

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DIOGO WAGMACKER NASCIMENTO

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE
MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MARIANA-MG,
COMO PIGMENTO E NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE
CIMENTO PORTLAND**

VITÓRIA – ES

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DIOGO WAGMACKER NASCIMENTO

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE
MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MARIANA-MG,
COMO PIGMENTO E NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE
CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia civil, na área de concentração construção civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Geilma Lima Vieira

Coorientadora: Prof^a Dr^a Cláudia Rodrigues Teles

VITÓRIA – ES

2018

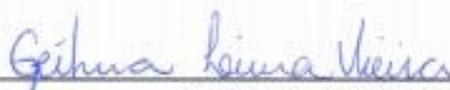
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO COMO PIGMENTO E NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

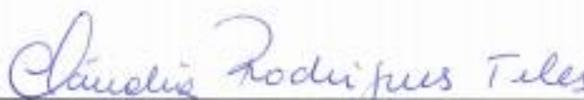
Diogo Wagmacker Nascimento

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia 26 de março de 2019 por:



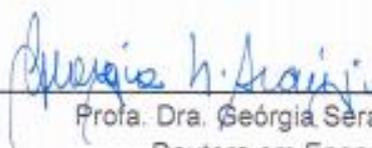
Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES



Profa. Dra. Cláudia Rodrigues Teles
Doutora em Engenharia Civil
Coorientadora - UFES
Examinadora Interna – UFES



Profa. Dra. Karla Moreira Conde
Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade
Examinadora Externa - UFES



Profa. Dra. Geórgia Serafim Araújo
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFES

Vitória – ES, março de 2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

W129e Wagmacker Nascimento, Diogo, 1990-
Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão, Mariana-MG, como pigmento e nas propriedades do concreto de cimento Portland / Diogo Wagmacker Nascimento. - 2019.
134 f. : il.

Orientadora: Geilma Lima Vieira.
Coorientadora: Cláudia Rodrigues Teles.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduo de minério de ferro. 2. Pigmento. 3. Adições minerais. 4. Sustentabilidade. I. Lima Vieira, Geilma. II. Rodrigues Teles, Cláudia. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente às minhas orientadoras Geilma Lima Vieira e Cláudia Rodrigues Teles, por me auxiliarem durante todo este percurso. Agradeço pela paciência nos momentos mais difíceis desta caminhada. Na vida, as experiências com pessoas boas devem ser sempre valorizadas e eu agradeço a Deus por ter recebido este presente, que foi ter sido orientado por vocês.

Agradeço aos amigos e familiares que estiveram comigo em todos momentos. A ajuda de vocês com palavras de incentivo, foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos do laboratório de materiais de construção civil da UFES, meus sinceros agradecimentos. Sem eles seria impossível a realização desta pesquisa, com o apoio, ensinamentos e esforço em prol deste trabalho.

Agradeço de forma especial aos meus pais. Às ligações diárias, com palavras de carinho e conselhos que fizeram toda a diferença nessa jornada.

Agradeço à capes pelo período de bolsa, que foi determinante para o cumprimento das minhas atividades e também ao CNPq que possibilitou os recursos para o cumprimento das atividades desta pesquisa.

Por fim, agradeço a Deus por mais esse sonho realizado.

RESUMO

NASCIMENTO, D. W. **ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO COMO PIGMENTO E NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

A extração de minério de ferro no Brasil possui papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, contribuindo com o sustento de diversas famílias em grande parte do território nacional. Entretanto, a indústria mineradora mostra-se irresponsável com a gestão dos seus resíduos a fim de reduzir os impactos causados pelo acúmulo, cada vez maior, dos rejeitos provenientes desta atividade. A fim de minimizar os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela atividade de mineração, este trabalho propõe o uso de rejeitos de minério de ferro como pigmento para produção de concretos coloridos. O resíduo utilizado tem origem na atividade de mineração do estado de Minas Gerais, especificamente na barragem de rejeitos de Fundão, Mariana - MG. Para este trabalho, o resíduo foi submetido a secagem, destorroado e peneirado, logo após este tratamento foi chamado de Resíduo do Beneficiamento de Minério de Ferro Tratado (RBMF). Foram confeccionados concretos com relação água/ cimento de 0,45 e 0,60, com adições de 0%, 5%, 10% e 15% de RBMF. Foi avaliado a influência das adições do resíduo sobre a resistência mecânica dos concretos com os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial, sua durabilidade foi verificada por meio dos ensaios de absorção de água por imersão e fervura e pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, a variação de cor foi analisada baseando-se no espaço de cor CIELAB. Em relação à coloração dos concretos, observou-se que os concretos com $a/c = 0,45$ e adições de 10 e 15%, apresentaram maior variação de cor em relação à referência. No que se refere à resistência mecânica, as adições de 10% do RBMF, nos concretos com relação $a/c = 0,45$ e 0,60, apresentaram melhores resultados em relação às suas referências. Analisando-se a durabilidade dos concretos, observou-se que as adições de 10 e 15% nos concretos com $a/c = 0,45$ e 0,60 proporcionam uma menor absorção de água por imersão e por capilaridade, o que demonstra que as adições podem contribuir com a vida útil dos concretos.

Palavras-chave: Resíduo de minério de ferro, concreto colorido, adição mineral.

ABSTRACT

NASCIMENTO, D. W. **STUDY ON THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF IRON ORE AS A PIGMENT AND IN THE PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT CONCRETE**. 2019. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Post-Graduation Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2019.

The extraction of iron ore in Brazil plays a fundamental role in economic and social development, contributing to the support of several families in much of Brazil. However, the mining industry is irresponsible with the management of its waste in order to reduce the impacts caused by the increasing accumulation of waste from this activity. In order to minimize the environmental, social and economic impacts caused by the mining activity, this work proposes the use of iron ore tailings as a pigment for the production of colored concretes. The waste used originates from the mining activity of the state of Minas Gerais, specifically in the tailings dam of Fundão, Mariana - MG. For this work, the residue was subjected to drying, dewatering and sieving, shortly after this treatment was called Waste of Iron Ore Processing (RBMFt). They were made with water/cement ratio of 0.45 and 0.60, with additions of 0%, 5%, 10% and 15% of RBMFt. The influence of the additions of the residue on the mechanical strength of the concretes with the tests of tensile strength by diametrical compression and resistance to axial compression, its durability was verified by means of the tests of absorption of water by immersion and boiling and by the test of water absorption by capillarity, the color variation was analyzed based on the CIELAB color space. In relation to the coloration of the concretes, it was observed that the concretes with $w/c = 0.45$ and additions of 10 and 15%, presented greater color variation in relation to the reference. Regarding the mechanical strength, the additions of 10% of the RBMFt, in concretes with respect to $w/c = 0.45$ and 0.60, presented better results in relation to their references. By analyzing the durability of the concretes, it was observed that the additions of 10 and 15% in the concretes with $w/c = 0.45$ and 0.60 provide a lower absorption of water by immersion and by capillarity, which demonstrates that the additions can contribute to the useful life of concrete.

Keywords: Iron ore tailings, colored concrete, mineral addition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais regiões de extração de minério de ferro no Brasil	6
Figura 2 – Mapa geológico simplificado do quadrilátero ferrífero	8
Figura 3 - etapas do beneficiamento do minério de ferro	9
Figura 4 - desastre em Mariana - MG, 2015	13
Figura 5 - desastre em Brumadinho - MG, 2019	24
Figura 6 – Representação do Sólido de cor no Espaço L^*a^*b	29
Figura 7 - Variação do pH do lixiviado ao longo do tempo	29
Figura 9 – Fluxograma do programa experimental	37
Figura 10 - Definição da relação água/cimento e percentual de adição	38
Figura 11 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	42
Figura 12 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo – zona granulométrica brita 1 ($d/D = 9,5/25$)	43
Figura 13 - Barragem de Fundão 13 de novembro de 2017	46
Figura 14 – Situação atual de Bento Rodrigues após rompimento da barragem	47
Figura 15 – Metodologia da amostragem	47
Figura 16 - Tratamento para a produção do RBMF a partir do RBMF	49
Figura 17 – Caracterização do RBMF	50
Figura 18 - Massa específica com o frasco de Le Chatelier.....	52
Figura 19 – Ensaio de massa unitária	52
Figura 20 – (a) material retido na peneira nº 200; (b) Superfície específica pelo método de Blaine...53	53
Figura 21 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos sólidos	55
Figura 22 - Ensaio de abatimento do concreto	60
Figura 23 - absorção de água por imersão e fervura	63
Figura 24 – Absorção de água por capilaridade	68
Figura 25 - Distribuição granulométrica do RBMF	69
Figura 26 – Difratoograma de raios X do RBMF	70
Figura 27 – Micrografia do RBMF: (a) Ampliação 100x (b) Ampliação 1000x	73

Figura 28 - Influência do percentual de adição de RBMF sobre a consistência dos concretos.....	73
Figura 29 - efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão axial.....	78
Figura 30 - Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial	79
Figura 31 - Efeito isolado do teor de adição sobre a resistência à compressão axial	80
Figura 32 – Efeito da interação entre relação a/c e idade sobre a resistência à compressão axial	81
Figura 33 - Efeito da interação da idade e porcentagem de adição sobre a resistência à compressão axial	82
Figura 34 - Efeito da interação da idade, porcentagem de adição e relação a/c sobre a resistência à compressão axial	83
Figura 35 - Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão dos concretos	86
Figura 36 - Efeito da interação entre o teor de adição e a idade sobre a resistência à tração dos concretos	87
Figura 37 - Efeito da interação entre a idade, a relação a/c e o percentual de adição sobre a resistência à tração dos concretos	88
Figura 38 - Efeito da porcentagem de RBMF sobre a absorção por imersão	92
Figura 39 - Efeito da idade sobre a absorção por imersão	93
Figura 40 - Efeito da interação entre a relação a/c e o percentual de RBMF sobre a absorção por imersão	94
Figura 41 - Efeito da interação entre a idade e o percentual de RBMF sobre a absorção por imersão	95
Figura 42 - Efeito da interação entre a idade e a relação a/c sobre a absorção por imersão	96
Figura 43 - Efeito da interação entre o percentual de RBMF, idade e relação a/c sobre a absorção por imersão	97
Figura 44 - Efeito isolado do percentual de RBMF sobre o índice de vazios	98
Figura 45 - Efeito isolado da idade sobre o índice de vazios	99
Figura 46 - Efeito da interação entre percentual de RBMF e relação a/c sobre o índice de vazios ..	100
Figura 47 - efeito da interação entre percentual de RBMF e idade sobre o índice de vazios	101
Figura 48 - Efeito da interação entre idade e relação a/c sobre o índice de vazios	102
Figura 49 - Efeito da interação entre porcentagem de RBMF, idade e relação a/c sobre o índice de vazios	103
Figura 50 - Efeito isolado da porcentagem de RBMF sobre a absorção por capilaridade	106
Figura 51 - Efeito isolado da relação a/c sobre a absorção por capilaridade	107
Figura 52 - Efeito isolado da idade sobre a absorção por capilaridade	108
Figura 53 - Efeito da interação da porcentagem de RBMF e a idade sobre a absorção por capilaridade	109
Figura 54 – Efeito da interação entre percentual de RBMF, relação a/c e idade sobre a absorção de água por capilaridade.	110
Figura 55 – MEV – Zona de transição concreto referência, a/c = 0,45	112
Figura 56 – MEV – concretos com adição de RBMF, a/c = 0,45	113
Figura 57 – MEV – concreto referência, a/c = 0,60	114

Figura 58 – MEV – concretos com adição de RBMF, $a/c = 0,60$	115
Figura 59 - Efeito da interação entre adição de RBMF e relação a/c sobre a luminosidade	117
Figura 60 – Efeito isolado da adição de RBMF sobre a coordenada vermelho (a)/ verde (-a)	119
Figura 61 - Efeito isolado da relação a/c sobre a coordenada Vermelho (-a)/ verde (-a)	120
Figura 62 - Efeito da interação entre percentual de RBMF e relação a/c sobre a coordenada a^* (vermelho/ verde)	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras de 2017 em dólares.	5
Tabela 2 - Fórmula química e composição dos óxidos de ferro	7
Tabela 3 - Caracterização química do rejeito do beneficiamento de minério de ferro	15
Tabela 4 – Estudos desenvolvidos com aplicação do resíduo de minério de ferro	21
Tabela 5 - Níveis de percepção das diferenças colorimétricas	25
Tabela 6 - Resíduos estabilizados por solidificação	27
Tabela 7 - Resultados encontrados para o extrato lixiviado	30
Tabela 8 - Níveis dos fatores para ensaios em concreto	34
Tabela 9 – Programa experimental – Ensaios	39
Tabela 10 - Propriedades físicas do agregado miúdo	41
Tabela 11 - Ensaios realizados no agregado graúdo	43
Tabela 12 - Caracterização do cimento CP V - ARI.	44
Tabela 13 - plano de amostragem do resíduo de minério de ferro	48
Tabela 14 - Composição química do RBMF	51
Tabela 15 – Traço unitário dos concretos	58
Tabela 16 - Caracterização química do RBMF	65
Tabela 17 - Características físicas do RBMF.....	67
Tabela 18 - Diâmetro do RBMF comparado com outras adições minerais	67
Tabela 19 – Extrato lixiviado do RBMF	71
Tabela 20 – Extrato solubilizado do RBMF	72
Tabela 21 - Massa específica dos concretos	75
Tabela 22 – Resistência à compressão axial média dos concretos	76
Tabela 23 - Análise de variância das variáveis independentes na resistência à compressão axial	78
Tabela 24 - Resistência à tração média dos concretos	84
Tabela 25- Análise de variância das variáveis independentes na resistência à tração por compressão diametral	85
Tabela 26 - Resultados de absorção e índice de vazios	89
Tabela 27 - ANOVA - Absorção por imersão dos concretos	91
Tabela 28 - ANOVA - Índice de vazios	98
Tabela 29 - Absorção capilar média dos concretos	104
Tabela 30 - ANOVA - Absorção por capilaridade	105
Tabela 31 - ANOVA – Luminosidade	117
Tabela 32 - ANOVA - Coordenadas verde (-a)/ vermelho (a)	118

Tabela 33 - Nível de percepção das diferenças colorimétricas	122
--	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Desastres envolvendo barragens de mineradoras por todo o mundo	11
Quadro 2 - Principais Desastres envolvendo barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais, Brasil	12
Quadro 3 – Projeto fatorial cruzado completo para ensaio em concreto	35
Quadro 4 - Definição do teor de argamassa	57
Quadro 5 – Traços unitários do diagrama de dosagem	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA – Análise de Variância
ASTM – American Society for Testing and Materials
CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento
CIE – Commission Internationale l’Eclairage
CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado
DEPEC – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos
DIN – Norma Alemã
ES – Espírito Santo
FFB – Formações Ferríferas Bandadas
FRX – Fluorescência de Raios - x
GL – Graus de Liberdade
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
LEMAC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção
LMC - Laboratório de Materiais Carbonoso e Cerâmicos
LPT – Laboratório de Plasma Térmico
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa – Mega Pascal
MQ – Média Quadrática
MG – Minas Gerais
NBR – Norma Brasileira
PF – Perda ao Fogo
pH – Potencial hidrogeniônico
RBMF – Resíduo do Benefiamento de Minério de Ferro
SQ – Soma Quadrática
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

UFPR – Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	01
1.1 OBJETIVOS	03
1.1.1 Objetivo geral	03
1.1.2 Objetivos específicos	03
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 A MINERAÇÃO E O MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL	04
2.2 BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO E GERAÇÃO DOS REJEITOS.	08
2.3 RISCOS POTENCIAIS ASSOCIADOS À UTILIZAÇÃO DE BARRAGENS COMO DEPÓSITO DOS REJEITOS DE MINÉRIO E OS DESASTRES EM MARIANA-MG E BRUMADINHO-MG	10
2.4 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO	14
2.5 REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO E APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.6 ADIÇÕES MINERAIS	19
2.6.1 adições do resíduo de beneficiamento de minério de ferro em matrizes cimentíceas	20
2.6.1.1 <i>Durabilidade</i>	22
2.7 ANÁLISE COLORIMÉTRICA	23
2.8 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO	25
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	32
3.1.1 Variáveis do programa experimental	32
3.1.1.1 <i>Variáveis dependentes</i>	32
3.1.1.2 <i>Variáveis independentes</i>	33
3.1.1.3 <i>Variáveis de controle</i>	33

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	34
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.4 MATERIAIS	41
3.4.1 Agregado miúdo	41
3.4.2 Agregado graúdo	42
3.4.3 Água	44
3.4.4 Cimento	44
3.4.5 Resíduo do beneficiamento de minério de ferro	45
3.4.5.1 <i>Visita às barragens da Samarco e ao distrito de Bento Rodrigues, Mariana – MG</i>	45
3.4.5.2 <i>Coleta do resíduo</i>	47
3.4.5.3 <i>Tratamento do resíduo do beneficiamento de minério de ferro</i>	49
3.4.5.4 <i>Caracterização do Resíduo de Beneficiamento de Minério de Ferro</i>	49
3.4.5.4.1 Caracterização química	50
3.4.5.4.2 Caracterização física	51
3.4.5.4.3 Análise mineralógica	53
3.4.5.4.4 Análise microestrutural	54
3.4.5.4.5 Classificação do resíduo sólido RBMF	54
3.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	56
3.5.1 Dosagem dos concretos	56
3.5.2 Ensaio do concreto no estado fresco	58
3.5.2.1 <i>Determinação da massa específica</i>	59
3.5.2.2 <i>Determinação da consistência</i>	59
3.5.3 Ensaio do concreto no estado endurecido	60
3.5.3.1 <i>Resistência à compressão axial</i>	60
3.5.3.2 <i>Determinação da resistência à tração por compressão diametral</i>	61
3.5.4 Ensaio de durabilidade	61
3.5.4.1 <i>Absorção de água por imersão e fervura</i>	61
3.5.4.2 <i>Absorção de água por capilaridade</i>	62
3.5.5 Análise microestrutural dos concretos	63
3.5.6 Análise colorimétrica	64

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO TRATADO	65
4.1.1 Caracterização química	65
4.1.2 Caracterização física	66
4.1.3 Caracterização mineralógica	68
4.1.4 Análise microestrutural	69
4.1.5 Classificação do resíduo de beneficiamento de minério de ferro tratado	70
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CONCRETOS	73
4.2.1 Concretos no estado fresco	73
4.2.1.1 <i>Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone</i>	73
4.2.1.2 <i>Massa específica do concreto no estado fresco</i>	74
4.2.2 Concreto no estado endurecido	75
4.2.2.1 <i>Avaliação da resistência à compressão axial</i>	76
4.2.2.2 <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	84
4.2.2.3 <i>Avaliação dos ensaios de durabilidade</i>	89
4.2.2.3.1 Absorção de água por imersão e fervura	89
4.2.2.3.2 Índice de vazios	97
4.2.2.3.3 Absorção por capilaridade	103
4.2.2.4 <i>Análise microestrutural</i>	111
4.2.3 Análise colorimétrica	116
4.2.3.1 <i>Diferença colorimétrica</i>	121
5 CONCLUSÃO	123
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RBMF	123
5.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO	124
5.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	124
5.3.1 Resistência à compressão axial	124
5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	124
5.3.3 Durabilidade	125
5.3.3.1 <i>Absorção por imersão e índice de vazios</i>	125
5.3.3.2 <i>Absorção por capilaridade</i>	126
5.4 ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....	126
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	127

5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
REFERÊNCIAS	124

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos de colônia as substâncias metálicas são de grande importância para a indústria mineral brasileira. Ao longo da história, a ocupação de territórios localizados no interior do continente proporcionou a descoberta de novos depósitos minerais, com isso, substâncias metálicas como manganês e ferro passaram a ter maior importância. O ferro é uma das maiores riquezas minerais do Brasil e utilizado para diversas finalidades como a produção de aço, máquinas, liga metálica para a produção de ferramentas e uma infinidade de outras aplicações e contribui com a impulsão da balança comercial brasileira. De acordo com o Ministério da indústria e comércio (2016), cerca de 374 milhões de toneladas de minério de ferro foram exportados no ano de 2016, representando 16,79% das exportações brasileiras nesse período.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, com uma produção estimada em 398 milhões de toneladas ao ano, equivalente a 13,5% do total global, estando atrás apenas da China em termos de produção (DNPN, 2014). As principais reservas de minério de ferro se encontram nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará.

Desde a extração até o beneficiamento do minério são gerados muitos materiais de pouco ou nenhum valor econômico, como os estéreis e os rejeitos, que são os materiais gerados no processo de beneficiamento. Estes resíduos correspondem a aproximadamente 70% de todo material gerado no processo produtivo do minério de ferro (DNPM, 2014)

Atualmente, as barragens de rejeito são o principal tipo de disposição para os resíduos gerados na mineração de ferro. Conceitualmente, Segundo a NBR 13.028 (ABNT, 2006), uma barragem de rejeitos é qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, para sedimentos e/ou para formação do reservatório de água (ABNT, 2006). Porém, apesar de ser prevista a sua utilização, as barragens apresentam grandes riscos, uma vez que o seu rompimento pode implicar em dano ambiental, perda de vidas humanas, contaminação do solo e de cursos d'água, com um alto custo para reparação dos danos (BARREDA, 2008).

Ressalta-se que problemas decorrentes do rompimento de barragens de rejeitos foram vistos nos desastres de Mariana e Brumadinho, ambos no estado de Minas Gerais, com o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015 e da barragem da mina do córrego de feijão em 25 de janeiro de 2019, respectivamente. O rompimento dessas barragens provocou os maiores desastres ambientais e humanitários da história do Brasil, visto que em Mariana, houveram 19 mortes e foram despejados 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente, afetando o Rio Doce, cuja bacia hidrográfica abrange 230 municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, muitos dos quais abastecem sua população com a água do rio. Já em Brumadinho, foram mais de 180 mortes e 130 desaparecidos, o rompimento da barragem liberou cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito que impactaram todo o ecossistema da região e ainda pode afetar cerca de 300 quilômetros de rios (PEREIRA *et al.* 2019).

Além do risco de rompimento, é importante ressaltar que a etapa de disposição final de resíduos, como na barragem de rejeitos, deve somente ser considerada quando não existe nenhuma forma de reaproveitamento, conforme descrito na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

O potencial de reaproveitamento dos rejeitos de minério de ferro vem sendo estudado principalmente por meio da separação magnética e concentração dos minerais presentes no rejeito tornando-o um subproduto reaproveitado na própria usina ou em outro segmento industrial. Segundo Andrade *et al.* (2016), seu reaproveitamento na construção civil, vem ganhando destaque, devido às suas características químicas, físicas e mineralógicas serem similares às de materiais utilizados na construção civil, devido também à visibilidade trazida pelo desastre em Mariana – MG e pelo fato da construção civil ser uma atividade de grande impacto ambiental, responsável por um alto consumo de matérias-primas, e geração de resíduos, sendo o reaproveitamento de resíduos nesta atividade, uma alternativa para minimizar os seus impactos.

Dentre os tipos de usos do rejeito de minério na construção civil, pesquisas vem estudando o reaproveitamento em tijolos, pavers, argamassa, concretos (GAMA *et al.*, 2014).

Visto a potencialidade do resíduo do beneficiamento de minério de ferro, decidiu-se estudar a influência da aplicação deste resíduo em concretos, tendo como foco avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a influência da adição de resíduo do beneficiamento de minério de ferro nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, analisando o comportamento mecânico e de durabilidade, além de verificar a sua atuação como agente pigmentante.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a influência dos percentuais de adição do de resíduo na consistência dos concretos.
- Analisar a massa específica dos concretos produzidos em função da relação a/c e dos percentuais de adição do resíduo;
- Analisar a propriedade de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral dos concretos produzidos em função da relação a/c e dos percentuais de adição do resíduo e das idades dos corpos de prova;
- Analisar a propriedade de absorção de água por imersão e por capilaridade dos concretos produzidos em função da relação a/c e dos percentuais de adição do resíduo;
- Analisar a microestrutura dos concretos produzidos com diferentes relações a/c e percentual de adição na idade de 180 dias;

- Analisar a mudança de coloração dos elementos de concreto em função do percentual de adição do resíduo e relação a/c.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A MINERAÇÃO E O MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL

De acordo com Andrade (2014), a mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar, beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los recursos econômicos e sociais.

O Brasil é um país com um extenso território e uma grande diversidade geológica, isso propicia a existências de diversas jazidas de diferentes minerais, o que coloca o país em posição privilegiada em relação às suas reservas e à produção mineral. Em 2017 a pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil atingiu um volume de 403 milhões de toneladas e representou em dólares US\$ 28,3 bilhões. Os principais produtos exportados foram: Minério de ferro, ouro, ferronióbio, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim e outros. A tabela 1 demonstra a distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras de 2017 em dólares.

Tabela 1 – Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras de 2017 em dólares.

BENS MINERAIS	EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS (%)
Ferro	62
Ouro	13
Ferronióbio	6
Cobre	9
Bauxita	1
Manganês	1
Pedras nat. e revest. ornamentais	5
Caulim	1
Outros	2

Fonte: IBRAM 2018

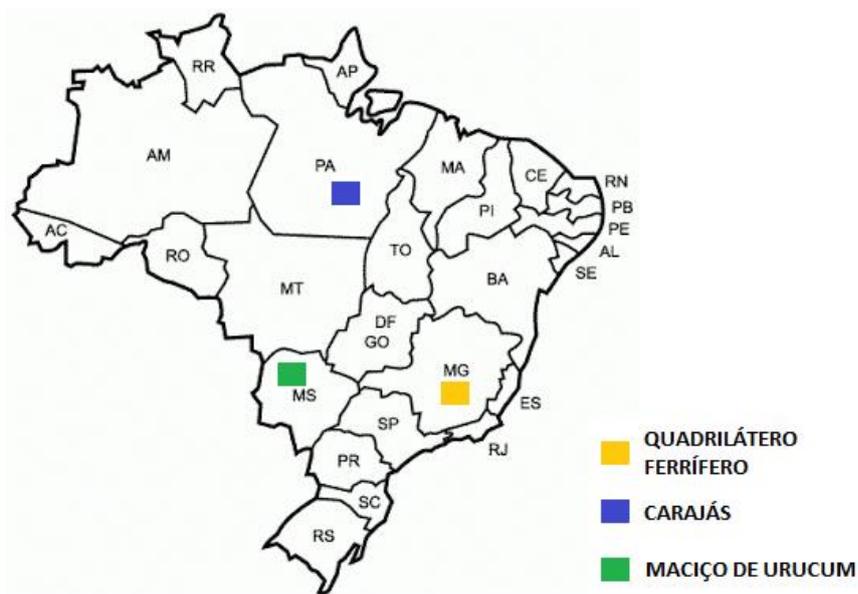
No Brasil existem 155 minas de recursos minerais de grande e médio porte, de onde se extraem metais ferrosos, metais preciosos, Urânio e outros minerais. Dentre as substâncias que trazem maiores ganhos econômicos para o Brasil estão o Ferro, o Caulim e a Bauxita. O valor de suas exportações representa cerca de 90% das exportações minerais, dos quais 82% são representados pela exportação de Ferro (MELPHI et al., 2016).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de minério de ferro. De acordo com o Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos – DEPEC (2017), este minério está entre os quatro principais produtos da pauta exportadora brasileira e responde por 7,6% das exportações totais do país, além de abastecer o mercado interno.

