

**A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MARMORARIA
NA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

ELIAS BRITO OLIVEIRA

LUIZA ORTOLAN LIBARDI

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

**A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
MARMORARIA NA DURABILIDADE DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**

ELIAS BRITO OLIVEIRA
LUISA ORTOLAN LIBARDI

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: {07/2019}

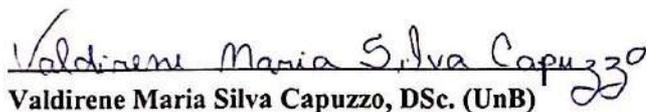
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

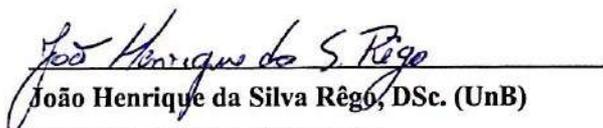
**A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
MARMORARIA NA DURABILIDADE DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**

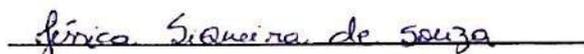
**ELIAS BRITO OLIVEIRA
LUIA ORTOLAN LIBARDI**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:


Valdirene Maria Silva Capuzzo, DSc. (UnB)
(ORIENTADORA)


João Henrique da Silva Rêgo, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)


Jéssica Siqueira de Souza, MSc. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 05 de JULHO de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, ELIAS BRITO

LIBARDI, LUISA ORTOLAN

A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MARMORARIA NA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL [Distrito Federal] 2019.x, 76 p. (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Concreto Autoadensável | 2. Fíler |
| 3. Resíduo de Marmoraria | 4. Durabilidade |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, E. B.; LIBARDI, L.O. (2019). A influência da utilização do resíduo de marmoraria na durabilidade do concreto autoadensável, Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Elias Brito Oliveira e Luisa Ortolan Libardi.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: A influência da utilização do resíduo de marmoraria na durabilidade do concreto autoadensável.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

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

Elias Brito Oliveira

SHIGS 706 bloco D casa 36

70350-754 – Brasília/DF – Brasil

Luisa Ortolan Libardi

SQSW 304 BLOCO I AP 301

70673-409 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por nos capacitar, fortalecer e ter dado perseverança para cada passo dessa longa jornada. E por todas outras bênçãos que Ele provê.

Também agradeço toda minha família, por sempre me apoiar e ajudar ao longo de todo curso e em cada etapa da vida. Amo vocês.

Agradeço a todos os amigos e colegas que conheci e convivi aqui na UnB, e que me fizeram ver e admirar tantas facetas diversas da vida. Por todo crescimento e aprendizado mútuo.

Aliás, agradeço a todos, que às vezes em pequenos pedaços, às vezes em pedaços tão grandes, constroem para mim o grande mosaico da vida.

Também por nossa orientadora, prof. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo, que tão pacientemente e dedicadamente nos auxiliou ao longo de toda essa pesquisa.

E aos professores João Henrique da Silva Rêgo e Jéssica Siqueira de Souza, que aceitaram compor nossa banca, e por todas suas sugestões. Além de todos outros professores dessa universidade que se dedicam a esse enorme desafio de capacitar e formar engenheiros.

Por fim, queria agradecer ao PECC e ao LEM por nos proporcionar todo o espaço e recursos para realização da nossa pesquisa e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAP-DF (Processo 0193.001700/2017), pelo suporte na realização deste estudo; e à marmoraria Veloso Stones, pela doação do resíduo utilizado. E também às pessoas que nos ajudaram e tantos experimentos e concretagens: Patrícia, Ana Luiza, Mara, Arthur e nosso querido Severo.

Muito obrigado pelo apoio de todos vocês!

Elias Brito Oliveira

AGRADECIMENTOS

Ao Bom Deus, única verdadeira necessidade de minha vida, e única fonte de tudo o que tenho. À Santíssima e Imaculada Virgem Maria, de cujas mãos liberais tenho recebido muito mais do que mereço, e pelas quais minhas pobres ofertas chegam ao Céu. Ao doce protetor e anjo de minha guarda e a todos os habitantes da milícia celeste, cujo alcance da intercessão pouco conheço.

À minha família, que sempre me incentivou de forma singela a tentar dar o melhor de mim a tudo que me exige dedicação. Em especial minha irmã e engenheira Priscila, de quem sinto a falta todos os dias.

A meu diretor espiritual, padre Luiz Fernando Pasquotto, sempre tão disponível, paciente e bem-humorado ao me escutar, aconselhar e oferecer incessantemente sacrifícios e orações por mim – sou grata por tê-lo como Bom Pastor.

Aos poucos que posso chamar de verdadeiros amigos, do sentido profundo e sobrenatural da amizade, que consiste na partilha de virtudes, de combates, de cruzes e de algumas conquistas - a conclusão deste trabalho devo a vocês, que sabem quem são. Obrigada pela leveza, pela honestidade e pela coragem que estimulam em mim.

À nossa orientadora, prof. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo, pela disponibilidade e tranquilidade em conduzir esse projeto e nos conduzir para as melhores decisões diante de todas as eventualidades. Aos professores João Henrique da Silva Rêgo e Jéssica Siqueira de Souza que aceitaram gentilmente compor a banca de avaliação. Aos outros mestres com os quais tive a alegria de aprender na UnB e na vida, e aos colegas de universidade, que tornam as aventuras da engenharia mais leves e cômicas.

Aos engenheiros da Polícia Federal e do Ministério Público que foram providencialmente escolhidos para meus supervisores de estágios, com os quais pude aprender na prática um pouco da ciência ainda tão abstrata que estudei na faculdade, mas que terminaram por me ensinar muito mais que engenharia. Agradeço pelo exemplo de profissionais que são, e pela partilha de conhecimentos, de experiências e de conselhos, que acabaram desenvolvendo em mim esse carinho pela nossa profissão.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM-UnB), que possibilitou a realização dos procedimentos experimentais deste estudo em particular.

À equipe do PECC e do LEM que muito pacientemente ajudou de todas as maneiras na realização deste projeto: Ana Luiza, Arthur, Mara, Patrícia, Severo, e tantos outros que se fizeram presentes desde o transporte dos materiais pesados, passando pela solução de dúvidas quanto aos procedimentos de ensaio, até as brincadeiras, conselhos, encorajamento e mesmo a simples companhia em cada obstáculo. O apoio de vocês foi valioso e indispensável nesses últimos semestres.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAP-DF (Processo 0193.001700/2017), pelo apoio na realização deste estudo; e à marmoraria Veloso Stones, pela doação do resíduo utilizado.

Luisa Ortolan Libardi

RESUMO

O Concreto Autoadensável (CAA) tem como foco principal a trabalhabilidade da mistura, visto que é capaz de espalhar-se pelo espaço da fôrma sem necessidade de adensamento externo, mas ainda com boa compactação. Para ser autoadensável, o concreto precisa garantir fluidez, habilidade de passar por obstáculos e resistência à segregação. Para isso, a dosagem do concreto autoadensável inclui, além dos componentes do Concreto Convencional (CCV), aditivos superplastificantes e, principalmente, maior proporção de materiais finos, que asseguram o preenchimento dos vazios e o bom empacotamento das partículas. O Resíduo de Marmoraria (RM) é uma adição mineral do tipo fíler, fina e inerte, que desempenha bem essas funções; esse material é produzido em larga escala em todo o Brasil e frequentemente é descartado sem tratamento prévio, provocando graves problemas ambientais; em contrapartida, tem sido estudado em misturas de concreto para aplicação estrutural. A presente pesquisa teve como intuito avaliar a influência do resíduo de marmoraria pela substituição do cimento por esse resíduo, nas proporções de 5%, 15% e 25%, especialmente no que diz respeito à durabilidade do concreto, mas sem deixar de contemplar também suas propriedades mecânicas e suas propriedades no estado fresco. Para isso, foram realizados, em cada traço de concreto produzido, ensaios de caracterização dos materiais componentes do concreto; ensaios para o CAA em seu estado fresco; ensaios quanto às propriedades mecânicas; e ensaios de avaliação da durabilidade. Os resultados foram comparados entre si e com um CAA de referência sem adição de RM. Mantidas as características de autoadensabilidade, os valores assumidos tanto pelas propriedades mecânicas quanto pelas de durabilidade demonstraram a possibilidade do RM ser aplicado de maneira vantajosa por diminuir o consumo de cimento, sobretudo no teor de 5% de substituição.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, resíduo de marmoraria, fíler, durabilidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância do Tema.....	2
1.2. Objetivos Gerais	3
1.3. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Concreto Autoadensável.....	4
2.1.1. Definição e histórico	4
2.1.2. Materiais.....	5
2.2. Resíduo de Marmoraria (RM)	10
2.3. Propriedades do CAA no Estado Fresco	12
2.4. Propriedades do CAA no estado endurecido.....	13
2.5. Durabilidade	15
2.5.1. Causas de deterioração	15
2.5.2. Aspectos influenciadores da durabilidade.....	16
3. METODOLOGIA	19
3.1. Organograma e Sequência Experimental	20
3.2. Caracterização dos Materiais Utilizados	20
3.2.1. Cimento Portland.....	21
3.2.2. Resíduo de Marmoraria.....	21
3.2.3. Agregado Graúdo	22
3.2.4. Agregado Miúdo	22
3.2.5. Aditivo Químico.....	23
3.2.6. Água de Amassamento.....	23
3.3. Estudo de Dosagem	23
3.3.1. Método de Dosagem.....	23
3.4. Ensaio do CAA no Estado Fresco.....	26
3.4.1. Ensaio de Espalhamento e Índice de Estabilidade Visual.....	27
3.4.2. Caixa L	27
3.4.3. Funil V.....	28
3.4.4. Massa Específica.....	28
3.4.5. Ensaio sobre Propriedades Mecânicas do CAA	28
3.5. Ensaio sobre Propriedades de Durabilidade do CAA	28

3.5.1.	Ensaio de Absorção de água por Imersão	29
3.5.2.	Ensaio de Absorção de água por Capilaridade.....	30
3.5.3.	Ensaio de Resistividade	31
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1.	Caracterização dos Materiais.....	36
4.1.1.	Cimento Portland.....	36
4.1.2.	Resíduo de Marmoraria (RM)	37
4.1.3.	Agregado Graúdo	40
4.1.4.	Agregado Miúdo	41
4.2.	Propriedades do Concreto no Estado Fresco	43
4.2.1.	Análise dos traços adotados	43
4.2.2.	Ensaio no estado fresco	47
4.3.	Propriedades Mecânicas do Concreto no Estado Endurecido	53
4.3.1.	Compressão Axial Simples	53
4.3.2.	Tração por Compressão Diametral.....	55
4.3.3.	Análises	55
4.4.	Propriedades de Durabilidade do Concreto	59
4.4.1.	Absorção de Água por Imersão	59
4.4.2.	Absorção de Água por Capilaridade	62
4.4.3.	Resistividade Elétrica	64
5.	CONCLUSÕES	67
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuições granulométricas de partículas.....	7
Figura 2.2 Etapas do processo de produção das rochas ornamentais (DIETRICH, 2015).	11
Figura 2.3 (a): Resíduo após a pré-secagem (BARROS, 2008) e (b) Lagoa em sua fase madura para coleta do resíduo (CAVALCANTI, 2006).	11
Figura 3.1: Organograma do programa experimental.	19
Figura 3.2: Metodologia de dosagem do concreto autoadensável.	24
Figura 3.3: Aspecto do traço de referência de Concreto Autoadensável (Fonte: acervo pessoal).	26
Figura 3.4: Ensaio de Caixa L em execução (Fonte: acervo pessoal).	27
Figura 4.1: Difratoograma do Cimento Portland CP V.....	37
Figura 4.2: Difratoograma obtido por DRX do Resíduo de Marmoraria.....	39
Figura 4.3: Curva granulométrica do Resíduo de Marmoraria.	39
Figura 4.4: Curva granulométrica do Agregado Graúdo.....	40
Figura 4.5: Curva Granulométrica da Areia com módulo de finura 1,95%.	42
Figura 4.6: Curva Granulométrica da Areia de módulo de finura 3,15%.	43
Figura 4.7: Consumo de cimento em kg/m ³	45
Figura 4.8: Proporção de água utilizada em relação aos finos e cimento.	45
Figura 4.9: Quantidade de superplastificante em função do cimento e finos.	46
Figura 4.10: Massa de agregado em relação ao total.	47
Figura 4.11: Proporção em massa entre os agregados.	47
Figura 4.12: Coeficiente de caixa L do concreto fluido.....	47
Figura 4.13: Espalhamento do concreto fluido	48
Figura 4.14: Tempo t500 (s) para cada traço.	49
Figura 4.15: Vista superior dos ensaios de estabilidade visual.....	50
Figura 4.16: Vista lateral dos ensaios de estabilidade visual.....	51
Figura 4.17: Tempo de escoamento no funil V do concreto fluido.....	52
Figura 4.18: Massa específica do concreto no estado fresco.	53
Figura 4.19: Resistência à compressão aos 7 dias de idade.	54
Figura 4.20: Resistência à compressão aos 14 dias de idade.	54
Figura 4.21: Resistência à compressão aos 28 dias de idade.	55
Figura 4.22: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.	55
Figura 4.23: Diferença proporcional entre as resistências do traço REF e RM 25%.....	56
Figura 4.24: Diferença proporcional entre as resistências do traço REF e RM 15%.....	57
Figura 4.25: Diferencial percentual proporcional entre as resistências dos traços REF e RM 5%.....	58
Figura 4.26: Evolução das resistências à compressão dos corpos de prova.....	58
Figura 4.27: Relação da absorção de água por imersão e do índice de vazios.....	60
Figura 4.28: Absorção de água por capilaridade em função do tempo.	62
Figura 4.29: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.	64
Figura 4.30: Resultados do ensaio de Resistividade Elétrica.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Relação das variáveis dependentes e independentes.....	20
Tabela 3.2: Metodologias de ensaio na caracterização do material cimentício.	21
Tabela 3.3: Metodologia de ensaio para caracterização do RM.	22
Tabela 3.4: Metodologia de ensaio para caracterização do agregado graúdo.....	22
Tabela 3.5: Metodologia de ensaio para caracterização física do agregado miúdo.	23
Tabela 3.6 Requisitos mínimos adotados para dosagem do concreto.	25
Tabela 3.7: Valores de referência para dosagem.....	25
Tabela 3.8: Ensaio e normas sobre análise das propriedades mecânicas.	28
Tabela 3.9: Ensaio sobre propriedades de durabilidade do CAA.....	29
Tabela 3.10: Coeficiente A/L para cálculo de resistividade elétrica volumétrica.....	35
Tabela 3.11: Classificação do concreto quanto ao risco de corrosão conforme a resistividade elétrica (Fonte: Ribeiro et al, 2014).	35
Tabela 3.12: Classificação do concreto quanto à permeabilidade de íons cloreto conforme a resistividade elétrica volumétrica (Fonte: AASHTO TP 119-2015).....	35
Tabela 4.1: Caracterização do Cimento Portland CP V - ARI.....	36
Tabela 4.2: Caracterização do Resíduo de Marmoraria (RM).	38
Tabela 4.3: Caracterização do agregado graúdo.	40
Tabela 4.4: Caracterização da areia fina.	41
Tabela 4.5: Caracterização da areia média.	42
Tabela 4.6: Relação do traço em massa para cada concretagem.....	44
Tabela 4.7: Proporção em massa de cada um dos traços.	44
Tabela 4.8: Índice de estabilidade visual de cada traço.	51
Tabela 4.9: Análises do ensaio de absorção de água por imersão.....	59
Tabela 4.10: Classificação de um concreto conforme o índice de vazios e a absorção de água por imersão.....	61
Tabela 4.11: Resultados e classificações de cada traço de concreto produzido quanto à resistividade elétrica.....	66

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland se tornou o material mais largamente utilizado na construção civil, e é atualmente consumido de tal forma que o único recurso que um ser humano usufrui em maior quantidade é a água. Apesar disso, o concomitante avanço das técnicas construtivas e o crescimento do mercado passaram a exigir concretos com características específicas, como o desempenho mecânico, a durabilidade, a trabalhabilidade, dentre várias outras (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O Concreto Autoadensável (CAA) surge nesse contexto, na década de 1980, para suprir a carência de operários qualificados para uma eficiente compactação do concreto no Japão. Esse concreto expelle o ar aprisionado sem vibração externa e flui naturalmente por entre os obstáculos para preencher a fôrma. Isso resolve as dificuldades de adensamento, reduz os ruídos no canteiro de obras e previne danos à saúde dos operários (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Esse concreto tem como principal diferencial o seu estado fresco, que deve apresentar as características da fluidez, da habilidade de passar entre armaduras de pequeno espaçamento e da resistência à segregação. Todas essas condições devem ser satisfeitas a fim de obter um concreto com elevada trabalhabilidade, contudo, sem prejudicar a durabilidade da peça (EFNARC, 2002).

O CAA, quando bem aplicado, proporciona benefícios tecnológicos e econômicos para o usuário final. Especificamente, pode-se listar algumas vantagens, elencadas pelo ACI (2007):

- Redução de trabalho (economia de mão-de-obra) e equipamentos (compra e manutenção) com propriedades mecânicas desejadas;
- Aceleração do cronograma da obra;
- Simplificação do preenchimento das fôrmas mesmo nos cantos menos alcançáveis;
- Redução do barulho no canteiro de obras, especialmente crítico em áreas urbanas nos períodos de descanso, reduzindo também eventuais multas e remunerações;
- Manutenção da saúde dos trabalhadores, por meio de um ambiente mais seguro e menos tenso;
- Maior flexibilidade no detalhamento das armaduras, permitindo o uso de armaduras pouco espaçadas;
- Criação de superfícies livres de ninhos de concretagem e sinais de exsudação ou descoloração, importantes para acabamentos superficiais em indústrias de pré-moldados.

Mesmo com esses e outros benefícios, o CAA não foi popularmente aceito no Brasil e até hoje não é comumente adotado. Concomitantemente, várias estruturas feitas com Concreto Convencional (CCV) mostram problemas estéticos, mecânicos e principalmente de durabilidade, muitas vezes relacionados a um adensamento inadequado.

No entanto, Celik *et al.* (2015) afirmam que o CAA tem sido utilizado de modo crescente na indústria da construção civil em razão das suas diversas propriedades e aplicações vantajosas quando comparado ao concreto convencional.

1.1. Importância do Tema

As razões da baixa aceitação do CAA no Brasil e no mundo, no início de sua popularização, foram principalmente os elevados custos de alguns materiais que são usados em maior proporção na sua mistura, além da falta de conhecimento sobre a dosagem, produção e controle tecnológico do CAA por parte dos profissionais (GEYER e SÁ, 2005). As pesquisas e experimentos envolvendo esse concreto foram parte dos esforços necessários para desmistificar os enganos propagados acerca de sua utilização e, em contrapartida, demonstrar as vantagens econômicas e de qualidade do produto.

A fim de proporcionar a estabilidade contra a segregação e o aumento da fluidez, o CAA exige uma mistura com viscosidade moderada (EFNARC, 2005). Para isso, utiliza-se agregados com granulometria controlada, aditivos redutores de água como superplastificantes e modificadores de viscosidade, além de materiais finos que confirmam trabalhabilidade e estabilidade à mistura (MIRANDA, 2018).

Os materiais finos no CAA consistem no cimento Portland e nas adições minerais. Uma mistura muito rica em cimento pode ter consequências indesejáveis como o elevado calor de hidratação e a retração térmica que aumenta o risco de fissuração. Assim, as adições minerais comuns no CAA são as pozolanas e os fílers com diâmetros menores que 0,125 mm segundo a EFNARC (2002).

Além de colaborar para as propriedades do concreto, as adições minerais conferem a sustentabilidade ecológica da tecnologia do CAA, uma vez que são, em sua maioria, compostas de resíduos industriais normalmente descartados no ambiente. Reciclar e utilizar os resíduos para produzir CAA pode ser a melhor opção para sustentar a futura economia da construção civil (HAMEED *et al.*, 2012).

É o caso do Resíduo de Marmoraria (RM), resultante do corte e beneficiamento do mármore e do granito. Segundo Montani (2017), a quantidade extraída das pedreiras do Brasil em 2016 atingiu cerca de 8,5 milhões de toneladas, o que significa cerca de seis por cento do volume mundial; por consequência, o volume de resíduo descartado por essa indústria também assume elevados valores.

Demirel (2010) afirma que o resíduo de marmoraria pode ser aplicado como adição mineral fina para a produção de concretos autoadensáveis. Dessa maneira, seria possível consumir esse resíduo, produto secundário da indústria e que seria prejudicial ao meio ambiente, na produção, desenvolvimento e expansão do uso do concreto autoadensável no Brasil e no mundo.

Segundo Miranda (2018), o alto teor de finos confere ao CAA uma microestrutura mais refinada do que o CCV com mesma relação água/cimento (a/c), o que afeta positivamente o desempenho do CAA contra agentes deletérios. Esse fato demonstra a necessidade de avaliar os parâmetros relativos à durabilidade desse concreto quando produzido com adições minerais finas alternativas, como é o RM.

1.2. Objetivos Gerais

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas e alguns critérios de durabilidade do concreto autoadensável com adição de resíduo de marmoraria em diferentes proporções de substituição ao cimento Portland, em comparação com um traço de CAA sem a adição do resíduo.

1.3. Objetivos Específicos

- Produzir o concreto autoadensável com diferentes teores de Resíduo de Marmoraria (RM) em substituição ao cimento Portland, de forma a reduzir o consumo de cimento do concreto.
- Analisar as propriedades do CAA no seu estado fresco, garantidas as condições de autoadensabilidade, em função do teor de RM.
- Analisar as propriedades mecânicas do CAA no seu estado endurecido, em função do teor de RM.
- Avaliar critérios de durabilidade do CAA produzido com diferentes proporções do RM para emprego desse concreto com função estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns atributos são importantes na avaliação de um documento científico. Deve-se avaliar características como precisão, robustez, validade, funcionalidade, tempo e custos. Vários métodos têm sido desenvolvidos para gerar resultados credíveis de pesquisas em meio à quantidade sempre crescente de informações. Com base nisso, a presente pesquisa utilizou o modelo unificado de Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC), que, por adotar múltiplas bases de dados (*Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*), permite contatos com vários autores e emprega tecnologias acessíveis para análise e filtro dos dados, garantindo as informações necessárias aos pesquisadores (MARIANO e SANTOS, 2017).

2.1. Concreto Autoadensável

2.1.1. Definição e histórico

O Concreto Autoadensável (CAA), como é conhecido atualmente, foi desenvolvido no Japão em consequência da redução na quantidade de trabalhadores especializados na indústria da construção para a correta compactação do concreto fluido. A carência desses operários gerou o crescimento de problemas de qualidade das estruturas de concreto, em especial no que diz respeito à durabilidade (OKAMURA e OUCHI, 2003). Fez-se necessário um concreto com a capacidade de auto compactar-se por todos os cantos da fôrma e por entre as armaduras, unicamente pelo próprio peso da mistura e sem a necessidade de adensamento mecânico por vibração ou qualquer outra energia externa (OKAMURA, 1997 *apud* GOMES e BARROS, 2009).

Os estudos relativos a esse concreto começaram a ser desenvolvidos e a sua aplicação na construção civil alcançou maior escala a partir do final da década de 1990, principalmente em obras com grandes volumes de concreto a fim de dispensar o adensamento mecânico, o que permite maior rapidez na execução mantendo-se uma boa qualidade da estrutura final. No Brasil, o CAA não obteve imediato sucesso devido, entre outros fatores, aos custos relativos a alguns de seus componentes, principalmente os aditivos químicos (GEYER e SÁ, 2005). No entanto, a gradual redução desses custos, aliada ao desenvolvimento das pesquisas e à própria experiência nesse assunto, tem mostrado as vantagens desse concreto em comparação ao concreto convencional (CCV), até mesmo no investimento final da obra, quando se considera todos os fatores (CELIK *et al.*, 2015).

Além disso, alguns profissionais justificam a escolha do CCV em detrimento do CAA com o argumento de que algumas propriedades do estado endurecido do concreto, como o módulo de elasticidade, podem apresentar-se de forma prejudicial ao desempenho da estrutura. No entanto, segundo Tutikian (2004), as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto se expressam unicamente de acordo com os seus materiais constituintes e as respectivas proporções.

Algumas soluções têm sido desenvolvidas e podem estimular o emprego do concreto autoadensável. A fim de garantir as características de autoadensabilidade do concreto, é necessária uma grande proporção de materiais finos, em geral o cimento Portland. Substituindo-se parte desse aglomerante por adições minerais com semelhantes granulometrias, é possível reduzir o consumo do material cimentício e conseqüentemente o custo final do concreto; outros benefícios são também alcançados, como a redução do calor de hidratação dos compostos do cimento Portland (MIRANDA, 2018).

2.1.2. Materiais

Os materiais que constituem o concreto autoadensável são basicamente os mesmos que constituem o concreto convencional: o cimento, o agregado miúdo, o agregado graúdo, a água e eventuais adições minerais e aditivos químicos. A diferença encontra-se nas proporções, visto que o CAA exige uma maior quantidade de materiais finos, que podem ser adições minerais ou fílers, além de aditivos químicos superplastificantes e, por vezes, modificadores de viscosidade. Os tipos de cimentos e agregados também devem ser escolhidos cuidadosamente, tendo em vista a maior sensibilidade desse concreto em seu estado fresco às variações dos materiais (SADEK *et al*, 2016).

2.1.2.1. Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, ou seja, reage quimicamente com a água e endurece por essas reações; uma vez endurecido, não sofre alterações químicas quando exposto ao contato com a água. O cimento Portland é produzido pela junção de calcário, materiais silicosos, alumina e óxido de ferro (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Todos os tipos de cimento Portland podem ser usados para a produção do concreto autoadensável, a depender da aplicação posterior. No entanto, deve-se atentar para as propriedades do concreto que garantem a adensabilidade. Cimentos com teores de aluminato

tricálcico (C_3A) acima de 10% podem causar problemas de trabalhabilidade no concreto, característica essencial nesse tipo de material (EFNARC, 2002).

Cimentos com maior superfície específica também são mais apropriados para o CAA, uma vez que elevam a viscosidade da mistura por meio da redução das tensões de escoamento consequente da colisão frequente entre as partículas de cimento e a água, gerados pela maior área de contato entre esses reagentes. A demanda por finos, contudo, deve ser acompanhada de cuidados com o calor de hidratação e a retração do concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.1.2.2. Agregados

As características do CAA exigem que as proporções dos constituintes sejam tais que o volume de pasta e de materiais finos seja elevado e o volume e a dimensão dos agregados sejam reduzidos, de forma a garantir a habilidade passante do concreto (BARROS, 2008).

Os tipos de agregados graúdos são os mesmos utilizados no CCV. A EFNARC (2002) estabelece uma dimensão máxima dos agregados entre 16 e 20 mm. O formato do agregado também influencia na trabalhabilidade, e segundo o ACI (2007), os formatos mais arredondados são recomendados para o CAA, uma vez que implementam a habilidade de preenchimento, apesar de que os agregados angulares apresentam melhor aderência com a pasta.

Os materiais que compõem os agregados miúdos e graúdos devem ser bem graduados, ou seja, apresentar partículas com diâmetros continuamente crescentes, como ilustrado na Figura 2.1. Essa característica dos agregados garante que os vazios deixados entre partículas de mesma dimensão sejam preenchidos pelas partículas de dimensão imediatamente inferior. O preenchimento dos vazios é importante para aspectos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade do concreto (NEVILLE, 2013).

As partículas cujos diâmetros forem menores que 0,125 mm devem ser consideradas como materiais finos (pó), que contribuem para a viscosidade e a coesão do CAA (GOMES e BARROS, 2009). Segundo os mesmos autores, o volume do agregado miúdo na mistura deve estar entre 40% a 50% do volume total de argamassa.

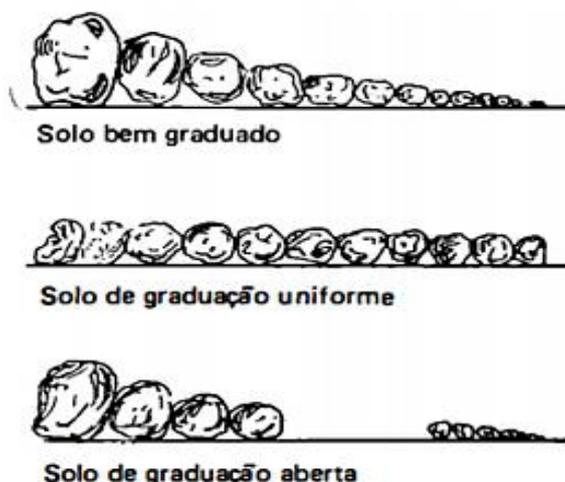


Figura 2.1: Distribuições granulométricas de partículas.

2.1.2.3. Água

A água de mistura do concreto autoadensável, assim como do concreto convencional, é medida pela relação água/cimento (a/c). Quanto ao estado fresco, Gomes e Barros (2009) observaram que, quanto maior essa relação, menor é a viscosidade plástica e a resistência de fluxo da mistura.

Segundo a lei de Abrahms, uma elevada relação a/c na dosagem dos componentes do concreto é associada a uma menor resistência à compressão do concreto endurecido (NEVILLE e BROOKS, 2013). Assim, para conseguir uma maior fluidez do concreto, a solução encontrada é o uso de aditivos químicos superplastificantes.

2.1.2.4. Aditivos Químicos

Segundo a NBR 11768/2011, aditivos são produtos químicos adicionados ao concreto durante sua preparação, a fim de modificar alguma de suas propriedades do estado fresco e/ou endurecido, de forma que a sua quantidade não ultrapasse 5% da massa de material cimentício.

Essas modificações muitas vezes permitem a utilização do concreto em ocasiões normalmente consideradas difíceis para a mistura, lançamento, adensamento e acabamento (NEVILLE, 2015). É o caso do concreto autoadensável, que utiliza o aditivo superplastificante para adquirir fluidez e, por vezes, o aditivo modificador de viscosidade para aumentar a coesão.

❖ Aditivo Superplastificante

Os superplastificantes são aditivos essenciais ao CAA, visto que lhe proporcionam a sua característica principal, que é a trabalhabilidade do estado fresco, sem a necessidade de se

aumentar o consumo de água (EFNARC, 2002). A NBR 11768/2011 divide os aditivos superplastificantes em: tipo I, que reduz no mínimo 12% da quantidade de água de amassamento; e tipo II, que reduz no mínimo 20% desse volume. Para a dosagem de concretos com abatimento maior que 220 mm, como é o caso do CAA, a mesma norma recomenda a utilização do segundo tipo.

Os compostos básicos dos superplastificantes podem ser lignossulfonatos, naftalenos, melaminas ou policarboxilatos, sendo que os policarboxilatos são os mais recomendáveis para o CAA por terem cadeia ramificada, o que permite alta eficiência em desassociar as partículas de cimento, reduzindo a quantidade de água em até 40% (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A incorporação dos aditivos superplastificantes nas misturas afetam características relativas à taxa de hidratação, porosidade e distribuição dos poros, desenvolvimento de resistência, fluidez e taxa de perda de fluidez, tempo de pega, retração, segregação e exsudação, dentre outras. Esses efeitos exigem cuidados, estudos e experimentos prévios com os aditivos antes de sua aplicação no concreto. (RONCERO, 2000 *apud* BARROS, 2008).

❖ Aditivo Modificador de Viscosidade

Os aditivos modificadores de viscosidade (do inglês, VMA) no concreto autoadensável têm como função a coesão da mistura, impedindo-a de segregar-se. Essa propriedade é normalmente adquirida com o teor de materiais finos do concreto; contudo, os finos em excesso exigem também maior consumo de água e podem prejudicar a uniformidade da mistura, o que é indesejável. Os aditivos VMA aparecem como complemento dos finos, ou mesmo substituição de parte deles (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016).

No contexto do CAA, os VMA mais utilizados são compostos à base de polissacarídeos naturais solúveis em água, que absorvem a água livre no sistema aquoso da pasta de cimento. Esse processo aumenta a viscosidade da pasta, diminui a exsudação e reduz a sedimentação de partículas sólidas (GOMES e BARROS, 2009). Outros tipos desses aditivos diminuem a viscosidade pela adsorção dos finos da mistura, o que não é de interesse para o concreto em estudo.

Barros (2008) elenca alguns aspectos que podem constituir desvantagens nos concretos com aditivos VMA, como por exemplo: alto conteúdo de cimento, tornando o aditivo insuficiente; altas temperaturas, que geram perda rápida do abatimento; grandes quantidades de areias muito

finas, que tornam a mistura pesada para o bombeamento coeso; compatibilidade com outros aditivos, que deve sempre ser estudada antes da aplicação.

2.1.2.5. Adições Mineraias

As adições mineraias nos concretos em geral ajudam a controlar o consumo de cimento a fim de reduzir, o calor de hidratação e a retração de origem térmica no material (EFNARC, 2005). Outros benefícios também são alcançados, apontados por Mehta e Malhotra (1996 *apud* GOMES e BARROS, 2009):

- Ambientais, porque várias das adições mineraias comuns são resíduos industriais reutilizados que seriam descartados no ambiente;
- Econômicos, porque substitui parte do cimento da mistura, que é o componente mais caro do concreto, tornando-o mais barato;
- Tecnológicos, porque estimulam no concreto propriedades do estado fresco (fluidez, resistência à segregação, etc.) e do estado endurecido (resistências, permeabilidade, etc.).

Segundo a EFNARC (2005), as adições mineraias podem ser separadas em dois grandes grupos, são eles:

- Quimicamente ativas, principalmente material pozolânico (cinza volante, metacaulim, sílica ativa, pozolana, entre outros exemplos), que reagem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento Portland produzindo o composto resistente C-S-H; ou material cimentante (escória granulada de alto forno, por exemplo), que já possui o Ca(OH)_2 na sua composição, hidratando-se sem necessidade de outros reagentes, mesmo que de forma lenta e insuficiente.
- Inertes, ou seja, sem atividade química, mas com ação física de compacidade da estrutura proporcionada pela sua finura que também favorece o processo de nucleação durante a hidratação do cimento; são os fillers calcários, areias finas, quartzos e alguns resíduos industriais como o Resíduo de Marmoraria (RM).

A dosagem do concreto autoadensável pode receber quaisquer desses tipos de adições. As adições quimicamente ativas têm melhor efeito sobre a durabilidade do concreto (GOMES e BARROS, 2009). Contudo, quanto mais finas forem as partículas das adições, melhores benefícios para a viscosidade e a coesão da mistura, visto que preenchem os poros e impedem o atrito entre as partículas de agregados (BARROS, 2008). Os finos da mistura se constituem

como pontos de nucleação, o que estimula e acelera o processo de hidratação do cimento por aumentarem a superfície de contato entre o grão de clínquer e o meio aquoso (NEVILLE, 2015).

A EFNARC (2002) sugere que o diâmetro médio dos finos compostos para o CAA deve ser menor que 0,125 mm. O mesmo documento recomenda que se mantenha a relação água/materiais finos entre 0,8 e 1,1.

2.2. Resíduo de Marmoraria (RM)

O resíduo de marmoraria consiste no resíduo gerado no processo de beneficiamento (corte, polimento e acabamento) de rochas ornamentais, que são, de forma geral, correspondentes aos mármore e granitos (NEGREDO, 2018).

Segundo Neves (2002 *apud* CAVALCANTI, 2006), as indústrias beneficiadoras de mármore e granito têm crescido economicamente no Brasil e no mundo, de forma representativa na produção mundial, com crescimento estimado de 6% ao ano na década de 1990. Uma grave consequência disso são os resíduos formados na forma de lama ou polpa abrasiva, constituída de água, granalha e cal moída, e proveniente dos processos de operação e manutenção dos aparelhos utilizados. Por sua vez, esse resíduo constitui fonte de grande preocupação quando se considera o descarte no ambiente, que em geral não é acompanhado de tratamento adequado.

No entanto, Sangalli *et al.* (2013) dizem que os resíduos de mármore e de granito são materiais descartados pela indústria que, contudo, podem ser aplicados na construção civil como substituição ou incorporação de outros constituintes, o que permite reduzir os impactos ambientais da produção dessas rochas dando-lhes uma nova utilidade.

O resíduo de marmoraria se classifica como uma adição mineral inerte, ou seja, sem atividade química, mas influi na compacidade do concreto devido à sua finura, em geral próxima ou ainda menor que a do próprio cimento Portland. Essa classificação é dada devido ao longo processo de formação das rochas ornamentais, responsável por sua estabilidade química em condições normais (CHINELATTO *et al.*, 2015; NEGREDO, 2018)

O processo de produção das rochas ornamentais engloba diversas fases, sumarizadas na Figura 2.2.

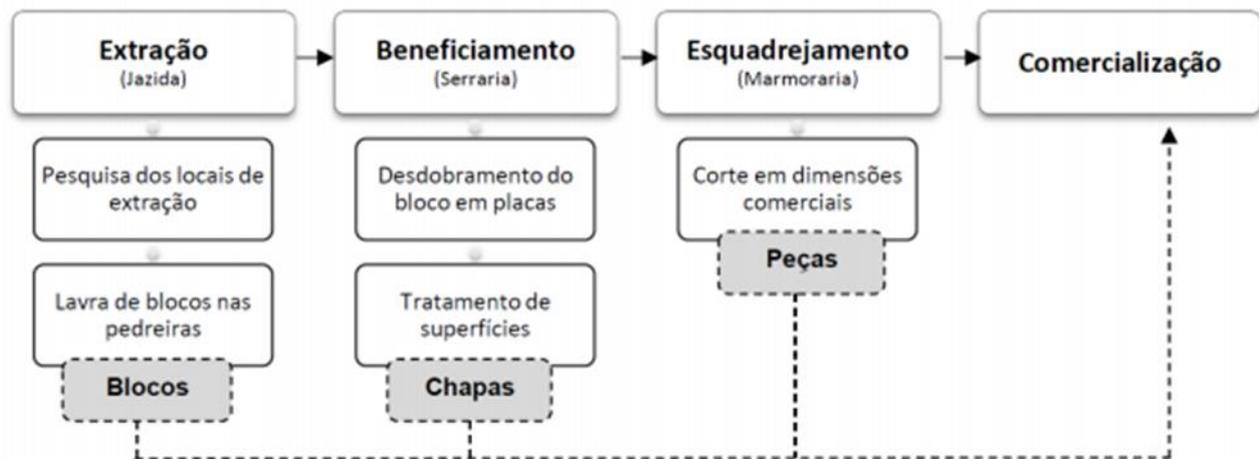


Figura 2.2 Etapas do processo de produção das rochas ornamentais (DIETRICH, 2015).

Na lavra de blocos, em que são cortados em tamanhos diversos com volumes padrão, há produção de resíduo em pó, que é sedimentado em lagoas no solo dando lugar à lama, posteriormente descartada em aterros sem reutilização. Os resultantes dos processos de beneficiamento têm o mesmo destino, sendo que o desdobramento de blocos gera a maior quantidade; enquanto a fase de esquadrejamento gera cacos de diferentes tamanhos que ocupam grande volume (NEGREDO, 2018). Os resíduos são ilustrados na Figura 2.3:



Figura 2.3 (a): Resíduo após a pré-secagem (BARROS, 2008) e (b) Lagoa em sua fase madura para coleta do resíduo (CAVALCANTI, 2006).

Sangalli *et al.* (2013) afirmam que a utilização do resíduo de marmoraria como adição mineral auxilia na busca de concretos de melhor desempenho tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido. O aumento da densidade do concreto e a minimização dos vazios é favorável à produção de um concreto autoadensável menos sujeito à ação de ataques externos.

2.3. Propriedades do CAA no Estado Fresco

A trabalhabilidade de um concreto deve ser tal que permita a adequada mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento, sem efeito de segregação (NEVILLE e BROOKS 2013). Influem na taxa de perda da trabalhabilidade fatores como a temperatura (deve ser controlada em regiões de climas quentes), o procedimento de mistura (dosagem e instante de aplicação), o tipo de cimento (finura dos grãos e teores dos compostos, em especial o C₃A), a consistência inicial do concreto (deve ser mais alta), a combinação com outros aditivos, entre outros (GOMES e BARROS, 2009).

A autoadensibilidade do concreto é definida em seu estado fresco, e exige a presença de três propriedades características: habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2002).

A Norma Brasileira NBR 15823-1:2017 estabelece os requisitos de classificação, controle e aceitação do concreto autoadensável no seu estado fresco, de acordo com a fluidez (pelo ensaio de espalhamento), a viscosidade (pelo tempo de escoamento e de espalhamento) e a habilidade passante (pelo ensaio de caixa L), assim como o chamado Índice de Estabilidade Visual.

A habilidade de preenchimento descreve a capacidade do CAA de fluir e preencher completamente os espaços dentro da fôrma, unicamente pelo seu próprio peso, sem que seu escoamento seja interferido, por exemplo, por cantos de formatos complexos; essa propriedade é definida pela fluidez e pela coesão do concreto (GOMES e BARROS, 2009).

A habilidade passante se refere à capacidade do concreto em passar por entre os obstáculos (armaduras, por exemplo) e espaços estreitos dentro das fôrmas, sem sofrer bloqueios. O bloqueio é uma condição que pode surgir da segregação local dos agregados nas vizinhanças dos obstáculos que deram origem ao travamento do fluxo; essa propriedade é controlada principalmente pela viscosidade da pasta de cimento (ACI, 2007), e é ilustrada na Figura 2.4.

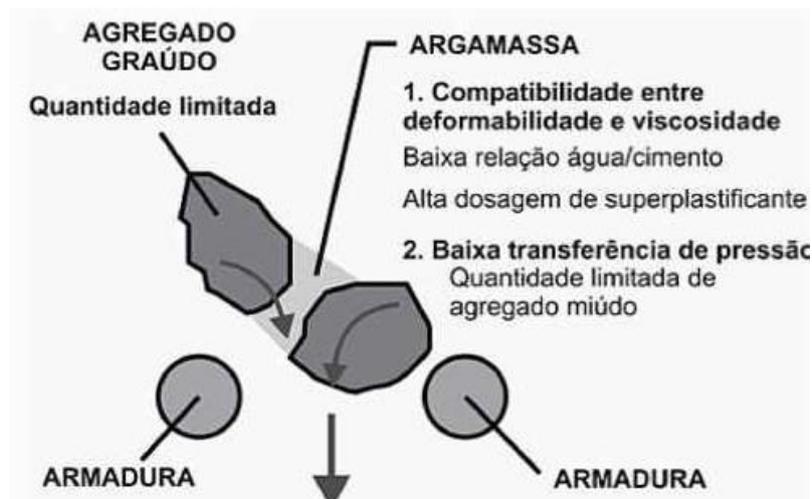


Figura 2.4: Mecanismo para habilidade passante. Fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, adaptado.

Já a resistência à segregação, também chamada de estabilidade, é a propriedade que descreve a capacidade do material de manter uma distribuição homogênea dos seus vários constituintes durante o seu escoamento, principalmente durante o transporte e o lançamento. A estabilidade pode ser do tipo dinâmica, que se refere à resistência do concreto à separação dos seus constituintes quando no lançamento dentro das fôrmas (deve ser observada em situações de obstáculos pouco espaçados); ou do tipo estática, referente à resistência do concreto à perda de água por exsudação. A viscosidade e a coesão da mistura quantificam essa propriedade (ACI, 2007).

A habilidade do concreto fresco, tanto autoadensável quanto convencional, de espalhar-se pelas fôrmas devidamente - sem a incorporação excessiva de bolhas de ar ou a acumulação de material em diferentes quantidades (ninhos de concretagem) – é um aspecto de extrema influência sobre as propriedades do mesmo concreto quando do seu estado endurecido. Por esse motivo, além dos cuidados na dosagem do CAA, a coesão da mistura desse tipo de concreto deve ser comprovada por ensaios antes de seu lançamento, uma vez que não se pode contar com o auxílio de quaisquer fontes externas para compactação do material (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.4. Propriedades do CAA no estado endurecido

As propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido, diferentemente do estado fresco, são apenas consequências das proporções de mistura dos materiais constituintes do concreto, os quais são os mesmos do concreto convencional. Uma ênfase especial é necessária, contudo, na estabilidade do CAA e o respectivo impacto nas propriedades mecânicas, além da durabilidade a longo prazo (ACI, 2007).

Durante a concretagem, o CCV depende de adensamento e compactação externos, feitos manualmente por operários, e, portanto, sujeito a erros. As falhas de concretagem elevam o número de vazios da mistura, uma vez que se acumulam vazios entre os agregados que não se espalharam. O aumento da porosidade, por sua vez, torna o concreto mais sujeito a ação de agentes agressivos (NEVILLE, 2015).

Já nos concretos devidamente adensados, os agregados são envolvidos pela pasta de cimento, de forma que a permeabilidade final é afetada apenas pela porosidade da própria pasta. Esse fato constitui uma vantagem de durabilidade pelo uso do CAA, uma vez que minimiza o risco de erros no adensamento, problema seriamente enfrentado em obras convencionais (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A fim de garantir a fluidez necessária para adensabilidade mantendo-se a coesão da mistura contra a segregação, pode ser necessário adotar uma relação água/cimento reduzida quando comparada às misturas de concreto convencional; além disso, a resistência do concreto pode ser tida como inversamente proporcional à relação água/cimento (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A menor porosidade do CAA também é responsável por uma microestrutura mais uniforme da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Todos esses fatores contribuem para que o CAA alcance maiores resistências do que um CCV equivalente (ACI, 2007).

O módulo de elasticidade de um material mede a rigidez de um material ou a resistência à deformação elástica, e é dado pela relação entre a tensão aplicada a ele e a deformação consequente dessa tensão (NEVILLE, 2013).

O principal responsável pelo módulo de elasticidade do concreto é o agregado graúdo. Visto que, na dosagem do CAA, é comum a utilização de elevados teores de cimento e areia (materiais finos, necessários para manter a fluidez), a consequência é que a quantidade de agregados graúdos é reduzida. Assim, o módulo de elasticidade tende a ser menor no CAA do que no CCV (GOMES e BARROS, 2009).

No entanto, como o CAA possui a microestrutura melhor compactada, ocorre concomitantemente um aumento na sua resistência mecânica; isso pode compensar a tendência de redução do módulo de elasticidade, dependendo do teor de pasta. (MIRANDA, 2018).

Os mesmos fatores afetam também a retração do concreto: a maior quantidade de pasta resulta em uma menor quantidade de agregados graúdos e uma menor relação água/cimento. A retração

por secagem, a retração autógena e a retração de origem térmica tendem, portanto, a aumentar no CAA com baixa relação a/c e elevado teor de pasta (ACI, 2007).

2.5. Durabilidade

A durabilidade do concreto é um foco de estudo essencial devido à intrínseca necessidade das estruturas de possuírem uma vida útil longa e servirem seus usuários adequadamente. O estudo experimental do CAA e das adições de RM, portanto, não ocorrer apenas em função do desempenho mecânico do concreto, mas também deve incluir perspectivas sobre o desempenho dos materiais à longo prazo.

A NBR 6118:2014 define durabilidade como “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 do projeto”. Em outras palavras, deve-se prever as influências ambientais (temperatura, umidade, vento, vibração, dentre outros) e fazer a estrutura de modo que ela possa resistir a todos esses efeitos durante sua vida útil. E isso irá depender das propriedades do concreto (e outros materiais) utilizados na construção.

Segundo Neville (2015), durante muito tempo associou-se que a durabilidade da estrutura seria uma mera função de sua resistência e que um concreto resistente automaticamente também seria um concreto durável, sendo no máximo feitas algumas considerações sobre gelo e degelo e ataques químicos. Contudo, atualmente tem-se a compreensão de que a durabilidade é uma característica tão importante como a resistência, e que, as estruturas tenham um bom desempenho, ambas devem ser estudadas e analisadas, não se pressupondo que boas propriedades mecânicas iniciais necessariamente resultarão em uma boa durabilidade, podendo ocorrer sua deterioração no longo prazo.

2.5.1. Causas de deterioração

A ocorrência de uma durabilidade inadequada se manifesta pela deterioração, que pode existir tanto por conta de fatores internos ou externos ao concreto. Em geral essas ações de deterioração podem ser divididas em três grandes grupos: ações físicas, químicas e mecânicas.

Os danos mecânicos são, principalmente causados por impacto, erosão, abrasão, cavitação e processos similares. Ou seja, são ações mecânicas do próprio ambiente externo, como golpes, o atrito com partículas (tanto em meio seco quanto líquido), ou mesmo a ação de microbolhas na água. Quando isso ocorre de forma repetitiva, o concreto irá se desgastar até o ponto que o concreto não consegue ter um desempenho satisfatório ao usuário.

Já os danos físicos são causados pela própria condição física do meio externo agindo sobre o concreto. Isso pode ser causado por exposições frequentes a temperaturas muito altas ou baixas (ou uma grande variação de temperatura), variações de umidade, a ação do fogo, gelo e degelo e processos similares, são diferentes fontes de desgaste para o concreto. Várias destas podem agir no sentido do aparecimento de fissuras e outros problemas que não permitem o concreto ter o mesmo desempenho que antes.

Por último, as deteriorações químicas são causadas mediante as reações químicas de álcali-agregado, álcali-carbonato, ataques de íons agressivos, ácidos, líquidos e gases. Em geral, se pode separar as deteriorações em três grupos: a hidrólise da pasta cimentícia, reações pela troca de cátions (íons positivos) e as reações de produtos expansivos.