As regiões principais de onde é extraído esse minério (Figura 1) são o quadrilátero ferrífero que localiza-se na parte centro-sudeste do estado de Minas Gerais, a província mineral de Carajás que encontra-se na porção sudeste do estado do Pará e a região de Corumbá em Mato Grosso do Sul, fazendo divisa com o Paraguai e a Bolívia. Essas três regiões possuem grandes depósitos das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) que são rochas laminadas constituídas principalmente por minerais de sílica e ferro. Os diferentes minérios explorados possuem teores de ferro

elevados com destaque para a região de Carajás de onde se obtém, em maior quantidade, o minério de ferro de melhor qualidade, porém a maior zona produtora de minério de ferro é a do quadrilátero ferrífero, correspondendo a cerca de 60% da produção brasileira. (CARVALHO et al., 2014).

Figura 1 - Principais regiões de extração de minério de ferro no Brasil



Fonte: Autor

Os principais minerais ferrosos que compõem o material extraído dessas áreas são: a hematita, goethita e magnetita. Esses minerais possuem elevada densidade e dureza, caracterizando o minério explorado nas regiões de extração brasileiras (HENRIQUES, 2012). Na tabela 2 pode-se observar a fórmula química e a composição desses óxidos de ferro.

Tabela 2 - Fórmula química e composição dos óxidos de ferro

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	CONTEÚDO TEÓRICO DE FERRO(%)
Hematita	Fe ₂ O ₃	69,97
Goethita	FeO(OH)	62,90
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72,40

Fonte: KLEIN, 2001

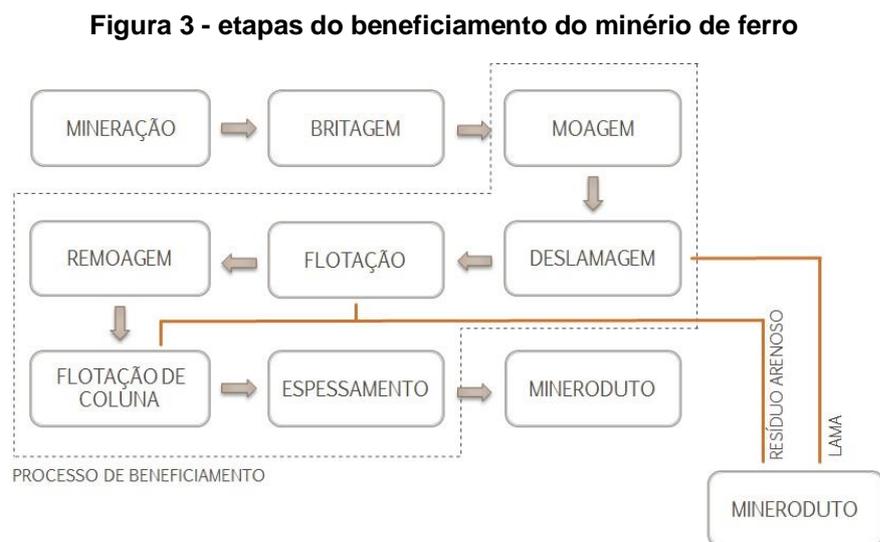
O quadrilátero ferrífero localiza-se na região centro-sudeste do estado de Minas Gerais e ocupa uma área aproximada de 7000 km². De acordo com Schobbenhaus *et al.* (2003) a expressão quadrilátero é originária da forma geométrica utilizada para delimitar a região com vastos depósitos de minério de ferro.

Em relação à formação geológica da região, de acordo com Machado e Ruchkys (2013) o quadrilátero ferrífero é caracterizado por três grandes associações de litotipos: duas de idade arqueana representadas por terrenos granito-gnáissicos e por uma unidade do tipo greenstone belt (supergrupo Rio das Velhas), e a terceira composta por uma sequência metassedimentar paleoproterozoica contendo formações ferríferas bandadas do tipo lagosuperior (supergrupo Minas) (Figura 2).

matéria-prima em todo o mundo, foi necessário a implementação de uma nova técnica para a exploração de minério com o teor de ferro reduzido, o primeiro grande projeto baseado exclusivamente na concentração de minérios itabiríticos de baixo teor foi colocado em operação pela Samarco na mina de Germano em Mariana, Minas Gerais, em 1977, utilizando a técnica de flotação catiônica reversa.

A Samarco é uma empresa de capital fechado que atua no segmento de mineração, pioneira no Brasil na concentração de itabirito por flotação, mantinha atividade industrial em dois estados brasileiros executando as fases de lavra, beneficiamento, transporte, pelotização e embarque de maneira integrada entre a Usina de Germano que se localiza em Mariana - MG e a usina industrial de Ponta do Ubu, em Anchieta - ES. Em forma de polpa, o concentrado de minério seguia para os minerodutos que são duas linhas de tubulação com aproximadamente 400 km de extensão cada, paralelas e possuem capacidade total para bombear até 24 milhões de toneladas por ano, de minério, fazendo o transporte entre as unidades de Germano e Ubu (MONTE *et al.*, 2001).

Segundo Monte *et al.* (2001), o processo de produção da Samarco resulta em 12 milhões de concentrado por ano, começando na usina de Germano, onde o itabirito é beneficiado de acordo com as etapas demonstradas na figura 3.



Fonte: Monte *et al.* (2001)

Monte *et al.* (2001) afirmam que a quantidade de rejeito gerado no processo de beneficiamento corresponde a 34,6% do total de matéria-prima utilizada para beneficiamento e que o teor de ferro desse rejeito é, em média, 22,64%. Considerando uma produção de 12 milhões de concentrado por ano, a geração de resíduo gira em torno de 6,35 milhões de toneladas neste mesmo período.

O resíduo gerado durante esse processo de beneficiamento é lançado, por meio de minerodutos, às barragens de rejeito. A Samarco mantinha as seguintes barragens, Germano, Fundão e Santarém, para estocagem de resíduos provenientes do beneficiamento do minério de ferro barragens para estocagem de resíduos provenientes do beneficiamento do minério de ferro, a última funcionava como depósito do material drenado das outras duas barragens consequentemente estando a jusante das outras barragens.

2.3 RISCOS POTENCIAIS ASSOCIADOS À UTILIZAÇÃO DE BARRAGENS COMO DEPÓSITO DOS REJEITOS DE MINÉRIO E O DESASTRE EM MARIANA-MG E BRUMADINHO.

Barragens de contenção de rejeitos de mineração e resíduos industriais são estruturas complexas e dinâmicas que requerem cuidados especiais na elaboração dos projetos de engenharia, operação, manutenção das estruturas, bem como para o descomissionamento. (DUARTE, 2008).

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastre que acontece com frequência em todo mundo, esses desastres normalmente ocorrem por dois principais fatores: um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou erros no planejamento dessa estrutura que, independentemente de fatores externos, entra em colapso.

Os desastres considerados mistos ocorrem com a somatória das forças da natureza, que se manifestam como terremotos ou grandes tempestades, e falhas na tecnologia humana. (VORMITTAG *et al.*, 2018).

Rompimento de barragens ocorrem em todo o mundo, no quadro 1 estão expostos alguns dos principais desastres ocorridos em vários países, que causaram mortes e danos ambientais sem precedentes.

Quadro 1 – Desastres envolvendo barragens de mineradoras por todo o mundo.

LOCAL	ANO	NOME	DANOS CAUSADOS
Nova Virgínea (África do sul)	1994	Harmony	17 óbitos
Marinduque (Finlândia)	1996	Mogpog	Não houve mortes diretas, mas pouco tempo depois pessoas apresentaram doenças relacionadas ao lixo tóxico, dentre as quais várias vieram a óbito. O rio Boac foi contaminado e considerado sem vida, centenas de pessoas ficaram desabrigadas.
Andaluzia (Espanha)	1998	Barragem da Boliden	Danos ambientais de longo prazo. Mortalidade de peixes e poluição do rio Guadiamar.
Shaanxi (China)	2006	shangluo	17 óbitos
Shanxi (China)	2008	Xiangfen county	277 óbitos
Guangdong (China)	2010	Zijin MIning	22 óbitos
Kolontar (Hungria)	2010	Ajka Alumina Plant	10 óbitos
Colúmbia Britânica (Canadá)	2014	Mount Polley	24 milhões de m ³ de lama contaminada por metais vazou, causando o maior desastre ambiental da história da mineração do Canadá. Terra, sistemas hídricos e habitats de reprodução de salmão foram destruídos.

Fonte: *ICOLD, 2001*

Quando são analisados os desastres ocorridos no exterior verifica-se a grande importância de um sistema de alerta à populações de habitam próximo a barragens, a evacuação em casos de rompimento deve ser realizada com agilidade, a fim de conservar o bem de maior valor, a vida.

Dentre os fatores que tornam vulneráveis esses acontecimentos estão as legislações negligentes, a corrupção dos agentes públicos, fatores naturais como solos instáveis, ausência de planejamento e tecnologias adequadas nas construções.

O número de barragens rompidas no Brasil é alarmante, principalmente no estado de Minas Gerais onde se encontra a maior quantidade de indústrias de beneficiamento mineral do país. O quadro 2 demonstra os principais acidentes que ocorreram nesse estado nos últimos anos, com destaque aos maiores desastres ambientais e humanitários da história do país, o rompimento das barragens de Fundão e Santarém em Mariana-MG e da barragem da mina do córrego de Feijão em Brumadinho – MG.

Quadro 2 - Principais Desastres envolvendo barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais, Brasil

LOCAL	ANO	NOME	DANOS CAUSADOS
Itabirito	1986	Barragem de Fernandinho	7 óbitos
Nova Lima	2001	Barragem de macacos	5 óbitos
Miraí	2007	Barragem da Rio Pomba/ Cataguases	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Itabirito	2014	Barragem da Herculano	3 óbitos
Mariana	2015	Barragem de Fundão e Santarém	19 óbitos, 8 desaparecidos, 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas, poluição do rio doce e do mar no ES, interrupção da atividade pesqueira e afetação ao turismo em Regência-ES.
Brumadinho	2019	Barragem da mina do córrego de Feijão	Mais de 180 mortes e 130 desaparecidos, considerado o maior acidente de trabalho no Brasil. 12 milhões de m ³ de lama despejados no meio ambiente, causando danos a diversas comunidades ribeirinhas.

Fonte: ICOLD, 2001 e VALE, 2019

Nota-se que barragens de rejeitos de mineração implicam em riscos de desastres por rompimento ou vazamento, em um primeiro momento e em ocorrências de desastres ambientais, posteriormente.

No dia 5 de novembro de 2015, rompeu-se a barragem de rejeitos de Fundão, no município de Mariana – MG. A enxurrada de lama causou dezenove (19) mortes e danos na bacia do Rio Doce (Mg). Seguindo o curso do Rio Doce, afetou ainda as

localidades de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, em Mariana, Gesteira e o núcleo urbano de Barra Longa. Depois de Mariana e Barra Longa, Governador Valadares, a capital regional, foi a cidade mais atingida, sofrendo com graves problemas de abastecimento e caos social. No Espírito Santo, Linhares, Baixo Guandu e Colatina foram duramente afetadas. Além dos danos causados aos diferentes grupos da região do Rio Doce – Populações rurais, urbanas, litorâneas, pescadores, garimpeiros, indígenas, etc.-, o rompimento da barragem de fundão causou fortes impactos sobre os ecossistemas fluviais, marinhos e costeiros, que se prolongam por mais de 800 km de sua origem (COELHO *et al.*, 2017).

A figura 4 apresenta imagens do desastre em Mariana-MG.

Figura 4 - Desastre em Mariana - MG, 2015



Fonte: G1, 2015

No dia 25 de janeiro de 2019, pouco mais de três anos após o rompimento da barragem de rejeitos de fundão em Mariana-MG, um novo rompimento de barragem de rejeitos de minério de ferro associada à mineradora Vale S.A. ocorreu em Brumadinho – MG. Os rejeitos da barragem I, associada à mina do córrego de feijão, transbordaram outras duas barragens e escoaram por uma grande extensão de terras do município de Brumadinho até serem drenados pelo rio Paraopeba (Figura 5). O maior impacto imediato do rompimento da barragem foi o de perdas humanas. Até o dia 2 de fevereiro de 2019, foram contabilizadas 110 mortes e 238 desaparecidos. O rejeito cobriu grande extensão de terras, danificando estruturas empresariais, moradias, atividades agropecuárias e vegetação nativa. Entretanto, no âmbito quantitativo, pouco se sabe sobre o tamanho e composição das áreas

atingidas, o que dificulta o dimensionamento, caracterização e mitigação dos impactos gerados (PEREIRA *et al.*, 2019).

Figura 5 - Desastre em Brumadinho - MG, 2019



Fonte: G1, 2019

2.4 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO.

Por ser proveniente de rochas com elevados teores de ferro e sílica, o resíduo é composto basicamente por esses elementos. No processo de beneficiamento, na etapa de flotação ocorre a adição de compostos orgânicos (amido e acetato de eteramina) e hidróxido de sódio, que auxiliam na separação dos minerais, mas tende a ter pouca influência nas características do produto, devido à pouca quantidade utilizada, proporcionando apenas um pH mais básico.

Diversos autores em todo mundo estudam as características do resíduo do beneficiamento de minério de ferro. Em sua composição química predominam a presença de silicato (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3) e aluminato (Al_2O_3). A tabela 3 apresenta a caracterização química do resíduo encontrado em diversos locais no mundo.

Tabela 3 - Caracterização química do rejeito do beneficiamento de minério de ferro

ELEMENTOS	GALVÃO <i>et al.</i> (2018)	LI <i>et al.</i> (2009)	SHETTIMA <i>et al.</i> (2016)
Fe ₂ O ₃	47,8%	6,09%	8,3%
SiO ₂	30,0%	63,40%	56,0%
Al ₂ O ₃	21,2%	9,92%	10,0%
SO ₃	0,7%	0,85%	-
K ₂ O	0,2%	1,23%	1,5%
CaO	0,1%	13,29%	4,3%
MnO	0,1%	-	1,7%

Fonte: GALVÃO *et al.* (2018); LI *et al.* (2009) e SHETTIMA *et al.* (2016)

Nota-se uma presença marcante dos óxidos, SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ nos resíduos analisados. Observa-se também que o material estudado por Galvão *et al.* (2018), apresenta grande concentração de Fe₂O₃, provavelmente, devido à utilizada no processo de beneficiamento do minério de ferro pela indústria local. A utilização de técnicas menos eficientes para concentração de ferro, podem refletir em um resíduo com maior teor de Fe₂O₃.

A composição mineral desses resíduos geralmente é quartzo, hematita, goetita e caulinita. A presença de quartzo pode ser benéfica com a utilização do resíduo na composição de argamassas e concretos.

Segundo Galvão *et al.* (2018), a depender da quantidade de óxido de ferro presente nos resíduos de mineração, pode ser viável a produção de tintas sustentáveis, sabendo-se que esses óxidos são os pigmentos naturais mais utilizados na indústria.

Esse resíduo possui diversas características benéficas às propriedades dos materiais de construção civil, e as diversas maneiras como ele está sendo utilizado, estão apresentadas na próxima seção.

2.5 REAPROVEITAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO E APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil é um setor que apresenta grande capacidade para absorção dos diversos tipos de resíduos sólidos gerados. Vários autores apresentam exemplos de aplicações do rejeito de minério devido à sua eficiência quando utilizado como um material de construção civil. Dentre as várias possibilidades, a utilização do rejeito de minério pode ser aplicado para diversos fins, tais como: blocos para alvenaria, fabricação de argamassas para assentamento, produção de materiais cerâmicos, concretos, blocos de pavimentação, pigmento, entre outros.

Como exemplo, no trabalho formulado por Ferreira *et al.* (2016), foi verificado a viabilidade técnica de utilização do rejeito gerado na exploração de um minério itabirítico como matéria-prima para confecção de argamassa. Concluiu-se que a argamassa confeccionada com maior quantidade de rejeito (traço 1 : 2,5) e menor relação água/ cimento (0,95) foi a que apresentou menor tempo de pega e maior resistência à compressão. O resultado alcançado foi considerado satisfatório, pois o aumento de rejeito incorporado favoreceu a resistência à compressão final do produto. A quantidade cada vez maior de rejeitos gerados na fase de exploração e extração de minério constitui um problema ambiental às mineradoras. Neste sentido, as argamassas produzidas com esse resíduo mostram bastante eficiência em suas propriedades físicas e mecânicas.

Aristimunho *et al.* (2012), avaliaram, do ponto de vista técnico, a aplicação do resíduo na forma de pó em argamassas de cimento Portland. Moldaram corpos-de-prova com variadas proporções de cimento, areia e pó de minério de ferro e, posteriormente, submeteram a ensaios físicos e mecânicos. Os resultados demonstraram que as substituições de areia pelo resíduo (destaque para a substituição de 20%) melhoraram o desempenho mecânico das argamassas, demonstrando a viabilidade técnica do material em estudo.

No trabalho realizado por Fontes *et al.* (2013), foi abordado o uso dos resíduos das barragens de rejeito de minério de ferro, como agregados reciclados para produção

de matrizes de argamassa para revestimento e assentamento de alvenarias, aplicadas em obras civis. Considerou-se que o rejeito *in-natura* não é o material ideal para a produção de argamassas, porém os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível usá-lo como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da mineração, na produção de argamassas como agregados reciclados.

A indústria cerâmica tem grande papel ambiental quando o assunto é a reciclagem de rejeitos, Souza *et al.* (2008), incorporaram o rejeito de mineração em material cerâmico com o intuito de avaliar o efeito na sua microestrutura. Os resultados mostraram que a adição do rejeito à massa argilosa altera significativamente a microestrutura da cerâmica. Incorporações de até 10% do rejeito são benéficas para a qualidade da cerâmica por meio da redução da porosidade aberta. Além da vantagem ambiental, a incorporação desse resíduo na cerâmica também confere vantagens às suas características físicas.

Silva *et al.* (2014) estudaram a recuperação e reciclagem de rejeitos provenientes da concentração de minério de ferro para a produção de cerâmica. Além do estudo das características físicas, químicas e mineralógicas, foi feita a adição de 5% na argila para a produção de cerâmica. Foram analisadas as propriedades mecânicas e a cor. Os resultados indicaram que a adição de rejeitos de minério de ferro para a produção de cerâmica vermelha foi altamente viável, tecnicamente e ambientalmente.

Após o rompimento da barragem de minério localizada próximo à cidade de Mariana – MG, em novembro de 2015, as pesquisas sobre o rejeito de minério sofreram grande impulsão. A busca por conhecimento das características do material tornou-se fundamental para saber a melhor maneira de destinação do resíduo, neste contexto, qualquer forma de reutilização deste resíduo é importante. Diversas pesquisas na área de pavimentação são desenvolvidas com o objetivo de aproveitamento deste rejeito.

Estudos como o de Shettima *et al.* (2016), tiveram como objetivo avaliar os rejeitos de minério de ferro como substituto do agregado miúdo. Foram realizadas substituições de 25%, 50%, 75% e 100%, o concreto foi produzido com uma relação água/cimento de 0,5. Foram realizados ensaios de resistência à tração, compressão,

módulo de elasticidade e durabilidade (absorção de água, penetração de cloretos e carbonatação). Os resultados dos testes indicaram redução na consistência dos concretos com substituições, enquanto que em todos os outros testes os resultados foram superiores ao do concreto referência. Portanto, de acordo com os resultados apresentados na pesquisa, é recomendável o uso do resíduo de minério de ferro como substituto do agregado miúdo, minimizando-se assim problemas ambientais, altos custos com materiais e desgaste de recursos naturais.

O consumo de cimento costuma ser um indicador do crescimento e progresso de um país. Sua fabricação está espalhada por todo o mundo devido a principal fonte para produção ser o calcário e esse recurso estar disponível na maioria dos continentes. A composição básica do cimento é calcário, argila e gesso. O minério de ferro e areia muitas vezes são utilizados para suprir as deficiências da argila frente a alguns de seus componentes que se mostram insuficientes ao processo. Sabendo-se dessa condição, Luo *et al.* (2016) estudaram a utilização do resíduo de minério de ferro como material para a produção de clínquer de cimento Portland. Foi estudado a possibilidade da substituição da argila por resíduo de minério de ferro. Para esse propósito, dois tipos de clínquer foram preparados: um com resíduo de minério; o outro foi preparado com argila e utilizado como referência. Percebeu-se que o uso do minério de ferro não alterou a formação das fases mineralógicas características do clínquer e também a performance mecânica e física dos dois materiais foram similares. Além disso, verificou-se que o uso do resíduo melhora a moagem do clínquer e diminui o calor de hidratação do cimento Portland. Esses achados sugerem que o resíduo de minério de ferro pode substituir a argila como matéria prima para a preparação de clínquer de cimento Portland.

Barbosa (2017), avaliou a utilização do rejeito da concentração de minério de ferro como matéria-prima para fabricação de cerâmica vermelha. Para confecção dos corpos de prova, as composições foram preparadas com substituições de 10% da massa de solo por rejeito de minério de ferro. Foram medidas as propriedades de retração linear de secagem, retração linear de queima, perda de massa por secagem, perda de massa por queima, massa específica de queima, absorção de água e resistência à compressão simples. Os resultados foram comparados com a referência e notaram que a diferença entre os valores de retração linear e perda de massa de secagem e de queima nas diferentes composições foi muito pequena. Os

valores de absorção de água e resistência à compressão para os corpos de prova com a substituição por rejeito de minério de ferro foram de 27% e 42,3 Mpa. Os parâmetros analisados mostraram que a composição está dentro das especificações para produção de alguns tipos de materiais cerâmicos.

As diversas formas de incorporação desse resíduo em materiais na construção civil são satisfatórias, a pequena granulometria possibilita sua ação como filler, ocupando espaços vazios tendo como consequência a redução da porosidade e o aumento da resistência dos materiais. Existe a questão dos ganhos ambientais quando um resíduo que é gerado em grande escala tem a possibilidade de ser utilizado por um setor que consome grande quantidade de recursos naturais, proporcionando menores desgastes à natureza e prevenindo desastres ambientais.

2.6 ADIÇÕES MINERAIS

Este trabalho tem o intuito de conhecer o comportamento do concreto com adições do Resíduo de Beneficiamento de minério de ferro tratado RBMFt, portanto, é fundamental que se obtenha conhecimento sobre os tipos de adições minerais que podem ser utilizadas em matrizes cimentícias. A partir disso, pode-se conhecer a melhor forma de aplicação do resíduo estudado.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais podem ser pozolânicas, cimentantes e preenchedoras (filler), a depender de suas propriedades físico-químicas.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define pozolanas como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

Segundo Silva (2004), as pozolanas podem ser originárias tanto de materiais naturais (tufos vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas), como de subprodutos e resíduos agrícolas e industriais (cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz). A denominação material natural refere-se a todos os materiais pozolânicos derivados de rochas ou materiais vulcânicos (com exceção das terras

diatomáceas) que passam por processos de britagem, moagem e classificação, e que, geralmente, são ativados termicamente, pois apresentam impurezas que diminuem a sua atividade pozolânica.

Em relação aos materiais cimentantes, Mehta e Monteiro (2008) afirmam são aqueles que necessitam apenas de água para realizar seu processo de hidratação, porém, com a presença de hidróxido de cálcio aceleram suas reações. Este comportamento pode ser observado com a escória de alto-forno, que é utilizada para a produção de cimentos.

Foseca 2010) define filler como um material finamente dividido, não reativo, com partículas de diâmetro médio próximo ao do cimento, podendo ser constituído de materiais naturais ou inorgânicos processados.

Algumas adições minerais que podem ser citadas são os materiais com características não reativas que possuem finalidade específica de dar cor às argamassas e concretos como o pó de tijolo e o resíduo de minério de ferro.

De acordo com Silva (2004), as adições minerais em concretos variam entre 5 e 100% do peso do cimento. O seu emprego pode ser feito de duas formas distintas, como substituição de parte do cimento e como adição em percentuais variáveis em relação à massa do cimento.

2.6.1 ADIÇÕES DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS.

Sabe-se que o processo de concentração de minério de ferro gera resíduos em diversas etapas, com características físicas diferentes. Neste trabalho o resíduo foi proveniente da etapa de deslamagem e flotação como visto na figura 3. Portanto trata-se de um resíduo fino, com características mais próximas à de fillers, como pode ser observado nos trabalhos apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Estudos desenvolvidos com aplicação do resíduo de minério de ferro

AUTORES	PESQUISA
Franco et al. (2014)	Aplicação do rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto.
Huang et al. (2013)	Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement
Aristimunho e Bertocini (2012)	Aplicação da lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento Portland.
Guerra (2014)	Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro <i>pellet feed</i> em pavimentos de blocos intertravados de concreto.

Fonte: Autor

Franco *et al.* (2014) realizaram adições de 0,5, 5, 10 e 50% de rejeito de mineração aos concretos C20, C30 e C40, proporcionalmente ao agregado miúdo. Notaram que para o concreto de resistência C20 a adição do resíduo em 5% apresentou o melhor desempenho mecânico, enquanto que para os concretos de resistência C30 e C40 a adição do resíduo de minério de ferro em 10% demonstrou-se mais favorável.

Guerra (2014), percebeu que o rejeito apresentou propriedades físicas, químicas e ambientais satisfatórias para a sua utilização como material filler nos pavimentos intertravados. Em sua pesquisa foram avaliados três traços, um referência e outros dois contendo adições de rejeito na proporções de 5 e 10% da massa do cimento. Na comparação entre o concreto com 5% de rejeito e a referência, o concreto com rejeito apresentou resistência superior em 6,6%. O concreto com 10% de adição apresentou resistência superior em 3% em relação à referência.

Nota-se também que as adições de resíduo de minério influenciam nos aspectos de durabilidade. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o preenchimento de vazios capilares contribuem com o bloqueio da passagem de agentes externos agressivos ao concreto.

2.6.1.1 DURABILIDADE

Segundo Helene e Tutikian (2011), os concretos devem ser duráveis frente às solicitações às quais serão expostos durante a vida útil. O conceito de durabilidade está associado aos mecanismos de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos: capilaridade, difusibilidade, migração iônica e permeabilidade.

Sabe-se também que outros fatores podem influenciar positivamente na qualidade do concreto como adições minerais, e negativamente, como agregados contaminados, entre outros. Desta forma, torna-se indispensável a análise de durabilidade para os concretos, especialmente para aqueles que contenham resíduos e subprodutos.

Aristimunho e Bertocini (2012), buscaram avaliar a aplicação do resíduo de minério de ferro em forma de pó em argamassas de cimento Portland. Desta forma, foram moldados corpos de prova com variadas proporções de cimento, areia e pó de minério de ferro. Foram realizadas adições de minério de ferro em pó em relação à massa de cimento do traço referência em porcentagens de 4, 6, 8 e 20%. O índice de vazios foi medido e observou-se que a maior quantidade de material fino prejudica a trabalhabilidade da argamassa e o adensamento das camadas também é prejudicado, no caso as adições de 6 e 8% apresentaram melhores resultados. Geralmente, quando se reduz o índice de vazios, conseqüentemente a durabilidade e resistência à compressão são aumentados.

Fontes (2013), utilizou rejeito de minério de ferro como matéria-prima para produção de matrizes de argamassa para revestimento e assentamento de alvenarias. As argamassas foram dosadas segundo proporção de 1:3, com agregados naturais, reciclados, cimento e cal. Foram produzidos traços com substituição da cal por rejeito nas proporções 0, 10, 20, 50 e 100%, para idades de 3, 7 e 28 dias. Quando analisada a absorção por capilaridade foi constatado que argamassas com maior quantidade de rejeito, tendem a absorver mais água por capilaridade quando comparadas com os traços naturais.

2.7 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

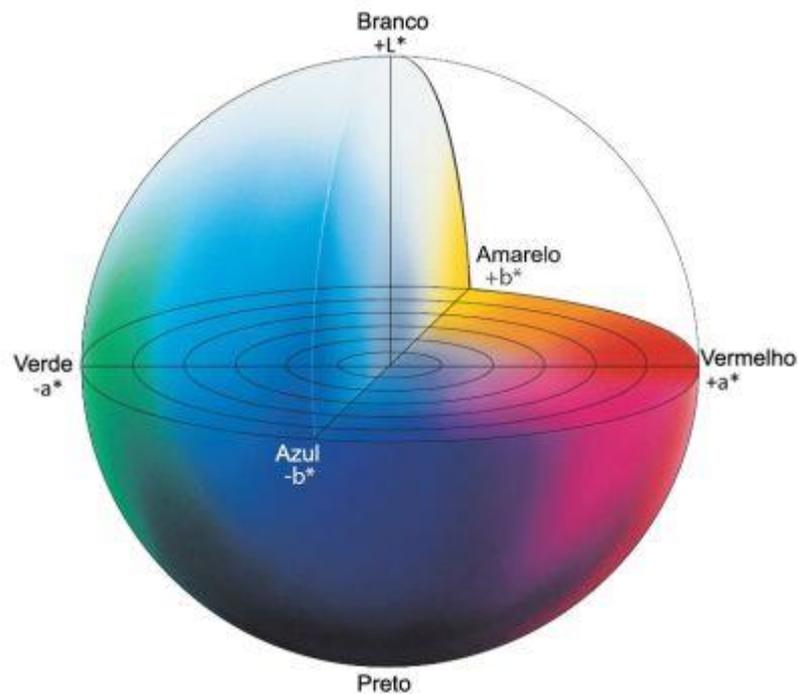
Segundo Passuelo (2004), os materiais que compõem a mistura de concreto (cimento, agregados, adições e aditivos) e a dosagem utilizada para a fabricação, são responsáveis pela sua coloração final.

Boschi e Melchiades (1999) afirmam que a percepção das cores envolve a participação de três elementos fundamentais: A fonte de luz, o objeto e o observador. No caso de materiais cerâmicos, que na maioria das vezes não são transparentes, pode-se dizer que a fonte de luz emite uma radiação eletromagnética que incide sobre o objeto, interage com a superfície e o novo espectro, resultante dessa interação, é refletido e detectado pelo olho do observador. A partir de então impulsos nervosos são enviados ao cérebro que produz a sensação denominada cor.

No passado, várias pessoas desenvolveram métodos para quantificar as cores e expressá-las numericamente, com o objetivo de tornar a comunicação de cores mais fácil e precisa. Esses métodos visavam proporcionar uma forma numérica de expressar as cores, da mesma forma como nos expressamos em termos de comprimentos e pesos. Esses métodos sofreram evolução ao longo do tempo e hoje podemos contar com técnicas bastante avançadas de medição de cor. A CIE *Commission internationale de l'Eclairage* é uma organização sem fins lucrativos considerada como a autoridade na ciência de luz e cor, e definiu três espaços de cor, CIE XYZ, CIE L*C*h e CIE L*a*b, para comunicação e expressão das cores.

Os sistemas numéricos de avaliação de cor baseiam-se na medida de refletância e normalmente são representadas a partir dos parâmetros tonalidade, intensidade luminosa e saturação, todos eles intimamente relacionados com a luz que está incidindo sobre o objeto. A tonalidade representa a sua especificação geral, mas não indica a concentração, dada pela saturação. A intensidade luminosa compõe o terceiro atributo, variando do branco ao preto. Dado o seu caráter tridimensional, a cor pode ser graficamente representada por um sistema de coordenadas perpendiculares (Figura 27): (PIOVESAN, 2009).

Figura 6 – Representação do Sólido de cor no Espaço L*a*b



Fonte: Minolta, 1998.

No sistema de cor L*a*b o L* indica a luminosidade, as coordenadas $-a^*$ e $+a^*$ representam a variação da cor verde ao vermelho e as coordenadas $-b^*$ e $+b^*$ representam a variação do azul ao amarelo.

Um instrumento de medição como um espectrofotômetro ou um colorímetro medem luz refletida dos objetos em cada comprimento de onda ou em faixas específicas, os resultados são apresentados em termos numéricos encontrados no espaço de cor CIE L*a*b*.

As diferenças de cor são definidas entre as amostras e o padrão, essa diferença de cor é conhecida como ΔE e para determinação dessa diferença é utilizada a equação 2.

(2)

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)}$$

Onde:

ΔE = Diferença total de cor;

ΔL = Diferença em mais claro e mais escuro;

Δa = Diferença em vermelho e verde;

Δb = Diferença em amarelo e azul.

A diferença de cor mede-se de acordo com a Norma alemã DIN 6174/97 podem ser verificados os níveis de percepção humano para as diferenças colorimétricas, de acordo com a tabela 5.

Tabela 5 - Níveis de percepção das diferenças colorimétricas

Diferenças (ΔE)	Classificação
< 0,2	Imperceptível
0,2 a 0,5	Muito pequena
0,5 a 1,5	Pequena
1,5 a 3,0	Distinguível
3,0 a 6,0	Facilmente distinguível
6,0 a 12,0	Grande
> 12,0	Muito grande

Fonte: DIN 6174/97

2.8 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

A técnica de estabilização por solidificação de resíduos é utilizada há muitos anos, o processo tornou-se mais conhecido e empregado em meados da década de 70, com o tratamento de alguns resíduos provenientes da indústria de aço. A estabilização desses resíduos era realizada afim de neutralizar sua acidez, utilizava-se cal, cinza

volante, cimento Portland e alguns solos para a produção de um sólido possível de descarte em aterro (MACIEL, 2015).

De acordo com Brito (2007), Sussa e Mayer (2016), na estabilização por solidificação os contaminantes são aprisionados numa matriz sólida, no caso do encapsulamento físico, a porosidade será substancialmente reduzida, os caminhos de conexão à superfície serão bloqueados e conseqüentemente sua permeabilidade diminuída, tornando o processo de lixiviação limitado à superfície ou à superfície de fratura, tratando-se da fixação química dos contaminantes, estes se integram à rede cristalina ou no produto final solidificado. Nestes casos, o produto continua contendo contaminantes, porém, em um estado insolúvel e não lixiviável, tornando o conjunto inerte.

Brito (2007), afirma que entre os agentes aglomerantes que melhor realizam o encapsulamento de resíduos contaminantes estão o cimento Portland, hidróxido de cálcio, asfalto, argilas, polietileno e polímeros orgânicos. Dentre as tecnologias citadas, a utilização do cimento Portland é a mais comum devido à sua simplicidade, o único material necessário para sua ativação é a água. De acordo com Pinto (2005) o uso de cimento Portland no processo de estabilização por solidificação foi inicialmente aplicado a resíduos nucleares por volta dos anos 50.

Com a percepção das vantagens do processo de estabilização de resíduos contaminantes por solidificação, pesquisas são desenvolvidas com o intuito de se obter maior conhecimento sobre a técnica. A tabela 6 mostra a autoria de vários trabalhos realizados a nível mundial que utilizaram diferentes métodos de avaliação e tipos de resíduos.

Tabela 6 - Resíduos estabilizados por solidificação

Autor	Aglomerantes (resíduos)	Ensaio (agência)
PAN, YZ et al. (2019)	Cimento (solo contaminado)	HJ 557 – 2010 (China TCLP standart)
FEI, Y et al. (2018)	Cimento (solo contaminado)	USEPA Method - 1996
MONTENEGRO, M. (2016)	Cimento (cinzas de biomassa)	NEN 7345 - 1994
MOUSSACEB, K et al. (2013)	Cimento (resíduos industriais contendo chumbo, níquel e cromo)	NEN 7375 - 2004

Fonte: PAN et al. (2019); FEI et al. (2018); MONTENEGRO (2016); MOUSSACEB et al. (2013)

Os principais métodos aplicados para verificação da E/S são os protocolos do Canadá e França e o modelo dos EUA. Entretanto, alguns países utilizam normas próprias que em alguns casos são bastante eficientes levando em consideração o tratamento e o gerenciamento de resíduos E/S. Na Holanda, dentre as normas utilizadas destaca-se a norma de lixiviação, NEN 7375 (*Tank Leaching Test*), essa norma permite fazer uma avaliação do material solidificado em diferentes estágios, sem realizar a trituração da amostra solidificada, ou seja, na forma de corpo monolítico (NEN 7375, 2004). Os métodos que apresentam a amostra em sua forma monolítica seriam os mais indicados ao se avaliar materiais com resíduos E/S. Pois assim é possível avaliar se o fator tempo tem influência na lixiviação de compostos tóxicos ao ambiente, bem como constatar se realmente esses resíduos estão sendo encapsulados dentro da matriz construtiva (MACIEL, 2015).

Neste contexto, alguns autores brasileiros realizaram estudos propondo metodologias de lixiviação para testar a estabilização por solidificação de resíduos incorporados a materiais de construção.

Pinto (2005), estudou a estabilização por solidificação de resíduos que continham metais pesados, como os da indústria curtumeira e os de escoamento de água da chuva de estradas. Foram utilizados cimento Portland e argila como agentes solidificantes, os resultados mostraram que os resíduos participam da hidratação do cimento, retardando ou reagindo com alguns dos compostos do cimento. A presença de argila favoreceu o encapsulamento dos metais pesados presentes nos resíduos, comprovado pelos ensaios de resistência à compressão e de lixiviação, que

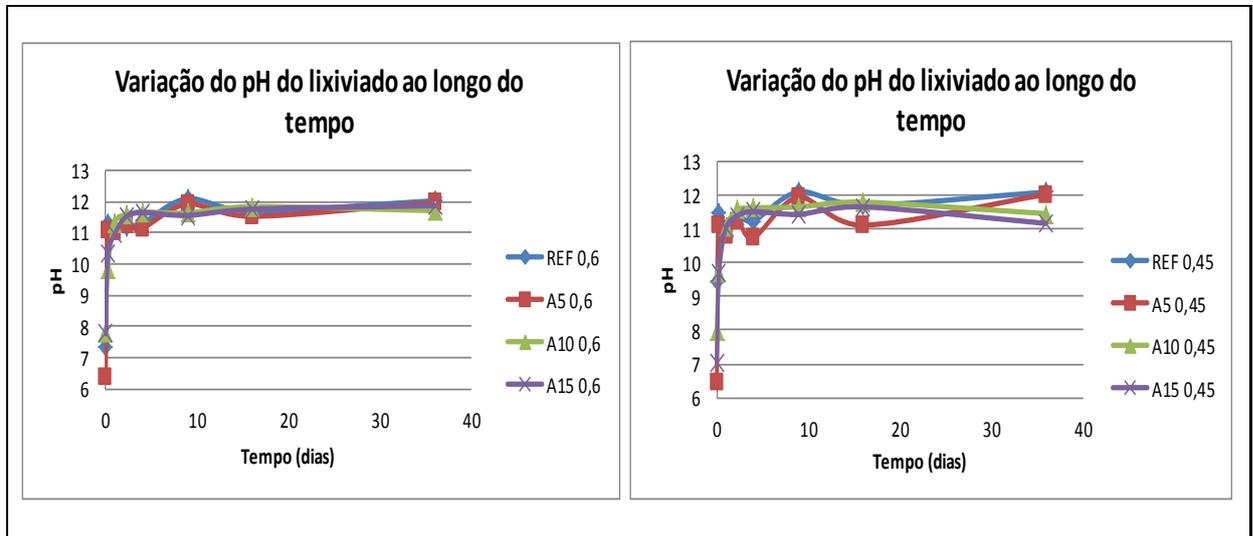
permaneceram dentro dos valores exigidos pela legislação ambiental. Brehm *et al.* (2013), verificaram a estabilização por solidificação do lodo de fosfatização em matrizes de cerâmica vermelha e em concretos de cimento Portland. Foram realizadas caracterizações dos materiais envolvidos e ensaios de lixiviação e solubilização das matrizes estudadas com e sem incorporação do lodo. Os resultados indicaram que há uma tendência à estabilização dos parâmetros avaliados tanto na matriz cerâmica quanto na matriz de cimento Portland.

Em outro exemplo, Brito e Soares (2008), avaliaram a integridade e a retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação. Foram comparadas as médias de quatro tratamentos (A,B,C e D) com 0, 40, 50 e 60% respectivamente de contaminantes e três repetições. Cimento Portland comum, bentonita sódica e hidróxido de cálcio foram usados para estabilizar o resíduo sólido sintético contendo óxido de Cd^{2+} , Pb^{2+} e Cu^{2+} . Concluiu-se que os tratamentos influenciaram no resultado de lixiviação do cádmio, chumbo e cobre. Os tratamentos mostraram que as concentrações do extrato solubilizado e lixiviado aumentam em função da quantidade de cádmio, chumbo e cobre adicionada. O maior valor encontrado foi para o material proveniente do tratamento D. Para os ensaios de integridade/durabilidade, constatou-se que o aumento da absorção de água fez com que a resistência à compressão diminuísse. O uso de cimento Portland, hidróxido de cálcio e bentonita sódica se mostrou ideal para a retenção de metais pesados, evitando a sua lixiviação e a solubilização para o meio ambiente.

A verificação do encapsulamento do RBMFt pelos componentes do concreto, foi conduzida por um grupo de pesquisa que trabalhou em conjunto na Universidade Federal do Espírito Santo. Spagnol *et al.* (2018), realizaram uma avaliação ambiental nos concretos com adições de 0, 5, 10 e 15% do resíduo de beneficiamento do minério de ferro e relação água/cimento de 0,6 e 0,45, submetendo-os ao ensaio de lixiviação, seguindo as instruções da norma EA NEN 7375:2004 – *Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials*, por um período de 36 dias. O pH e a condutividade das amostras, coletadas durante o período de ensaio, foram medidos e percebeu-se, pela análise do comportamento do pH, que a amostra entrou em equilíbrio após 54h de teste, de acordo com a análise da condutividade das amostras, durante todo o teste ocorreu a lixiviação do resíduo.

Os resultados da análise do pH e da condutividade das amostras estão representados pelas figuras 7 e 8, respectivamente.

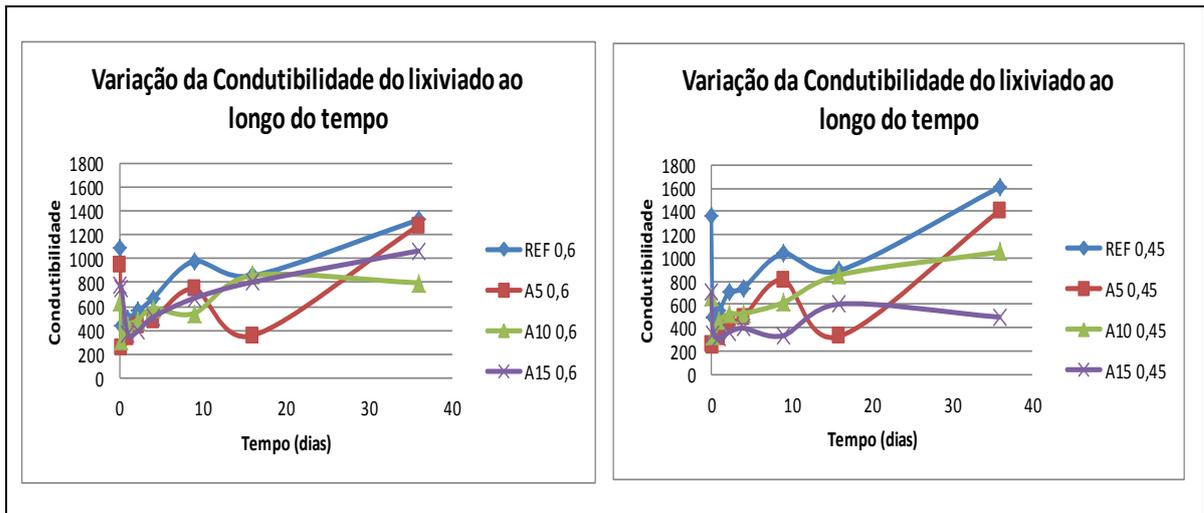
Figura 7 - Variação do pH do lixiviado ao longo do tempo



Fonte: Spagnol *et al.* (2018)

De acordo com Pinto (2005), o ensaio de lixiviação pode ser influenciado pelo pH da mistura durante o ensaio. O aumento na alcalinidade do sistema aumenta a mobilidade de alguns metais, obtendo uma maior concentração desses compostos na solução de extração. Spagnol *et al.* (2018), perceberam um aumento no pH das amostras no decorrer do período de ensaio, chegando para a todos os traços avaliados, a 12, o que indica uma tendência de aumento da lixiviação de metais com um maior tempo de exposição da matriz às intempéries. Segundo GROOT e SLOOT, (1992), a lixiviação dos compostos é mínima com um pH entre 7 e 10.

Figura 8 – Variação da condutividade ao longo do tempo



Fonte: Spagnol *et al.* (2018)

Venâncio (2012), afirma que a natureza heterogênea dos materiais cimentícios resulta em diferentes condutividades elétricas, ocorrendo uma competição entre elas. Spagnol *et al.* (2018) perceberam uma não uniformidade do lixiviado dos concretos contendo o RBMFt, foram observadas oscilações significativas durante todo o procedimento. Nos primeiros 5 dias de ensaio, observaram uma tendência de aumento constante da lixiviação de contaminantes, para todos os traços estudados. A partir desse momento, os traços A10 0,6 e A15 0,45 apresentaram um declínio da condutividade, o que indica uma menor lixiviação de contaminantes. De acordo com Venâncio (2012), a condutividade indica a mobilidade de íons, o que representa a lixiviação de contaminantes.

Nota-se que entre o 10^o e o 15^o dia, há uma queda da condutividade e do pH do traço A5, denotando, entre esse período, uma maior retenção de contaminantes

No que diz respeito à lixiviação de contaminantes, Spagnol *et al.* (2018), obtiveram os resultados apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados encontrados para o extrato lixiviado

Parâmetros ($\mu\text{g/l}$)	CONCRETOS								NBR 10.004 ($\mu\text{g/L}$)
	a/c = 0,45				a/c = 0,60				
	REF.	A5	A10	A15	REF.	A5	A10	A15	
Prata	1,627	1,263	1,655	1,179	3,059	1,787	1,265	1,450	5000,0
Arsênio	0,074	0,073	0,079	0,056	0,079	0,096	0,076	0,050	1000,0
Cádmio	0,248	0,323	0,210	0,224	0,267	0,251	0,219	0,222	500,0
Cromo	3,124	0,315	0,468	0	2,121	0,426	0	0,316	5000,0
Cobre	6,983	7,299	3,817	4,488	9,759	7,764	21,004	4,551	5000,0
Mercúrio	0,863	0,778	0,733	0,732	0,852	0,793	0,756	0,706	100
Chumbo	1,79	2,191	4,226	1,115	1,568	2,289	0,711	0,920	1000
Selênio	1,043	0,727	0,644	0,670	0,910	0,624	0,764	0,652	1000

Fonte: Spagnol *et al.* (2018)

Observa-se que nenhum valor de concentração lixiviada ultrapassa os limites recomendados pela NBR 10004. Segundo Mayer e Sussa (2016), no caso do encapsulamento físico, a porosidade é substancialmente reduzida e o processo de lixiviação tende a ser limitado à superfície e à superfície de fratura. Nas amostras analisadas, pode-se observar redução na concentração da maioria dos contaminantes nos extratos lixiviados dos corpos de prova com adições de 5 a 15% e relação a/c de 0,45 e 0,60, provavelmente essa redução é devida à menor porosidade dos materiais, o menor contato com a substância extratora pode ter ocasionado uma menor concentração de metais nas amostras dos concretos com adições do RBMFt.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para garantir que os objetivos desta pesquisa fossem alcançados, foi realizado um planejamento que abrange etapas desde a obtenção do Resíduo de Beneficiamento de Minério de Ferro tratado RBMF até a observação do seu desempenho como material de construção civil. Foram escolhidos ensaios que possibilitariam a comprovação da hipótese inicial de que o RBMF melhora o desempenho dos concretos em relação à resistência e à durabilidade, devido à sua ação filler e age como pigmento alterando a coloração dos concretos produzidos. Foi também elaborado um cronograma que delimitaria todos os prazos para obtenção das variáveis resposta. Nos tópicos seguintes serão apresentadas todas as variáveis utilizadas na pesquisa e comentada a sua importância para o desenvolvimento da mesma.

3.1.1 VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.1.1 VARIÁVEIS DEPENDENTES

Variáveis dependentes são representadas pelas respostas obtidas por meio da manipulação das variáveis independentes. Essas variáveis foram obtidas após a realização de ensaios em laboratório e estão diretamente ligadas às variáveis independentes. Foram admitidas neste trabalho as seguintes variáveis dependentes:

- Resistência à compressão axial
- Consistência pelo abatimento do tronco de cone
- Massa específica do concreto no estado fresco
- Resistência à tração por compressão diametral

- Absorção de água por imersão
- Absorção de água por capilaridade
- Luminosidade
- Coordenada ver/vermelho.

3.1.1.2 VARIÁVEIS INDEPENDENTES

São variáveis manipuladas durante o experimento e podem ser consideradas a causa de um determinado efeito. São variáveis introduzidas na pesquisa para se conhecer a influência que possuem sobre as variáveis dependentes. Foram utilizadas nessa pesquisa, variáveis independentes como:

- Proporção de RBMF em relação à massa do cimento (0, 5, 10 e 15%)
- Relação a/c (0,45 e 0,60)
- Idade (28, 91 e 180 dias)

3.1.1.3 VARIÁVEIS DE CONTROLE

Essas variáveis devem se manter constantes durante o experimento, pois podem afetar os resultados obtidos na pesquisa. As variáveis controle consideradas neste trabalho foram as seguintes:

- Procedimento para obtenção do RBMF
- Tipo de cimento utilizado (CP V-ARI, Holcim, cimentos do mesmo lote)
- Agregado miúdo
- Agregado graúdo
- Procedimento de dosagem do concreto (IPT-EPUSP)
- Procedimento de cura do concreto

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental é o processo de planejar e conduzir o experimento, tendo a sua implantação de modo em que seja possível recolher dados que possam ser analisados usando metodologias estatísticas apropriadas que conduzam a conclusões válidas e objetivas.

Os níveis das variáveis independentes desta pesquisa foram baseados em trabalhos que investigaram o desempenho de concretos com adição de resíduos e está representado na Tabela 8.

Tabela 8 - Níveis dos fatores para ensaios em concreto

CONCRETO NO ESTADO FRESCO			
Variáveis independentes	Nº de níveis	Níveis	Unidades
Percentual de adição de RBMF	4	0, 5, 10, 15	%
Relação a/c	2	0,45; 0,60	-
CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO			
Variáveis independentes	Nº de níveis	Níveis	Unidades
Percentual de adição de RBMF	4	0, 5, 10, 15	%
Relação a/c	2	0,45; 0,60	-
Idade	3	28, 91 e 180	dias
DURABILIDADE DOS CONCRETOS			
Variáveis independentes	Nº de níveis	Níveis	Unidades
Percentual de adição de RBMF	4	0, 5, 10, 15	%
Relação a/c	2	0,45; 0,60	-
Idade	3	28, 91, 180	dias

Fonte: Autor

A quantidade de corpos de prova para a realização dos ensaios em concreto endurecido foi definida por meio de um experimento fatorial cruzado. O quadro 3

apresenta com detalhes, como foi realizado o cálculo da quantidade de corpos de prova.

Quadro 3 – Projeto fatorial cruzado completo para ensaio em concreto

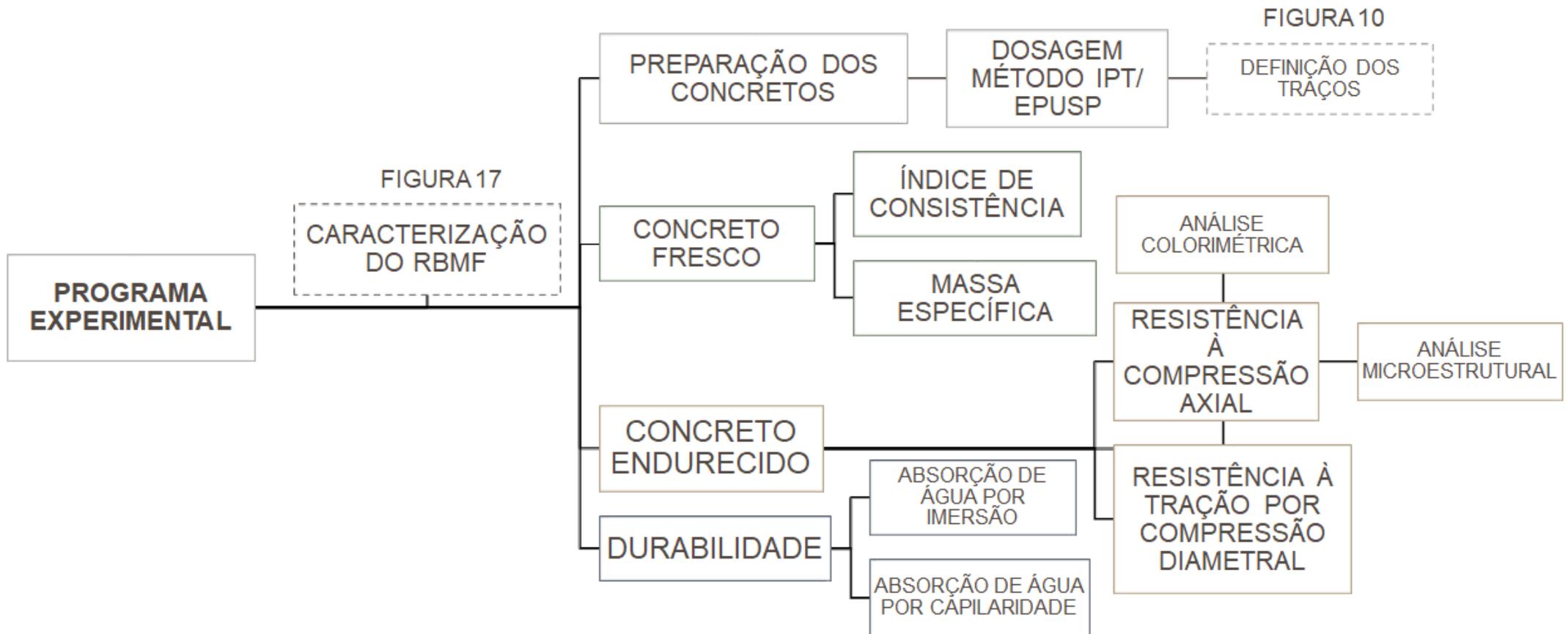
PROJETO FATORIAL CRUZADO COMPLETO
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantidade de corpos-de-prova para ensaio em concreto endurecido <p>Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007)</p> <p>nº de níveis de proporção de resíduo x nº de níveis de relação água/cimento x nº de níveis de idade x nº de variáveis resposta:</p> $4 \times 2 \times 3 \times 6 = 144$ <p>Determinação de resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)</p> <p>nº de níveis de proporção de resíduo x nº de níveis de relação água/cimento x nº de níveis de idade x nº de variáveis resposta:</p> $4 \times 2 \times 3 \times 6 = 144$ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantidade de corpos-de-prova para ensaio de durabilidade <p>Determinação da absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009)</p> <p>nº de níveis de proporção de resíduo x nº de níveis de relação água/cimento x nº de níveis de idade x nº de variáveis resposta:</p> $4 \times 2 \times 3 \times 3 = 72$ <p>Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)</p> <p>nº de níveis de proporção de resíduo x nº de níveis de relação água/cimento x nº de níveis de idade x nº de variáveis resposta:</p> $4 \times 2 \times 3 \times 3 = 72$ <p>Análise colorimétrica D-2244 (ASTM, 2005)</p> <p>nº de níveis de proporção de resíduo x nº de níveis de relação água/cimento x nº de variáveis resposta:</p> $4 \times 2 \times 2 = 16$ <p>NÚMERO TOTAL DE CORPOS-DE-PROVA:</p> $144 + 144 + 72 + 72 + 16 = 448$

Fonte: Autor

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos expostos neste trabalho e ajustar todas atividades desenvolvidas em laboratório, o programa experimental foi de fundamental importância. Na Figura 9 pode-se observar a divisão do fluxograma em cinco etapas, considerando seu início no momento de chegada do resíduo estudado ao laboratório de materiais de construção civil da UFES – LEMAC. As etapas do programa experimental foram: a caracterização do resíduo, preparação dos concretos, concreto fresco, concreto endurecido e durabilidade.