É importante entender, que todas essas deteriorações acontecem de forma simultânea e sinérgica sobre o concreto. Mesmo que os eventos sejam descritos de forma separada eles frequentemente cooperam entre si na deterioração do concreto, sendo que os danos frequentemente possuem mais de uma causa.

2.5.2. Aspectos influenciadores da durabilidade

Apesar de terem sido listadas várias causas para deterioração do concreto, percebe-se que existe uma variável que é essencial no entendimento de quão intensa essa deterioração irá ocorrer. No caso, todas as deteriorações químicas (e várias dentre as físicas) só ocorrem mediante o transporte de um fluido através do concreto.

Sendo assim, com relação à durabilidade, a permeabilidade do concreto é a propriedade mais importante do concreto, já que controlando essa única propriedade é possível minimizar várias fontes simultâneas de deterioração.

2.5.2.1. Permeabilidade a Fluidos do Concreto e Movimentação de Agentes Agressivos

Segundo Neville (2015) os três fluidos mais relevantes a serem analisados para a durabilidade do concreto são a água (sendo ela pura ou carregando íons agressivos), dióxido de carbono e oxigênio. Contudo, tão importante quanto ter o entendimento dos agentes agressivos em si, é entender como estes conseguem adentrar no concreto e serem transportados por ele, causando assim a deterioração.

Esse mecanismo se dá justamente pelo sistema de poros do concreto. Dependendo das características do sistema de poros os agentes agressivos podem agir com muito mais facilidade

e intensidade e, no caso inverso, tais agentes terão muito mais dificuldade e o concreto será bem mais durável. Um ponto importante a ser destacado é que existe uma diferença muito significativa entre a porosidade e permeabilidade de um concreto.

Ainda segundo Neville (2015), a porosidade é a propriedade que analisa a proporção de volume dos poros em relação ao volume total do concreto. Contudo, o mero fato de que há um grande volume de poros não garante que ele será permeável. Um concreto que é altamente poroso, mas que os poros sejam descontínuos ou ineficazes no transporte dos fluidos possuirá uma baixa permeabilidade. Em outras palavras, além da porosidade em si, características do sistema de poros (como suas dimensões, forma, continuidade, tortuosidade, dentre outros) também possuem uma influência muito significativa, exigindo um estudo mais detalhado sobre esses fatores. Os poros mais significativos são necessariamente contínuos e com diâmetro mínimo de 120 nm ou 160 nm. Além disso, quanto maior a tortuosidade do sistema, menor será a permeabilidade e os poros nos agregados possuem pouca influência para a permeabilidade.

Também é importante ressaltar os fatores na execução do concreto que influenciam na sua permeabilidade. O primeiro a se destacar é a composição da pasta. Segundo Helene (1986) a relação água/cimento do concreto é um fator preponderante na permeabilidade aos gases, sendo assim, naturalmente muito influente em processos como a carbonatação (pela difusão do dióxido de carbono). Não obstante, o grau de hidratação da pasta também é um fator muito relevante já que o concreto sempre estará hidratando e lentamente preenchendo os poros com mais pasta, tornando mais difícil o transporte dos fluidos.

Contudo um dos principais fatores, que infelizmente é frequentemente ignorado na construção civil, é fazer uma cura devida. Isso se deve ao fato de que a hidratação do cimento só se dá de forma adequada em condições de saturação, e praticamente cessa quando a umidade relativa nos capilares cai abaixo de 80%, segundo Mehta e Monteiro (2008). A cura, ao impedir a saída de água para o ambiente, melhora significativamente o grau de hidratação do cimento e reduz o tamanho e conectividade dos poros.

2.5.2.2. Resistividade Elétrica

Outro ponto importante para a durabilidade das estruturas de concreto é a manutenção da qualidade das suas armaduras. Segundo Ribeiro (2014) a resistividade elétrica do concreto é essencial para tal durabilidade e que quanto menor ela fosse, mais facilmente ocorreria a corrosão das armaduras, sendo ela intimamente relacionada à umidade, a permeabilidade e as propriedades eletroquímicas do concreto.

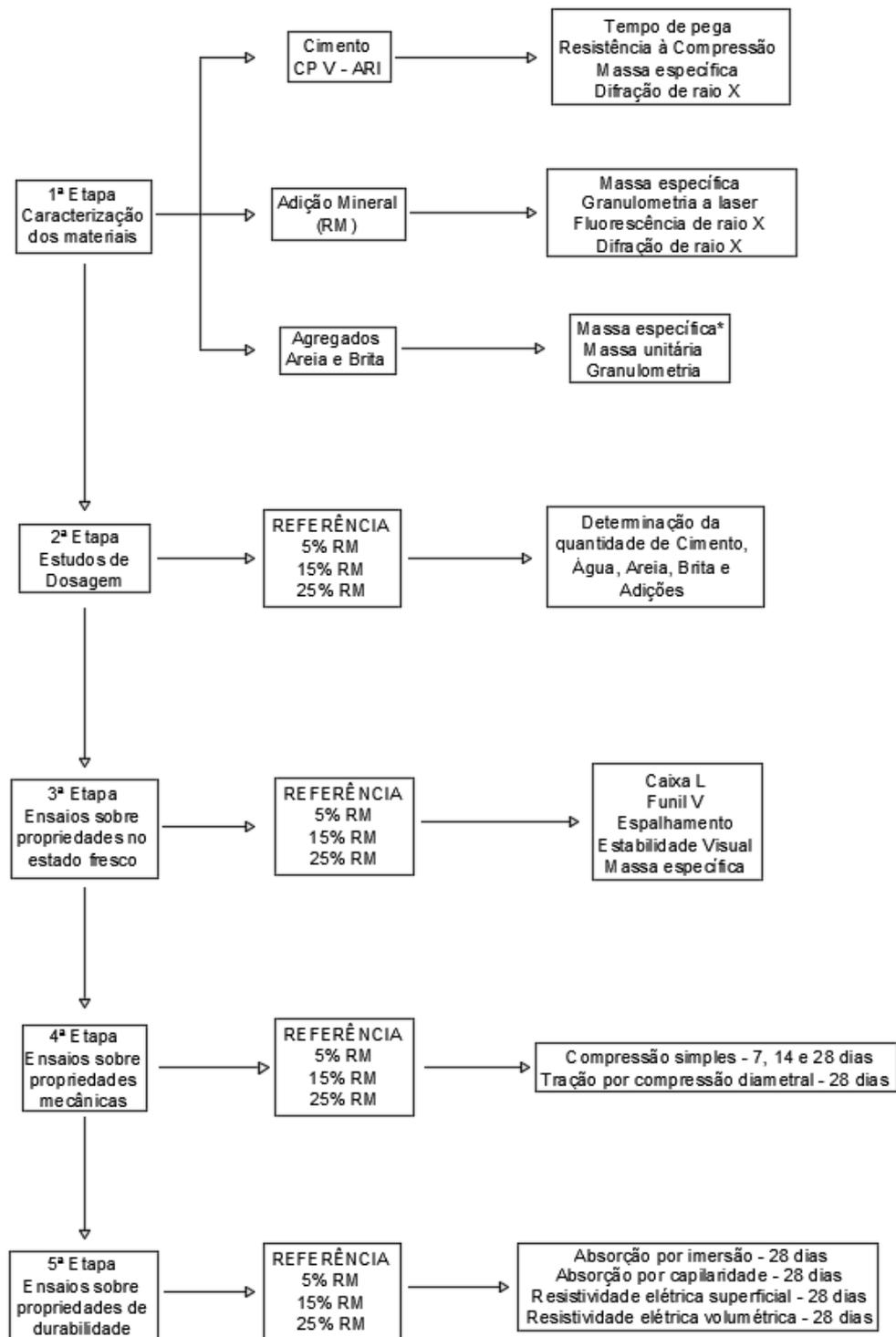
Em condições normais o concreto protege a armadura oferecendo alta resistência à passagem de corrente elétrica. Isso acontece, em grande medida, pelo efeito eletroquímico do concreto, que ocorre pela alcalinidade do eletrólito em seu interior (NEVILLE, 2013). Sendo assim, a corrente é controlada, não só pela resistência ôhmica, presente em qualquer material, mas principalmente pelo efeito de polarização.

Além disso, segundo Santos (2006) a resistividade elétrica do concreto estará fortemente correlacionada com o sistema de poros dentro dele, seus diâmetros e conectividade, que também está diretamente conectado com os principais mecanismos de transporte no concreto: permeabilidade, absorção capilar, difusão, e migração iônica. Segundo Shekarchi *et al.* (2004) o principal fluxo de corrente elétrica se daria justamente pelos íons presentes na água no sistema de poros interconectados da pasta. O que também condiz com as observações de que o concreto seco ao ar possui uma resistividade na ordem de $10^4 \Omega\text{m}$, enquanto o concreto seco em estufa apresenta a ordem de $10^9 \Omega\text{m}$ (NEVILLE, 2013).

Sendo assim, os ensaios realizados de análise de resistividade e de absorção de água estão conectados devida essa íntima correlação que ocorre entre o sistema de poros e a resistividade oferecida pelo concreto, em que quanto maior for a fração volumétrica dos poros e maior sua conectividade, menor será a resistividade do concreto e mais rapidamente a armadura poderá sofrer a corrosão (SANTOS, 2006).

3. METODOLOGIA

Esse capítulo descreverá como se deram os procedimentos do programa experimental, incluindo a metodologia, normas utilizadas e uma descrição sobre o porquê desses experimentos serem importantes para a pesquisa.



*Não foi realizado o ensaio de Massa específica para a Brita

Figura 3.1: Organograma do programa experimental.

3.1. Organograma e Sequência Experimental

O programa experimental se divide em cinco etapas distintas: a caracterização dos materiais, metodologia de dosagem, ensaios sobre as propriedades do concreto no estado fresco, ensaios sobre as propriedades mecânicas e, por fim, ensaios sobre propriedades de durabilidade. Cada uma dessas etapas é representada no organograma da Figura 3.1, que sumariza todo o programa experimental. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio e Materiais – LEM/UnB e na Central Analítica do Instituto de Química CAIQ/UnB.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as variáveis dependentes e independentes da pesquisa. Variáveis independentes (ou controláveis) são: a relação água/finos, o espalhamento do concreto e o teor da adição de RM. Já as variáveis dependentes, que variam em função da alteração das variáveis independentes, são: propriedades no estado fresco, propriedades mecânicas e propriedades relacionadas à durabilidade.

Tabela 3.1: Relação das variáveis dependentes e independentes.

Variáveis Independentes	Relação a/finos	0,5
	Espalhamento	SF 2 - 660 a 750 mm
	Teor de adição	0% (REF)
		5% (RM 5%)
		15% (RM 15%)
		25% (RM 25%)
Variáveis Dependentes	Propriedades no estado fresco	Massa específica
		Espalhamento
		Índice de estabilidade visual
		Caixa L
		Funil V
	Propriedades mecânicas	Resistência à compressão – 7, 14 e 28 dias
		Resistência à tração – 28 dias
	Propriedades de durabilidade	Absorção por imersão – 28 dias
		Absorção por capilaridade – 28 dias
		Resistividade elétrica superficial – 28 dias
		Resistividade elétrica volumétrica – 28 dias

3.2. Caracterização dos Materiais Utilizados

Nos seguintes itens serão apresentados os materiais que foram utilizados na composição do concreto para a experimentação. Também são descritos os métodos utilizados para caracterizar cada material: cimento Portland, resíduo de marmoraria, agregado miúdo e agregado graúdo.

3.2.1. Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland do tipo CP V ARI (cimento Portland de alta resistência inicial). A escolha deste material foi motivada pela disponibilidade dos tipos de cimento no mercado; o cimento CP V possui uma maior quantidade de clínquer em detrimento de um teor menor de adições (dentre 0 a 10% de material carbonático), quando em comparação a outros tipos de cimento. O cimento CP I, o único tipo com teor de adições ainda menor, é muito dificilmente encontrado e até mesmo fabricado. O baixo teor de adições ajuda a reduzir qualquer interferência que esses materiais extras poderiam exercer sobre os resultados.

A caracterização do cimento foi feita pela avaliação das propriedades de: tempo de pega, resistência à compressão simples e massa específica. Além do ensaio de difração de raio-X (DRX). A metodologia de ensaio das caracterizações foi realizada segundo as recomendações das normas vigentes indicadas na Tabela 3.2:

Caracterização Física	Método de Ensaio
Tempo de pega	ABNT NM 65:2003
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019
Massa específica	ABNT NBR NM 23:2001
Difração de raio-X	

Tabela 3.2: Metodologias de ensaio na caracterização do material cimentício.

A caracterização física, por meio da difração de raio-X, foi feita pelo equipamento da marca Rigaku Ultima IV, com tubo de cobre e filtro de níquel, sem monocromador, com velocidade de 100 passos/min (passo = 0,05°) e 2θ variando de 2 a 60°.

3.2.2. Resíduo de Marmoraria

O resíduo de marmoraria (RM) foi coletado na marmoraria Veloso Stones, uma empresa de porte médio no Distrito Federal. O resíduo foi coletado na forma de lama; porém, para os ensaios da pesquisa, foi seco em estufa e depois destorroado até a forma de pó. Outra forma de se utilizá-lo, porém que não foi utilizada no programa experimental, é com o material ainda na forma de lama, com a determinação da umidade superficial por meio do frasco de Chapman e a subtração do valor equivalente da quantidade de água de amassamento.

As caracterizações realizadas para esse material foram a massa específica e a granulometria a laser. Além disso, foi realizada a caracterização mineralógica pelo método de difração de raio-X, pelo mesmo equipamento da caracterização do cimento, e caracterização química pela fluorescência de raio-X, em um equipamento da marca SHIMADZU, modelo EDX-720 HS. A metodologia dos ensaios de caracterização seguiu as orientações das normas na Tabela 3.3.

Caracterização Física	Método de ensaio
Massa específica	ABNT NBR NM 23:2001
Granulometria a laser	
Fluorescência de raio-X	
Difração de raio-X	

Tabela 3.3: Metodologia de ensaio para caracterização do RM.

3.2.3. Agregado Graúdo

Foi utilizado agregado graúdo proveniente da britagem de rocha calcária. O diâmetro nominal máximo adotado foi de 12,5 mm. Esse critério foi escolhido devido ao fato que concretos com agregados menores são mais fáceis de serem bombeados e trabalhados, justamente maximizando as vantagens comparativas do concreto autoadensável.

A caracterização do agregado graúdo ocorreu pelos ensaios de massa unitária e de granulometria. Esses ensaios ocorrerão segundo as orientações das normas a seguir, indicadas na Tabela 3.4.

Caracterização Física	Método de ensaio
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006
Granulometria	ABNT NBR NM 248:2001

Tabela 3.4: Metodologia de ensaio para caracterização do agregado graúdo.

3.2.4. Agregado Miúdo

Foi utilizada como agregado miúdo a areia lavada de rio. A caracterização do agregado miúdo foi feita pelos ensaios de massa específica, massa unitária e de granulometria, segundo as recomendações das normas vigentes indicadas na Tabela 3.5.

Caracterização Física	Método de ensaio
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006
Granulometria	ABNT NBR NM 248:2001

Tabela 3.5: Metodologia de ensaio para caracterização física do agregado miúdo.

3.2.5. Aditivo Químico

O aditivo que foi utilizado na confecção do concreto autoadensável é o super plastificante *ADVA Cast 585*, da fabricante GCP (Grace Construction and Packaging) applied technologies. Não foram realizados experimentos de caracterização para o aditivo, porém se utilizarão os dados fornecidos pelo próprio fabricante.

O aditivo cumpre a ASTM C 494 (norma americana) atingindo as classes A e F, tendo o aspecto de um líquido alaranjado. Também atende a ABNT: NBR 11768/2011 do tipo SP II / N/A/R. Também deve-se mencionar que sua base química são policarboxilatos, isento de cloretos, possuindo aplicações tanto para concreto convencional como autoadensáveis. Porém são incompatíveis com produtos de base naftaleno-sulfonato.

Segundo a fabricante o aditivo proporciona uma ótima redução da demanda de água, ótimas resistências iniciais e uma boa manutenção do abatimento. Sua dosagem recomendada é de 0,4% a 1,0% da massa de cimento portland e sua massa específica fica entre de 1,055 e 1,105 g/cm³.

3.2.6. Água de Amassamento

A água de amassamento para a fabricação do concreto deve estar de acordo com os critérios estabelecidos na NBR 15900-1:2009. A água foi fornecida pela CAESB, companhia de abastecimento de água de Brasília e para ser utilizada não pode conter impurezas visíveis.

3.3. Estudo de Dosagem

3.3.1. Método de Dosagem

A dosagem de concretos autoadensáveis é um tópico que por si só ainda é bastante estudado e discutido. Devido às suas propriedades particulares, encontrar a dosagem certa de cada componente para maximizar seus benefícios ainda é um tópico a ser melhor compreendido.

Várias técnicas vêm sendo desenvolvidas com esse objetivo como os métodos Nan Su *et al*, Gomes *et al*, Repette-Melo, Alencar-Helene, dentre vários outros.

Não existe uma norma técnica para a dosagem de concretos no Brasil, frequentemente são usados métodos conceituados existentes. Nessa pesquisa foi utilizado o processo da “American Concrete Institution” na recomendação ACI 237R-07, já que estabelece diretrizes amplamente aceitas a nível internacional e por ser uma metodologia condizente com os objetivos da pesquisa.

Foram realizados quatro traços distintos: um traço referência e outros três com os teores de substituição do cimento por RM em 5%, 15% e 25%. Sendo que, para encontrar as dosagens ideais de cada traço foi necessário começar pelo traço de referência e então aplicar a substituição do cimento pelo resíduo de marmoraria.

Resumidamente, o procedimento de dosagem da norma se dá nesses oito passos, mostrados na Figura 3.2. Após a escolha e a caracterização de materiais, resta determinar os requisitos mínimos para as propriedades do concreto e como será a escolha da quantidade de cada um de seus componentes.

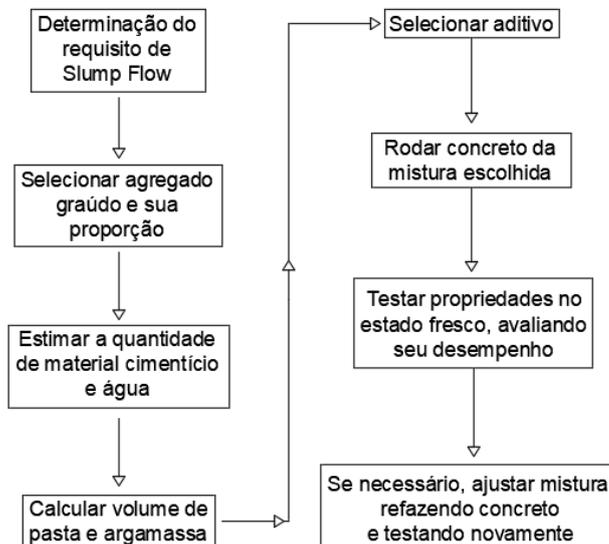


Figura 3.2: Metodologia de dosagem do concreto autoadensável.

Sobre os requisitos mínimos para as propriedades do concreto no estado fresco adotaram-se os valores apresentados na Tabela 3.6. A escolha desses valores se deve ao perfil de utilização do material, sendo os valores escolhidos suficientemente adequados para execução de lajes e vigas, segundo os critérios da NBR 15823 – 1:2017.

Propriedades (estado fresco)	Valor requisitado
Slump Flow (Espalhamento)	SF 2 - 660 mm (espalhamento mínimo)
Funil V (tempo)	VS 2/VF 2 - 25 s (tempo máximo)
Índice de estabilidade Visual	IEV 1 (estabilidade mínima)

Tabela 3.6 Requisitos mínimos adotados para dosagem do concreto.

Sobre a proporção entre os agregados graúdo e miúdo foi determinada em função dos seus ensaios de massa unitária no estado solto, com o princípio que quanto maior a massa unitária, menor será a quantidade de vazios entre os grãos. Esse preenchimento de vazios propicia um melhor rendimento do concreto podendo usar menos pasta de cimento.

Sobre a quantidade inicial de cimento adotado na mistura, a norma do ACI recomenda utilizar um valor maior que 458 kg/m³, para abatimentos maiores que 650 mm. Sendo assim, esse foi, aproximadamente, o valor inicial para a mistura. Contudo, conforme os ensaios ocorrerem essa quantidade poderia variar, dependendo das condições de trabalhabilidade que o concreto apresentasse. Esses ajustes foram feitos com o intuito de usar o mínimo possível de cimento, mas ainda satisfazendo as condições de desempenho determinadas anteriormente.

A Tabela 3.7 indica os valores limites da ACI 237R-07 para as composições das misturas essenciais. Contudo, esses valores foram utilizados apenas como um referencial para ajustar a dosagem do concreto, não sendo estritamente seguidos. Conforme dito anteriormente, o verdadeiro critério é o desempenho final do concreto, mesmo que este supere o valor das recomendações do ACI.

	Agregado Graúdo	Pasta cimentícia	Argamassa (Pasta+Ag. Miúdo)	Relação água/cim.
Valor mínimo (ACI)	28%	34%	68%	0,32
Valor máximo (ACI)	32%	40%	72%	0,45

Tabela 3.7: Valores de referência para dosagem.

Por fim, a quantidade de aditivo a ser utilizada foi determinada com base nos experimentos em relação à trabalhabilidade do concreto, aumentada ou diminuída conforme os resultados. Também se deve ter em mente que o primeiro traço testado foi com o concreto referência e que o valor dos outros traços (com 5%, 15% e 25% de substituição em massa) serão definidos em função dele. A Figura 3.3 contém uma imagem do aspecto visual da trabalhabilidade necessária para o CAA.



Figura 3.3: Aspecto do traço de referência de Concreto Autoadensável (Fonte: acervo pessoal).

3.4. Ensaios do CAA no Estado Fresco

É necessário analisar como o resíduo de marmoraria afeta as propriedades do concreto autoadensável ainda em seu estado fresco, dado essa ser uma característica crítica de seu diferencial em relação aos concretos convencionais. Especificamente, foi necessário verificar se as propriedades de fluidez, habilidade passante e coesão (resistência à segregação) seriam satisfatórias após a adição do RM.

Para isso foram feitos os ensaios de caixa L, funil V, espalhamento, estabilidade visual e massa específica para o concreto referência e cada um dos traços analisados, conforme descritos nos itens a seguir.

3.4.1. Ensaio de Espalhamento e Índice de Estabilidade Visual

O ensaio de espalhamento foi realizado segundo as diretrizes estabelecidas na NBR 15823-2:2017. O objetivo do teste é avaliar a fluidez do concreto, em fluxo livre, sob a ação do próprio peso pela determinação do espalhamento e do tempo de escoamento, empregando-se o cone de Abrams. O teste, apesar de simples, é um forte indicador da trabalhabilidade do concreto durante a construção. Nesse mesmo ensaio se determina o índice de estabilidade visual. Os dados obtidos com esse experimento foram:

- Espalhamento do concreto (SF),
- Tempo de escoamento (t_{500}) e
- Índice de estabilidade visual (IEV).

O índice de estabilidade visual, que é obtido junto aos outros dados no mesmo experimento, indica a coesão do concreto, antevendo potenciais problemas com relação à segregação e exsudação, também identificando suas respectivas intensidades.

3.4.2. Caixa L

O ensaio de caixa L foi realizado conforme as instruções estabelecidas na NBR 15823-4:2017. O objetivo do ensaio é a determinação da habilidade passante em fluxo confinado do concreto autoadensável usando a caixa L. O princípio do teste envolve entender o comportamento do concreto sob uma condição de confinamento dos elementos construtivos, sendo útil para prever seu comportamento em relação a uma armadura mais densa. Nesses ensaios foi utilizada a caixa L com 3 barras, como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4: Ensaio de Caixa L em execução (Fonte: acervo pessoal).

3.4.3. Funil V

O ensaio de funil V foi realizado em conformidade com a norma NBR 15823-5:2017 e tem como objetivo determinar a viscosidade do concreto autoadensável, pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do funil V. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior será o tempo de escoamento.

3.4.4. Massa Específica

A determinação da massa específica foi feita conforme as instruções da norma NBR 9833:2008, aplicável ao concreto convencional. A diferença é que não precisa realizar o adensamento, pela própria natureza do concreto autoadensável.

3.4.5. Ensaios sobre Propriedades Mecânicas do CAA

Para a análise das propriedades mecânicas foram realizados dois ensaios diferentes: resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Os corpos de prova cilíndricos foram preparados segundo a norma NBR 5738:2003 possuindo dimensões iguais a 100 x 200 mm. Também foram retificados para que a força aplicada sobre eles na prensa se distribua de forma mais uniforme e os resultados sejam mais acurados. Para cada um dos ensaios, em cada uma das idades, foram utilizados três corpos de prova. As normas técnicas utilizadas são apresentadas na Tabela 3.8.

Ensaio	Norma Técnica
Resistência à compressão simples	ABNT NBR 5739:2007
Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222:2011

Tabela 3.8: Ensaios e normas sobre análise das propriedades mecânicas.