Figura 9 – Fluxograma do programa experimental

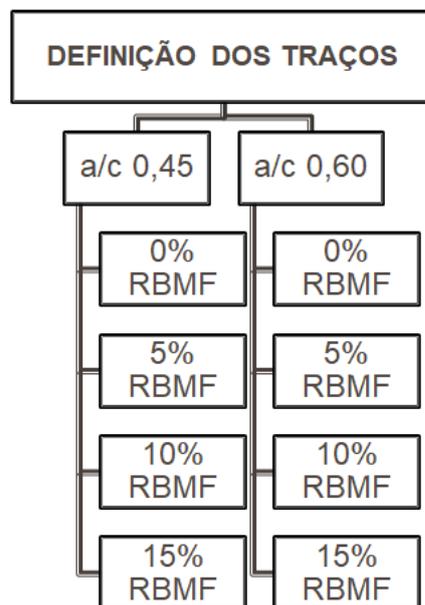


Fonte: Autor

Foram estabelecidas duas relações água/cimento, 0,45 e 0,60, a primeira dá origem a um concreto com menor porosidade, com tendência a possuir maior resistência à compressão e durabilidade. O segundo dá origem a um concreto mais poroso, com tendência a ter menor resistência e durabilidade. A importância da definição desses dois traços está ligada às suas diferentes características, a adição do RBMF à composição desses concretos pode garantir um desempenho diferente nas duas situações tanto em relação às características de resistência e durabilidade, quanto na sua coloração.

Na Figura 10 é demonstrado o percentual de adição do RBMF em relação à quantidade de cimento. A quantidade de RBMF utilizada foi baseada em trabalhos que envolveram a investigação da resistência e durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduos.

Figura 10 - Definição da relação água/cimento e percentual de adição



Fonte: Autor

Na Tabela 9 é apresentado o os ensaios que serão realizados dentro do programa experimental.

Tabela 9 – Programa experimental - Ensaios

	Ensaios	Tipo de CP	Idade	Nº de CP para cada relação a/c	
				0,45	0,60
REF. 0%	Determinação da consistência NBR NM 67 (ABNT, 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Determinação da massa específica do concreto NBR 9833 (ABNT, 2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação de resistência à compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação da absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Análise colorimétrica D-2244 (ASTM, 2005)	Prismático 8 x 10 x 10cm	-	2	2
AD. 5%	Determinação da consistência NBR NM 67 (ABNT, 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Determinação da massa específica do concreto NBR 9833 (ABNT, 2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação de resistência à compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação da absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Análise colorimétrica D-2244 (ASTM, 2005)	Prismático 8 x 10 x 10cm	-	2	2

	Ensaio	Tipo de CP	Idade	Nº de CP para cada relação a/c	
				0,45	0,60
AD. 10%	Determinação da consistência NBR NM 67 (ABNT, 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Determinação da massa específica do concreto NBR 9833 (ABNT, 2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação de resistência à compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação da absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Análise colorimétrica D-2244 (ASTM, 2005)	Prismático 8 x 10 x 10cm	-	2	2
AD. 15%	Determinação da consistência NBR NM 67 (ABNT, 1998)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Determinação da massa específica do concreto NBR 9833 (ABNT, 2009)	Amostra no estado fresco	-	-	-
	Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação de resistência à compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	6	6
	Determinação da absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 2009)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)	Cilíndrico 10 x 20cm	28, 91, 180	3	3
	Análise colorimétrica D-2244 (ASTM, 2005)	Prismático 8 x 10 x 10cm	-	2	2

Fonte: Autor

3.4 MATERIAIS

Materiais utilizados na confecção dos concretos como areia, brita e Cimento Portland, foram adquiridos na região da Grande Vitória, o resíduo de minério de ferro foi coletado no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana – MG.

3.4.1 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado na pesquisa, é uma areia branca quartzosa extraída de jazida. Os ensaios de caracterização deste material foram realizados no laboratório de materiais de construção civil da UFES (LEMAC), esses ensaios seguiram as instruções das normas brasileiras. Os resultados da caracterização deste material podem ser vistos na Tabela 10.

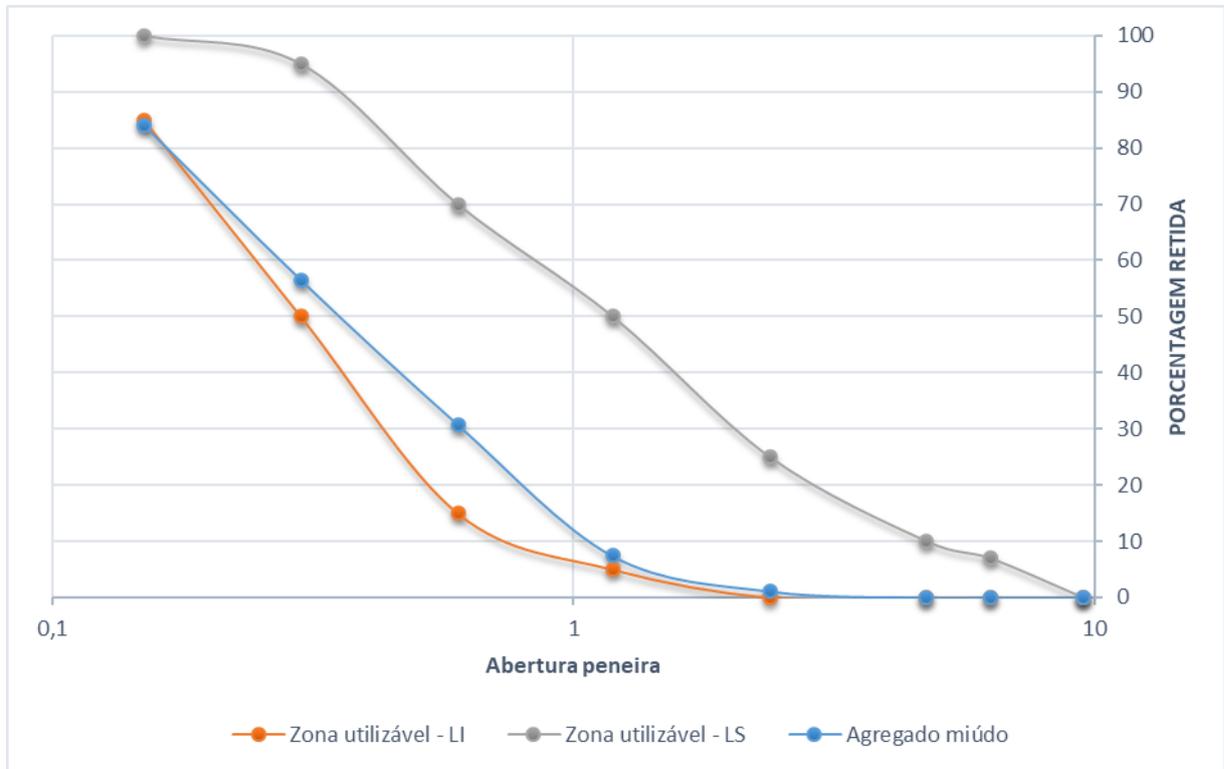
Na figura 11, pode-se observar que a areia se enquadrou nos limites especificados pela NBR 7211: 2009 – Agregados para concreto – especificações.

Tabela 10 - Propriedades físicas do agregado miúdo

Propriedades	Normas	Resultados
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,79
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	38,25
Matéria orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	68,40
Massa unitária (kg/m³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1630

Fonte: Autor

Figura 11 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor

3.4.2 AGREGADO GRAÚDO

A brita 1 foi o agregado graúdo escolhido para a confecção dos concretos, ela é proveniente da britagem de rochas graníticas e atende às características da norma NBR 7211: 2009 – Agregados para concreto – especificações. Foi observado que a brita possuía bastante sujeira e esse fator poderia interferir nos resultados, então, a brita foi lavada e seca ao ar livre antes de ser utilizada. Na tabela 11 podem ser observadas as características físicas deste agregado.

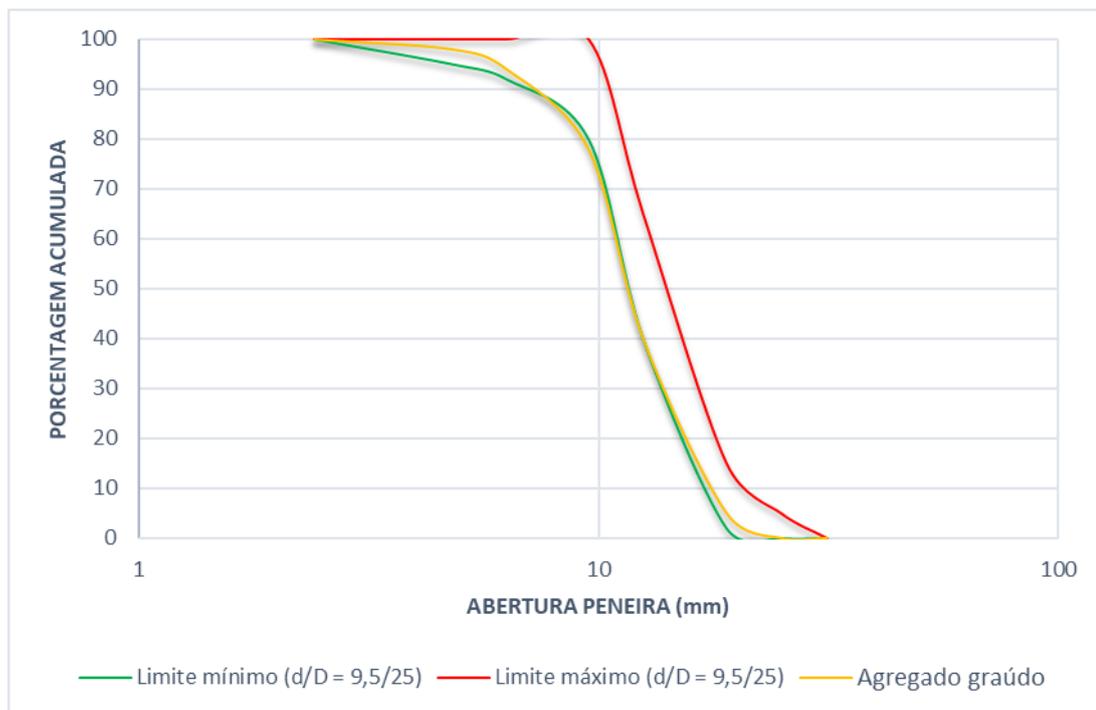
Tabela 11 - Ensaio realizados no agregado graúdo

Propriedades	Normas	Resultados
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,57
Dimensão máxima características (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,79
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,42
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1530

Fonte: Autor

A figura 12 demonstra a distribuição granulométrica deste agregado.

Figura 12 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo – zona granulométrica brita 1 (d/D = 9,5/25)



Fonte: Autor

3.4.3 ÁGUA

A água utilizada foi fornecida pela rede de abastecimento público (CESAN).

3.4.4 CIMENTO

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP V - ARI. A composição deste material é de 95 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 5% de material carbonático. A escolha deste tipo de cimento foi baseada na menor quantidade de adições, com o objetivo de ter um melhor controle sobre a influência da adição do resíduo estudado na pesquisa.

A caracterização deste material foi cedida pela cimenteira Lafarge/ Holcim, os resultados estão expostos na tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização do cimento CP V - ARI.

ENSAIOS QUÍMICOS				
ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO NBR 11578/91
PF 950°C	NBR NM 18/12	%	3,45	<=4,5
SO3	NBR NM 16/12	%	3,64	<=4,5
RI	NBR NM 22/04	%	0,95	<=1
CaOI	NBR NM 13/13	%	1,93	Não aplicável
MgO	NBR NM 14/12	%	1,79	<=6,5
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS				
ENSAIOS	NORMA	UNIDADE	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO NBR 11578/91

Blaine	NBR NM 76/15	cm ² /g	4730	>=300
Densidade	NBR NM 23/01	g/cm ³	null	Não aplicável
Ret. 75 mic.	NBR 11579/13	%	0,1	<=6
Ret. 45 mic.	NBR 12826/14	%	0,7	Não aplicável
IP	NBR NM 65/03	Min.	129	>=60
FP	NM 65/03	Min.	171	Não aplicável

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) – NBR 7215/96

ENSAIOS	NORMA	UNIDADE	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO NBR 11578/91
Resist. Comp. 1d	NBR 7215/09	MPa	26,9	>=14
Resist. Comp. 3d	NBR 7215/09	MPa	37,4	>=24
Resist. Comp. 7d	NBR 7215/09	MPa	43,6	>=34
Resist. Comp. 28d	NBR 7215/09	MPa	51,3	Não aplicável

Fonte: Lafarge/Holcim

3.4.5 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Esse resíduo é proveniente da barragem de Fundão, cujo rompimento atingiu diversas comunidades no trecho compreendido entre a barragem e a foz do Rio Doce. O material estudado foi coletado no distrito de Bento Rodrigues em Mariana – MG.

3.4.5.1 VISITA ÀS BARRAGENS DA SAMARCO E AO DISTRITO DE BENTO RODRIGUES.

No dia 13 de novembro de 2017 a equipe de pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo, composta por 3 membros do programa de pós-graduação em engenharia civil, deslocou-se de Vitória – ES para Mariana – MG com o intuito de conhecer a região onde ocorreu o desastre e realizar a coleta de uma porção do rejeito de minério de ferro para estudos posteriores. A visita ao local foi apoiada pela

Fundação Renova, uma instituição autônoma e independente criada em novembro de 2015 para reparar os danos causados pelo rompimento da barragem de Fundão.

A equipe de manejo de rejeitos da Fundação Renova em conjunto com os pesquisadores da UFES desenvolveram um cronograma de visita às barragens da Samarco e ao distrito de Bento Rodrigues, além de um planejamento para a coleta do resíduo. No primeiro dia (13 de novembro de 2017) às 14h deslocaram-se da cidade de Mariana até a empresa Samarco, onde o grupo iniciou a visita aos locais programados. O primeiro local visitado foi a região das barragens (Germano, Fundão e Santarém), o momento mais marcante da visita ocorreu quando o grupo chegou ao local da barragem de Fundão, onde foi possível observar de perto a região em que ocorreu o rompimento e as obras que estavam sendo realizadas para conter a movimentação do resíduo que ainda resta na barragem. A figuras 13 demonstra a situação da barragem de Fundão no período da visita.

Figura 13 - Barragem de Fundão 13 de novembro de 2017



Fonte: Autor

De acordo com o funcionário da Samarco que acompanhou a visita, após o rompimento, a lama atingiu a barragem de Santarém e prejudicou a sua estrutura que estava passando por reformas.

Com o término da visita às barragens, o grupo seguiu para o distrito de Bento Rodrigues onde observou a devastação causada no local, diversas residências destruídas, em sua região mais baixa, a maior parcela coberta pela lama da barragem de Fundão. A Figura 14 apresenta a situação do local.

Figura 14 – Situação atual de Bento Rodrigues após rompimento da barragem



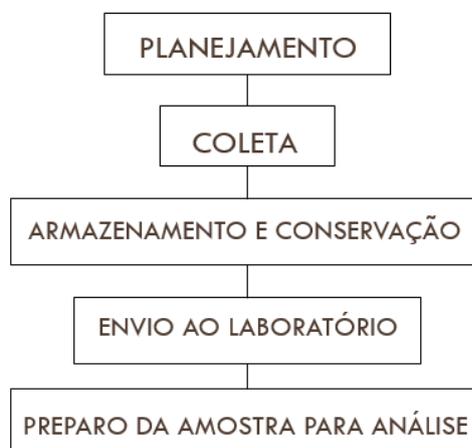
Fonte: Autor

3.4.5.2 COLETA DO RESÍDUO

Para a coleta do resíduo inicialmente foram definidos os pontos a serem amostrados e o tipo de amostragem, que foi determinada como composta, de acordo com a norma ABNT NBR 10.007/2004.

Anteriormente à coleta, foi realizado um estudo sobre suas prováveis características para um planejamento da melhor forma de coleta. A metodologia utilizada para a amostragem do material segue o que está exposto na Figura 15.

Figura 15 – Metodologia da amostragem



Fonte: Autor

Foi elaborado um roteiro para a realização da coleta do resíduo, baseando-se na ABNT NBR 10007: 2004 – Amostragem de resíduos sólidos. Levou-se em consideração o tipo de amostra a ser coletada, o local de amostragem, o tipo de amostrador, o frasco de coleta e o volume da amostra. Pode-se observar na tabela 13, o resumo do plano de amostragem.

Tabela 13 - plano de amostragem do resíduo de minério de ferro

PLANO DE AMOSTRAGEM	
TIPO DE AMOSTRA	Amostra composta
LOCAL DE AMOSTRAGEM	Rua São Bento, Bento Rodrigues, Mariana - MG
TIPO DE AMOSTRADOR	Pá
FRASCO DE COLETA	Tambor de polietileno (200L)
VOLUME DA AMOSTRA	200L

Fonte: Autor

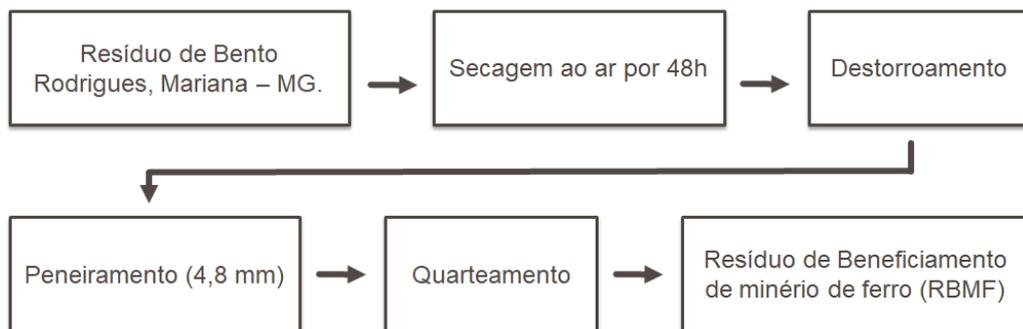
A coleta teve início aproximadamente às 17h do dia 13 de novembro de 2017. Foi verificado a espessura das camadas de resíduo com uma escavadeira manual, posteriormente o material foi coletado com a pá e transferido diretamente para o tambor de polietileno de 200L.

Após a coleta, uma transportadora foi contratada para levar o resíduo ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção – LEMAC/ UFES, onde foram realizadas as análises para a sua caracterização. O material foi entregue à transportadora no dia 14 de novembro e chegou ao laboratório no dia 16.

3.4.5.3 TRATAMENTO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

No momento da coleta, foi possível notar que o resíduo de minério de ferro possuía uma quantidade considerável de restos de vegetação e pedriscos, característica que adquiriu logo após o rompimento da barragem, devido ao seu contato com a vegetação e o solo da região atingida. O tratamento deste resíduo foi necessário para se retirar o excesso de matéria orgânica e de material com dimensões excedente e ele passou por etapas que podem ser observadas na Figura 16.

Figura 16 - Tratamento do resíduo de minério de ferro

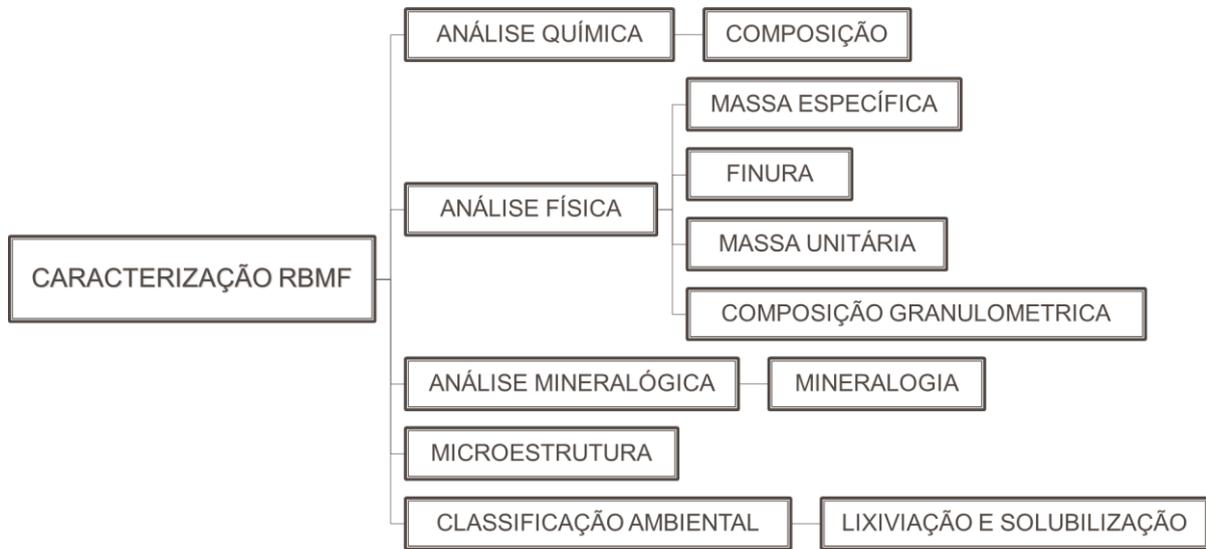


Fonte: Autor

3.4.5.4 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

A maior parte dos ensaios de caracterização do resíduo foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMAC/UFES). Este item aborda resultados das análises química, física, mineralógica, de microestrutura e classificação do resíduo. O fluxograma para caracterização deste material é apresentado na figura 17.

Figura 17 – Caracterização do RBMF



Fonte: Autor

3.4.5.4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Foi utilizada a técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) para se conhecer a composição química do RBMF, esse ensaio foi realizado pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR/UFPR), utilizando o equipamento Panalytical, Modelo Axios Max: tubo ródio 4 kv. Na técnica de fluorescência de raios X, a absorção dos raios emitidos ocasiona a excitação dos átomos do material analisado que, por sua vez, produz uma radiação conhecida por fluorescência. Essa radiação viabiliza a identificação de cada componente químico em função do comprimento de onda dos raios emitidos.

A composição química do resíduo estudado é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição química do RBMF

PROPRIEDADES	RBMF
Perda ao fogo – PF(%)	2,18
	SiO ₂ (%)
	54,7
	Fe ₃ O ₂ (%)
	39,1
	Al ₂ O ₃ (%)
	3,3
	K ₂ O (%)
	0,2
	TiO ₂ (%)
	0,1
Composição Química	P ₂ O ₅ (%)
	0,1
	CaO (%)
	0,1
	MnO (%)
	0,1
	MgO (%)
	0,1
	NaO ₂ (%)
	< 0,1
	SO ₃ (%)
	< 0,1

Fonte: Autor

3.4.5.4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios para análise das propriedades físicas do resíduo foram realizados em sua maior parte no LEMAC/UFES. Para análise da massa específica seguiu-se os procedimentos recomendados pela NBR 16605 (ABNT, 2017) – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da massa específica. Para este ensaio utilizou-se o frasco de Le Chatelier como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Massa específica com o frasco de Le Chatelier.



Fonte: Autor

A massa unitária, realizada no LEMAC/ UFES, é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o recipiente. Por meio dela pode-se transformar determinadas composições dadas em peso para volume e vice-versa. Os procedimentos para a realização deste ensaio estão na NBR NM 45 (ABNT, 2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. A figura 19 demonstra as etapas deste ensaio, na figura 19 (a) o recipiente possui 2/3 do seu volume preenchido pelo resíduo, na figura 19 (b) o material é nivelado ao recipiente para posterior pesagem.

Figura 19 – Ensaio de massa unitária



(a)

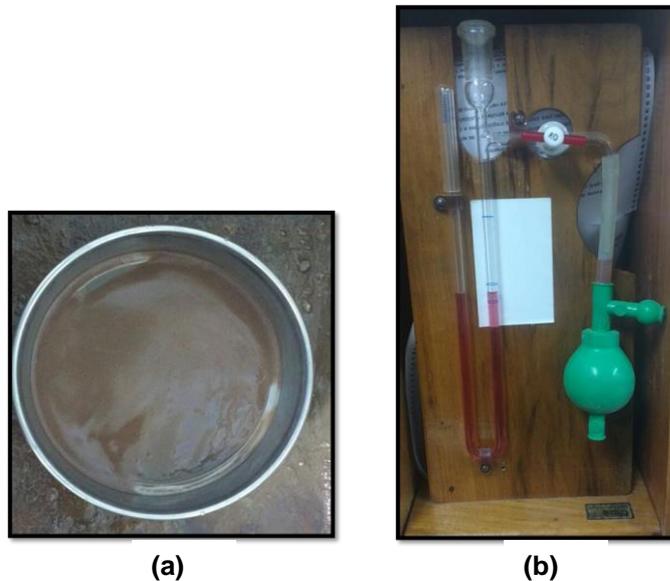


(b)

Fonte: Autor

A análise finura do material foi realizada pelo percentual retido na peneira nº 200, figura 20 (a). A superfície específica foi determinada pelo método da permeabilidade de Blaine, conforme figura 20 (b). Ensaios realizados no LEMAC/ UFES.

Figura 20 – (a) material retido na peneira nº 200; (b) Superfície específica pelo método de Blaine.



Fonte: Autor

A análise granulométrica do RBMF foi realizada no LAMIR/ UFPR, o ensaio foi feito com um granulômetro a laser da marca Cilas, modelo 1064, que permite a precisão necessária pela presença de grãos finos, menores que 0,075mm.