3.5. Ensaios sobre Propriedades de Durabilidade do CAA

Os ensaios selecionados para avaliar as propriedades de durabilidade do concreto foram: absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica, sendo utilizados corpos de prova preparados igualmente aos dos experimentos de propriedades mecânicas. A seguir, na Tabela 3.9, encontra-se a relação dos experimentos e as normas técnicas obedecidas. É importante ressaltar que para

dois dos experimentos não havia ainda uma normatização nacional sobre a metodologia do experimento, optando-se então por normas internacionais de larga abrangência.

Ensaio	Norma técnica
Absorção de água por imersão	NBR 9778: 2005
Absorção de água por capilaridade	NBR 9779: 2012
Resistividade elétrica superficial	ASTM G57 - 06: 2012
Resistividade elétrica volumétrica	AASHTO TP 119-2015

Tabela 3.9: Ensaios sobre propriedades de durabilidade do CAA.

3.5.1. Ensaio de Absorção de água por Imersão

O ensaio foi realizado conforme as instruções da NBR 9778:2005, e tem como objetivo determinar a capacidade de absorção de água do corpo de prova. Assume-se a hipótese que essa capacidade de absorção esteja diretamente relacionada à porosidade do corpo de prova e, portanto, inversamente relacionada à durabilidade do concreto.

Após o corpo de prova ser seco em estufa (105 ± 5 °C) por 72h, sua massa é registrada. Ele é imerso em água a 23 ± 2 °C e mantido por 72h nessa condição. Após o corpo estar saturado, este foi posto em um recipiente também cheio de água que deve ser gradativamente aquecido até a temperatura de ebulição, na Figura 3.5 (a).

A ebulição ocorre por 5h mantendo-se o volume de água aproximadamente constante. Após esse período a água esfria naturalmente até a temperatura de 23 ± 2 °C e registra-se a massa do corpo com o auxílio de uma balança hidrostática. Ao todo são determinadas as massas de cada corpo-de-prova antes da secagem, antes da imersão, antes e após a ebulição, esta última pesagem feita tanto em balança convencional quanto em balança hidrostática, sendo essa última etapa mostrada na Figura 3.5 (b).



Figura 3.5 (a): Corpos de prova em processo de ebulição (Fonte: acervo pessoal) e (b) Pesagem de corpo de prova em balança hidrostática (Fonte: acervo pessoal).

A absorção é definida pela seguinte equação:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$

Em que:

A é a absorção em porcentagem

M_{sat} é a massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura

M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa

E o índice de vazios da amostra é definido por

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

Em que m_i é a massa do corpo saturado imerso em água após fervura

3.5.2. Ensaio de Absorção de água por Capilaridade

A norma ABNT NBR 9779:2012 estabelece o método de ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade através de ascensão capilar pelos poros do concreto. O ensaio foi executado com três corpos-de-prova de dimensões 10x20cm de cada traço, aos 28 dias de idade e conservados em cura por câmara úmida, que foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até a constância de massa e, após resfriados, foram imersos em um volume de água que alcançasse a altura de (5 ± 1) mm a partir de suas faces inferiores. Os

corpos foram nivelados e o contato homogêneo da água foi garantido pela utilização de placas de vidro entre o recipiente e as faces dos cilindros, sendo ilustrado na Figura 3.6.

Depois de 72h dessa imersão parcial, os elementos foram rompidos por compressão diametral,



Figura 3.6: Corpos de prova durante ensaio de absorção de água por capilaridade (Fonte: acervo pessoal).

de forma a observar e medir a distribuição da água no seu interior. A mesma norma orienta que sejam realizadas pesagens dos corpos-de-prova antes da secagem, antes da imersão, e após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h a partir do início da imersão parcial. Finalmente os corpos são rompidos por compressão diametral para se avaliar a altura da ascensão capilar.

A absorção de água por capilaridade é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S}$$

Em que,

C é a absorção de água por capilaridade, expressa em g/cm^2

m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova após seu contato com a água expressa em gramas (g)

m_s é a massa do corpo de prova quando seco, a 23 ± 2 °C expressa em gramas (g)

S é a área da seção transversal, expressa em cm^2

3.5.3. Ensaio de Resistividade

A resistividade elétrica é a propriedade física do concreto que indica a resistência ao fluxo de corrente elétrica de natureza iônica na solução aquosa (fase líquida do concreto) contida na sua rede de poros comunicantes: bolhas, interstícios e canais capilares. Em outras palavras, a resistividade volumétrica do concreto irá dizer o quanto este efetivamente resiste à corrente

elétrica entre as regiões anódica e catódica da armadura. Quanto maior a resistividade do concreto, menor será a corrente e, portanto, a corrosão das armaduras, fazendo a estrutura de concreto ser mais durável.

Para medir a resistividade elétrica do concreto, serão realizados dois experimentos distintos: pela técnica de quatro eletrodos (método Werner), segundo a ASTM G57-06:2012, e a resistividade elétrica volumétrica, segundo a AASHTO TP 119-2015. Inclusive reutilizando os mesmos corpos de prova (100 x 200 mm), permitindo assim uma comparação direta entre os resultados.

3.5.3.1. Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial – ASTM G57-06:2012

Com relação à técnica dos quatro eletrodos, por não existir uma norma brasileira em relação ao ensaio sobre a resistividade elétrica superficial, decidiu-se usar a norma americana ASTM G57-06:2012 amplamente reconhecida e utilizada internacionalmente. A Figura 3.7 contém a imagem do aparato utilizado para execução do ensaio. O transformador é utilizado para aplicação de tensão sobre o corpo de prova, por sua vez submetido ao contato com os quatro eletrodos; os eletrodos e o transformador são ligados aos multímetros.

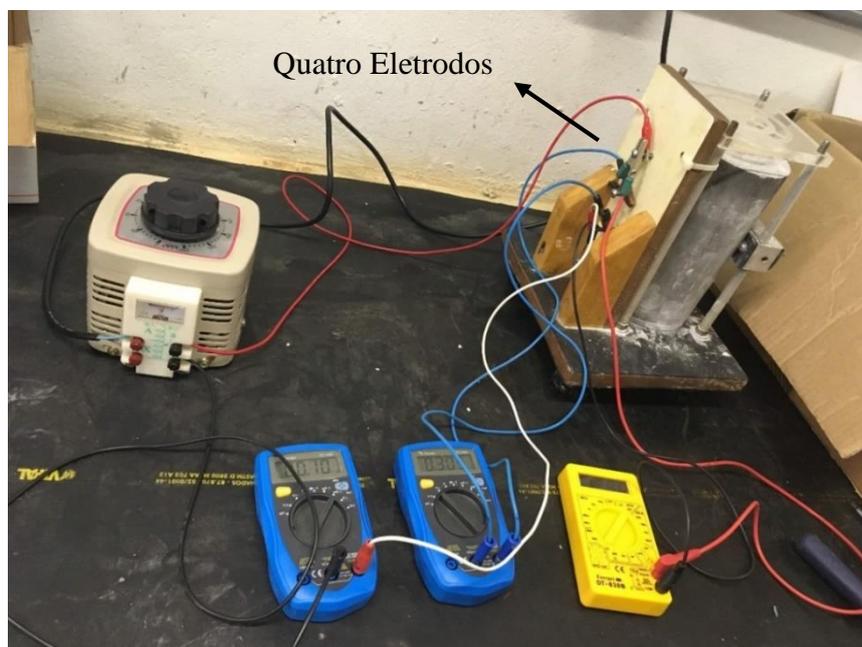


Figura 3.7: Execução do ensaio de resistividade superficial. (Fonte: acervo pessoal).

Para o ensaio ser executado, foram posicionados quatro eletrodos ao redor do corpo de prova. É então aplicada uma corrente elétrica alternada entre os dois eletrodos mais externos. Simultaneamente, os dois outros eletrodos internos mediram a corrente e a queda de tensão

produzida. Com base nesses dois dados é possível encontrar a resistência elétrica do corpo de prova entre os eletrodos pela relação nomeada lei de Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

Sendo R a resistência do corpo de prova;

ΔV a diferença de potencial aplicada e

i a corrente elétrica do circuito.

Contudo, o valor da resistência não é uma propriedade do material em si, já que também depende do comprimento e quantidade de concreto entre os eletrodos. Assim sendo, a resistividade do concreto estudado se dá pela equação:

$$\rho = 2 * \pi * a * R$$

Sendo ρ a resistividade do concreto;

a o espaçamento entre os eletrodos (cm) e

R a resistência elétrica encontrada na equação anterior

Deve-se lembrar de que dependendo das condições ambientais de temperatura, pode-se aplicar fatores corretores para os valores encontrados.

3.5.3.2. Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica – AASHTO TP 119-2015

Já os ensaios de resistividade volumétrica foram realizados segundo a norma internacional AASHTO TP 199-15. Segundo o ensaio, os corpos de prova devem ter sido previamente saturados em água com cal, à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Após serem removidos, deve-se tirar o excesso de água que estiver sobre o corpo com um pano.

Foram ensaiados três corpos de prova de dimensões 10x20cm de cada traço de concreto, aos 28 dias, através de multímetros digitais, de forma a medir a tensão aplicada sobre os eletrodos e a corrente elétrica passante entre eles.

Todo o ensaio deve ser realizado sobre uma superfície não condutora de eletricidade (como uma camada de borracha ou algo similar), enquanto os eletrodos eram de aço. Entre os eletrodos e o corpo de prova, posicionou-se um meio filtrante que impedisse que a resistividade dos eletrodos fosse medida juntamente de maneira indevida; esse meio filtrante apresentou resistividade desprezível.

Para a medição da resistividade elétrica volumétrica, cada corpo de prova ensaiado foi posicionado entre as duas placas de aço que foram usadas como eletrodos, que foram submetidos a uma diferença de potencial, de forma a medir-se a corrente elétrica entre eles, que passou por todo o volume do corpo de prova. Esse procedimento pode ser visto na Figura 3.8, em que o corpo de prova é encaixado no meio de duas placas que funcionam como eletrodos, por entre os quais a corrente elétrica é transmitida e medida pelo multímetro. Para cada corpo de prova, foram feitas cinco leituras e a resistividade adotada será a média das cinco calculadas.

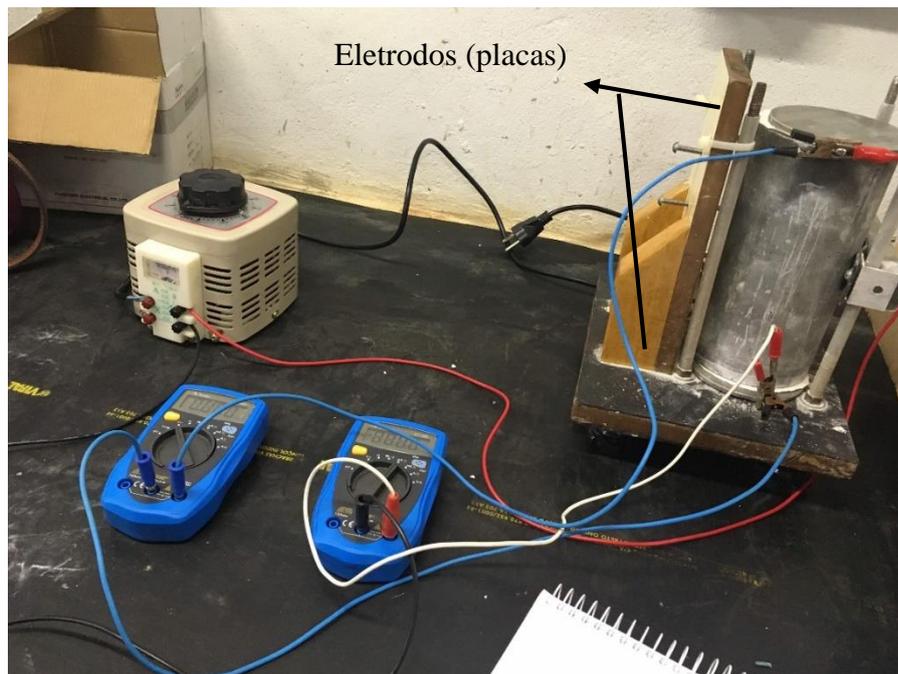


Figura 3.8: Execução do ensaio de resistividade volumétrica. (Fonte: acervo pessoal).

A resistência do corpo-de-prova para cada medição é dada pela lei de Ohm, e calcula-se a respectiva resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$) segundo a equação:

$$\rho = R_{\text{corpo}} * \frac{A}{L}$$

Em que

R é a resistência elétrica do corpo de prova (Ω)

A é a área da seção transversal do corpo de prova (cm^2)

L é a medida do comprimento do corpo de prova (cm).

Para corpos padronizados, a Tabela 3.10, fornecida pela norma em estudo, indica os valores nominais a serem adotados para essa relação:

Dimensões nominais do cilindro	A/L (cm²/cm)
100 mm x 200 mm	4
150 mm x 300 mm	6

Tabela 3.10: Coeficiente A/L para cálculo de resistividade elétrica volumétrica.

Finalmente, pode-se classificar os concretos quanto à resistividade elétrica de acordo com duas fontes diferentes. A norma CEB – 192 e o boletim europeu CE – COST 509 indicam a probabilidade de corrosão das armaduras aderidas ao concreto de acordo com o valor da resistividade elétrica. E a mesma norma usada para a execução do ensaio de determinação da resistividade elétrica volumétrica, a AASHTO TP 119-2015 estabelece uma classificação quanto à penetração de cloretos de acordo com o respectivo valor de resistividade. Esses limites estão descritos nas Tabelas 3.11 e 3.12

Risco de Corrosão	Resistividade Elétrica (kΩ.cm)	
	CEB - 192	COST 509
Desprezível	> 20	>100
Baixo	10 a 20	50 a 100
Moderado	---	10 a 50
Alto	5 a 10	< 10
Muito alto	< 5	---

Tabela 3.11: Classificação do concreto quanto ao risco de corrosão conforme a resistividade elétrica (Fonte: Ribeiro et al, 2014).

Permeabilidade de Íons Cloreto	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)
Alta	< 5,2
Moderada	5,2 a 10,4
Baixa	10,4 a 20,8
Muito Baixa	20,8 a 207
Insignificante	> 207

Tabela 3.12: Classificação do concreto quanto à permeabilidade de íons cloreto conforme a resistividade elétrica volumétrica (Fonte: AASHTO TP 119-2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada um dos procedimentos experimentais descritos no capítulo 3. As seções serão divididas nas caracterizações de cada material utilizado, nas propriedades do concreto no estado fresco e nas propriedades do concreto no estado endurecido, tanto no que diz respeito às propriedades mecânicas quanto às de durabilidade.

Os resultados com número suficiente de dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), que consiste em identificar se as médias das amostras analisadas diferem significativamente, de forma que uma variável independente – no caso, o teor de Resíduo de Marmoraria em cada traço de concreto – tem efeito sobre a variável dependente – o resultado de cada ensaio discutido. Essa avaliação é feita com a probabilidade de significância, o chamado Valor- p , que significará a influência significativa do teor RM sobre a variável analisada se assumir valor menor que α . Por sua vez, α consiste no nível de significância em que cada hipótese é testada, e nesse trabalho foi assumido como $\alpha = 5\%$, garantindo um nível de confiança de 95% em cada teste realizado. A ANOVA foi aplicada sobre os resultados por meio do *software Microsoft Excel*.

4.1. Caracterização dos Materiais

4.1.1. Cimento Portland

Na Tabela 4.1 estão descritos os resultados da análise de caracterização do aglomerante hidráulico utilizado na pesquisa, que foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI). Os limites descritos são estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018.

Característica		Resultado	Limite
Massa Específica (g/cm ³)		2,98	N.E.
Teor de água da pasta de consistência normal (%)		34	N.E.
Tempo de pega	Início de Pega (min)	138	≥ 60
	Fim de Pega (min)	206	≤ 600
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	22,9	≥ 14,0
	3 dias	38,1	≥ 24,0
	7 dias	42,0	≥ 34,0

Tabela 4.1: Caracterização do Cimento Portland CP V - ARI.

O Cimento Portland também foi submetido a análise de composição mineralógica pela técnica de Difração de Raio X (DRX) em equipamento de marca Rigaku Ultima IV com parâmetros padrões da técnica, que são o comprimento de onda de cobre, sem monocromador, velocidade de 100 passos/min ou passo de 0,05° e o parâmetro 2θ variando de 2 a 60°. A Figura 4.1 contém o difratograma resultante, e pode-se observar principalmente a intensidade dos picos de silicatos de cálcio, gipsita e ferrita de cálcio, compostos próprios do processo de produção e industrialização do cimento.

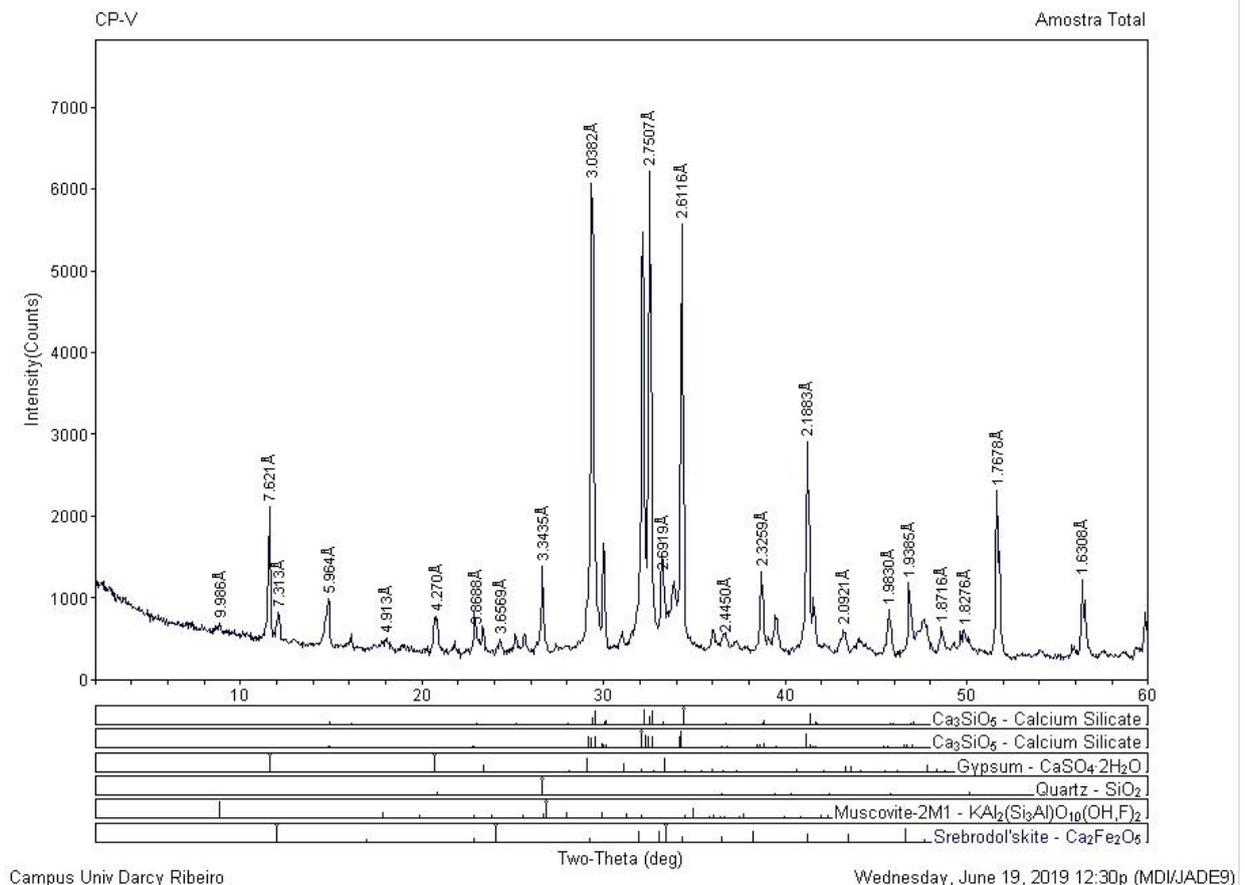


Figura 4.1: Difratograma do Cimento Portland CP V.

4.1.2. Resíduo de Marmoraria (RM)

A amostra de RM utilizada na pesquisa foi disponibilizada por uma marmoraria de médio porte localizada no Setor de Armazenagem e Abastecimento Norte do Distrito Federal (SAAN – DF). Na Tabela 4.2 estão descritas algumas de suas características físicas e sua composição química determinada pela técnica de espectroscopia por Fluorescência de Raios-X (FRX) em equipamento de modelo EDX-720HS e marca Shimadzu.

A composição química encontrada pela fluorescência de raio X indica a predominância de óxidos de silício (quartzo) e de cálcio, encontrados, respectivamente, nas rochas de granito e de

mármore. Os valores referentes à composição química estão dados em relação a 100% da amostra inicial, e não em relação à porcentagem restante após perda ao fogo.

Característica	Resultado	
Massa específica (g/cm³)	2,72	
Composição química, em óxidos (%)	SiO ₂	43,382
	CaO	20,828
	Al ₂ O ₃	11,331
	Fe ₂ O ₃	10,229
	K ₂ O	7,799
	MgO	2,633
	TiO ₂	1,865
	P ₂ O ₅	0,579
	RuO ₂	0,539
	Tm ₂ O ₃	0,463
	MnO	0,159
	SO ₃	0,141
	V ₂ O ₃	0,052

Tabela 4.2: Caracterização do Resíduo de Marmoraria (RM).

Também se procedeu a análise da composição mineralógica do RM por meio de técnica de DRX no mesmo equipamento e com mesmos parâmetros usados na análise do CP V. O difratograma resultante do RM é apresentado na Figura 4.2, em que se destaca a intensidade dos picos de muscovita, dolomita e quartzo, além da ausência de alos amorfos, representativos nos materiais pozolânicos.

O RM também foi caracterizado quanto à distribuição granulométrica de seus grãos, por meio da técnica de granulometria a laser pela marca Cilas modelo 1190 Liquid. A Figura 4.3 contém a curva granulométrica do resíduo, fornecida pelo aparelho de ensaio. Os diâmetros imediatamente inferiores às porcentagens de 10%, 50% e 90% (D₁₀, D₅₀ e D₉₀) são, respectivamente, 1,51 µm, 13,40 µm e 48,94 µm, sendo que nenhum agente dispersante foi usado para a realização do ensaio.

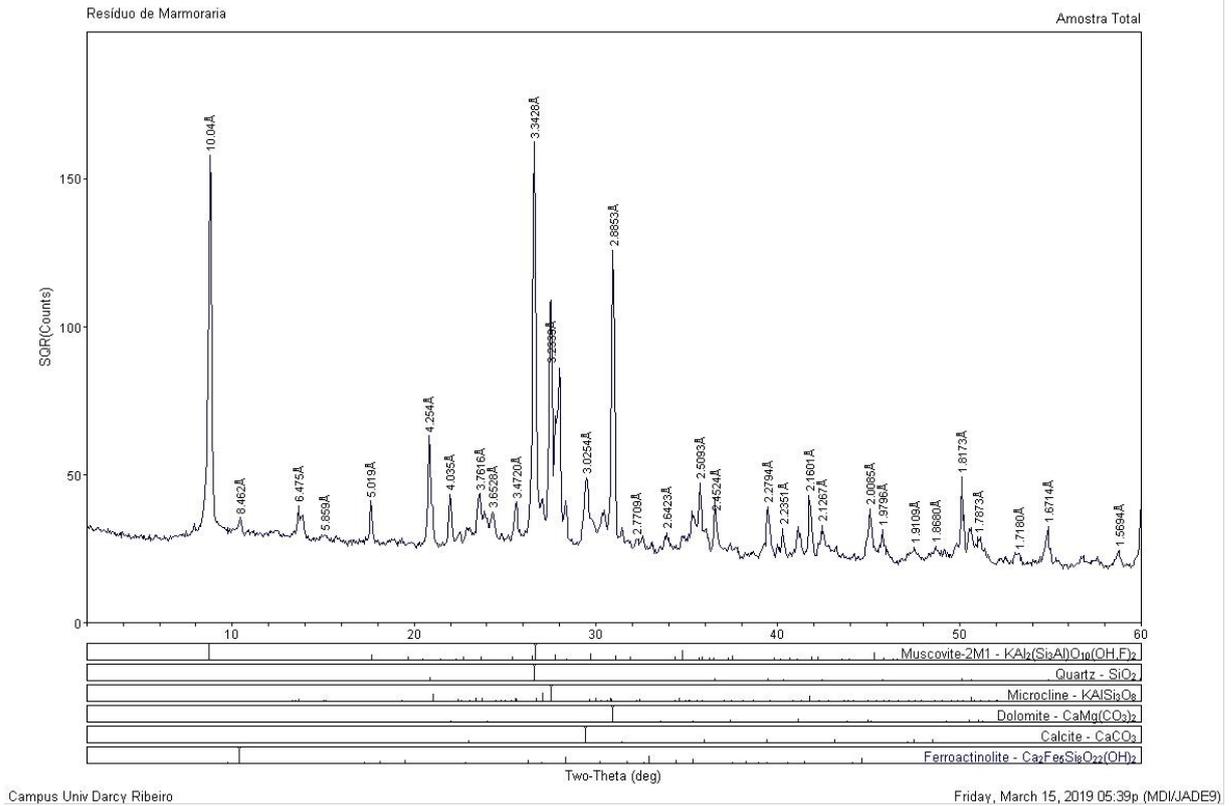


Figura 4.2: Difratoograma obtido por DRX do Resíduo de Marmoraria.