3.4.5.4.3 ANÁLISE MINERALÓGICA

Por meio da difração de raios X foi realizada a caracterização mineralógica do RBMF, essa é a técnica mais indicada para a determinação das fases cristalinas presentes nos materiais. Neste trabalho, o LAMIR/ UFPR foi responsável por realizar o ensaio de DRX, onde utilizou a técnica de determinação de argilominerais por tratamento a partir da técnica do pó, o equipamento utilizado para a aplicação desta técnica foi da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, com detector X'Celerator, tubo de cobre, o Software para análise mineralógica qualitativa foi o X'pert Highscore Plus, da marca Panalytical, com bancos de dados PDF-2.

3.4.5.4.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural do resíduo foi realizado com o auxílio do Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos/ Laboratório de Plasma Técnico (LMC/ LPT – UFES), onde foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo EVO 40 XVP da marca Zeiss.

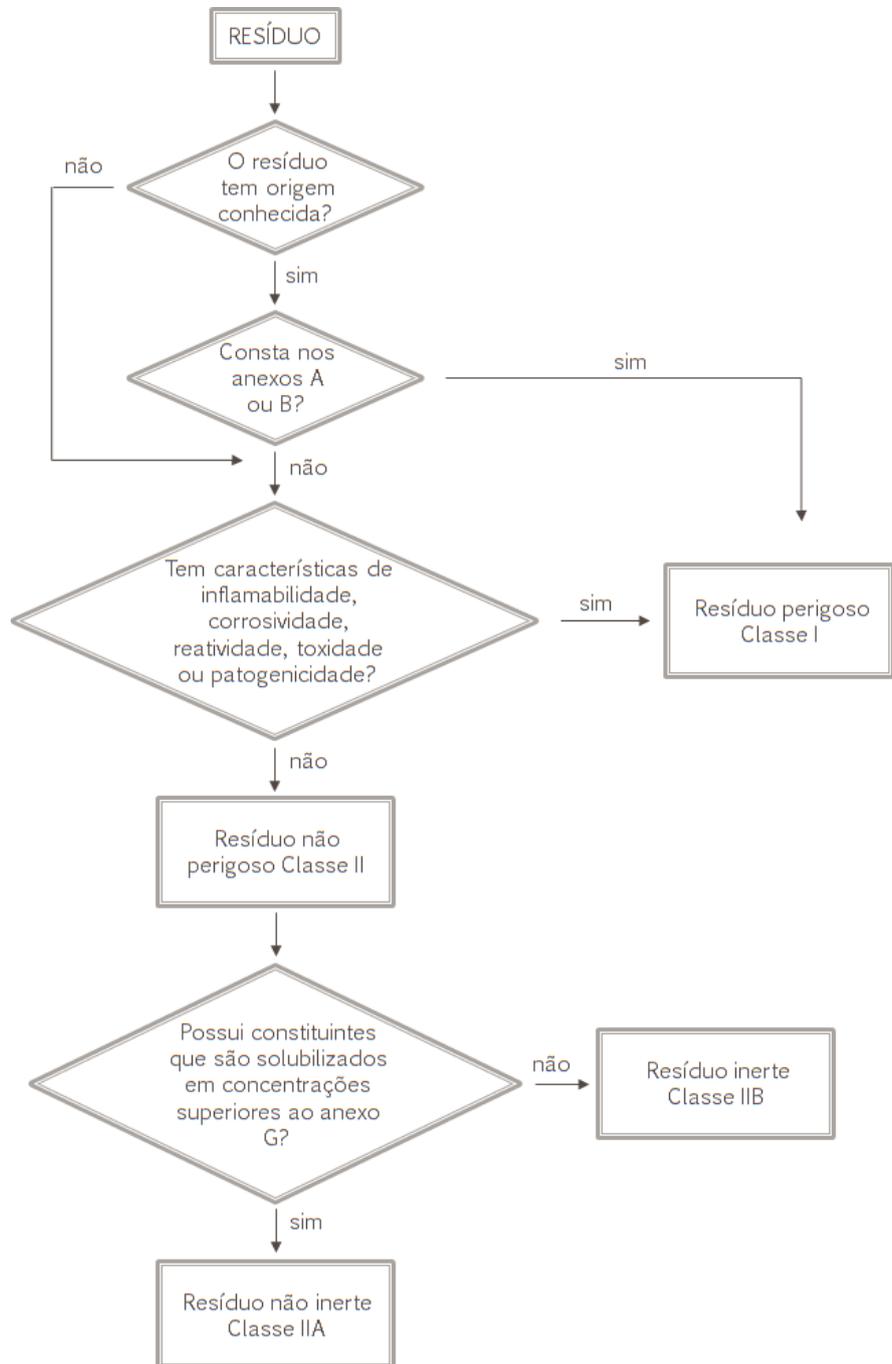
3.4.5.4.5 CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DO RESÍDUO SÓLIDO RBMF

Para a classificação do resíduo estudado foi necessário a obtenção do seu extrato solubilizado e lixiviado, foi necessário também a análise química desses extratos com base nos parâmetros indicados nos Anexos F e G da NBR 10004 (ABNT, 2004). O Laboratório de Controle de Qualidade – HIDROLABOR, foi responsável por realizar as análises necessárias para a classificação do RBMF.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, essa classificação é baseada nas características do material quanto à concentração de poluentes em sua composição e sua periculosidade, resíduos classe I são resíduos perigosos enquanto os resíduos classe II são considerados não perigosos e estão subdivididos em não inertes (classe IIA) e inertes (classe IIB).

O fluxograma de caracterização e classificação de resíduos (figura 21), proposto pela NBR 10004 (ABNT, 2004), deixa claro os passos a serem seguidos para a identificação das características do rejeito a fim de classificá-lo.

Figura 21 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos sólidos



Fonte: ABNT, 2004

O RBMF foi submetido ao ensaio proposto pela NBR 10005 (ABNT, 2004) - Procedimento para a obtenção do extrato lixiviado, afim de saber se algum elemento lixiviado ultrapassaria os limites estabelecidos pela norma. Foi necessário também a análise do extrato solubilizado, obtido por meio do ensaio proposto pela NBR 10006 (ABNT, 2005) – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado.

3.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Os procedimentos de dosagem dos concretos, os ensaios em concreto fresco (consistência e massa específica), concreto endurecido (resistência à compressão axial e resistência à tração) e os ensaios de durabilidade (absorção por imersão e capilaridade), foram realizados no LEMAC/ UFES.

3.5.1 DOSAGEM DOS CONCRETOS

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), para a obtenção de um concreto com as características requisitadas, a princípio deve-se realizar uma seleção criteriosa dos materiais componentes. A segunda etapa chama-se dosagem dos materiais, que consiste em encontrar a combinação exata dos materiais para que o concreto adquira as características exigidas em projeto.

O método de dosagem utilizado neste trabalho foi o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Neste método existe uma relação entre a relação água/cimento, a resistência à compressão, o traço e o consumo de cimento em um diagrama que é montado, baseado na lei de Abrams, lei de Lyse e lei de Molinari.

A primeira etapa desse método de dosagem consiste em um procedimento experimental, onde inicialmente foi definido o abatimento desejado à massa de concreto (10 ± 2 cm). Definido o abatimento, iniciou-se o procedimento para obtenção do teor de argamassa ideal (α), que é a relação entre a massa da argamassa seca e a massa total de material seco aplicado ao concreto. O teor de argamassa é ideal quando se observa a redução da quantidade de vazios aparentes na massa e por

sua maior coesão, por meio dos acréscimos de argamassa, como pode ser observado no quadro 4. O teor de argamassa que foi considerado ideal nesta dosagem foi de 52%.

Quadro 4 - Definição do teor de argamassa

Teor de argamassa	Traço unitário			Consumo de materiais (kg)			Acréscimo em relação ao α anterior (kg)		Consumo de água (kg)	a/c
	Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia		
0,48	1	1,88	3,12	6,410	12,051	20	-	-	2,50	0,39
0,49	1	1,94	3,06	6,535	12,679	20	0,125	0,628	2,61	0,40
0,50	1	2	3	6,666	13,333	20	0,131	0,654	2,80	0,42
0,51	1	2,06	2,94	6,802	14,012	20	0,136	0,679	3,06	0,45
0,52	1	2,12	2,88	6,944	14,722	20	0,142	0,710	3,47	0,50
0,53	1	2,18	2,82	7,092	15,460	20	0,148	0,738	-	-

Fonte: Autor

Após a definição do teor de argamassa, foram criados 3 traços baseados no α estipulado, porém, cada um deles possuía quantidade de agregados (m) diferente, o rico (1:3,5), intermediário (1:5) e o pobre (1:6,5), quadro 5.

Quadro 5 – Traços unitários do diagrama de dosagem

m	TRAÇO UNITÁRIO			Brita (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água Utilizada (kg)	a/c	H (%)	Abatimento (cm)
	c	a	p							
3,5	1	1,34	2,16	20	9,26	12,41	3,98	0,43	9,5	9
5	1	2,12	2,16	20	6,94	14,72	3,47	0,50	8,3	9
6,5	1	2,90	3,60	20	5,55	16,11	3,38	0,61	8,1	10

Fonte: Autor

Após a definição dos traços e o cálculo da quantidade de materiais, foi realizado a etapa de concretagem. Com o concreto no estado fresco, foram medidos a consistência NBR NM 67 (ABNT, 1998), a massa específica e o consumo de cimento

NBR 9833 (ABNT, 2009). Após 28 dias da concretagem desses traços, foi realizado o ensaio de resistência à compressão NBR 5739 (ABNT, 2007), afim de obter os resultados finais para elaboração do diagrama de dosagem.

Por meio desse diagrama foram definidos os 8 traços utilizados na pesquisa, para avaliar a influência do RBMF nas propriedades dos concretos de cimento Portland. Os traços referência escolhidos possuíam relação a/c de 0,45 e 0,60, deles foram criados mais seis traços com adições de 5, 10 e 15% do RBMF e concretados posteriormente. Pode-se observar na tabela 15, que com as adições do resíduo houve uma redução no consumo de cimento.

Tabela 15 – Traço unitário dos concretos

Concreto	Relação água/cimento	Cimento	Resíduo	Areia	Brita	Consumo de cimento (kg/m ³)
REF 0,45	0,45	1	0	1,51	2,33	463,56
AD5 0,45		1	0,05	1,51	2,33	459,23
AD10 0,45		1	0,10	1,51	2,33	454,97
AD15 0,45		1	0,15	1,51	2,33	450,73
REF 0,60	0,60	1	0	2,81	3,52	309,30
AD5 0,60		1	0,05	2,81	3,52	307,30
AD10 0,60		1	0,10	2,81	3,52	305,38
AD15 0,60		1	0,15	2,81	3,52	303,50

Fonte: Autor

3.5.2 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Logo após a misturas dos componentes do concreto foram determinadas a consistência do concreto produzido e sua massa específica. Os procedimentos para obtenção dos resultados seguiram as mesmas metodologias para todos os traços.

3.5.2.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

A Massa específica do concreto é determinada pela relação entre a massa do concreto e o seu volume após o adensamento, este ensaio é regulamentado pela NBR 9833 (ABNT, 2009) – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Para definição da massa específica dos concretos foi moldado um corpo de prova, conforme NBR 5738 (ABNT, 2008) para cada traço executado. Posteriormente, o material foi pesado e subtraído a massa do molde do corpo de prova utilizado, obtendo assim a massa do concreto. Desta forma, a sua massa específica foi obtida a partir da equação 1.

$$\gamma_c = \frac{M_{\text{forma+concreto}} - M_{\text{forma}}}{V_{\text{forma}}} \quad (1)$$

Onde:

γ_c – Massa específica do concreto fresco;

$M_{\text{forma+concreto}}$ – Massa da forma preenchida com concreto;

M_{forma} – Massa da forma;

V_{forma} – Volume da forma.

3.5.2.2 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA

A consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto, para sua determinação foi realizado o ensaio de abatimento do concreto, conhecido também como slump test. Esse ensaio, descrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, consiste em colocar uma massa de concreto dentro de uma forma tronco-cônica, em três camadas igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes. O molde é retirado lentamente, levantando-o verticalmente e é medido a diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada (figura 22).

Figura 22 - Ensaio de abatimento do concreto



Fonte: Autor

3.5.3 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios do concreto no estado endurecido foram realizados por meio da determinação da resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral nas idades de 28, 91 e 180 dias.

3.5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial dos concretos foram realizados conforme NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, com auxílio da prensa Amsler do LEMAC. Foram formulados 8 traços diferentes, para cada traço foram moldados 6 corpos de prova em 3 idades diferentes, totalizando 144 corpos de prova ensaiados. Todos os elementos produzidos foram curados em uma solução saturada com cal até a idade de ruptura, anteriormente ao ensaio, foram retificados para que se garantisse que a distribuição da carga aplicada sobre a seção transversal dos corpos de prova fosse uniforme. O resultado da carga axial aplicada necessária para romper o corpo de prova foi obtido em kgf, posteriormente convertido para tensão (σ) e expressa em MPa.

3.5.3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguiram as orientações da NBR 7222 (ABNT, 2011) – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova. Esse ensaio foi realizado com o auxílio da prensa Amsler do LEMAC. Foram ensaiados 144 corpos de prova, provenientes dos 18 corpos de prova moldados para cada um dos 8 traços. Certificou-se a regularidade dos corpos de prova no momento do ensaio para redução de erros nos resultados.

3.5.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a água é um importante agente de deterioração do concreto, possui variadas formas e encontra-se em abundância no planeta. Por possuir pequenas moléculas a água consegue penetrar em cavidade e poros extremamente finos, além disso é um solvente que se destaca por possuir capacidade de dissolver muito mais substâncias do que qualquer outro líquido conhecido. Essas são algumas das propriedades da água que podem contribuir com a decomposição de materiais sólidos, ensaios de permeabilidade dos concretos são necessários pois pode-se ter noção do intervalo de vida útil que o material pode atingir quando expostos às intempéries do ambiente.

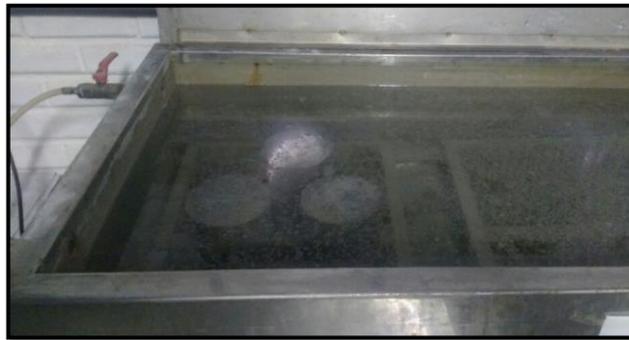
3.5.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E FERVURA

A norma utilizada para realização deste ensaio foi a NBR 9778 (ABNT, 2009), os corpos de prova foram postos em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 72 horas, posteriormente pesados para obtenção da massa seca (ms). Em seguida, foram levados ao boiler, conforme figura 23, onde ficaram submersos em água por mais 72 horas, posteriormente a água do recipiente foi submetida a alta temperatura

até que entrasse em ebulição, assim os corpos de prova permaneceram durante 5 horas, logo após, com a água do recipiente já na temperatura ambiente, os corpos de prova foram retirados e registradas suas massas saturadas (m_{sat}) e massas imersas (m_i) com o auxílio da balança hidrostática.

Foram preparados 9 corpos de prova para cada um dos 8 traços, num total de 72 corpos de prova para a determinação da absorção de água e índice de vazios.

Figura 23 - absorção de água por imersão e fervura

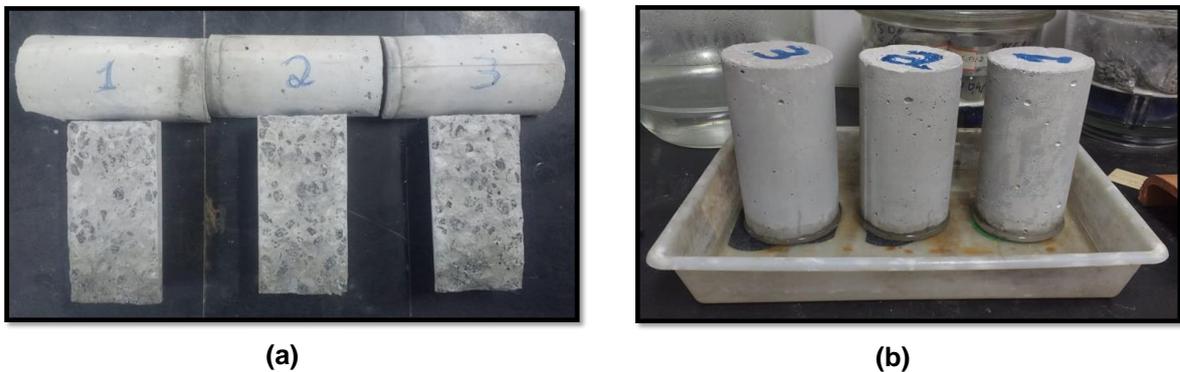


Fonte: Autor

3.6.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012), onde os corpos de prova foram postos, no primeiro momento, em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ e deixados por 24 horas. No segundo momento, os elementos de concreto foram pesados, registrados suas massas secas (m_s) e posteriormente colocados em um recipiente onde uma lâmina d'água cobria (5 ± 1) mm da base do corpo de prova, figura 24 (b). Sua massa saturada (m_{sat}) foi obtida após 72h, os corpos de prova foram rompidos lateralmente, e pode-se observar o nível atingido de água absorvida, figura 24 (a).

Figura 24 – Absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor

3.5.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS CONCRETOS

A microestrutura do concreto é composta basicamente por três fases, a pasta de cimento, a fase agregado e a zona de transição, que representa uma pequena região próxima às partículas de agregado graúdo e é apresentada na forma de uma camada delgada, normalmente com espessura de $10\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$. A zona de transição, geralmente, é menos resistente que as outras duas fases do concreto, podendo exercer, desta forma, uma influência maior sobre o comportamento mecânico do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Na análise microestrutura dos concretos produzidos, observou-se o preenchimento dos seus espaços vazios, proporcionados pela ação fíller do RBMFt. Foi observado com maior cuidado sua influência sobre a interface pasta de cimento-agregado, com o intuito de saber se houve alguma influência para o ganho de resistência.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos/ Laboratório de Plasma Térmico (LMC/LPT UFES), com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Shimadzu modelo SSX-550.

3.5.6 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

A análise colorimétrica realizada neste trabalho foi baseada nas recomendações da ASTM D 2244/05 (*Standart method for calculation of colour from instrumentally measured colour coordinates*). O Laboratório de colorimetria do Senai cetiqt do Rio de Janeiro, foi responsável pelas medições de cor, com o auxílio de um espectrofotômetro portátil da marca MINOLTA, modelo CM 2600d. A temperatura ambiente de $23,0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ das medições realizadas foram controladas por um termo higrômetro, da marca *Hanna Instruments*, modelo H19564.

Para a realização do ensaio foi tomado um cuidado especial para a produção dos corpos de prova, de acordo com Passuelo (2004), pois existem inúmeras possibilidades dos resultados sofrerem interferência de fatores externos. Foram moldados 2 corpos de prova prismáticos para cada traço elaborado, com dimensões de 10x10x8 cm, somando no final 16 corpos de prova.

Após 14 dias de cura, até a data de envio para a análise de cor, os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, protegidos por lonas de plástico.

Para uma análise mais específica sobre a variação da cor, foram utilizados os eixos L^* (Luminosidade) e a^* (vermelho e verde), do sólido de cor no espaço L^*a^*b (Figura 6), que mais obtiveram influência sobre a cor dos materiais estudados.

A diferença de cor foi medida e de acordo com a Norma alemã DIN 6174/97 que propicia a verificação de acordo com os níveis de percepção humano para as diferenças colorimétricas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO TRATADO

O RBMFt foi submetido a ensaios para avaliar suas características químicas, físicas e mineralógicas. Esses ensaios foram suficientes para analisar a viabilidade do resíduo como agente pigmentante, afim de produzir concretos pigmentados.

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química do RBMFt foi obtida por ensaio de perda ao fogo e fluorescência de raios-x. Os resultados são apresentados na tabela 16 e comparados a adições minerais utilizadas em outros trabalhos onde exerciam a função de pigmentação.

Tabela 16 - Caracterização química do RBMFt

	RBMFt ¹	Zirconita ²	Resíduo de minério de ferro ³	
	SiO ₂	54,7	42,0	30,0
	Fe ₃ O ₂	39,1	12,1	47,8
	Al ₂ O ₃	3,3	12,8	21,2
	K ₂ O	0,2	0,80	0,20
	TiO ₂	0,1	-	-
	P ₂ O ₅	0,1	-	-
Composição Química (%)	CaO	0,1	8,50	0,10
	MnO	0,1	-	0,10
	MgO	0,1	10,1	-
	NaO ₂	<0,1	4,0	-
	SO ₃	<0,1	-	0,70

P.F.	2,18	-	-
------	-------------	---	---

1 Autor

2 Resheidat e Al-Kharabsheh (2016)

3 GALVÃO *et al.* (2018)

Pode-se observar, com a verificação da composição química do RBMF, que este possui um alto teor de sílica (54,7%) e hematita (39,1%). O resíduo utilizado por Resheidat e Al-Kharabsheh (2016) possui certas semelhanças com o RBMF, é composto basicamente por sílica (42%) e hematita (12,1%), provavelmente por ser proveniente do processo de beneficiamento de rochas, onde as tecnologias utilizadas para concentração de minerais influenciam diretamente as características dos rejeitos. Estes resíduos possuem uma quantidade elevada de hematita (Fe_3O_2), responsável pela coloração avermelhada. No trabalho de Galvão *et al.* (2018), foi utilizado o resíduo de minério de ferro para a produção de tintas sustentáveis e concluem que o resíduo pode ser utilizado como base para produção de pigmentos com tons avermelhados.

Nota-se também uma quantidade considerável de óxidos de alumínio (Al_2O_3). De acordo com Melo (2010), em concretos, a presença de fontes de Aluminatos (Al_2O_3) podem contribuir com a formação de cristais de etringita em idades mais avançadas do concreto.

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física foi realizada por meio dos ensaios apresentados na tabela 17, com os respectivos resultados, além da composição granulométrica.

Tabela 17 - Características físicas do RBMF

PROPRIEDADES	NORMAS	RESULTADOS
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,06
Massa unitária (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1660
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	45,39
Área específica – Blaine (cm ² /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	1474
Material retido na peneira #200 (%)	NBR 11576 (ABNT, 2012)	39,02
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,37
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,6

Fonte: Autor

Os resultados de massa específica e dos diâmetros do RBMF, comparado com outras adições minerais e o cimento utilizado nesta pesquisa estão expostas na tabela 18.

Tabela 18 - Diâmetro do RBMF comparado com outras adições minerais

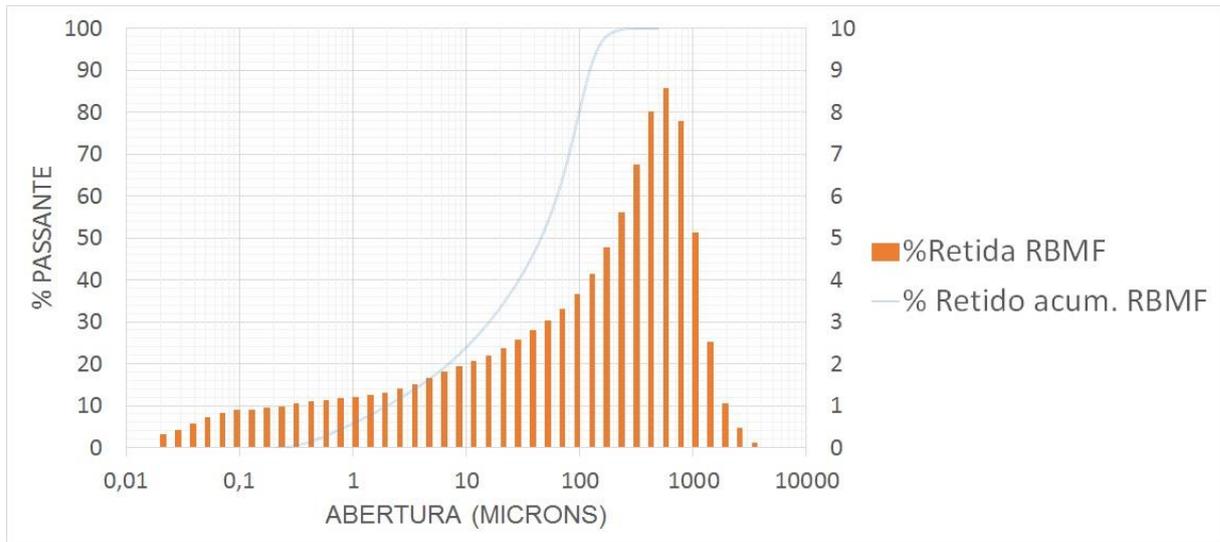
	Metacaulim	Silica ativa	RBMFt	CPV-ARI
D10 (µm)	1,02	5	1,99	3,60
Diâmetro	D50 (µm)	5,75	45,38	11,79
	D90 (µm)	20,74	122,3	29,09
Massa específica	2,55	2,15	3,06	3,09

Fonte: Rocha (2005) e Romano *et al.* (2008)

Nota-se na tabela 18, que a massa específica do RBMF é superior à dos outros tipos de adição mineral, o alto teor de ferro é o responsável por esse efeito. Pode-se observar, também, que a massa específica do resíduo se assemelha à do cimento utilizado na pesquisa.

A Figura 25 apresenta a distribuição granulométrica do resíduo estudado.

Figura 25 - Distribuição granulométrica do RBMFt



Fonte: Autor

Avaliada a granulometria do resíduo, pode-se notar que cerca de 80% é passante na peneira de 0,075 mm e os diâmetros das partículas do resíduo são semelhantes às de outras adições minerais utilizadas na produção do concreto como pode ser observado na tabela 16. De acordo com as características apresentadas, o RBMFt pode ser considerado um material pulverulento e que pode atuar como filler em concretos.

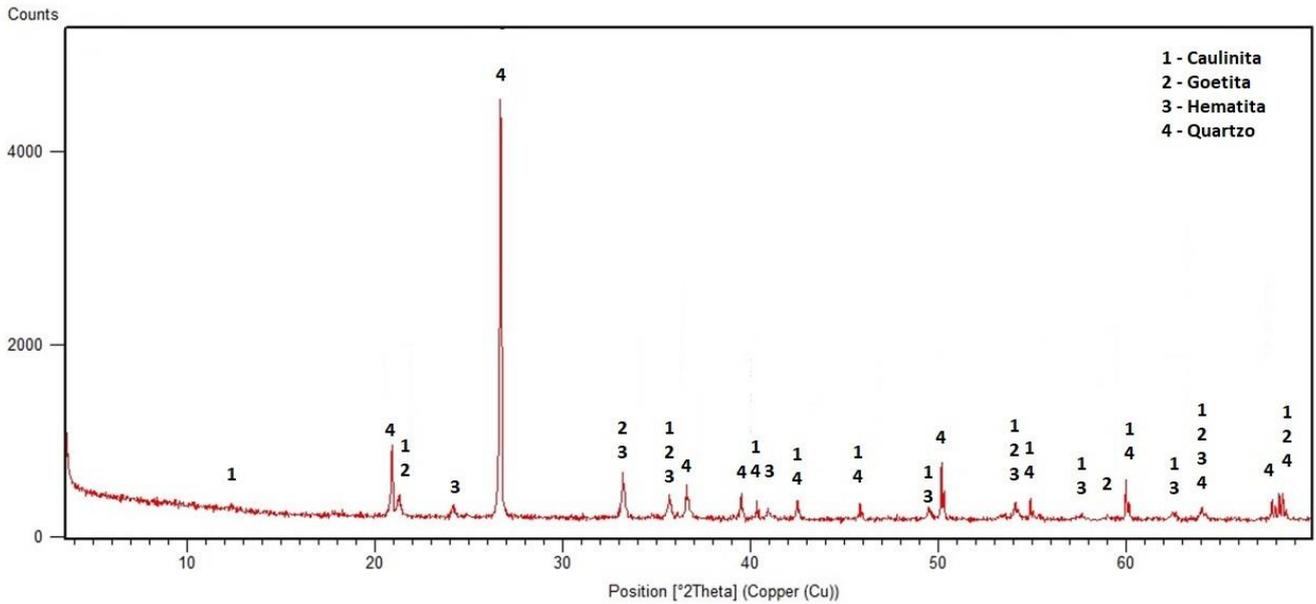
4.1.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Tratando-se dos minerais obtidos na Análise DRX, o difratograma obtido para a amostra de rejeito estudada é mostrado na figura 26. As fases minerais encontradas nessa análise são semelhantes às encontradas nos trabalhos apresentados na tabela 18. Nota-se que a composição mineral da maior parte do RBMFt são o quartzo e ferro (hematita e goetita). A caulinita também faz parte da composição mineral do resíduo estudado, denotando a presença de argila no rejeito.

O quartzo é um mineral presente em grande parte das matérias-primas utilizadas na construção civil, a presença desse composto no rejeito estudado é interessante, pois

mostra que suas características estão bem próximas às de materiais como agregados, aglomerantes e adições minerais utilizadas na produção de concreto.

Figura 26 – Difratoograma de raios X do RBMFt

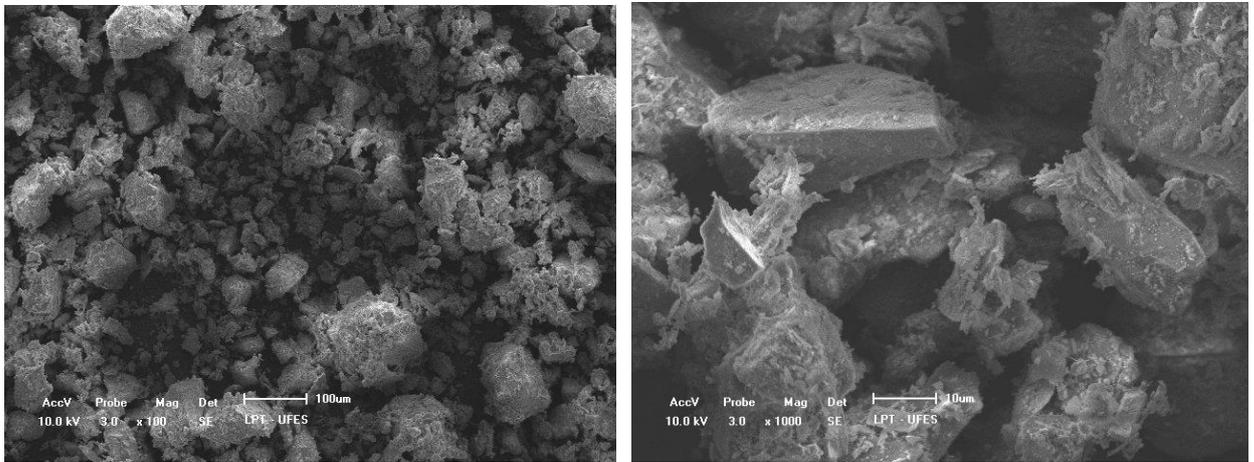


Fonte: Autor

4.1.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Na figura 27 (a) e (b) pode-se observar a micrografia do RBMFt com ampliações de 100x e 1000x, respectivamente.

Figura 27 – Micrografia do RBMFt: (a) Ampliação 100x (b) Ampliação 1000x



(a)

Fonte: Autor

(b)

Na figura 27 (a) pode-se notar as dimensões variadas do resíduo estudado, com partículas que possuem dimensões inferiores a 150 µm. Observa-se na figura 27 (b), a forma diferenciada das partículas de RBMFt, além de sua superfície angulosa e partículas com dimensões de aproximadamente 40 µm.

O RBMFt, demonstra por meio de características como a dimensão dos seus grãos, sua composição mineral e outras características físicas, que pode atuar na microestrutura dos concretos de cimento Portland. Devido a essas características, que são semelhantes às de resíduos de outros autores citados, nota-se uma potencialidade em beneficiar esses elementos proporcionando maior durabilidade e resistência.

4.1.5 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO TRATADO

Para analisar características de toxicidade, o RBMFt foi submetido ao ensaio proposto pela NBR 10005 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção do extrato lixiviado, afim de saber se algum elemento lixiviado ultrapassaria os limites estabelecidos pela norma. Os

parâmetros analisados, seus respectivos limites e resultados estão apresentados na tabela 19.

Tabela 19 – Extrato lixiviado do RBMFt

ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO			
Parâmetros	ABNT NBR 10004 Limite máximo	Resultado	Unidade
Fluoreto	150,0	0,34	mgF/L
Prata	5,0	< 0,005	mgAg/L
Arsênio	1,0	< 0,002	mgAs/L
Bário	70,0	0,18	mgBa/L
Cádmio	0,5	< 0,5	mgCd/L
Cromo	5,0	< 0,01	mgCr/L
Mercúrio	0,1	< 0,001	mgHg/L
Chumbo	1,0	< 0,01	mgPb/L
Selênio	1,0	< 0,005	mgSe/L

Fonte: Autor

Quanto a classificação do resíduo, pela NBR 10004 (ABNT, 2004), este pode ser considerado não-perigoso, sabendo-se que os resultados do extrato lixiviado permaneceram dentro dos limites estabelecidos no anexo F da ABNT NBR 10004.

Nem todos os parâmetros analisados no teste de solubilização atenderam os limites estabelecidos pela norma, uma vez que o resíduo apresentou uma quantidade de ferro superior ao limite permitido, como pode ser observado na tabela 20.

Tabela 20 – Extrato solubilizado do RBMFt

ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO			
Parâmetros	ABNT NBR 10004 Limite máximo	Resultado	Unidade
Prata	0,05	< 0,005	mgAg/L
Arsênio	0,01	< 0,002	mgAs/L
Bário	0,7	0,03	mgBa/L
Cádmio	0,005	< 0,001	mgCd/L
Cromo	0,05	< 0,01	mgCr/L
Mercúrio	0,001	< 0,001	mgHg/L
Chumbo	0,01	< 0,01	mgPb/L
Selênio	0,01	< 0,005	mgSe/L
Alumínio	0,2	0,07	mgAl/L
Cianeto	0,07	< 0,05	mgCn/L
Cloreto	250,0	17,99	mgCl/L
Cobre	2,0	< 0,01	mgCu/L
Fenois totais	0,01	< 0,001	mg/L
Ferro	0,3	0,37	mgFe/L
Fluoreto	1,5	0,06	mgF/L
Manganês	0,1	< 0,01	mgMn/L
Nitrato	10,0	0,46	mgN/L
Sódio	200,0	15,28	mgNa/L
Sulfato	250,0	< 2,00	mgSO ₄ /L
Surfactantes	0,5	< 0,10	mgLAS/L
Zinco	5,0	0,02	mgZn/L

Fonte: Autor

Por conta da concentração de ferro no extrato solubilizado do resíduo ter sido superior ao estabelecido por norma, o material é classificado como não inerte. Resíduos com classificação (não perigosos e não inertes) são intitulados pela norma como resíduos de classe II A e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

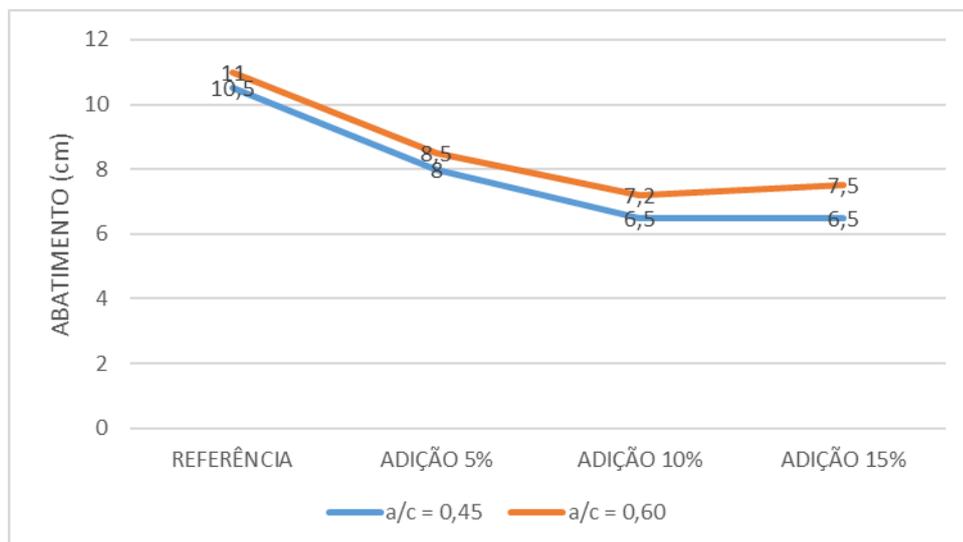
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CONCRETOS

4.2.1 CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

4.2.1.1 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

O ensaio de abatimento pelo tronco de cone foi realizado segundo o que recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). O abatimento especificado, 10 ± 2 mm, foi atingido por todos os concretos referências, com 0% de adição do RBMF. Na figura é possível verificar o comportamento dos concretos produzidos em função de seu abatimento e do percentual de adição do resíduo.

Figura 28 - Influência do percentual de adição de RBMF sobre a consistência dos concretos.



Fonte: Autor

Pela figura 28, pode-se perceber que houve perda de abatimento nos concretos com relação a/c de 0,45 e 0,60 à medida que o percentual de adição aumentou. De acordo com Dietrich (2015), devido à elevada superfície específica da adição existe maior demanda de água para manter a consistência do concreto fresco, portanto, é comum a diminuição da fluidez do concreto à medida que crescem os teores de

adição de resíduo. Pode se observar na figura 28 que o abatimento dos concretos com relação $a/c = 0,60$ mantiveram-se acima dos outros de relação a/c inferior, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), o aumento do consumo de água, nos concretos, tem como consequência uma consistência mais fluida.

O concreto que sofreu maior modificação da consistência, com a adição do resíduo, foi o de relação $a/c = 0,45$. Com o acréscimo de 5% de RBMF, houve uma redução no abatimento de 23,80% e para o teor de adição igual a 10% houve um decréscimo de 38,09% no abatimento. Isso acontece devido o concreto com relação a/c inferior possuir uma menor quantidade de água, devido a adição de RBMF ter sido feita em relação à massa de cimento, este foi o concreto que recebeu maior quantidade de finos, sendo o concreto mais afetado em sua consistência.

Nas adições de 15% do RBMF, nos concretos com relação a/c de 0,45 e 0,60, observou-se um comportamento fora da tendência. Não houve uma redução contínua do abatimento, visto que a quantidade de finos foi superior às adições de 10%. Esses resultados podem ser influenciados por fatores como o tempo de agitação da mistura, o maior cuidado com o tempo de agitação das misturas com 15% de adição pode ter influenciado na consistência dos concretos com maiores adições.

4.2.1.2 MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O resultado do ensaio para determinação da massa específica foi realizado conforme a NBR 9833 (ABNT, 2009). Os resultados obtidos estão expostos na tabela 21.

Tabela 21 - Massa específica dos concretos

CONCRETO	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO (Kg/m ³)	
a/c = 0,45	Ref.	2452,23
	AD 5%	2455,12
	AD 10%	2453,32
	AD 15%	2457,35
a/c = 0,60	Ref.	2455,20
	AD 5%	2453,11
	AD 10%	2455,45
	AD 15%	2454,65

Fonte: Autor

É possível observar que os valores de massa específica dos concretos estão bem próximos à média (2454,55 kg/m³). O desvio máximo em relação à média foi de apenas 0,1%, demonstrando que a quantidade de RBMFt não foi suficiente para alterar significativamente a massa específica dos concretos no estado fresco. O resíduo utilizado proporciona outros benefícios aos concretos, como será demonstrado nos capítulos posteriores.

4.2.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos foram verificadas, afim de constatar suas potencialidades. Pretende-se comparar os resultados obtidos dos ensaios de cada concreto de mesma família, com o intuito de analisar a inserção do RBMFt em sua mistura. Avaliações estatísticas também foram realizadas nessa seção.

4.2.2.1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A tabela 22 mostra o resultado médio da resistência à compressão axial das famílias de concreto produzidas e o incremento na resistência em função da adição de RBMFt. Observa-se que houve melhora da resistência dos concretos, na maior parte dos casos. No concreto de relação $a/c = 0,60$ com adição de 5% aos 28 dias, ocorreu uma perda de resistência em relação à referência de 4,63%. Analisando as informações presentes na tabela 18, nota-se uma tendência de diminuição de ganho de resistência à compressão dos concretos quando ultrapassado o teor de adição de 10%. Os concretos de relação $a/c = 0,60$ com adições de 5 e 10% apresentaram um maior incremento na resistência, esse comportamento foi mais evidente nesses concretos, provavelmente, pelo fato de possuírem maior quantidade de vazios preenchidos pelo resíduo.

Tabela 22 – Resistência à compressão axial média dos concretos

CONCRETO		RESISTÊNCIA MÉDIA A COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	INCREMENTO NA RESISTÊNCIA AXIAL (%)	
28 dias	$a/c = 0,45$	Ref.	56,12	-
		AD 5%	57,59	2,62
		AD 10%	59,67	6,32
		AD 15%	58,92	4,99
	$a/c = 0,60$	Ref.	39,67	-
		AD 5%	37,83	-4,63
		AD 10%	40,25	1,46
		AD 15%	40,88	3,05
90 dias	$a/c = 0,45$	Ref.	61,92	-
		AD 5%	62,35	0,69
		AD 10%	67,88	9,62
	$a/c = 0,60$	AD 15%	64,00	3,35
		Ref.	42,83	-
		AD 5%	42,96	0,30

	AD 10%	45,88	7,12
	AD 15%	44,30	3,43
	Ref.	67,64	-
180 dias	a/c = 0,45	AD 5%	67,80
		AD 10%	70,50
		AD 15%	68,17
		Ref.	43,62
	a/c = 0,60	AD 5%	48,40
		AD 10%	48,50
		AD 15%	44,15

Fonte: Autor

Para avaliar melhor a influência das variáveis (a/c, idade e teor de adição) sobre o comportamento mecânico dos concretos, foi necessária uma análise estatística. Portanto, os resultados foram submetidos à análise variância (ANOVA), realizada por meio do programa Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A tabela 23 mostra a contribuição e cada variável independente sobre a variável resistência à compressão axial, com o nível de confiança de 95%. Para avaliar se a variável teve influência sobre a resistência à compressão axial dos concretos, analisou-se o valor-P fornecido pela análise de variância. A variável é considerada significativa quando o valor-P é inferior a 0,05. Para a maioria das variáveis e suas interações o valor-P foi inferior a 0,05, demonstrando que influenciaram significativamente na resistência à compressão axial dos concretos analisados. Pode-se observar na tabela 23 que apenas a interação entre a porcentagem de resíduo e a relação água/ cimento, não foi significativa

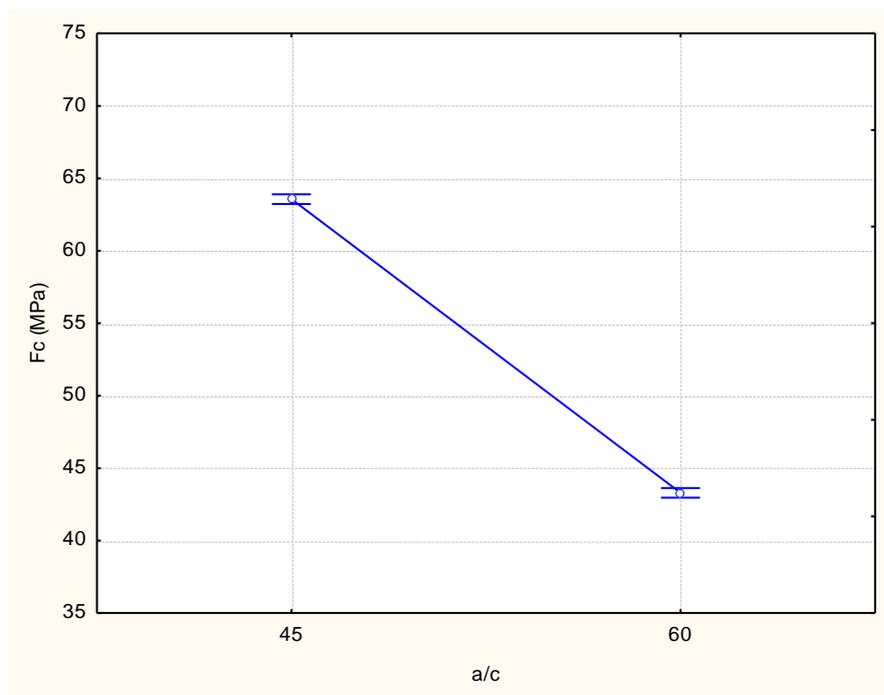
Tabela 23 - Análise de variância das variáveis independentes na resistência à compressão axial

FONTES DE VARIACÃO	SM	GL	MQ	F	P	RESULTADO
% RBMF	231,3	3	77,1	38,5	0,000000	S
a/c	14791,0	1	14791,0	7379,7	0,000000	S
Idade	1763,1	2	881,6	439,8	0,000000	S
% RBMF – a/c	10,8	3	3,6	1,8	0,151585	NS
% RBMF – Idade	100,7	6	16,8	8,4	0,000000	S
a/c – Idade	102,3	2	51,1	25,5	0,000000	S
% RBMF – a/c - Idade	56,3	6	9,4	4,7	0,000259	S
Erro	240,5	120	2,0			

SQ – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Inicialmente será analisado o efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão axial dos concretos, o gráfico pode ser observado na figura 29.

Figura 29 - Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão axial

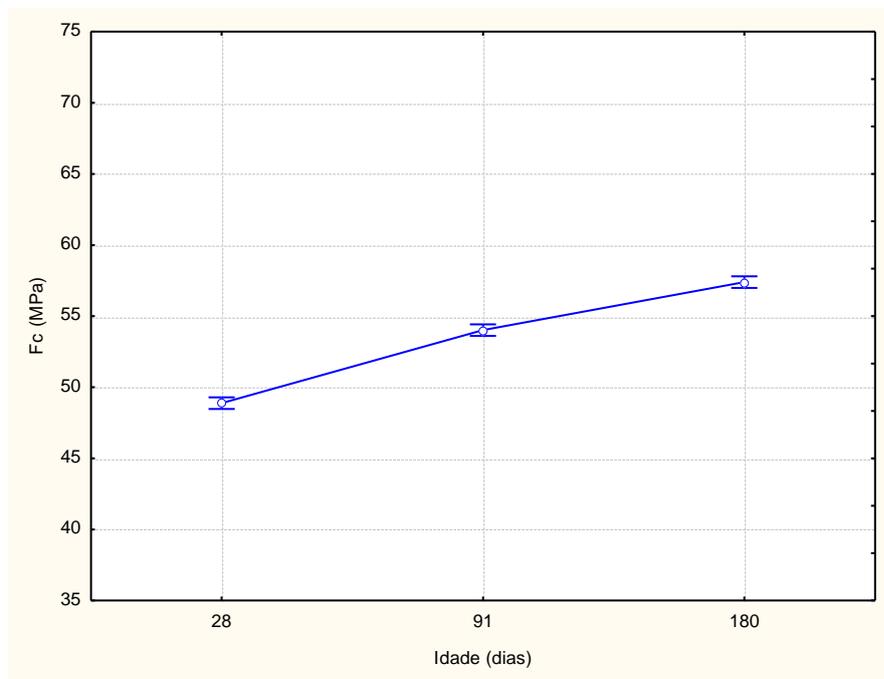


Fonte: Autor

Nota-se que, com o aumento da relação a/c houve uma grande redução de resistência, esse resultado já era esperado. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a resistência dos concretos está ligada à porosidade, que é controlada pela relação a/c e pelo grau de hidratação. A lei de Abrams, utilizada na elaboração do gráfico de dosagem dos concretos, descreve essa tendência de comportamento, o aumento do consumo de água ocasiona uma menor resistência nos concretos analisados.

Na figura 30, pode ser observada a influência da idade sobre a resistência à compressão axial dos concretos

Figura 30 - Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial

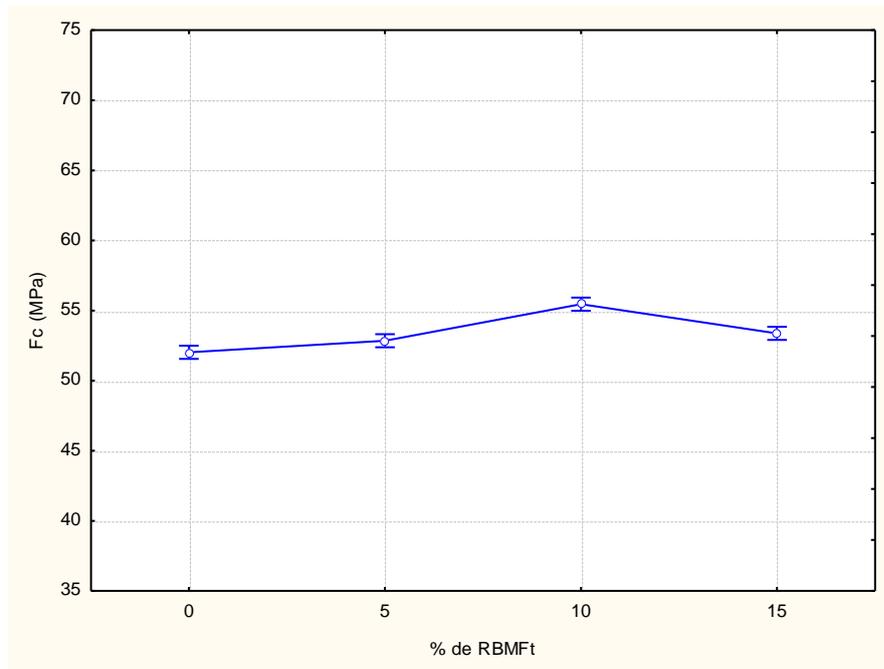


Fonte: Autor

Nota-se, na figura 30, que o incremento de resistência, considerando o intervalo dos 28 aos 91 dias, foi de aproximadamente 10,20% enquanto o ganho de resistência aos 180 dias foi de 7,47%. De acordo com Neville e Brooks (2013), com o aumento da idade, o grau de hidratação geralmente aumenta, portanto a resistência cresce. Esse efeito é mostrado na figura 30.

A figura 31, por sua vez, mostra o efeito isolado da variável %RBMF sobre a resistência à compressão. A resistência manteve-se acima da referência para todos os níveis de adição, demonstrando um melhor desempenho na adição de 10%.

Figura 31 - Efeito isolado do teor de adição sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Autor

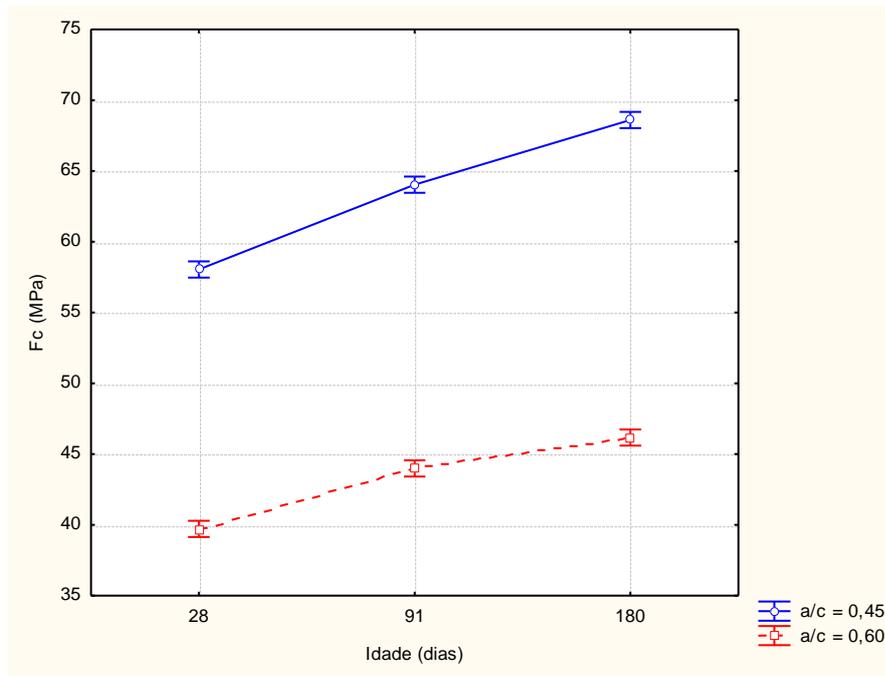
O auge da resistência à compressão, considerando os percentuais de adição do RBMF, foi a adição de 10%, que corresponde a uma resistência média de 56,25 MPa, essa adição proporcionou um aumento de 8,17% em relação à referência.

O resultado obtido, provavelmente, foi proveniente do preenchimento de poros existentes e diminuição dos espaços disponíveis para água proporcionando um maior grau de empacotamento da matriz. Cabrera *et al.* (1998) enfatizam que os materiais finos podem alojar-se entre os grãos de cimento promovendo um melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura.

Na figura 32, pode-se observar o efeito da interação entre a relação a/c e a idade dos concretos. Nota-se um comportamento esperado para concretos produzidos com o cimento CP V. É possível observar, também, a diferença de resistência mecânica entre os concretos produzidos com diferentes relações a/c. Como vem

sendo mencionado, concretos com quantidades superiores de água, produzem maior quantidade de espaços vazios na matriz, refletindo uma menor resistência à compressão axial, como exibido na figura 32.