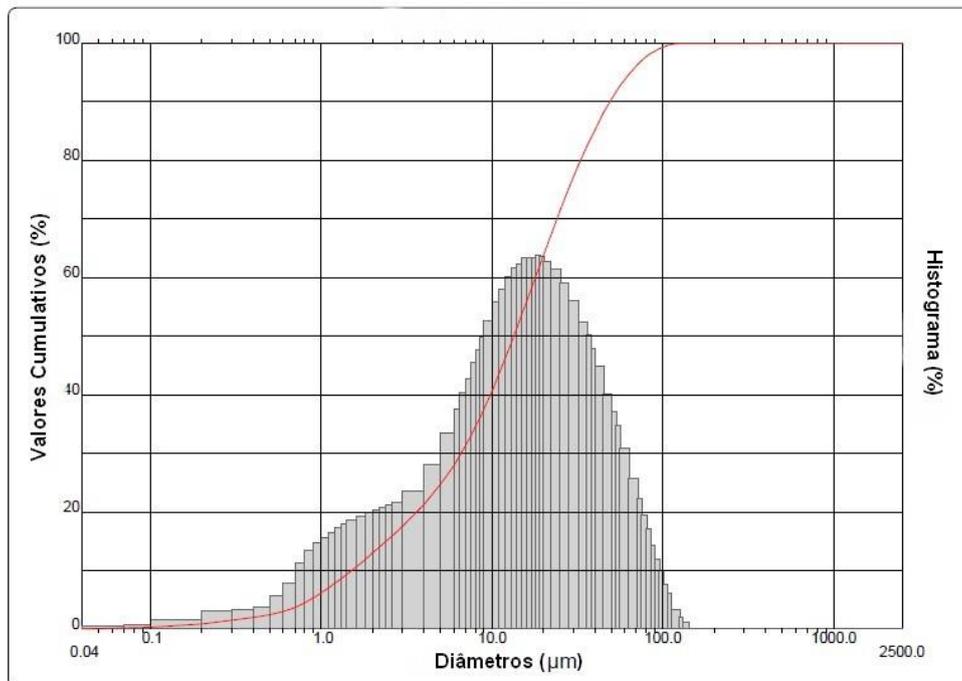


Figura 4.3: Curva granulométrica do Resíduo de Marmoraria.

4.1.3. Agregado Graúdo

Foi utilizada, como agregado graúdo natural, uma pedra britada cujas características serão dispostas na Tabela 4.3.

Característica	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,54
Módulo de finura (%)	6,94
Dimensão máxima característica (mm)	12,5

Tabela 4.3: Caracterização do agregado graúdo.

Além dessas grandezas, também é importante definir a curva granulométrica do agregado graúdo, que está representada na Figura 4.4, assim como os limites da composição granulométrica dos agregados graúdos conforme a ABNT NBR 7211:2009 em sua Tabela 6.

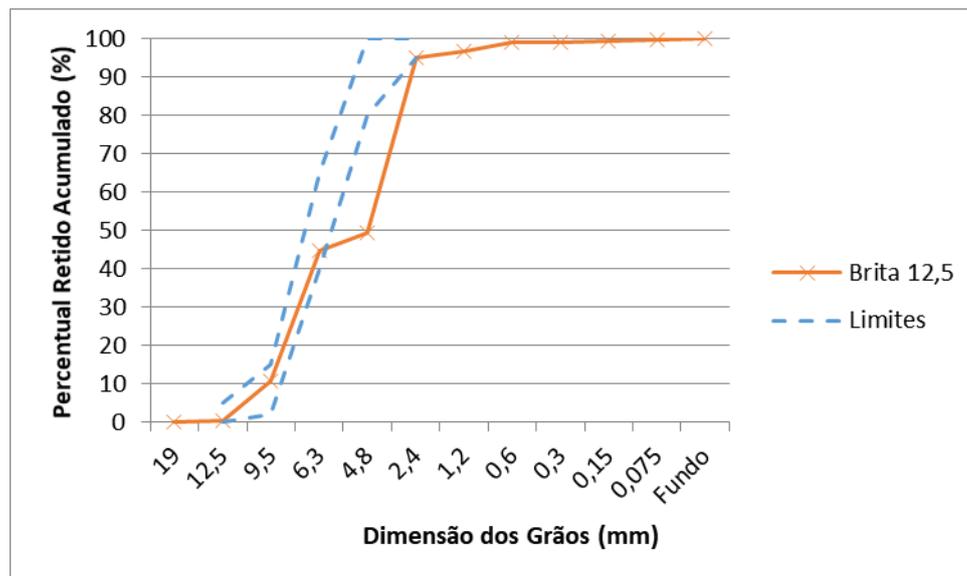


Figura 4.2: Curva granulométrica do Agregado Graúdo.

Ao analisar a curva granulométrica da brita, é possível observar que a sua composição granulométrica se define parcialmente fora dos limites estabelecidos por norma. Nota-se uma descontinuidade na curva granulométrica do agregado graúdo, entre as peneiras de 6,3 mm e 4,8 mm, que é precisamente o ponto em que a curva começa a afastar-se mais sensivelmente dos valores limitados pela norma. Isso quer dizer que a distribuição granulométrica da brita possui uma graduação aberta ou descontínua, e por isso pouca quantidade de material é retido na peneira de 4,8 mm e grande quantidade de material é retido abruptamente na peneira de 2,4

mm, omitindo essa fração da distribuição, e afastando a curva granulométrica para a área do gráfico correspondente às peneiras de diâmetro mais fino.

Essa característica de descontinuidade da granulometria do agregado graúdo nem sempre é indesejável e pode até gerar economia, mas observa-se que, para misturas mais trabalháveis, também colabora para a tendência à segregação. Por isso, a granulometria descontínua é recomendada apenas para misturas com baixa trabalhabilidade, uma vez que respondem bem à vibração (NEVILLE, 2015). Evidentemente, esse não é o caso do concreto autoadensável, em que a trabalhabilidade da mistura deve ser elevada devido ao próprio conceito de autoadensabilidade, como visto na seção 2.3 deste trabalho, e a mistura não deve ser adensada, sob risco de forte segregação.

Por meio de uma análise visual do agregado graúdo, observou-se que se apresentava com forma lamelar, que consiste no fato de a espessura do grão mostrar-se excessivamente pequena quando em comparação com as suas outras dimensões. A característica de lamelaridade dos agregados graúdos está relacionada aos parâmetros do concreto tanto em seu estado fresco quanto no estado endurecido.

As partículas lamelares tendem a se orientar em um plano, permitindo a formação de vazios e o conseqüente acúmulo de água de exsudação entre elas, o que afeta significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A lamelaridade também afeta a trabalhabilidade do concreto enquanto reduz a compactação da mistura, que acaba por exigir maior quantidade de água para atingir determinada trabalhabilidade (NEVILLE, 2015).

4.1.4. Agregado Miúdo

4.1.4.1. Areia de módulo de finura 1,95%

A areia de quartzo rosa foi utilizada como agregado miúdo de menor granulometria na presente pesquisa, e suas características físicas estão descritas na Tabela 4.4.

Característica	Resultado
Massa específica (g/cm³)	2,65
Massa unitária (g/cm³)	1,28
Módulo de finura (%)	1,95
Dimensão máxima característica (mm)	0,6

Tabela 4.4: Caracterização da areia fina.

Ao analisar, na Figura 4.5, a curva granulométrica da areia mais fina, percebe-se que esta areia tem grãos com dimensões menores do que o valor limite inferior da zona utilizável. Essa característica determina a necessidade de se estabelecer uma composição da areia fina com uma areia de maior granulometria, em proporções adequadas, de forma que o empacotamento desta composição seja compatível também com o agregado graúdo.

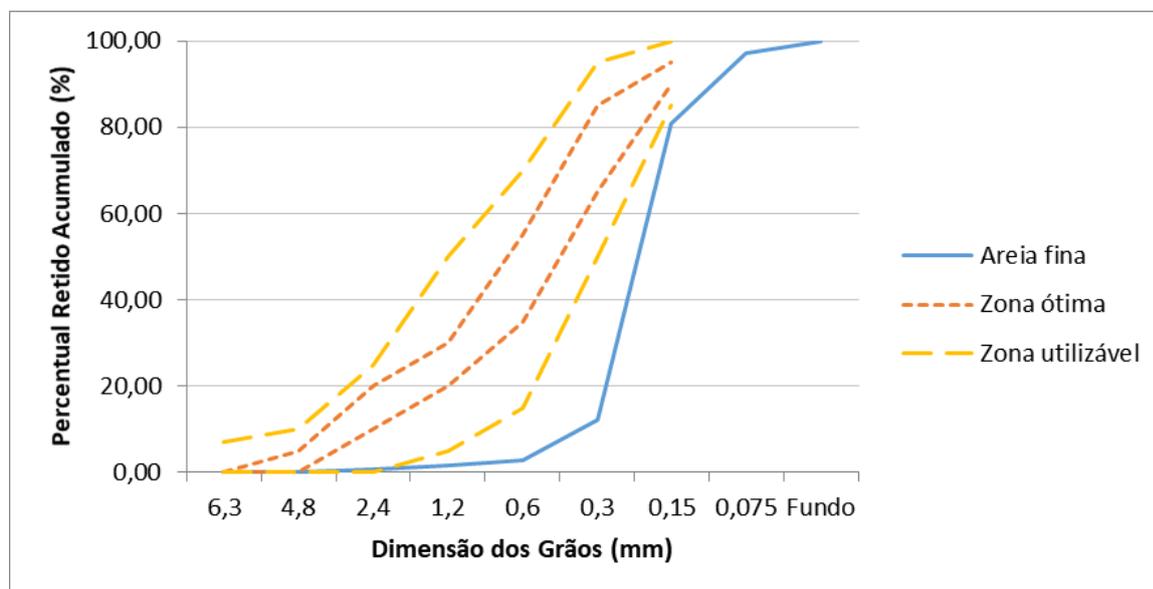


Figura 4.3: Curva Granulométrica da Areia com módulo de finura 1,95%.

4.1.4.2. Areia de módulo de finura 3,15%

Foi utilizado como agregado miúdo de granulometria média uma areia natural, e suas características estão apresentadas na Tabela 4.5.

Característica	Resultado
Massa específica (g/cm³)	2,66
Massa unitária (g/cm³)	1,38
Módulo de finura (%)	3,15
Dimensão máxima característica (mm)	2,4

Tabela 4.5: Caracterização da areia média.

Além dessas características, tem-se a curva granulométrica da areia média no gráfico da Figura 4.6. Observa-se que a curva da areia média se encontra inteiramente dentro da faixa de zona utilizável e parcialmente dentro da zona ótima, cujos limites são estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009.

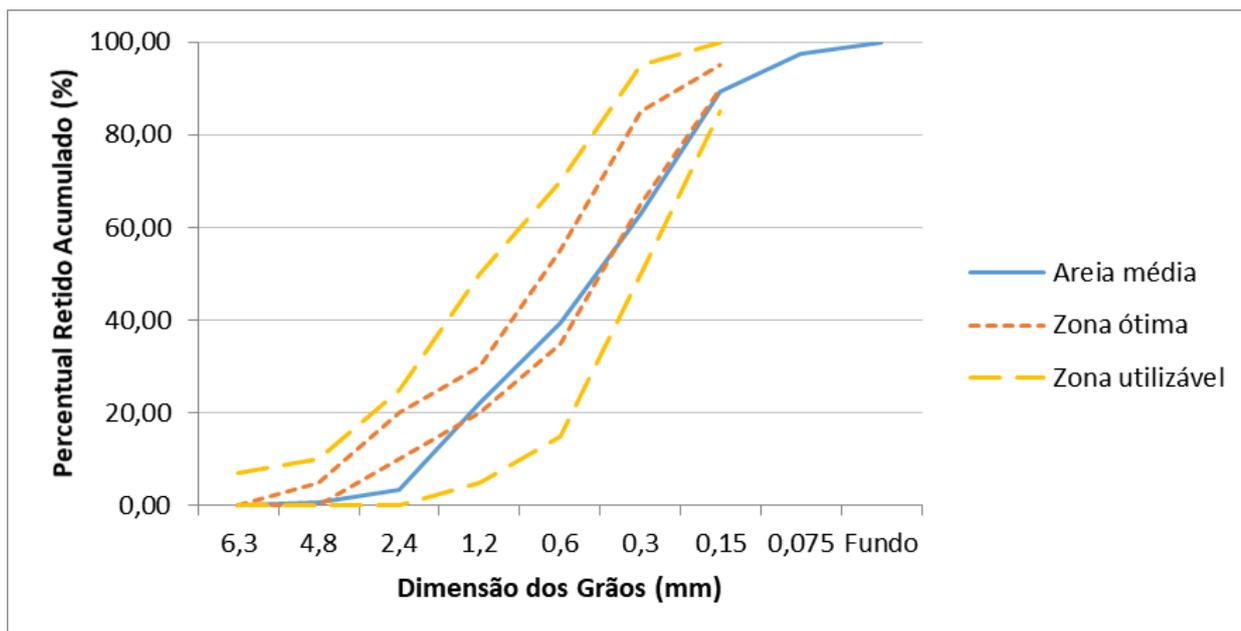


Figura 4.4: Curva Granulométrica da Areia de módulo de finura 3,15%.

Por meio da medição das massas unitárias dos agregados no estado solto e buscando um adequado empacotamento dos grãos, optou-se, na presente pesquisa, por utilizar esses agregados nas seguintes proporções: 60% de agregado graúdo compostos com 40% de areia média; e 80% dessa composição composta, por sua vez, com 20% de areia fina.

4.2. Propriedades do Concreto no Estado Fresco

4.2.1. Análise dos traços adotados

A adoção desses valores finais para traço ocorreu em função de dois aspectos. Primeiramente foi realizado um ensaio de empacotamento entre as areias de granulometrias finas e médias e depois entre a mistura das areias e a brita, visando maximizar a massa unitária do sistema e o preenchimento dos poros. Tendo essas quantidades para os agregados, estimou-se o consumo de cimento, superplastificante e água em função da qualidade pretendida para a resistência do concreto e sua durabilidade (tendo como base fatores empíricos de outras concretagens).

Infelizmente, essa primeira metodologia não conseguiu produzir um concreto de qualidade suficiente para a execução dos ensaios. Portanto, iniciou-se o segundo aspecto dessa determinação: um processo iterativo de tentativa e erro na busca de corrigir os problemas encontrados no concreto inicial, variando alguns aspectos do concreto, como os materiais utilizados e suas respectivas quantidades.

Ao fim do processo, tanto o superplastificante quanto a areia média foram alterados em relação ao planejamento inicial, assim como a proporção de traço inicialmente sugerida, até que

encontrássemos um concreto suficientemente satisfatório para a experimentação. Sendo assim, principalmente devido ao fato que a própria areia média foi alterada, não faz sentido explorar os dados antigos com relação ao empacotamento da antiga areia. Sendo assim os resultados finais para os traços utilizados para a concretagem estão expressos na Tabela 4.6.

Quantidade de materiais (kg) de cada concretagem							
	Cimento	RM	Areia Fina	Areia Média	Brita 1	SP	Água
REF	16,33	0,00	11,79	18,86	28,28	0,09	8,16
RM 5%	15,51	0,82	11,77	18,82	28,24	0,09	8,16
RM 15%	13,88	2,45	11,73	18,76	28,14	0,08	8,16
RM 25%	12,25	4,08	11,69	18,70	28,05	0,09	8,16

Tabela 4.6: Relação do traço em massa para cada concretagem.

Esses dados ainda podem ser expressos em termos da porcentagem da massa total para cada um dos elementos adotados, nesse caso os dados estão expressos na Tabela 4.7:

Proporção (%) em massa de cada um dos materiais							
	Cimento	RM	Areia Fina	Areia Média	Brita 1	SP	Água
REF	19,55	0,00	14,11	22,58	33,87	0,10	9,78
RM 5%	18,58	0,98	14,09	22,54	33,81	0,10	9,78
RM 15%	16,62	2,93	14,04	22,47	33,70	0,09	9,78
RM 25%	14,67	4,89	14,00	22,39	33,59	0,10	9,78

Tabela 4.7: Proporção em massa de cada um dos traços.

Além disso, é importante analisar as quantidades necessárias tanto do cimento, quanto da água e do superplastificante a serem utilizadas. Com relação ao cimento, o traço referência utilizou 450 kg de cimento por m³ de concreto, enquanto os outros traços gradativamente substituíam o cimento por RM (resíduo de marmoraria), conforme ilustrado na Figura 4.7.

Para a água definiu-se uma proporção fixa em relação ao total de finos (cimento + RM) de 50% para ser utilizada em todos os traços. Note-se, porém, que enquanto a quantidade de finos é fixa para todos os traços (fazendo com que a quantidade de água também o seja), a quantidade de cimento é gradativamente reduzida, fazendo com que a relação a/c (água/cimento) gradativamente cresça, como ilustrado na Figura 4.8.

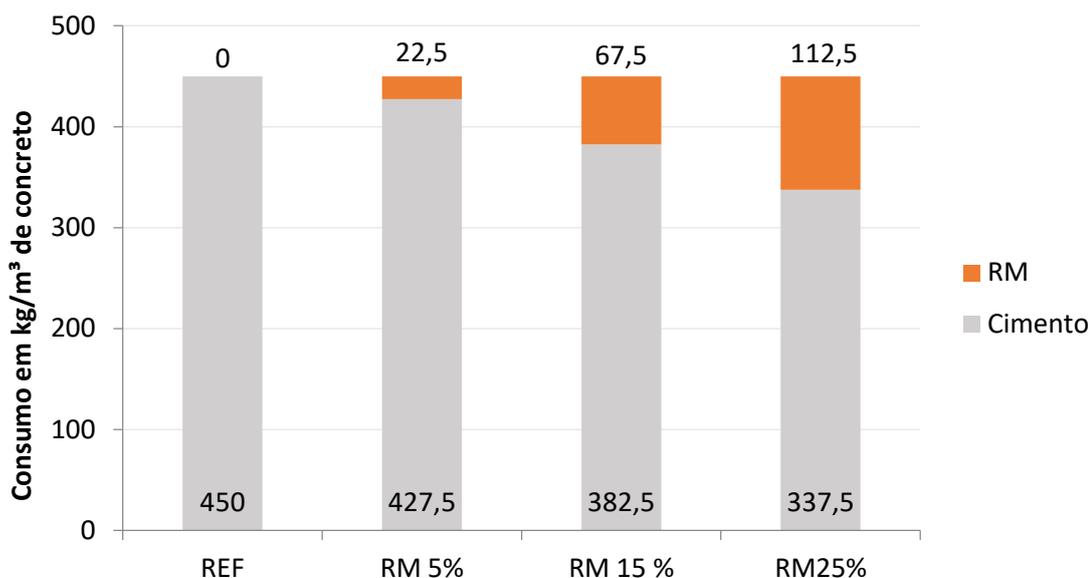


Figura 4.5: Consumo de cimento em kg/m³.

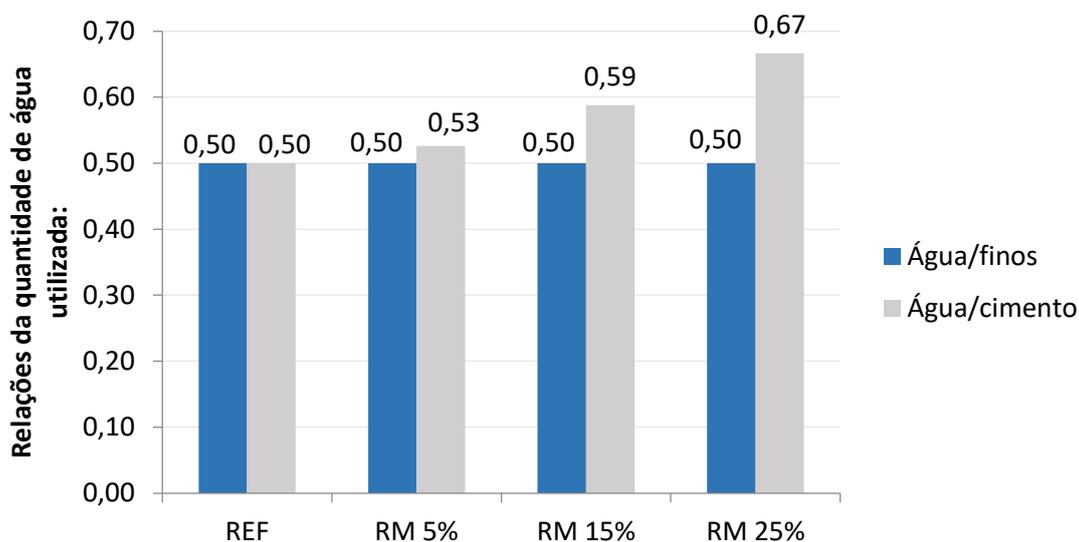


Figura 4.6: Proporção de água utilizada em relação aos finos e cimento.

Com relação ao uso do superplastificante, apesar da existência de estimativas iniciais, a quantidade final a ser utilizada só foi determinada durante a concretagem. Sendo adicionado gradativamente, o valor foi fixado assim que o concreto fosse bem-sucedido nos ensaios de caixa L, espalhamento, estabilidade visual e funil V. Essa quantidade pode ser expressa tanto em proporção ao total de cimento utilizado quanto em relação à quantidade de finos (cimento + resíduos de marmoraria) conforme é ilustrado na Figura 4.9.

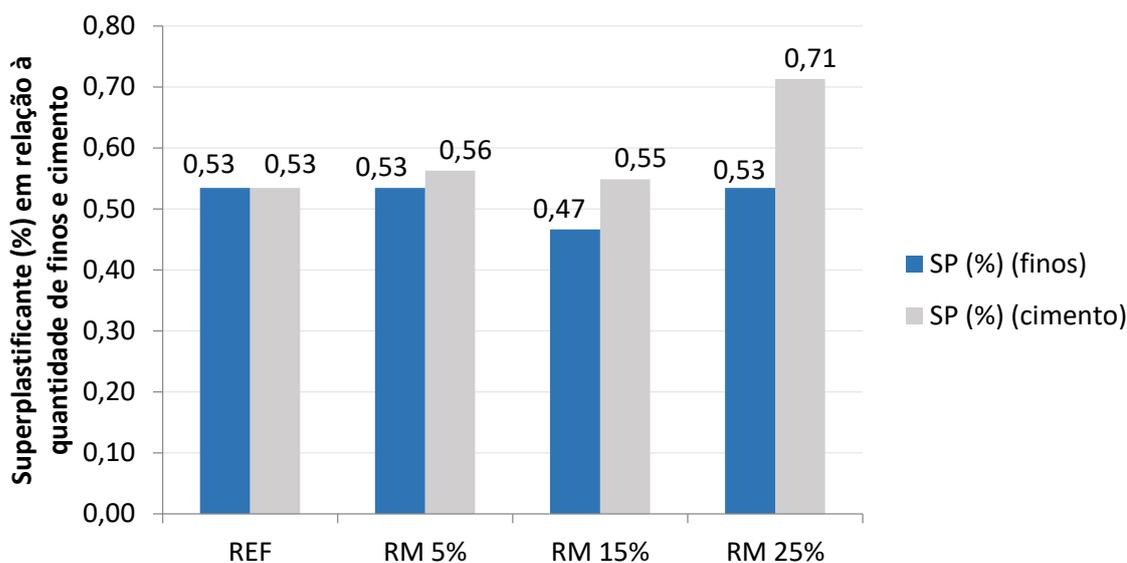
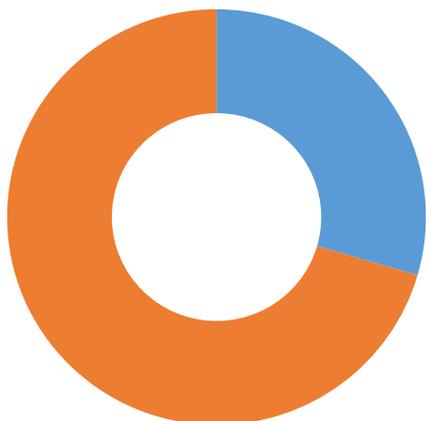


Figura 4.7: Quantidade de superplastificante em função do cimento e finos.

Deve-se observar que para os concretos REF, RM 5% e RM 25% a proporção do superplastificante em relação aos finos é a mesma: de 0,53%. Contudo, o RM 15% essa relação é menor, de 0,47%. Isso ocorreu em função do fato que a quantidade de superplastificante não era pré-fixada e durante a concretagem, já com 0,47% de superplastificante o RM 15% possuía valores adequados para a trabalhabilidade nos ensaios realizados. Além disso, o valor não foi elevado para 0,53% por receio de que essa quantidade extra de superplastificante pudesse facilitar uma incorporação de ar e segregação do concreto nos corpos de prova. Sendo que o primeiro evento ocorreu em tentativas anteriores.

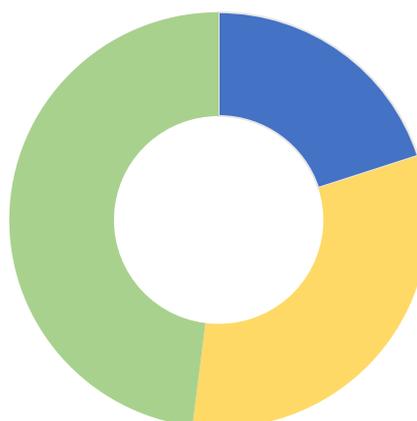
Já para o RM 25% essa quantidade de superplastificante não foi suficiente para se alcançar a trabalhabilidade desejada, optando-se por adicionar o superplastificante até 0,53% dos finos novamente. Sendo assim, o RM 15% é o único traço em que houve uma utilização diferente para o superplastificante, esse fator não impede as análises a serem realizadas, porém deve ser levado em consideração para serem realizadas.

Finalmente, sobre a quantidade de agregados utilizados, optou-se por utilizar uma quantidade que simultaneamente fosse economicamente viável enquanto que sempre mantendo proporções em que a coesão do concreto fosse mantida. Ao fim do processo 70,5% da massa do concreto era composta por agregados, enquanto 29,5% eram do cimento, RM, água e superplastificante. Dentre os próprios agregados 48% é de brita, 32% de areia média e 20% de areia fina, para cada um dos traços conforme indicado nas Figuras 4.10 e 4.11.



■ C+RM+SP+ÁGUA ■ Total Agregado

Figura 4.8: Massa de agregado em relação ao total.



■ Areia Fina ■ Areia Média ■ Brita 1

Figura 4.9: Proporção em massa entre os agregados.

4.2.2. Ensaios no estado fresco

Para a análise das propriedades no estado fresco foram realizados cinco ensaios. Esses ensaios foram realizados durante a concretagem e serviam para garantir a qualidade e trabalhabilidade do concreto autoadensável. Os ensaios foram o de caixa L, espalhamento, índice de estabilidade visual, funil V e massa específica.

4.2.2.1. Caixa L

O ensaio de caixa L segue a norma NBR 15823-4:2017 e obteve-se os seguintes resultados expressos na Figura 4.12.

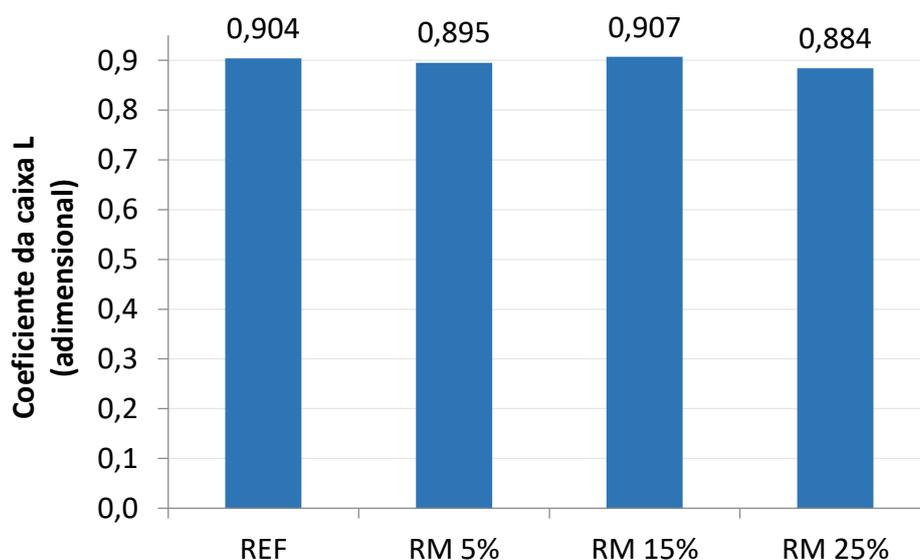


Figura 4.10: Coeficiente de caixa L do concreto fluido.

Segundo os dados o maior coeficiente para caixa L foi obtido pelo RM 15%, 0,907, enquanto o menor valor foi o do RM 25%, 0,884, (-2,53% em relação ao RM 15%). Portanto é perceptível que a utilização do resíduo de marmoraria exerce pouco efeito sobre a habilidade passante do concreto, sendo que todos os traços passaram com folga o limite mínimo de 0,8 para a trabalhabilidade de classe PL1.

4.2.2.2. Espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado com o cone de Abrams, seguindo a norma NBR 15823-2:2017, avaliando a fluidez do concreto. Para cada um dos traços os resultados são ilustrados na Figura 4.13.

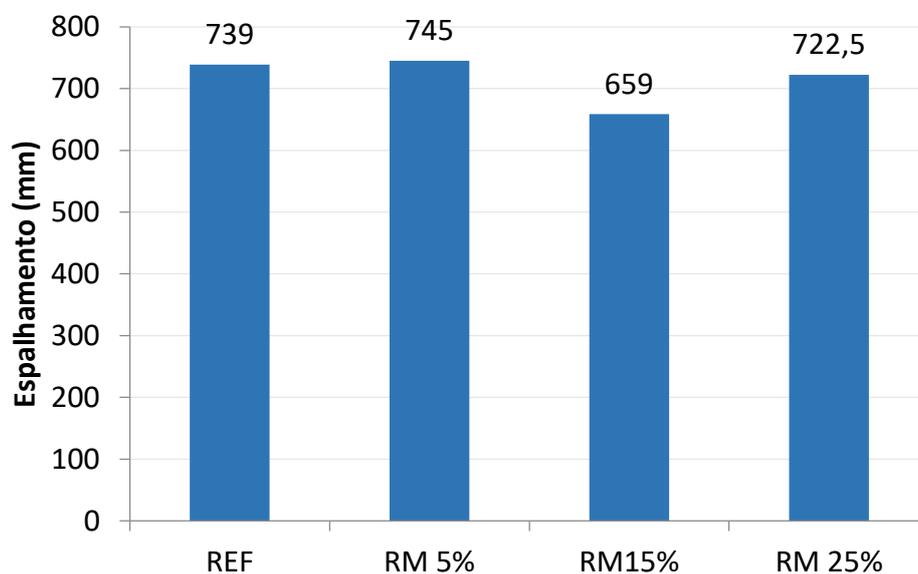


Figura 4.11: Espalhamento do concreto fluido

O maior espalhamento foi do RM 5%, 745 mm, enquanto o menor deles foi do RM 15%, 659 mm (11,5% menor). Os valores dos concretos REF, RM 5% E RM 25% foram todos muito próximos, sendo o RM 15% o único ponto significativamente divergente. No entanto, essa divergência dificilmente seria causada pela utilização do resíduo de marmoraria, dado que o próprio RM 25% apresenta um índice bem melhor e o próprio RM 5% apresenta um resultado ligeiramente melhor que o do concreto referência.

Esse resultado desviante é provavelmente derivado do fato que o uso de superplastificante foi proporcionalmente menor nesse traço, 0,47% contra 0,53% dos finos (cimento + RM) dos outros traços. Essa diferença resulta em uma significativa redução da fluidez do material. Ainda

assim, o RM 15% ainda chegou a ter um espalhamento de 659 mm, na iminência de adentrar a classe SF2 (de mínimo 660 mm).

Sendo assim, é possível concluir que é extremamente provável que com um uso maior de superplastificante (0,53% como nos outros traços) o concreto iria adentrar a classe SF1 para a realização de um concreto de alta qualidade e bastante fluido. Enquanto pelo próprio traço do RM 25% (com espalhamento de 722,5 mm) indica que o resíduo de marmoraria exerce pouca influência sobre o espalhamento (2,23 % menor do que o concreto referência).

Por fim, ainda há os dados relacionados ao tempo t_{500} , (tempo de escoamento até a massa de concreto atingir um escoamento de 500 mm de diâmetro). Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 4.14.

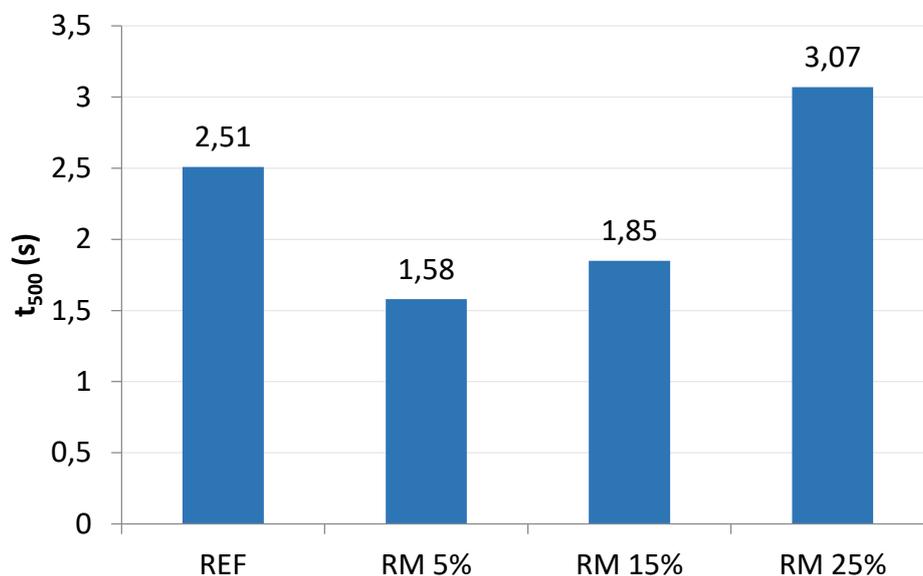


Figura 4.12: Tempo t_{500} (s) para cada traço.

Pelos resultados, os concretos RM 5% e RM 15% pertenceriam a classe VS1, enquanto o concreto REF e RM 25%, pertenceriam à classe VS2, segundo o critério da norma de um máximo de 2s para a classe VS1. Pelo o que os dados demonstram, o resíduo de marmoraria, principalmente no teor de 5%, ajudaria o concreto a escoar mais rapidamente. Contudo, em concentrações maiores (25%) ele passaria a ter um efeito oposto, ainda que próximo ao valor original do concreto referência.

Porém, também deve-se estar atento para o fato que existe uma margem maior para erro nessa análise do que em outros experimentos. Isso ocorre porque como o tempo é muito pequeno, o tempo de reação do executor do ensaio pode exercer uma influência mais significativa. Além

disso, a própria forma de como o ensaio é realizado (como a velocidade de retirada do cone e sua centralidade em relação ao círculo de 500mm) também pode exercer uma variação nos dados finais que pode não representar a verdadeira influência do RM.

4.2.2.3. Índice de Estabilidade Visual

O índice de estabilidade visual é determinado durante o mesmo ensaio que o de espalhamento, também segundo a norma NBR 15823-2:2017, mas focando na resistência à segregação do concreto fluido. A Figura 4.15 exibe as vistas superiores de cada um dos traços após o espalhamento.

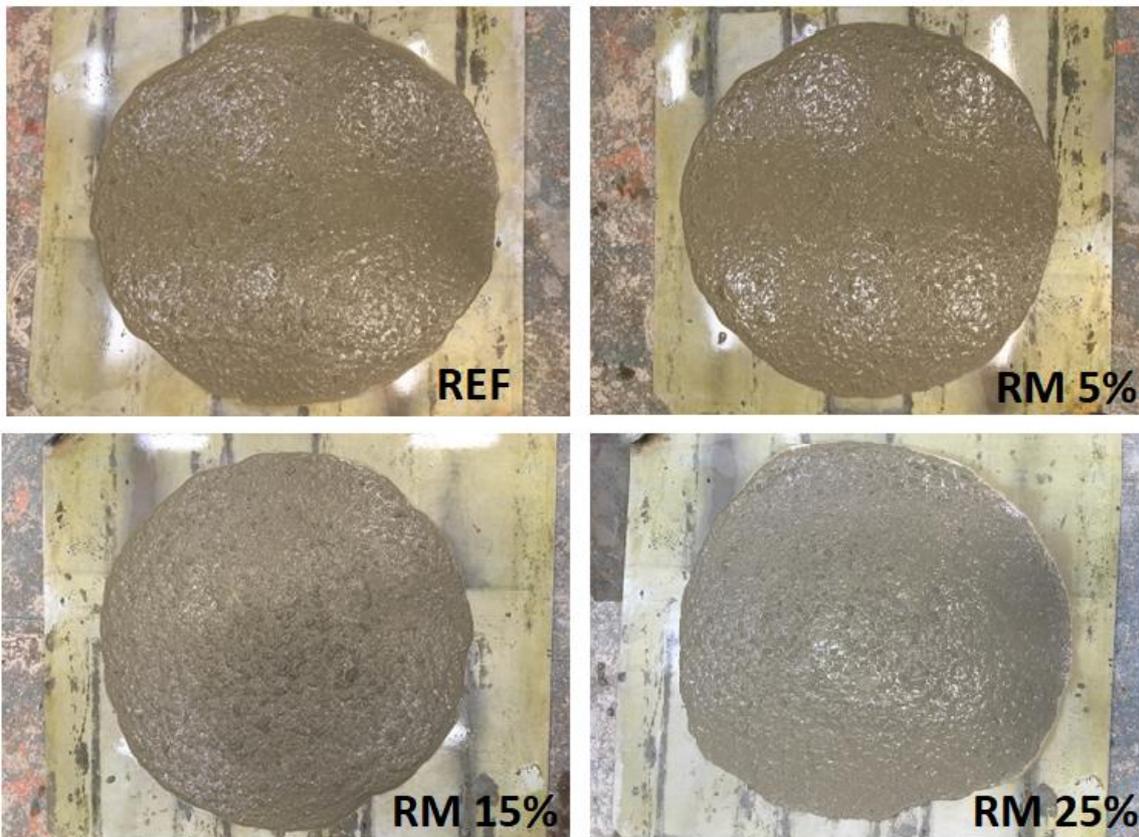


Figura 4.13: Vista superior dos ensaios de estabilidade visual.

Além das vistas superiores, também foram registradas as vistas laterais de cada traço, expostos abaixo, na Figura 4.16.

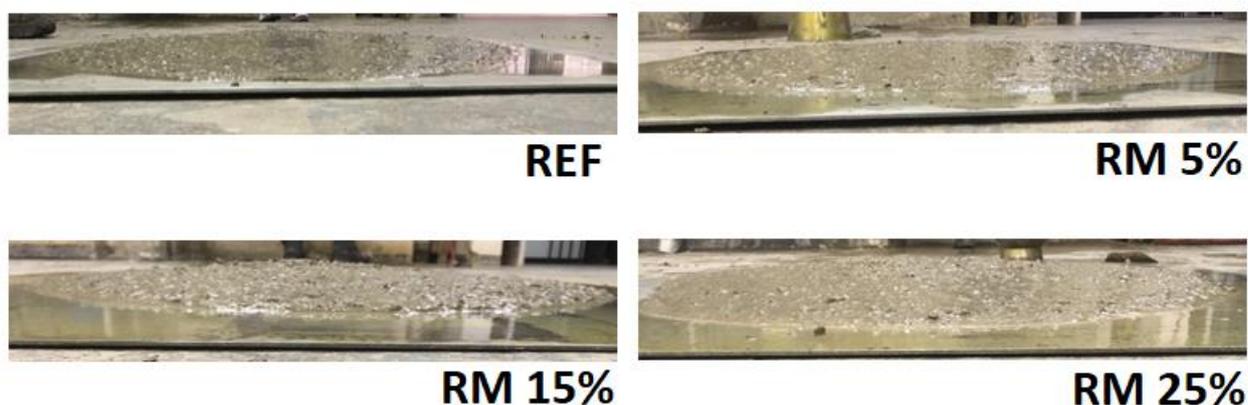


Figura 4.14: Vista lateral dos ensaios de estabilidade visual.

É possível perceber que em todos os traços os concretos eram ao menos estáveis, sem apresentar nenhuma tendência à segregação do agregado graúdo. Contudo, no concreto referência (REF), no RM 15% e no RM 25% houve uma leve tendência à exsudação. Isso era notável pela formação de um pequeno anel (ou parte de um) de pasta de concreto nas extremidades do círculo em que havia uma menor concentração de brita. Esse fenômeno não foi observado no RM 5%, em que não havia nenhuma tendência à exsudação ou segregação.

Sendo assim, o resumo dos resultados do ensaio pode ser expresso na Tabela 4.8:

Traço analisado	Classificação
REF	IEV 1 (Estável)
RM 5%	IEV 0 (Altamente estável)
RM 15%	IEV 1 (Estável)
RM 25%	IEV 1 (Estável)

Tabela 4.8: Índice de estabilidade visual de cada traço.

Percebe-se, tanto pelas imagens tanto pela tabela, que o resíduo de marmoraria teve pouco efeito sobre a estabilidade visual do concreto fluido sendo que, inclusive, quando em baixas quantidades (5% de substituição no experimento) ele inclusive melhorou o seu desempenho reduzindo a tendência à exsudação.

4.2.2.4. Funil V

O ensaio de Funil V é executado segundo a norma NBR 15823-5:2017, determinando a viscosidade do concreto autoadensável. Os resultados obtidos estão exibidos na Figura 4.17.

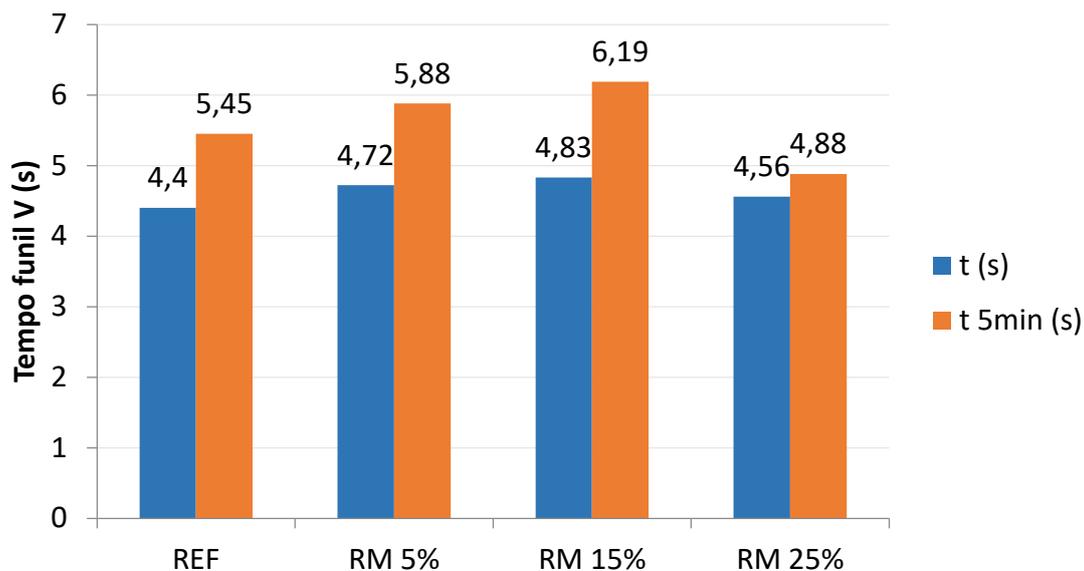


Figura 4.15: Tempo de escoamento no funil V do concreto fluido.

Com relação a t , com a liberação imediata do concreto, o menor tempo foi o de 4,40s com o traço REF, enquanto o maior tempo foi o do RM 15%, 4,83s (9,8% maior). Já para o $t_{5\text{min}}$, em que a liberação do concreto só ocorre 5 minutos depois, o menor tempo foi o do RM 25%, 4,88 s, enquanto o maior foi novamente o RM 15%, 6,19s (26,8% maior).

Pelos dados, é visível que todos os concretos facilmente adentram a classe VF 1, em que o menor tempo de escoamento é de 9s. Além disso, nesse ensaio ainda há uma precisão menor já que existe certa subjetividade na determinação de quanto o fluxo de concreto realmente acabou, além do próprio tempo de reação dos executores. Sendo assim, é necessária a execução de novos ensaios, e um estudo da interação física e química entre os compostos, para uma melhor compreensão dos resultados.

4.2.2.5. Massa Específica

A massa específica foi determinada segundo a NBR 9833:2008, utilizando-se um recipiente de volume fixo de 14,3 litros e medindo a massa com este completamente preenchido. Os resultados são exibidos na Figura 4.18.

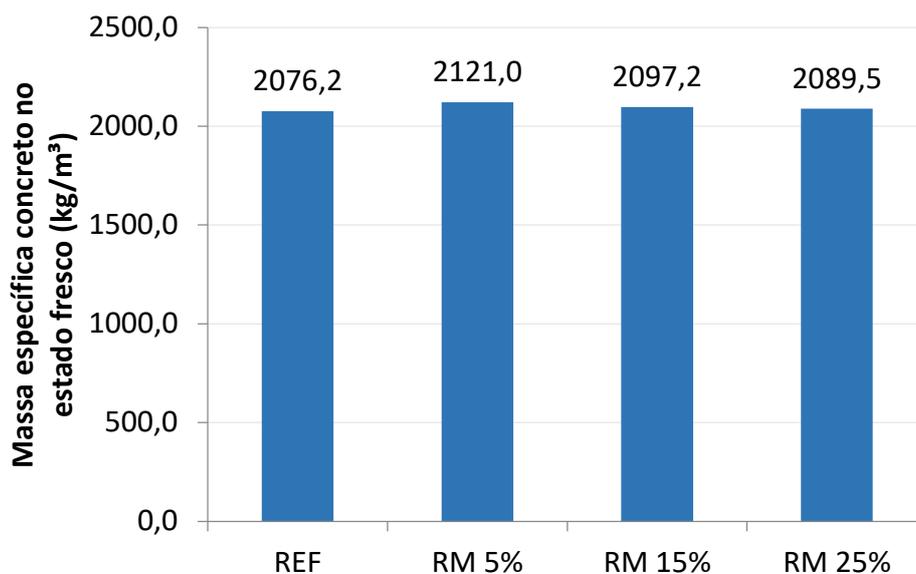


Figura 4.16: Massa específica do concreto no estado fresco.

O maior valor é o do RM 5%, 2121,0 Kg/m³, enquanto o menor valor é o do concreto referência, 2076,2 Kg/m³ (2,1% menor). Sendo assim, conclui-se que o efeito do resíduo de marmoraria é pouco significativo para a massa específica do concreto fresco e não gera nenhuma alteração realmente significativa.

4.3. Propriedades Mecânicas do Concreto no Estado Endurecido

Para o estudo das propriedades mecânicas foram realizados os ensaios de compressão axial simples e o ensaio de tração por compressão diametral.

4.3.1. Compressão Axial Simples

Os valores de resistência a compressão foram obtidos aos 7, 14 e 28 dias em conformidade com a norma ABNT NBR 5739:2007. Para cada idade, foram utilizados três corpos de prova. As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 demonstram os resultados dos ensaios para cada uma das idades:

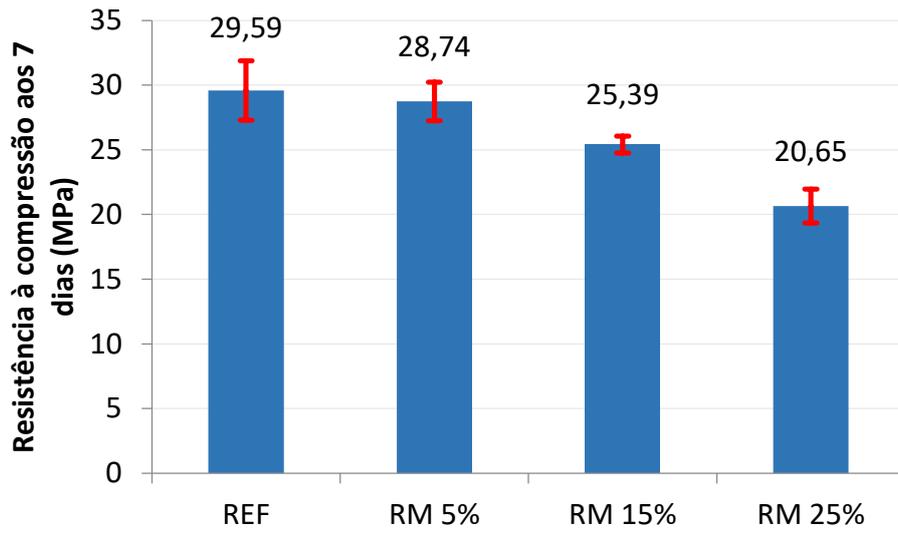


Figura 4.17: Resistência à compressão aos 7 dias de idade.