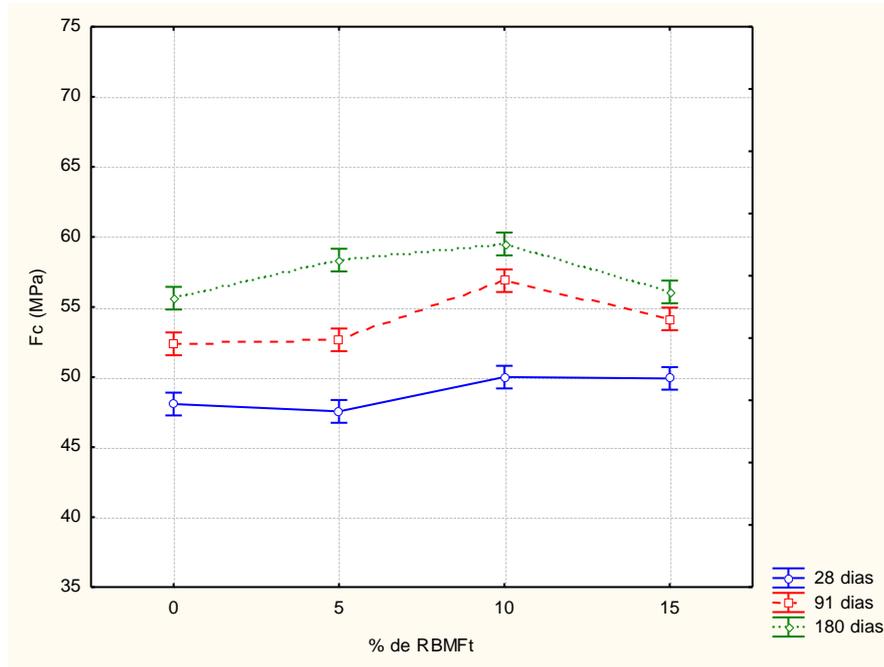
Figura 32 – Efeito da interação entre relação a/c e idade sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Autor

Na Figura 33 pode-se observar o efeito da interação entre a idade e o percentual de adição do resíduo sobre a resistência à compressão axial dos concretos.

Figura 33 - Efeito da interação da idade e porcentagem de adição sobre a resistência à compressão axial

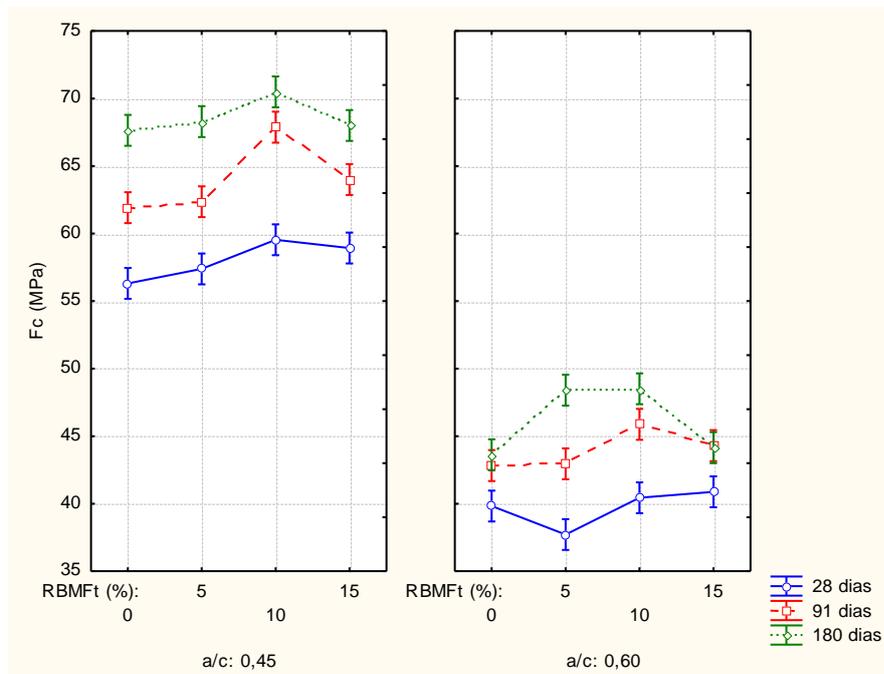


Fonte: Autor

Com a adição de 5% de resíduo ao concreto, nota-se pouca variação na resistência à compressão, em relação à referência, essa variação pode ser correspondente à quantidade de resíduo utilizada. Franco *et al.* (2014) utilizaram rejeito de beneficiamento de minério de ferro como adição em concretos, com adições em relação ao agregado miúdo de 0,5, 5, 10 e 50%. Os concretos com adições de 10% foram os que se apresentaram mais favoráveis, com ganhos de resistência mais elevado para os concretos C30 e C40. Franco *et al.* (2014), acreditam que as adições inferiores a 10% não foram suficientes para contribuir com o refinamento dos poros, deixando de promover uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia e deixando de apresentar ganhos mais significativos, ao contrário dos concretos com adição de 10% do resíduo utilizado. Neste trabalho, percebe-se que a com adições de 15% de RBMF, ocorre a redução de resistência dos concretos em relação aos 10% de adição, o mesmo ocorreu com as adições de 50% no trabalho de Franco *et al.* (2014), esse efeito pode ter ocorrido devido à dificuldade no adensamento desses concretos com esses níveis de adição, ocasionando o surgimento de vazios que podem ter influenciado diretamente na resistência à compressão dos concretos.

A interação da relação a/c, idade e percentual de adição também foi significativa e o seu resultado é apresentado na figura 34.

Figura 34 - Efeito da interação da idade, porcentagem de adição e relação a/c sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Autor

As adições de RBMF representaram ganho de resistência para os concretos, quando comparados à referência, menos em um caso, na adição de 5% do concreto de relação a/c = 0,60 aos 28 dias, onde houve uma perda pouco significativa de resistência, provavelmente, por algum erro de adensamento, visto que em outras idades esse comportamento não ocorreu.

Pode-se observar nos concretos de relação a/c = 0,60, que houve uma menor perda de resistência com a adição de 15% de RBMFt, nessas condições pode ser feita uma associação com os resultados de consistência, onde o concreto com relação a/c maior apresentou um maior abatimento com adições de 15% do resíduo (Figura 30). Devido o adensamento ter sido realizado com menor dificuldade, a presença de espaços vazios no interior do concreto deve ter ocorrido com menor frequência. Nota-se que no concreto de relação a/c = 0,60 aos 28 dias, a resistência aumentou 2,5%.

4.2.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a avaliação da influência da adição do RBMFt na resistência à tração por compressão diametral foram rompidos três corpos-de-prova cilíndricos, para cada traço de concreto, nas idades de 28, 56 e 180 dias, de acordo com a NBR 7222 (1994).

A seguir, na tabela 24, são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 24 - Resistência à tração média dos concretos

continua

CONCRETO		RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	INCREMENTO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (%)			
28 dias	a/c = 0,45	Ref.	6,12	-		
		AD 5%	7,42	21,24		
		AD 10%	7,17	17,15		
		AD 15%	6,60	7,84		
	a/c = 0,60	Ref.	6,27	-		
		AD 5%	5,93	- 5,42		
		AD 10%	5,97	- 4,78		
		AD 15%	5,90	- 5,90		
		91 dias	a/c = 0,45	Ref.	6,41	-
				AD 5%	6,55	2,18
AD 10%	7,68			19,81		
AD 15%	6,67			4,05		
a/c = 0,60	Ref.		5,69	-		
	AD 5%		5,63	- 1,05		
	AD 10%	5,84	2,63			
	AD 15%	6,34	11,42			
180 dias	a/c = 0,45	Ref.	7,31	-		
		AD 5%	6,72	- 8,07		
		AD 10%	6,56	- 10,25		

	AD 15%	7,28	-0,41
	Ref.	5,74	-
a/c = 0,60	AD 5%	6,62	15,33
	AD 10%	5,89	2,61
	AD 15%	5,67	1,21

Fonte: Autor

Foi realizada a ANOVA para a verificação da existência da influência das variáveis relacionadas e suas interações na resistência à tração por compressão diametral. Na tabela 25 consta a análise estatística da interação destas variáveis.

Tabela 25- Análise de variância das variáveis independentes na resistência à tração por compressão diametral

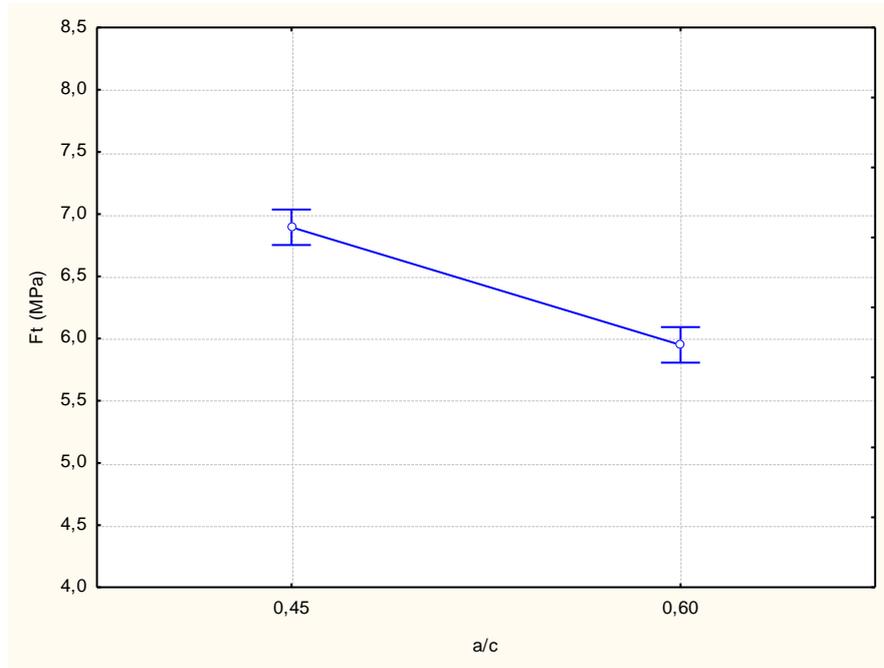
FONTE DE VARIAÇÃO	SM	GL	SQ	F	P	RESULTADO
% de adição	0,933	3	0,311	0,83	0,478708	NS
a/c	32,158	1	32,158	86,09	0,000000	S
Idade	0,402	2	0,201	0,54	0,585339	NS
% de adição – a/c	1,097	3	0,366	0,98	0,404949	NS
% de adição – Idade	6,068	6	1,011	2,71	0,016794	S
a/c – idade	0,058	2	0,029	0,08	0,925385	NS
% de adição – a/c - Idade	11,330	6	1,888	5,06	0,000118	S
Erro	44,823	120	0,374			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Os resultados mostram a influência significativa da relação a/c sobre a resistência à tração, verifica-se ainda que há influência da interação entre o teor de adição e idade dos concretos e da interação entre as três variáveis, teor de adição, relação a/c e idade, sobre a resistência à tração dos concretos.

A figura 35 mostra o comportamento dos concretos quanto à resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c.

Figura 35 - Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão dos concretos

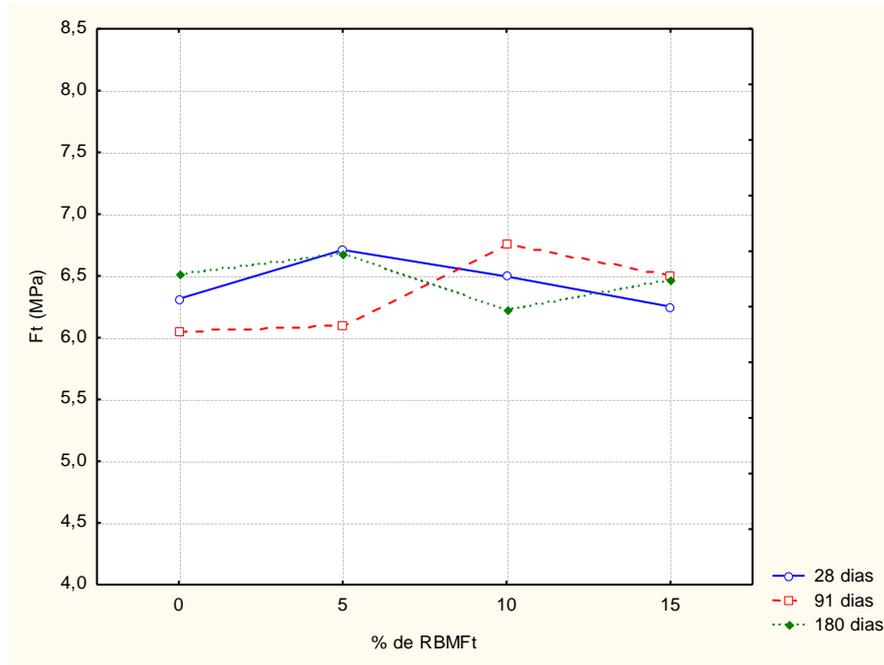


Fonte: Autor

Os resultados expostos na figura 35 eram esperados, sabendo que a maior relação a/c influência de forma direta sobre a resistência dos concretos. Os resultados mostram que há um decréscimo da resistência à tração por compressão diametral com o aumento da relação a/c .

Na figura 36, pode-se observar a interação entre as variáveis teor de adição e idade.

Figura 36 - Efeito da interação entre o teor de adição e a idade sobre a resistência à tração dos concretos



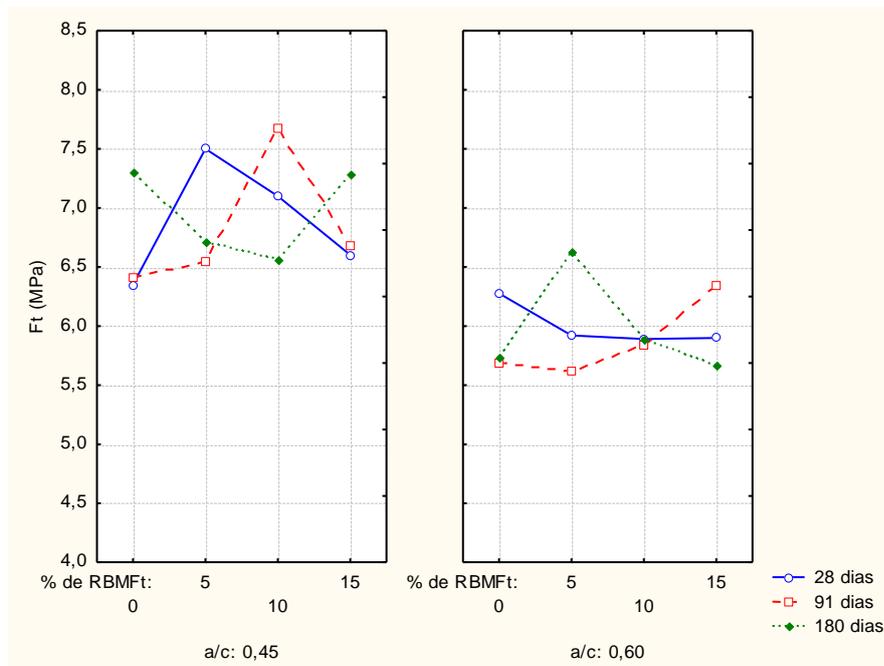
Fonte: Autor

Analisando-se o desempenho de cada nível de adição em relação às idades, nota-se que os concretos com adição de 10 e 15% de RBMF, apresentam redução em suas resistências à tração dos 90 aos 180 dias, enquanto os concretos referências e com adição de 5% de RBMF, demonstram melhora em suas resistências, no mesmo período.

De acordo com os resultados apresentados na figura 36, os concretos com adição de 5% de RBMF apresentam melhor comportamento em relação aos outros concretos nas idades de 28 e 180 dias. De acordo com Gonçalves (2000), uma maior quantidade de partículas cristalinas, sem reação química e com características de filler, dispersas na mistura de concreto, provavelmente causará uma maior dispersão dos produtos hidratados. Este fato pode conduzir a uma diminuição da ligação entre os produtos hidratados causando uma deficiência na mistura da matriz. Quando os concretos são submetidos aos esforços de tração, a linha média de fratura passa pela zona de maior fragilidade, que são entre o poro e o filler, no contato filler – filler ou no contato filler – produtos hidratados/produtos não hidratados, já que não há ligações químicas entre o grão de adição e os compostos adjacentes.

Na figura 37, é apresentada a interação entre a idade, a relação a/c e o percentual de adição do resíduo sobre a resistência à tração do concreto.

Figura 37 - Efeito da interação entre a idade, a relação a/c e o percentual de adição sobre a resistência à tração dos concretos



Fonte: Autor

Observa-se na figura 37 que aos 28 dias os concretos com relação a/c de 0,45 apresentam melhora significativa na resistência, incrementando cerca de 21,24% à resistência à tração quando adicionado 5% de RBMFt à sua composição. Nota-se também, aos 28 dias, que os concretos apresentam comportamento bastante variado. Concretos com relação a/c = 0,60 apresentam perda de resistência com as incorporações de resíduo.

Aos 180 dias, os concretos de relação a/c = 0,45 apresentam perdas de resistência com a incorporação do resíduo, enquanto os concretos com reação a/c = 0,60 demonstram melhoras na resistência à tração.

4.2.2.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), é difícil simular em laboratórios o processo de deterioração dos concretos, sendo que, na prática, essa deterioração está ligada a diversos fatores. No entanto, sabe-se que a água costuma ser o fator central para a maioria dos problemas da durabilidade no concreto, servindo de veículo para transporte de íons agressivos.

Contudo, os ensaios de absorção por imersão e fervura e absorção por capilaridade para verificação dos benefícios que a adição do RBMFt pode trazer aos concretos, no que se refere à durabilidade.

4.2.2.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E FERVURA

O ensaio de absorção por imersão mostra a absorção de um determinado concreto e seu índice de vazios, por meio da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem levar em consideração a velocidade de absorção (GONÇALVES, 2000).

Na tabela 26 estão apresentados os resultados de absorção e índice de vazios dos concretos produzidos. Verifica-se que tanto para a absorção quanto para o índice de vazios foi pequena a variabilidade, o que permite a obtenção de uma análise mais segura da influência do RBMFt sobre as propriedades avaliadas.

Tabela 26 - Resultados de absorção e índice de vazios

CONCRETOS		Abs. Média (%)	C.V. (%)	I.V. Média (%)	C.V. (%)
	REF.	5,76	2,96	13,30	2,43
28 dias	AD. 5%	5,53	2,04	12,81	1,40
	AD. 10%	4,79	4,29	11,22	3,83
	AD. 15%	4,30	1,45	10,01	1,40
	a/c = 0,45				

	REF.	4,60	2,17	10,71	2,22
a/c = 0,60	AD. 5%	4,89	3,40	11,31	2,94
	AD. 10%	4,78	5,02	11,14	4,58
	AD. 15%	4,85	1,67	11,29	1,48
	REF.	4,92	4,27	11,53	3,69
91 dias	AD. 5%	4,91	2,71	11,53	2,46
	AD. 10%	4,56	3,30	10,72	3,02
	AD. 15%	5,60	3,09	13,03	1,67
	REF.	4,79	1,81	11,11	2,84
a/c = 0,60	AD. 5%	5,03	2,93	11,63	2,01
	AD. 10%	5,27	2,90	12,35	3,16
	AD. 15%	5,14	0,70	11,96	0,78
	REF.	5,13	0,78	11,95	1,05
180 dias	AD. 5%	5,01	2,80	11,74	2,85
	AD. 10%	3,69	3,20	8,77	4,70
	AD. 15%	4,12	2,09	9,68	1,91
	REF.	5,09	1,86	11,91	2,98
a/c = 0,60	AD. 5%	5,28	0,77	12,19	0,38
	AD. 10%	4,60	1,20	10,74	1,09
	AD. 15%	4,58	1,98	10,71	1,76

Abs – Absorção; I.V. – Índice de vazios; C.V. – Coeficiente de variação; Fonte: Autor

A partir dos resultados expostos na tabela 26 foi realizada a análise de variância para verificação da influência da relação a/c, idade, percentual de adição e suas possíveis interações, na absorção por imersão.

Na tabela 27 são apresentados os resultados da ANOVA.

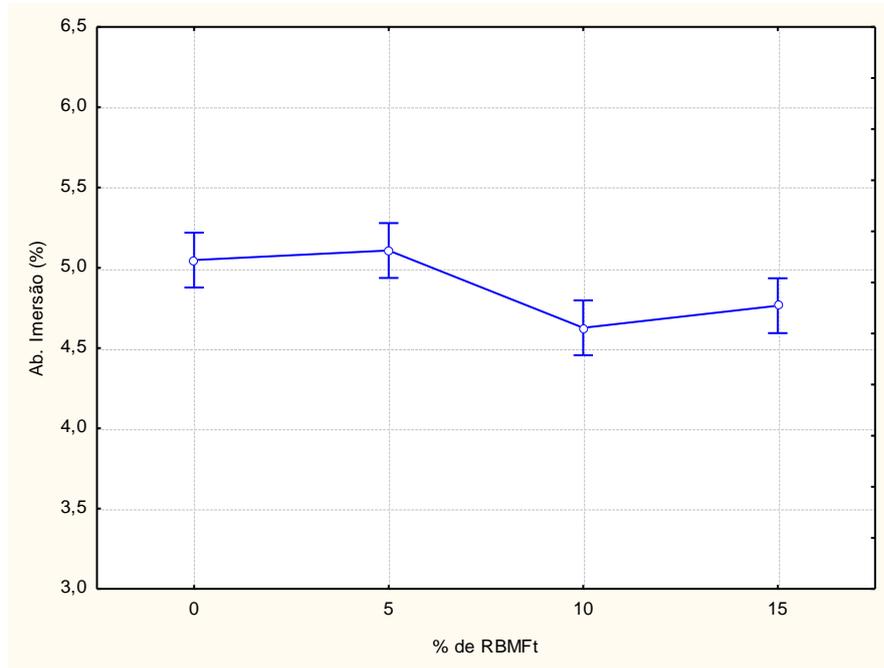
Tabela 27 - ANOVA - Absorção por imersão dos concretos

FONTE DE VARIAÇÃO	SM	GL	SQ	F	P	RESULTADO
% RBMFt	2,841	3	0,947	7,29	0,000400	S
a/c	0,051	1	0,051	0,39	0,533132	NS
Idade	1,551	2	0,776	5,97	0,004840	S
% Adição – a/c	2,413	3	0,804	6,19	0,001213	S
% Adição – Idade	4,596	6	0,766	5,90	0,000115	S
a/c – Idade	1,524	2	0,762	5,87	0,005256	S
% Adição – a/c – Idade	2,004	6	0,334	2,57	0,030640	S
Erro	6,236	48	0,130			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Os resultados da tabela 27 mostram que existe influência significativa da maioria das variáveis e suas interações, apenas a relação a/c não demonstrou significância sobre a absorção por imersão dos concretos.

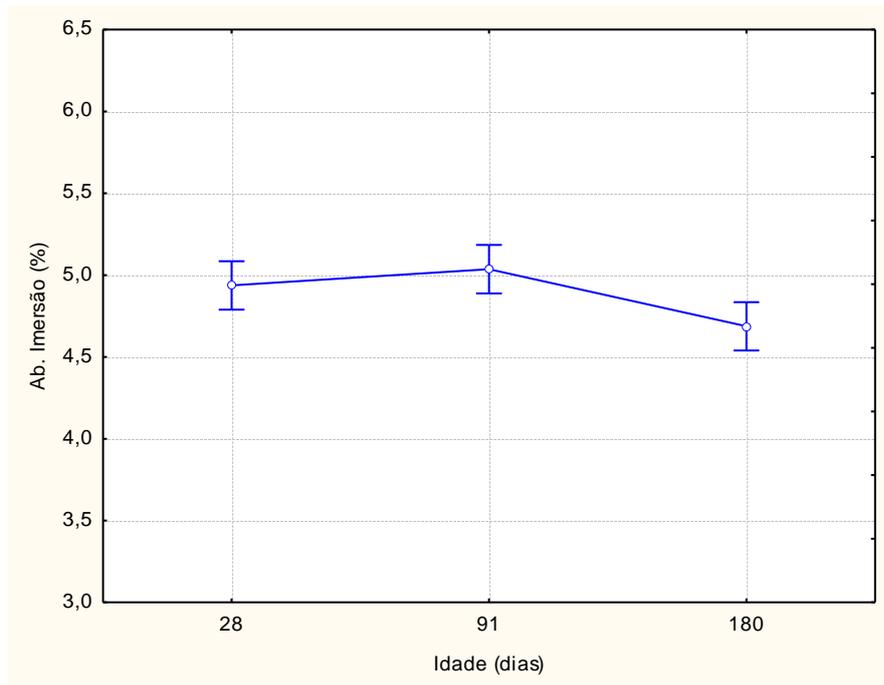
A figura 38 demonstra o efeito da porcentagem de adição de RBMFt sobre a absorção por imersão dos concretos.

Figura 38 - Efeito da porcentagem de RBMFt sobre a absorção por imersão

Fonte: Autor

Nota-se que a absorção de água foi menor, em relação ao concreto referência, com a adição de 10% de resíduo. Provavelmente essa adição foi responsável por tornar a estrutura de poros descontínua.

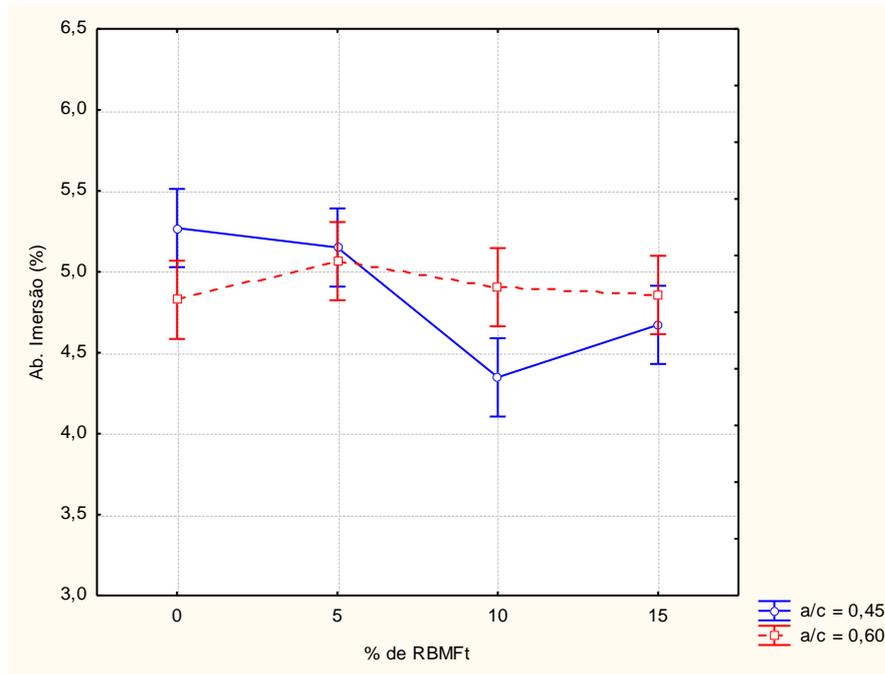
A figura 39, por sua vez, mostra o efeito isolado da idade sobre a variável resposta. Observa-se que existe uma tendência de redução da absorção de água na idade de 180 dias, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que com o desenvolvimento da hidratação, a maioria dos poros terá seus tamanhos reduzidos e perderão suas interconexões, reduzindo, assim, a permeabilidade. Provavelmente a redução dos espaços vazios, foi potencializada com a adição de RBMFt.

Figura 39 - Efeito da idade sobre a absorção por imersão

Fonte: Autor

Observa-se ainda o efeito da interação entre o teor de RBMFt e a relação a/c sobre a absorção de água, na figura 40.