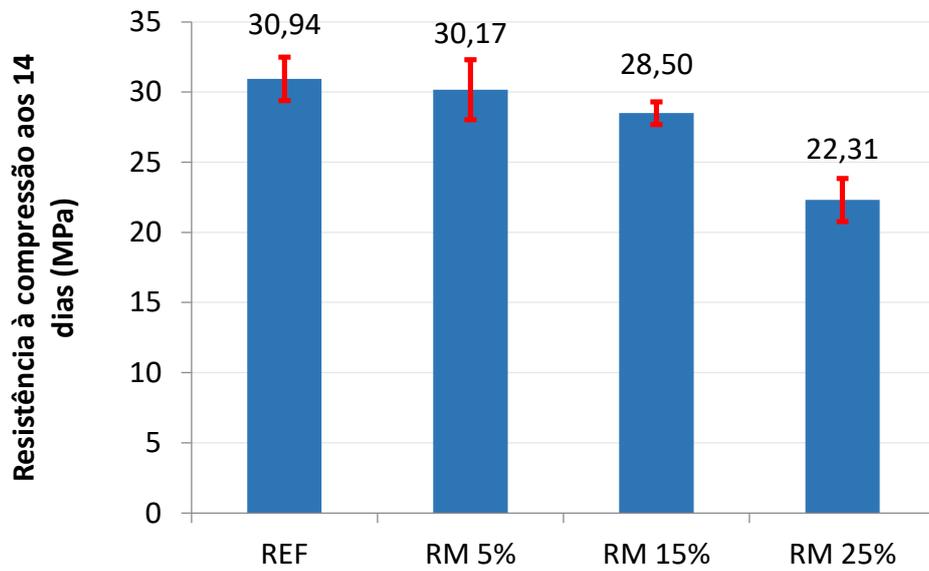


Figura 4.18: Resistência à compressão aos 14 dias de idade.

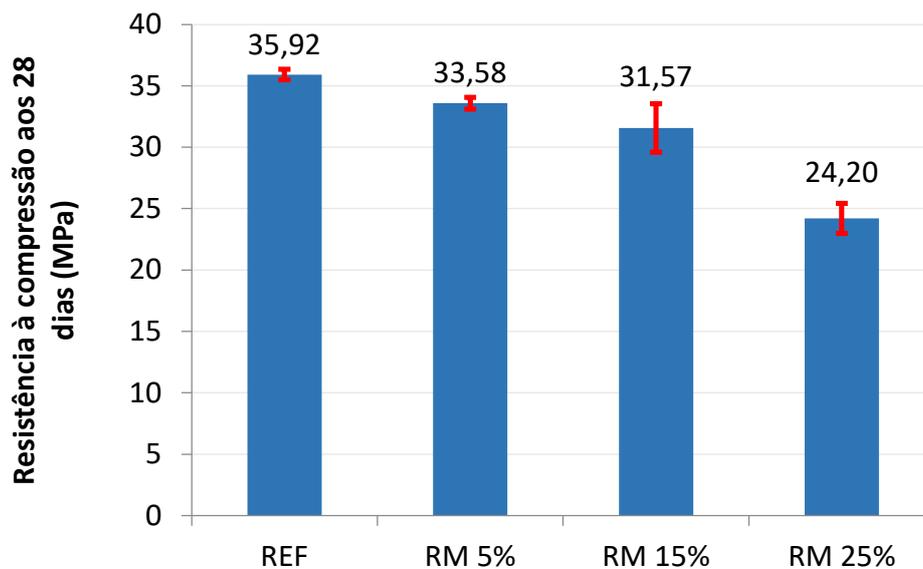


Figura 4.19: Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

4.3.2. Tração por Compressão Diametral

Também foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral para cada um dos traços aos 28 dias de idade. Os resultados são mostrados na Figura 4.22.

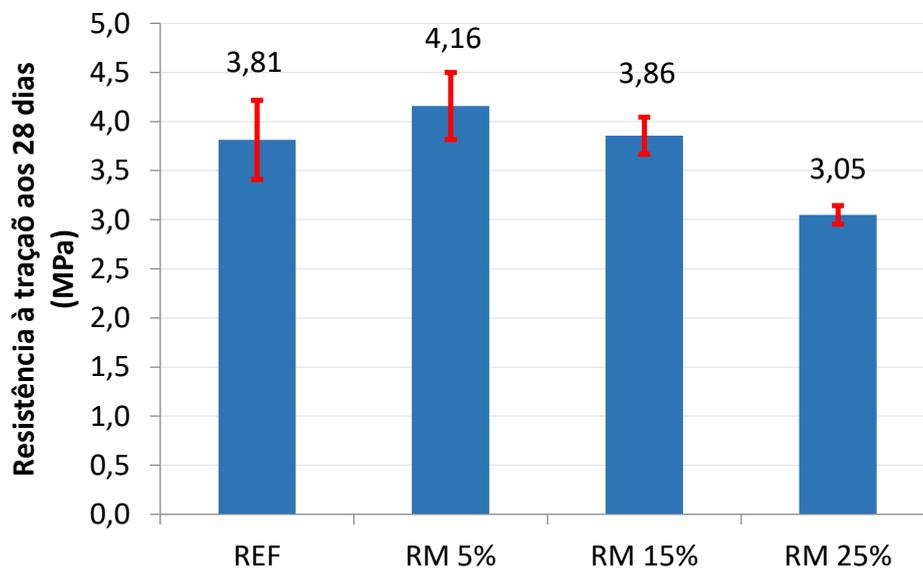


Figura 4.20: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

4.3.3. Análises

Com relação à análise da influência do resíduo de marmoraria sobre a resistência à compressão, foram realizadas análises de variância (ANOVA) para cada um dos ensaios. Para os ensaios de

compressão axial aos 7, 14 e 28 dias e o de tração os valores de p foram respectivamente 0,0004; 0,0006; 0,00001 e 0,0078, sendo o alfa = 0,05. Demonstrando que é estatisticamente significativa a influência da utilização do resíduo de marmoraria sobre os valores de resistência à compressão e tração.

Para os resultados de resistência à compressão, em todas as idades testadas, o concreto referência (REF) é o de maior valor, enquanto o RM 25% apresenta os menores valores. Para as idades de 7, 14 e 28 dias o traço apresenta respectivamente um desempenho 30,2%, 27,9% e 32,6% menor do que o concreto referência, para o ensaio de tração o RM 25% apresentou um desempenho 20,0% menor. A Figura 4.23 exibe cada um desses dados.

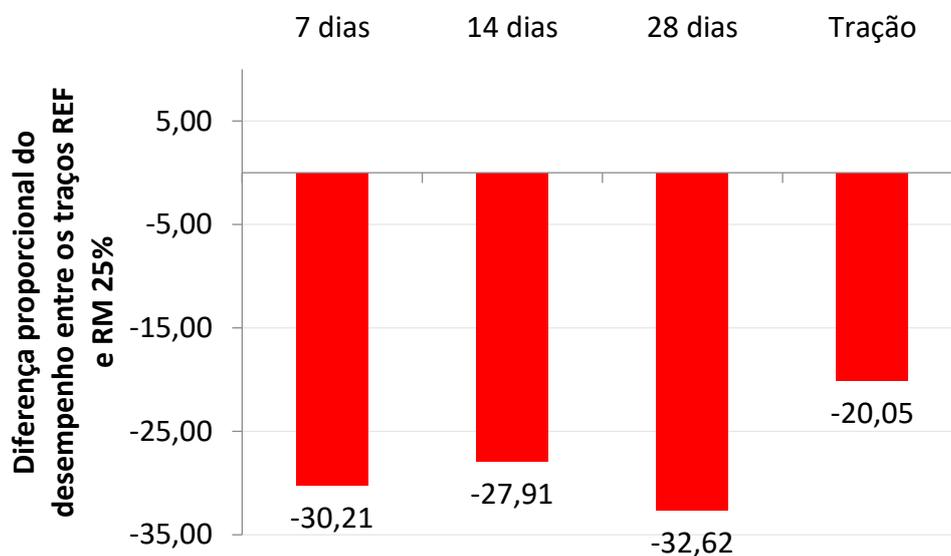


Figura 4.21: Diferença proporcional entre as resistências do traço REF e RM 25%.

Esses valores são extremamente significativos e não seria economicamente ou tecnologicamente viável fazer a substituição do cimento na proporção de 25%. Sendo assim, é necessário analisar o desempenho das outras proporções de substituição.

O concreto com 15% de substituição, para compressão nas idades de 7,14 e 28 dias apresenta respectivamente um desempenho 14,2%, 7,9% e 12,1% menor do que o do concreto referência. Já para o ensaio de tração, o traço reverte essa tendência e apresenta um desempenho 1,1% maior do que o concreto referência, conforme indicado na Figura 4.24.

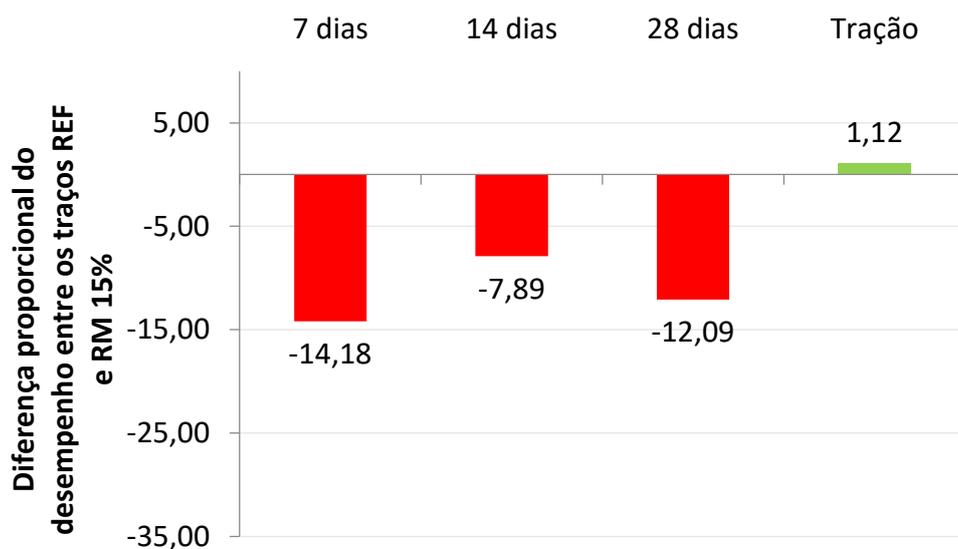


Figura 4.22: Diferença proporcional entre as resistências do traço REF e RM 15%.

Apesar do desempenho ligeiramente melhor em relação ao concreto referência, o concreto RM 15% ainda possui um desempenho significativamente pior para a resistência à compressão, variando na margem de 14,2% a 7,9%. Mesmo que este apresente um desempenho bem melhor do que o concreto RM 25%, ainda se percebe uma redução significativa em seu desempenho.

A norma NBR 6118 determina que para um concreto resistir à classe de agressividade ambiental III seu f_{ck} mínimo deve ser de 30 MPa (classe C30). Subtraindo-se os valores médios de f_{cj} por 1,65 vezes o desvio-padrão, obtemos os respectivos valores de f_{ck} para os traços: 35,2 MPa, 32,8 MPa, 28,3 MPa e 22,2 MPa, do REF ao RM 25% respectivamente. Mostrando que o REF e RM 5% atenderiam a esse critério, enquanto o RM 15% estaria na classe C25 e o RM 25% na C20.

Finalmente, é possível analisar o concreto RM 5%. Para a compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias ele apresentou, respectivamente, uma resistência 2,9%, 2,5% e 6,5% menor que o concreto referência. Contudo, para o ensaio de tração por compressão diametral ele apresentou um desempenho 9,1% maior. Todos os valores estão ilustrados na Figura 4.25.

Portanto, a maior redução de desempenho mecânico causado pelo concreto RM 5% é de apenas 6,51% aos 28 dias, o que é um resultado bem aceitável. O concreto RM 15%, aos 28 dias, teve uma redução de 12,09%, o que já é uma variação mais significativa, porém também potencialmente aceitável devido a ser utilizar 15% a menos de cimento.

Além dessa análise traço a traço, também é possível chegar a conclusões sobre a evolução das resistências ao longo do tempo. Todos esses dados podem ser sumarizados na Figura 4.26.

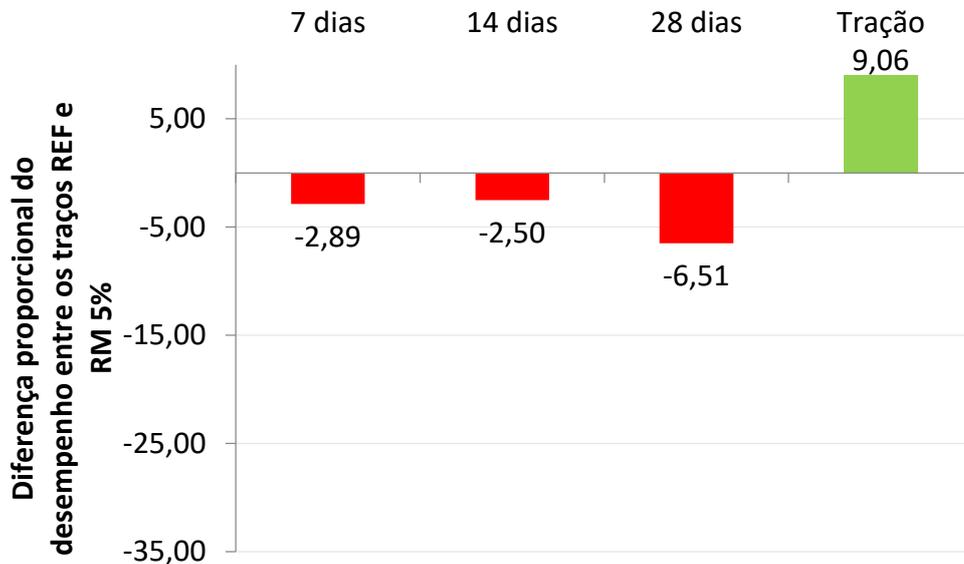


Figura 4.23: Diferencial percentual proporcional entre as resistências dos traços REF e RM 5%.

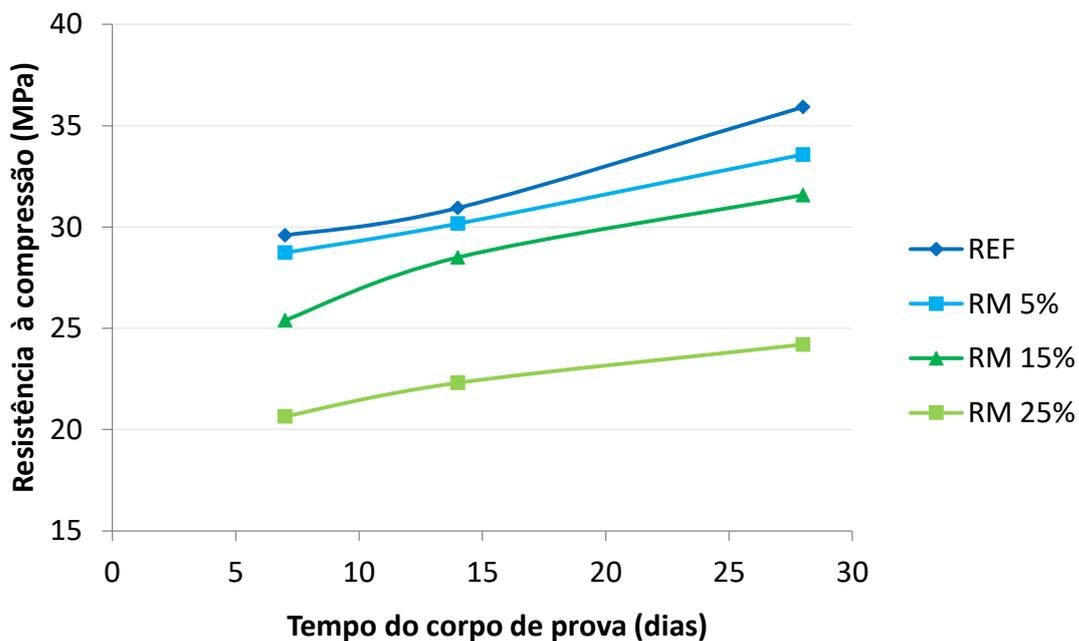


Figura 4.24: Evolução das resistências à compressão dos corpos de prova.

O gráfico indica que os traços tiveram curvas de evolução ligeiramente diferentes entre si. Para o concreto REF a diferença de resistência entre os 28 dias e os 14 dias é de aproximadamente 16,1%, enquanto é e 11,3%, 10,8% e 8,5% para os concretos RM 5%, RM 15% e RM 25%, respectivamente.

Sendo assim, mesmo que os concretos com resíduo de marmoraria apresentem uma boa resistência nas idades iniciais, para uma análise mais clara e diretiva é importante verificar como esse ganho de resistência no longo prazo, algo que está intimamente ligado com a durabilidade e desempenho de longo prazo das estruturas.

4.4. Propriedades de Durabilidade do Concreto

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos traços de CAA para avaliar a durabilidade do concreto, compreendida pelos ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica de quatro pontos.

4.4.1. Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão fornece parâmetros para avaliar o índice de vazios e a porosidade aberta do concreto, pela qual a água penetra no elemento. O ensaio foi realizado conforme a norma ABNT NBR 9778:2005, que define a absorção de água por imersão como o processo pelo qual a água é conduzida pelos poros permeáveis de um concreto, visto como um corpo sólido poroso. Esse fenômeno resulta no incremento de massa deste material sólido, devido à penetração da água nos poros, que pode ser comparada à sua massa no estado seco.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massas específicas de cada traço de concreto submetido ao ensaio.

	REF	RM 5%	RM 15%	RM 25%
Absorção de água por imersão (%)	6,57	6,36	6,81	7,58
Índice de Vazios (%)	12,84	12,68	13,43	14,70
Massa específica da amostra seca (g/cm³)	1,96	1,99	1,97	1,94
Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	2,08	2,12	2,11	2,09
Massa específica real (g/cm³)	2,24	2,28	2,28	2,27

Tabela 4.9: Análises do ensaio de absorção de água por imersão.

Com base nesses dados, observa-se que os valores de massas específicas entre os concretos foram muito semelhantes e próximos entre si, dificultando a comparação dos traços. De fato, a

Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro de massa específica real apresentou Valor-*p* igual a 0,2117, demonstrando a insignificância estatística da variação observada.

Com a substituição de 5% de cimento por RM, observou-se uma leve redução da absorção de água por imersão e do índice de vazios do concreto. Essa redução deve-se provavelmente ao efeito fíler do resíduo, que por sua vez provoca o empacotamento granulométrico da mistura, tornando-a mais densa. Com 15% de substituição, ambos esses parâmetros foram apenas ligeiramente superiores aos anteriores.

Com os mesmos dados, pode-se traçar o gráfico de absorção por imersão e de índice de vazios, em função do traço analisado, como ilustrado na Figura 4.27.

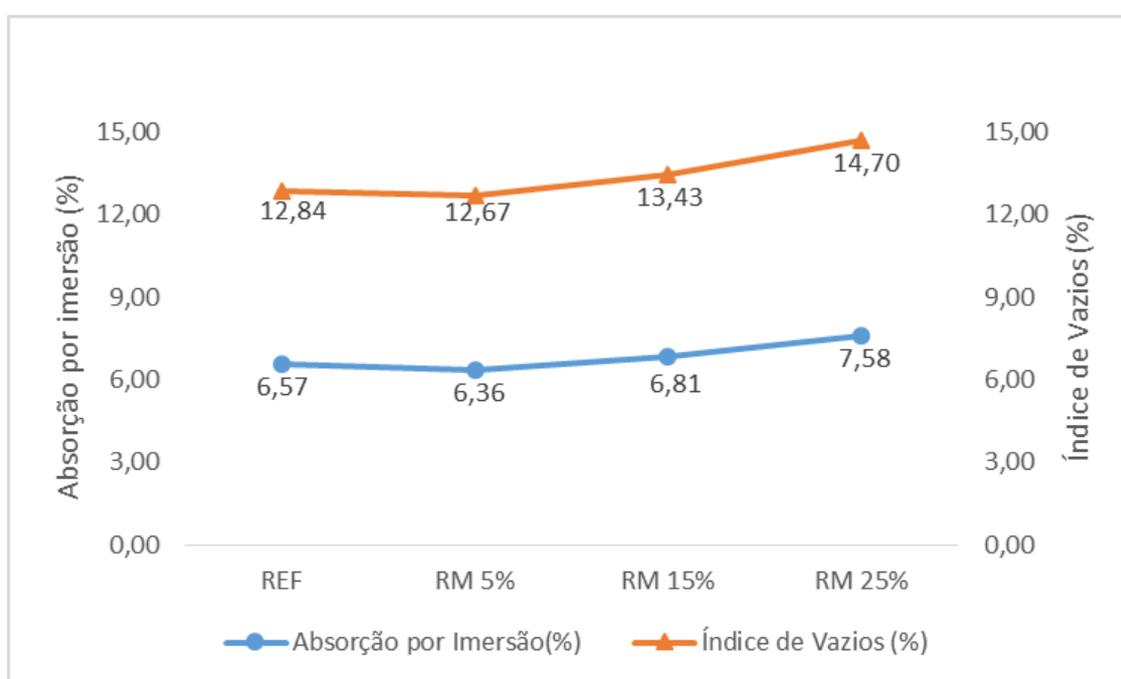


Figura 4.25: Relação da absorção de água por imersão e do índice de vazios.

Pode-se observar que a absorção de água por imersão, assim como o índice de vazios dos concretos, diminui levemente no traço de CAA com 5% de substituição, posteriormente aumentando da mesma maneira conforme aumenta a porcentagem de RM em substituição ao cimento. O valor da absorção por imersão, por exemplo, do CAA com 25% de substituição é 14,49% maior do que a absorção do CAA de referência e 16,02% maior do que a absorção do CAA com apenas 5% de substituição. Segundo Hameed *et al.* (2012), devido à elevada área de superfície específica do RM, o incremento da adição desse material resulta em uma maior absorção de água. Além disso, a substituição protagonizada do cimento pelo RM interfere na quantidade tanto dos reagentes quanto dos produtos das reações de hidratação do cimento restante.

A Análise de Variância (ANOVA) para a absorção por imersão resultou no valor-*P* igual a 0,0002 e no mesmo valor para o índice de vazios, o que significa uma influência estatisticamente significativa entre os valores dos traços analisados – essa influência pode ser explicada pelos valores destoantes do traço de 25% de RM em substituição ao cimento. Quando aplicada apenas aos traços REF, RM 5% e RM 15%, a mesma análise fornece um valor-*P* igual a 0,07 para ambos os parâmetros, o que confirma o caráter discrepante do traço RM 25% e o bom desempenho dos traços de 5% e 15% de substituição.

Pode-se classificar os concretos produzidos quanto à absorção de água por imersão e quanto ao índice de vazios ou porosidade, por meio de uma classificação proposta por Helene (1983), apresentada na Tabela 4.10.

PROPRIEDADE	QUALIDADE DO CONCRETO	<10%	≥10 e ≤15%	>15%
		Durável	X	
Índice de Vazios (%)	Normal		X	
	Deficiente			X
PROPRIEDADE	QUALIDADE DO CONCRETO	<4,2%	≥4,2 e ≤6,3%	>6,3%
		Durável	X	
Absorção de água (%)	Normal		X	
	Deficiente			X

Tabela 4.10: Classificação de um concreto conforme o índice de vazios e a absorção de água por imersão.

De acordo com essa classificação, todos os traços de CAA produzido são considerados normais quanto ao índice de vazios (porosidade) e deficientes quanto à absorção de água por imersão. Acredita-se que esse comportamento se deve principalmente à deficiência do agregado graúdo utilizado, cuja lamelaridade e descontinuidade resultam em maior dificuldade de os materiais finos preencherem os vazios entre os grãos de agregados, o que acarreta maior facilidade da água em penetrar por esses poros que estão interligados entre si.

4.4.2. Absorção de Água por Capilaridade

A norma ABNT NBR 9779:2012 estabelece o método de ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade através de ascensão capilar pelos poros do concreto. A Figura 4.28 contém os resultados médios dos valores de absorção por capilaridade de cada traço estudado em função do tempo de pesagem das amostras. Pode-se observar que, nas primeiras horas de ensaio, os traços REF e RM 25% apresentaram valores de absorção semelhantes, assim como os traços RM 5% e RM 15%, dificultando a análise nesses primeiros momentos. Com o decorrer do ensaio, estabeleceu-se o comportamento dos traços analisados escritos em ordem crescente de absorção.

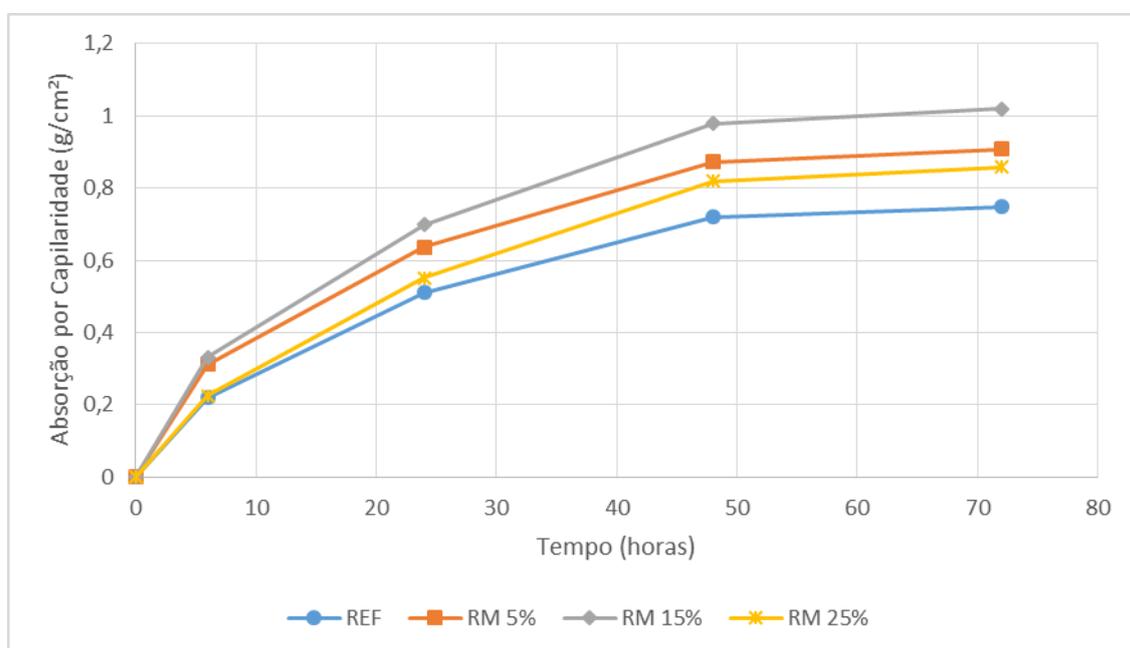


Figura 4.26: Absorção de água por capilaridade em função do tempo.

Inesperadamente, o traço com maior teor de RM, 25% de substituição, apresentou os menores valores de absorção por capilaridade dentre os traços com presença de RM. Simultaneamente, o traço RM 15% assumiu os maiores valores de absorção, seguido pelo traço RM 5%, sendo sucedido pelo traço RM 25% e, por fim, o traço REF com os menores valores de absorção por capilaridade em todos os horários medidos de ensaio.

Pode-se considerar que as partículas finas de RM preenchem parcialmente os vazios deixados entre os grãos, mas não os desconectam completamente; e quanto maior a quantidade de materiais finos, mais poros serão desconectados. No entanto, a redução do consumo de cimento da mistura reduz também a quantidade dos produtos de hidratação, principais responsáveis pela separação desses poros.

Foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) para cada horário de medição. De todas elas, o menor Valor-*P* encontrado foi de 0,3060 para a medição de 6h, e o maior Valor-*P* foi de 0,3799 para as 24h. Dessa forma, conclui-se que o teor de RM em substituição ao cimento não exerce influência significativa na absorção capilar do concreto em nenhum horário medido de ensaio até às 72h.

Para complementar essa análise estatística, observou-se também que, para as medições feitas às 72h de ensaio, o Valor-*P* da propriedade de absorção de água por capilaridade calculado entre os quatro traços foi de 0,3751; e o Valor-*P* calculado apenas para os traços REF, RM 5% e RM 15% foi de 0,1974. O traço RM 25% foi excluído da última análise para comprovar que a sua aparente discrepância em relação aos outros traços não exerce, contudo, influência significativa na absorção de água por capilaridade.

No entanto, é importante observar também o caráter rapidamente crescente de todas as curvas que descrevem a absorção de água por capilaridade em função do tempo. Isso demonstra a influência dos poros capilares interconectados no concreto sobre a sua absorção de água por capilaridade, enfatizando os efeitos que em uma estrutura de concreto imerso mesmo que a uma fina lâmina d'água.

Na Figura 4.29 são apresentados os resultados da absorção por capilaridade calculada conforme a norma para as massas medidas após 72h da imersão, assim como da ascensão capilar medida nos corpos de prova após o rompimento por compressão diametral. Os valores de absorção de água por capilaridade apresentaram valores diretamente relacionados aos de ascensão capilar, ou seja, os traços que absorveram mais água também tiveram maior ascensão, e vice-versa – o que corrobora a ideia de que a água medida no interior dos elementos de concreto foi absorvida pelos poros capilares interligados.

O crescimento da ascensão capilar concomitante ao crescimento do teor de RM, pelo menos para os três primeiros traços, pode ser explicado pelo preenchimento parcial dos poros capilares, tornando-os mais finos. Assim, os meniscos formados entre a água e as paredes dos poros sofrem maior tensão superficial, o que os força a elevar-se mais sobre essas paredes, e a água alcança maior ascensão capilar. A redução da ascensão capilar na análise do traço RM 25% poderia ser explicada pela ampliação da porosidade devida à redução excessiva dos produtos de hidratação, o que reduz a tensão superficial entre os poros sobre a água.

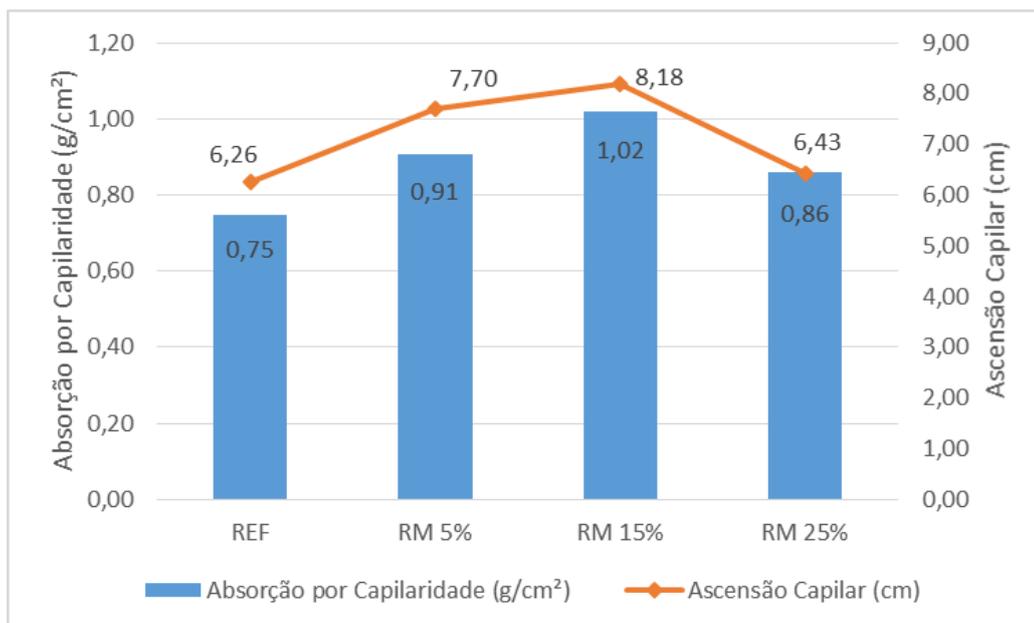


Figura 4.27: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

4.4.3. Resistividade Elétrica

Os ensaios de resistividade elétrica foram executados com o intuito de avaliar o processo de corrosão eletroquímica das armaduras inseridas no concreto, relacionada fortemente à permeabilidade de fluidos e à difusibilidade de íons pelos poros do material, nos quais a corrente elétrica é conduzida principalmente quando estes espaços estão preenchidos com água.

Na presente pesquisa, a resistividade elétrica do concreto foi determinada por meio de dois métodos distintos: a resistividade elétrica volumétrica (método de dois eletrodos) e a resistividade elétrica superficial (método dos quatro eletrodos de Wenner). Ambos os ensaios foram executados com aparato desenvolvido conforme as normas AASHTO TP 119-2015 e ASTM G57-06:2012, respectivamente. Para cada corpo de prova, em cada método, foram feitas cinco leituras e a resistividade adotada é a média das cinco calculadas.

Os resultados de resistividade elétrica, tanto volumétrica quanto superficial, estão apresentados na Figura 4.30.

Pela análise dos dados, observa-se que o traço de referência apresentou maior resistividade elétrica em ambos os métodos: o valor da resistividade superficial de referência é 20,10% maior que o traço com 5% de RM, 38,96% maior que o traço com 15% e 58,41% maior que o traço com 25%; já a resistividade volumétrica do traço de referência é 88,51% maior que a do traço

com 5% de RM, 78,26% maior que a do traço com 15% e 134,29% maior que a resistividade volumétrica do traço com 25% de substituição do cimento Portland pelo RM.

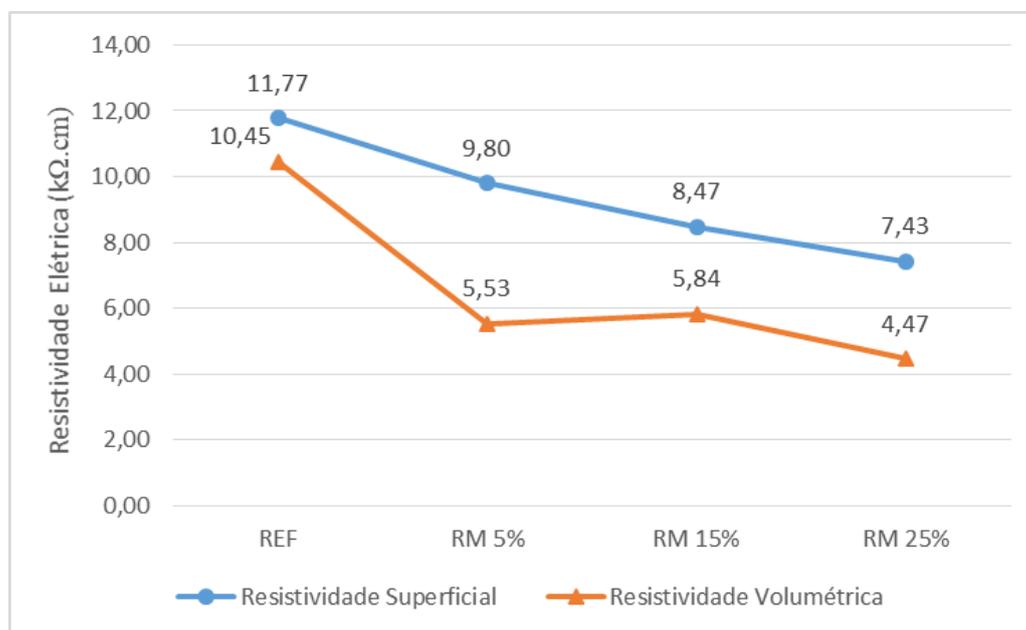


Figura 4.28: Resultados do ensaio de Resistividade Elétrica.

A análise de variância (ANOVA) resultou em um Valor- P de 0,003 para ambos os métodos, o que confirma a influência significativa da substituição cimentícia sobre a resistividade do CAA. O aumento do teor de RM significa a redução do teor de cimento da mistura, visto que o resíduo foi acrescentado em substituição ao aglomerante. Assim, os produtos das reações de hidratação do cimento sofrem gradativa redução, o que também afeta sensivelmente o valor da resistividade elétrica.

Pode-se classificar os concretos quanto à resistividade elétrica de acordo com a norma CEB – 192 e o boletim europeu CE – COST 509, quanto à probabilidade de corrosão das armaduras, e de acordo com a norma AASHTO TP 119-2015, quanto à penetração de cloretos. Esses limites estão descritos nas Tabelas 3.11 e 3.12. De acordo com cada uma dessas indicações, os concretos produzidos podem ser classificados, conforme a Tabela 4.11

		Risco de Corrosão			Permeabilidade a Cloretos	
		Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	CEB - 192	COST 509	AASHTO TP 119
Superficial	<i>REF</i>	11,77		Baixo	Moderado	
	<i>RM 5%</i>	9,80		Alto	Alto	
	<i>RM 15%</i>	8,47		Alto	Alto	
	<i>RM 25%</i>	7,43		Alto	Alto	
Volumétrica	<i>REF</i>		10,45	Baixo	Moderado	Baixa
	<i>RM 5%</i>		5,53	Alto	Alto	Moderada
	<i>RM 15%</i>		5,84	Alto	Alto	Moderada
	<i>RM 25%</i>		4,47	Muito Alto	Alto	Alta

Tabela 4.11: Resultados e classificações de cada traço de concreto produzido quanto à resistividade elétrica.

Santos (2006) e Silva (2016) explicam que a resistividade elétrica está intimamente relacionada às características da microestrutura do concreto, como a porosidade total, a distribuição do tamanho dos poros e a condutividade da solução aquosa presente nesses poros; esses autores encontraram maiores valores de resistividade elétrica relacionados a menores porosidades. Assim, a permeabilidade do concreto está relacionada à sua porosidade e, portanto é influenciada pelos fatores que alteram o volume e a conectividade dos poros capilares.

Por sua vez, um importante fator que afeta o volume total, as dimensões e a interligação dos poros são as características dos agregados, como a forma e a textura, inclusive do agregado graúdo (NEVILLE, 2015). Como foi visto na seção 4.1.3, o agregado graúdo utilizado na mistura de todos os traços de concreto analisados estava comprometido pelo formato lamelar das suas partículas e pela descontinuidade da sua distribuição granulométrica. Essa intercorrência pode explicar a baixa resistividade elétrica dos concretos e as respectivas consequências adversas.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho avaliou os efeitos do uso de resíduo de marmoraria (RM) em substituição ao cimento Portland para a produção de concretos autoadensáveis, avaliando suas propriedades no estado fresco, mecânicas e, principalmente, de durabilidade. Pode-se concluir que, até certo teor de substituição, o uso de resíduo de marmoraria é sim factível e não causa prejuízos significativos ao concreto.

Com relação às propriedades no estado fresco, pôde-se observar que a substituição por RM pouco influenciou os dados. Tanto para a caixa L, funil V, massa específica e índice de estabilidade visual, o RM, em qualquer teor, não impediu o concreto de se adequar às classes de qualidade desejadas, nem demonstrou alteração negativa significativa para os dados.

Para o ensaio de espalhamento, pôde-se observar que para o RM 15%, o único a não se classificar na classe de SF1, é bem mais provável que o efeito tenha sido pela menor quantidade de superplastificante, dado que o RM 25%, quando com 0,53% do aditivo, alcançou valores bem similares ao REF e RM 5%.

Acerca dos ensaios mecânicos, é perceptível que o resíduo de marmoraria não consegue dar ao concreto a mesma resistência à compressão do que o cimento. No entanto, quando em baixos teores, essa perda de resistência é plenamente aceitável e não compromete a qualidade do concreto. Em relação ao concreto de referência, o f_{cj} do traço com 5% de substituição foi apenas 6,51% menor, porém houve um ganho de 9,06% na tração. Com teores maiores (15% e 25%) as perdas já foram demasiadamente significativas.

Finalmente em relação à durabilidade dos concretos, diferentes ensaios indicaram diferentes perspectivas sobre a utilização do resíduo. Para o ensaio de absorção por imersão os resultados REF, RM 5% e RM 15% foram muito próximos, sendo o RM 5% o melhor dentre eles (com uma menor absorção e índice de vazios) e apenas o RM 25% apresentava um desempenho significativamente pior.

Contudo, para o ensaio de absorção por capilaridade, todos os traços com o resíduo apresentaram uma absorção significativamente maior do que o REF, sendo que dentre eles o menor resultado de absorção e ascensão capilar foi o do RM 25%. Porém, como foi indicado pela análise ANOVA, havia demasiadas variações dentro de cada grupo em comparação com as diferenças entre eles ($p = 0,3751$), fazendo com que não se pudesse estatisticamente afirmar que tais resultados ocorressem em função da substituição por resíduo de marmoraria.

Sobre os ensaios de resistividade, o padrão observado foi de que quanto maior o teor de resíduo de marmoraria, menor é a resistividade elétrica oferecida pelos corpos, o que é um indicativo sobre a existência de mais poros e de suas interconexões, o que contribui para maior tendência à corrosão das armaduras e à penetração dos íons cloreto de elevado potencial de deterioração. As classificações dos resultados relacionados à resistividade foram especialmente preocupantes quanto ao risco de corrosão das armaduras, em que apenas os traços de referência apresentaram baixo risco de corrosão (CEB-192) ou permeabilidade de cloretos (AASHTO TP 119).

No entanto, uma informação importante a ser considerada é que todos os traços foram produzidos com agregado graúdo inadequado, uma vez que a caracterização desse material demonstrou o seu caráter lamelar quanto à forma e descontínuo quanto à granulometria. Esse fato provocou a maior porosidade de todos os traços de concreto, o que certamente afetou significativamente tanto os resultados mecânicos quanto os de durabilidade.

Sendo assim, em geral o RM proporciona poucos efeitos deletérios sobre o concreto autoadensável quando na proporção de substituição de 5% do cimento, inclusive podendo gerar alguns benefícios significativos, pelo seu efeito fíler, como o aumento na resistência à tração e melhorias na estabilidade visual. Isso também pode ajudar fabricantes de concreto a reduzirem seus custos e, simultaneamente, resolver o problema ambiental gerado pelo RM.

Infelizmente, para a substituição em maiores teores (15% e 25%), alguns efeitos deletérios passaram a afetar as propriedades do concreto, não sendo o resíduo de marmoraria capaz de compensar a perda de concreto. Isso ocorre principalmente em termos de resistência mecânica e da durabilidade, e em especial com relação à resistividade elétrica dos elementos de concreto, não sendo recomendado seu uso em tais proporções.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios também com outros teores de RM, como 10% e 20% de substituição, para se ter um melhor entendimento do material e verificar se o concreto seria tecnicamente viável;
- Estudar a durabilidade do concreto com ensaios de carbonatação e migração de cloretos, para uma análise mais completa do material;
- Realizar o ensaio de módulo de elasticidade dos corpos de prova, para verificar possíveis alterações no comportamento estrutural do concreto;
- Possibilitar a utilização de uma diferente configuração dos agregados (evitando agregado graúdo lamelar ou com descontinuidades), verificando a influência sobre o sistema de poros e a durabilidade;
- Analisar a resistência à compressão e a durabilidade em idades mais avançadas, certificando-se do ritmo de evolução de suas propriedades.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 9202: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (n° 325)**. Rio de Janeiro. 1985

_____. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (no 200)** Rio de Janeiro. 1991.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro. 1997.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro. 2002.

_____. **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e Massa específica**. Rio de Janeiro. 2005.

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

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

_____. **NBR 9833: Concreto Fresco - Determinação da Massa Específica e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico**. Rio de Janeiro. 2008a.

_____. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro. 2008b.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro. 2009a.

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

_____. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro. 2009c.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

_____. **NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland.** Rio de Janeiro. 2011a.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2011b.

_____. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 15823-1: Concreto Autoadensável - Parte 1: Classificação, Controle e Recebimento no Estado Fresco.** Rio de Janeiro. 2017a.

_____. **NBR 15823-4: Concreto Autoadensável - Parte 4: Determinação da Habilidade Passante - Métodos da Caixa L e da Caixa U.** Rio de Janeiro. 2017b.

_____. **NBR 15823-5: Concreto Autoadensável - Parte 5: Determinação da Viscosidade - Método do Funil V.** Rio de Janeiro. 2017c.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete,** 2007.

ASTM. **G57:2012 - Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method,** 2012.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de Durabilidade do Concreto Auto-Adensável obtido com Resíduo de Corte de Mármore e Granito**. 2008. Universidade Federal de Alagoas - UFAL. Maceió, AL, 2008. Disponível em: http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Pedro%20Gustavo%20dos%20Santos%20Barros.pdf.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, v. 55, p. 18–32, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132009000100003&lng=pt&tlng=pt.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do Concreto Auto-Adensável visando sua aplicação em Elementos Estruturais**. 2006. Universidade Federal de Alagoas – UFAL, 2006.

CELIK, K.; MERAL, C; GURSEL, A.P.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P.J.M. **Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder**. Cement and Concrete Composites, v. 56, n. February 2015, p. 59–72, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514002054?via%3Dihub>.

CHINELATTO, A. S. A.; CHINELATTO, A.L.; FERREIRA, D.E.M.; GRALIK, G. **Estudo da viabilidade do uso de resíduo de polimento de rochas ornamentais em porcelanas**. Revista Matéria, v. 20, n. 4, p. 1075–1086, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n4/1517-7076-rmat-20-04-01075.pdf>

DEMIREL, B. **The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete**. International Journal of the Physical Sciences, v. 5, n. 9, p. 1372–1380, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228506057_The_effect_of_the_using_waste_marbl

[e dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete.](#)

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto.** 2015. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória - ES., 2015. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4004/1/tese_9466_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Mestrado%20PPGEC%20UFES%202015.pdf.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** European Federation of National Associations. Farnham, Surrey. 2002. Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use.** European Federation of National Associations, p. 63, 2005. Farnham, Surrey. Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R.. **Concreto auto-adensável: Uma nova tecnologia à disposição da construção civil de Goiânia,** Realmix, 2005.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de Concreto Autoadensável.** 1. ed. São Paulo: Editora Pini LTDA, 2009. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgsXUAL/metodos-dosagem-concreto-autoadensavel>.

HAMEED, M. S.; SEKAR, A.S.S.; BALAMURUGAN, L.; SARASWATHY, V. **Self-compacting concrete using Marble Sludge Powder and Crushed Rock Dust.** KSCE Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 6, p. 980–988, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257774525_Self-compacting_concrete_using_Marble_Sludge_Powder_and_Crushed_Rock_Dust.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 39 Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão das armaduras para concreto armado.** São Paulo, IPT, PINI,

1986.

HELENE, P. R. L. **La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón**. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, v. 10, n. 83, p. 25–35, 1983. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2016/09/HelenePauloR%20L1983.pdf>.

MARIANO, A. M.; SANTOS, M. R. **Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora**. AEDEM International Conference, Calabria (Italy), p. 427–443, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ari_Mariano/publication/319547360_Revisao_da_Literatura_Apresentacao_de_uma_Abordagem_Integradora/links/59beb024aca272aff2dee36f/Revisao-da-Literatura-Apresentacao-de-uma-Abordagem-Integradora.pdf.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2008, 61-65.

MIRANDA, L. R. M. De. **Carbonatação em Concretos Autoadensáveis com Substituições de Cimento Portland por Adições Minerais**. 2018. Universidade de Brasília. Brasília - DF, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.unb.br/handle/10482/32610>.

MONTANI, C. **XXVIII Relatório mármore e rochas no mundo 2017 - Dossiê Brasil 2017**. AbiRochas, Brasília, 2017. Disponível em: http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/dossie/Dossie_Brasil_2017.pdf.

NEGREDO, A. S. **Durabilidade de concretos com Resíduo de Marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. Universidade de Brasília, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/32943>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. edição. Editora Pini. São Paulo, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª edição. Porto Alegre, 2013.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self Compacting Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 2, p. 5–15, 2003. Disponível em:

http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/d/d9/Okamura_e_Ouchi_%282003%29.pdf.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análises**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. Disponível em: <https://bit.ly/2KwlaFR>.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. **Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development**. Journal of Cleaner Production, v. 121, p. 19–32, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616002043?via%3Dihub>.

SANGALLI, T.; BRITES, B.G.; NEIVOCK, M.P.; FORMAGINI, S. **Confecção de Concreto Autoadensável com a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de granito e mármore**. Anais 55º Congresso Brasileiro de Concreto, p. 1–16, Ibracon, 2013.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Universidade de Brasília, 2006. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/5188/1/dissertacao%20LOURDIMINE%20SANTO%20S.pdf>.

SHEKARCHI, M.; TADAYON, M.; CHINI, M.; HOSEINI, M.; ALIZADEH, R.; GHODS, P.; MONTAZER, S.H. **Predicting chloride penetration into concrete containing silica fume, with measuring the electrical resistivity of concrete**. In. 4º International Conference on Concrete under Severe Conditions. CONSEC'04. Proceedings. Seoul, Korea, 2004.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. 2016. Universidade Federal de Goiás, 2016. Disponível em: https://www.eec.ufg.br/up/140/o/RESISTIVIDADE_EL%C3%89TRICA_SUPERFICIAL_D_O_CONCRETO_INFLU%C3%8ANCIA_DA_CURA..pdf.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3918/000450678.pdf>.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. 1ª ed. São Paulo: EDITORA PINI LTDA, 2008.