Figura 40 - Efeito da interação entre a relação a/c e o percentual de RBMFt sobre a absorção por imersão

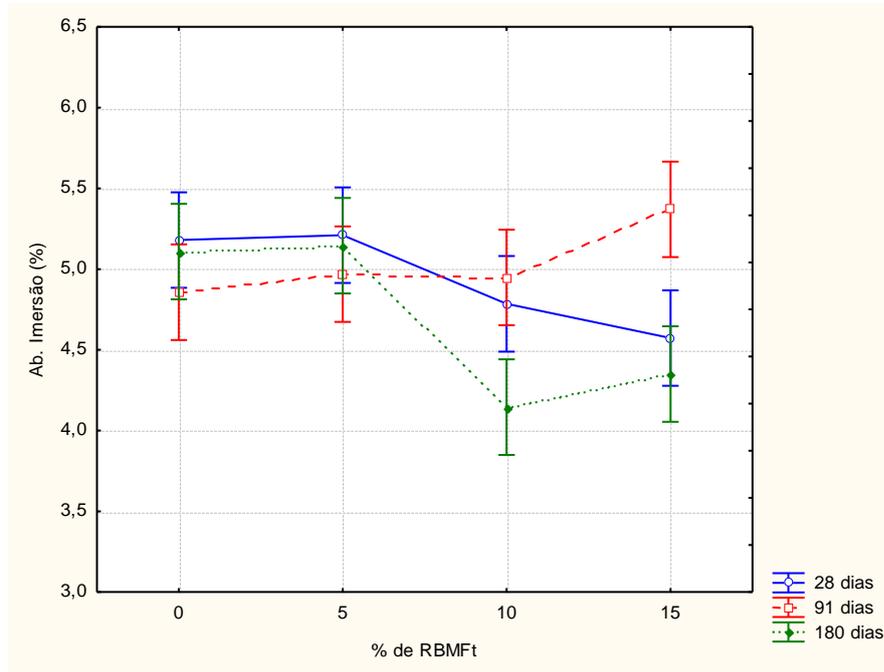


Fonte: Autor

Um resultado não esperado pode ser observado na figura 40, onde o concreto referência de maior relação a/c apresentou menor absorção de água. Naturalmente, concretos com maior relação a/c apresentam quantidades maiores de espaços vazios em sua matriz, refletindo em uma maior absorção de água. Observa-se, também, que os concretos com relação a/c = 0,60 demonstraram absorções de água discretas em relação à referência, enquanto os concretos com relação a/c = 0,45 exibiram absorções inferiores à sua referência.

Na figura 41, pode-se observar o efeito das adições de RBMFt em todas as idades analisadas.

Figura 41 - Efeito da interação entre a idade e o percentual de RBMF sobre a absorção por imersão

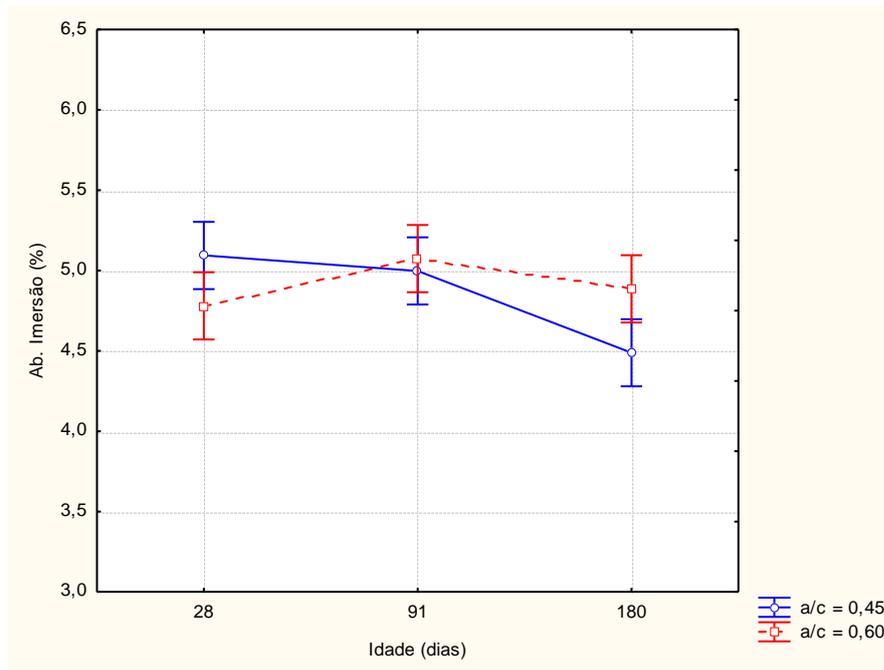


Fonte: Autor

As adições de 5% de RBMF, observadas na figura 41, não foram significativas em nenhuma idade analisada, tratando-se de absorção por imersão.

Os resultados apresentados aos 91 dias fugiram o esperado para as adições de 15%, enquanto nas idades de 28 e 180 dias, os resultados encontrados para os percentuais de adição de 10 e 15% foram de maior eficácia, aos 91 dias esses percentuais de adição proporcionaram um aumento na absorção dos concretos. Esses resultados podem estar ligados ao mal adensamento das misturas e poderão ser comprovados pela análise do índice de vazios.

Figura 42 - Efeito da interação entre a idade e a relação a/c sobre a absorção por imersão



Fonte: Autor

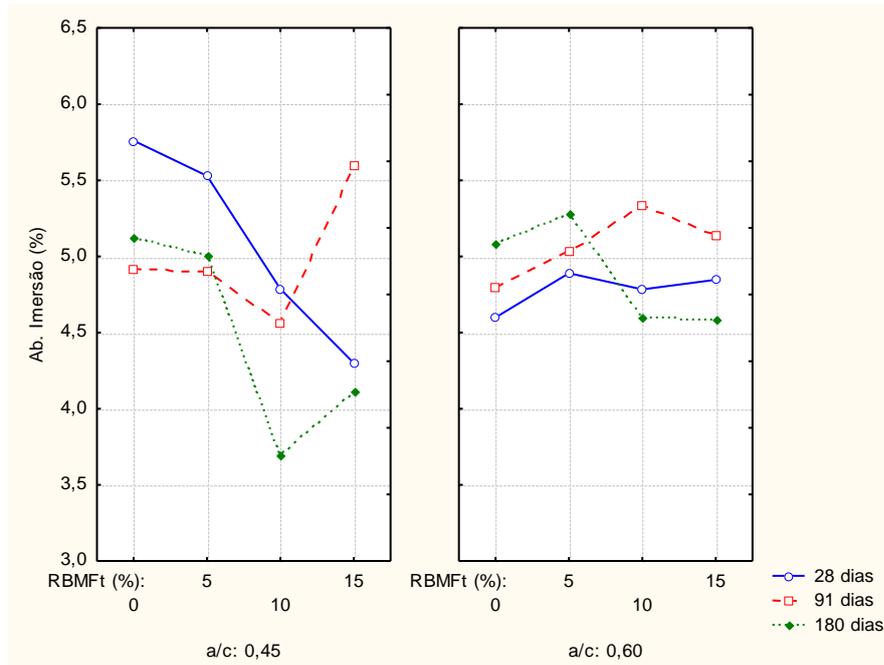
Na figura 42, observa-se o desempenho dos concretos de diferentes relações a/c frente as diferentes idades. Nota-se a redução da absorção de água com o tempo apenas nos concretos com relação a/c = 0,45, essa redução é mais acentuada aos 180 dias, correspondendo a 10% da absorção aos 91 dias. Nos concretos com relação a/c = 0,60 ocorre um incremento na absorção aos 91 dias de 7,36% seguida de redução na absorção aos 180 dias.

Observa-se o efeito da interação entre a relação a/c, a porcentagem de adição e a idade sobre a absorção de água por imersão, na figura 43.

Os resultados exibidos demonstram um melhor desempenho do resíduo utilizado na pesquisa, nos concretos com relação a/c = 0,45. Os concretos com adição de 10 e 15% e relação a/c = 0,45, apresentam melhor desempenho aos 28 e 180 dias. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que em geral, quando a relação a/c é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta de cimento terá uma porosidade alta.

Para os concretos com relação $a/c = 0,60$, a adição de resíduo mostrou-se eficaz apenas aos 180 dias, quando os concretos com 10 e 15% de adição mostraram níveis de absorção inferiores à referência.

Figura 43 - Efeito da interação entre o percentual de RBMFt, idade e relação a/c sobre a absorção por imersão



Fonte: Autor

4.2.2.3.2 ÍNDICE DE VAZIOS

De acordo com Moura e Dal Molin (2004), no ensaio de absorção por imersão, mede-se o volume de poros no concreto, e não a facilidade com que o fluido pode penetrar. O índice de vazios está relacionado diretamente com a absorção por imersão, portanto, apresentará as mesmas proporções de ganho ou perda.

Na tabela 28 são apresentados os resultados da ANOVA para o índice de vazios.

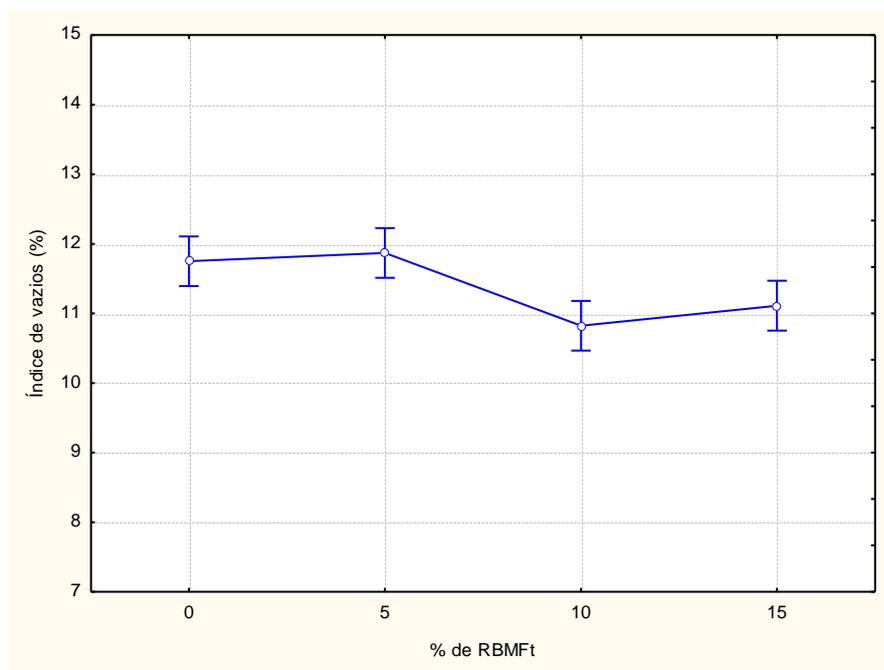
Tabela 28 - ANOVA - Índice de vazios

FONTE DE VARIAÇÃO	SM	GL	SQ	F	Q	RESULTADO
% de RBMF	13,654	3	4,551	8,02	0,000196	S
a/c	0,072	1	0,072	0,13	0,724007	NS
Idade	7,402	2	3,701	6,52	0,003116	S
% de RBMF – a/c	11,953	3	3,984	7,02	0,000521	S
% de RBMF – Idade	23,554	6	3,926	6,92	0,000024	S
a/c – Idade	7,458	2	3,729	6,57	0,002999	S
% de RBMF – a/c – Idade	10,100	6	1,683	2,97	0,015168	S
Erro	27,230	48	0,567			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Os resultados da tabela 28 mostram que não existe uma influência significativa do fator isolado relação a/c sobre o índice de vazios do concreto. Verificou-se, ainda, que houve influência significativa do fator isolado teor de RBMF e de suas interações com a relação a/c e a idade.

Figura 44 - Efeito isolado do percentual de RBMF sobre o índice de vazios

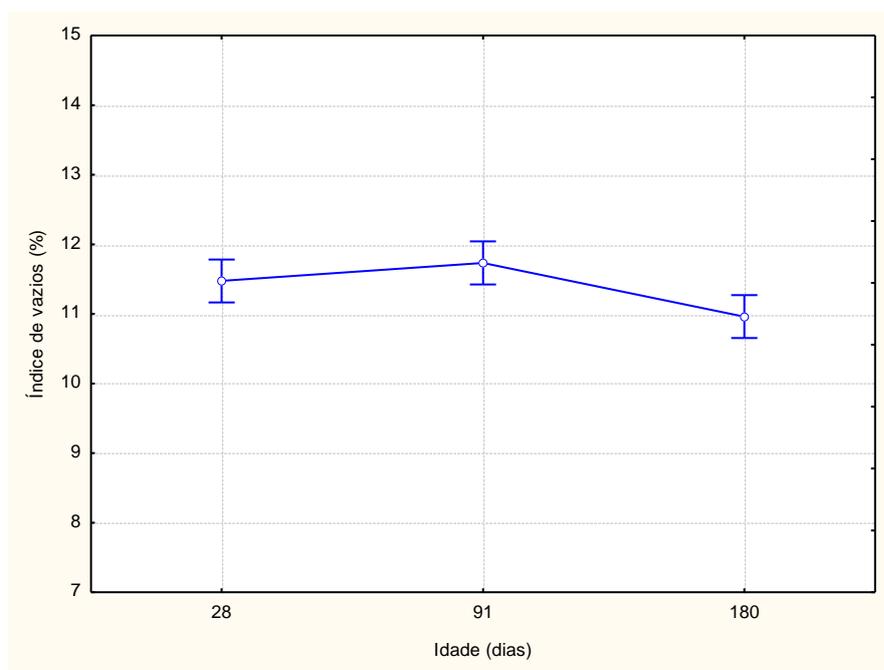


Fonte: Autor

Ocorreu uma diminuição significativa do índice de vazios, com as adições de 10% de RBMF. Esta diminuição está ligada ao preenchimento dos espaços vazios pelo resíduo.

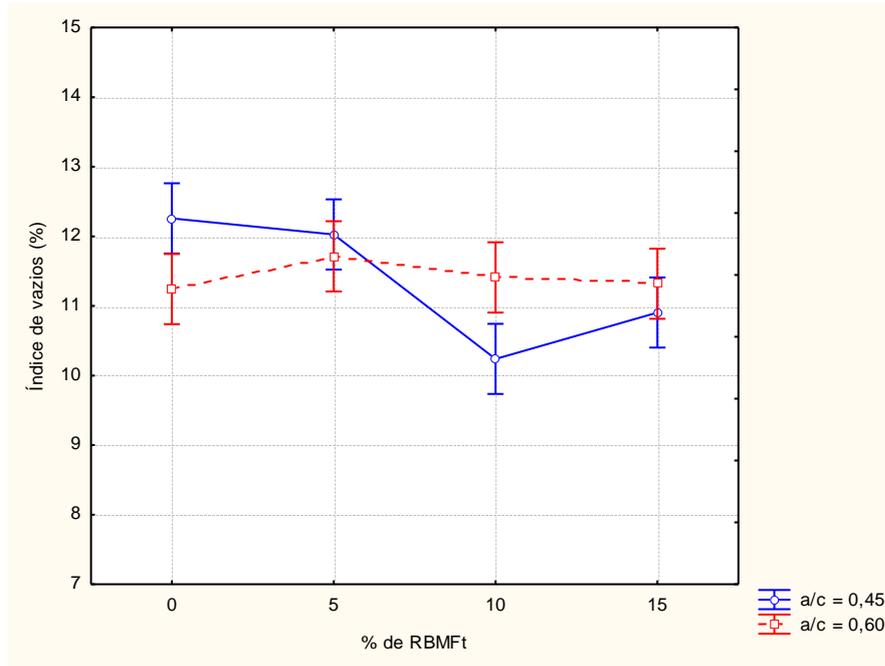
O efeito isolado da idade sobre o índice de vazios, pode ser observado na figura 45, onde nota-se a redução mais significativa dos espaços vazios, com o tempo. A diminuição dos vazios é benéfica e está ligada diretamente à durabilidade dos concretos, os fenômenos físico-químicos associados ao transporte de água, que age como veículo transportador de íons agressivos em sólidos porosos, são controlados pela permeabilidade do sólido.

Figura 45 - Efeito isolado da idade sobre o índice de vazios



Fonte: Autor

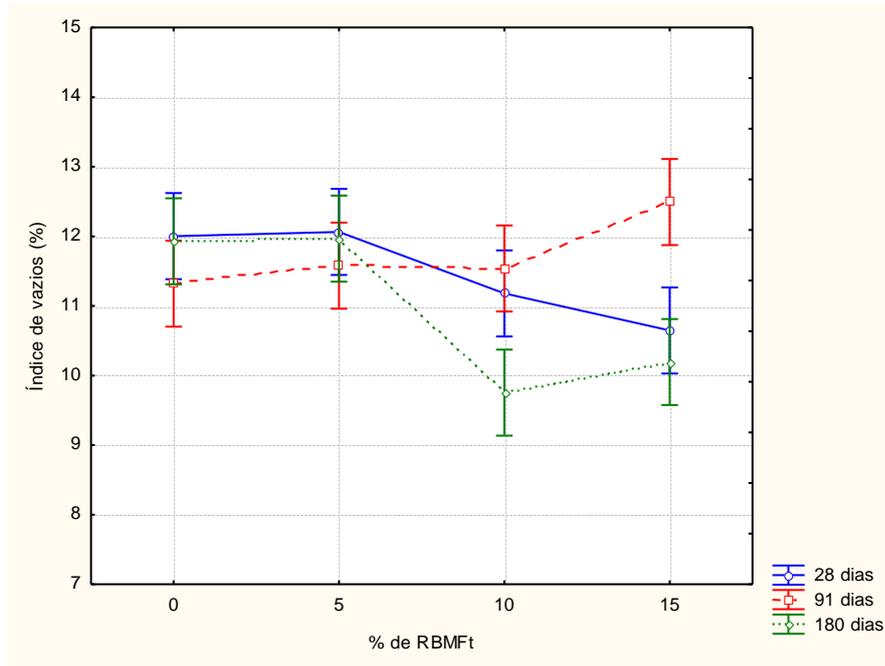
Na figura 46, está exposta a o resultado da interação entre a porcentagem de RBMF utilizada e a relação a/c.

Figura 46 - Efeito da interação entre percentual de RBMF e relação a/c sobre o índice de vazios

Fonte: Autor

Analisando os concretos sem adição de resíduo, observa-se que ocorre algo fora do comum. Concretos com relação a/c maior, tendem a possuir maiores índices de vazios devido à maior quantidade de água utilizada e o baixo grau de hidratação. A partir das adições de 10 e 15%, nota-se uma redução significativa do índice de vazios nos concretos com relação a/c = 0,45, permanecendo com quantidade de vazios inferiores aos concretos com relação a/c = 0,60 e mesmo nível de adição.

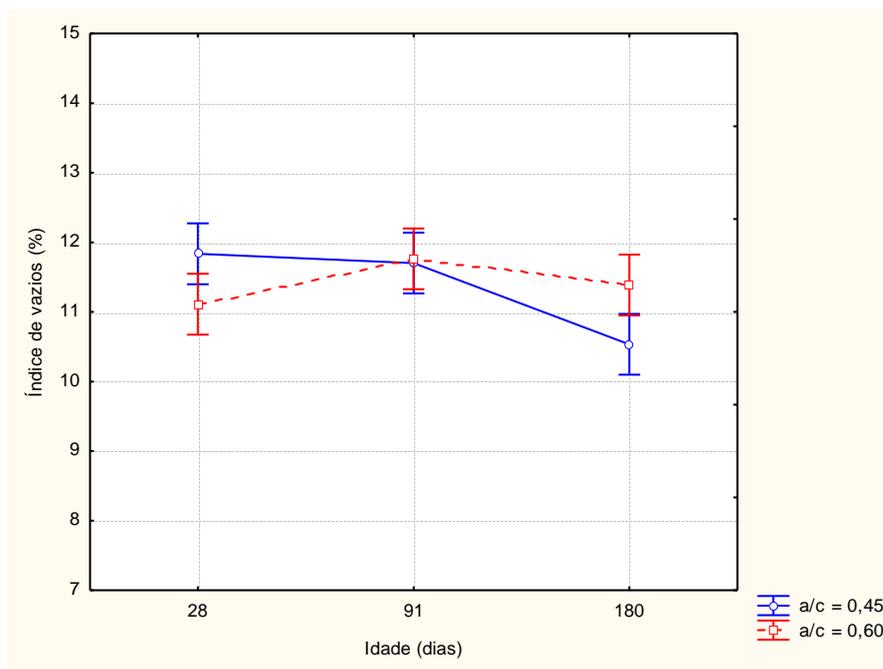
Figura 47 - efeito da interação entre percentual de RBMF e idade sobre o índice de vazios



Fonte: Autor

Na figura 47, está demonstrado o efeito da interação entre as variáveis %RBMF e idade. Aos 91 dias é notado o aumento do percentual de índice de vazios, enquanto nas outras idades, ocorre o contrário. A presença dessa quantidade de vazios nesses concretos com 10 e 15% de RBMF pode ser devido a um mal adensamento das misturas, ocasionando uma maior absorção de água, como foi observado na figura 47.

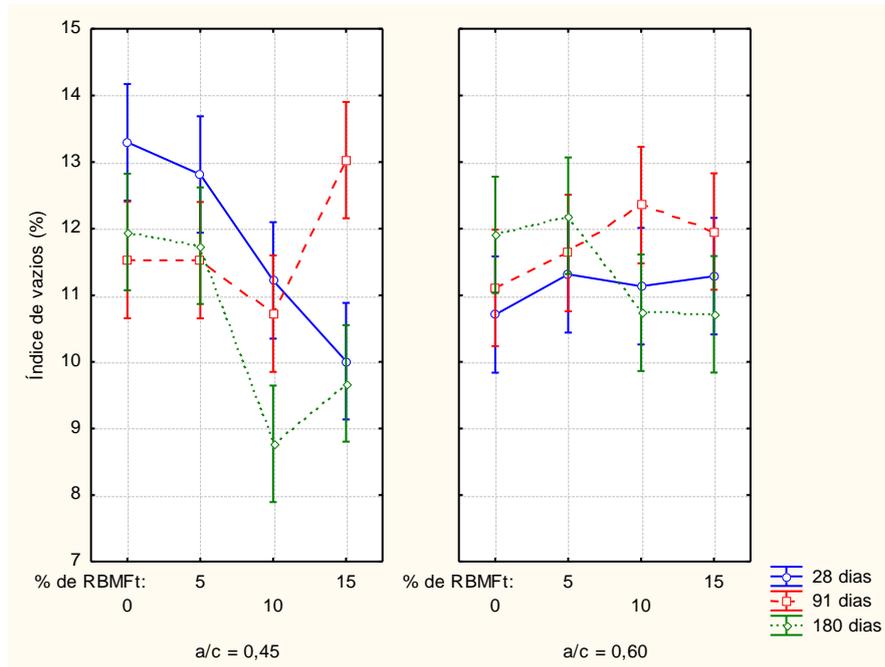
O comportamento dos concretos de diferentes relações a/c, com o tempo, pode ser observado na figura 48. Nota-se que o índice de vazios dos concretos com relação a/c = 0,45 aos 28 dias, é superior, porém, com o tempo a quantidade de vazios superior passa a ser a dos concretos com relação a/c = 0,60.

Figura 48 - Efeito da interação entre idade e relação a/c sobre o índice de vazios

Fonte: Autor

O efeito da interação entre as porcentagens de adição, relação a/c e idade sobre o índice de vazio dos concretos pode ser observado na figura 49.

Figura 49 - Efeito da interação entre porcentagem de RBMF, idade e relação a/c sobre o índice de vazios



Fonte: Autor

Nota-se que os concretos com relação $a/c = 0,45$ apresentam melhores resultados de índice de vazios. Os melhores índices ocorrem, na maioria dos casos, nas adições de 10%. Aos 180 dias, os concretos com relação $a/c = 0,60$ e $0,45$ apresentam índices de vazios inferiores à referência nos concretos com 10 e 15% de adição.

4.2.2.3.3 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A tabela 29 apresenta os resultados médios de absorção por capilaridade executados conforme a norma NBR 9779 (ABNT, 2012).

Tabela 29 - Absorção capilar média dos concretos

CONCRETO		ABSORÇÃO MÉDIA (g/cm ²)	
28 dias	REF	0,176	
	a/c = 0,45	AD.5%	0,212
		AD10%	0,187
		AD15%	0,179
	a/c = 0,60	REF.	0,193
		AD.5%	0,213
		AD.10%	0,190
		AD.15%	0,178
91 dias	REF.	0,207	
	a/c = 0,45	AD.5%	0,207
		AD.10%	0,163
		AD.15%	0,173
	a/c = 0,60	REF.	0,278
		AD.5%	0,235
		AD.10%	0,218
		AD.15%	0,140
180 dias	REF.	0,317	
	a/c = 0,45	AD.5%	0,164
		AD.10%	0,151
		AD.15%	0,143
	a/c = 0,60	REF.	0,246
		AD.5%	0,220
		AD.10%	0,224
		AD.15%	0,247

Fonte: Autor

Com base nas informações acima, foi realizada a análise variância da variável absorção por capilaridade, a tabela 30 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável resposta, com o nível de confiança de 95%.

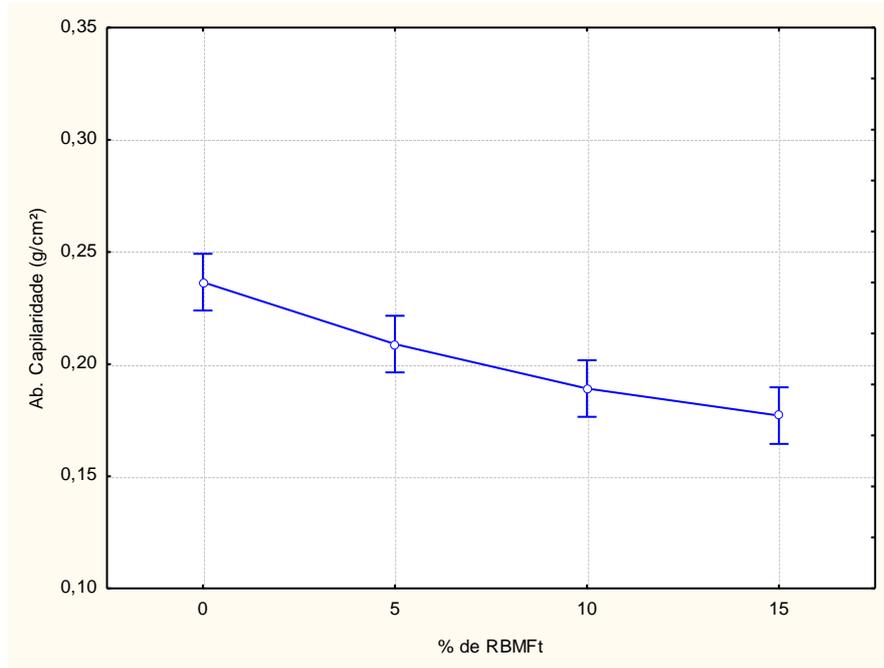
Tabela 30 - ANOVA - Absorção por capilaridade

FONTE DE VARIAÇÃO	SM	GL	SQ	F	P	RESULTADO
% RBMF	0,036491	3	0,012164	17,135	0,000000	S
a/c	0,011501	1	0,011501	16,202	0,000201	S
Idade	0,006280	2	0,003140	4,423	0,017255	S
%RBMF – a/c	0,003282	3	0,001094	1,541	0,215965	NS
%RBMF – Idade	0,029543	6	0,004924	6,936	0,000024	S
a/c – Idade	0,003900	2	0,001950	2,747	0,074193	NS
%RBMF – a/c – Idade	0,033136	6	0,005523	7,780	0,000007	S
Erro	0,034073	48	0,000710			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo. Fonte: Autor

Nota-se que as interações entre as variáveis %RBMF - relação a/c e relação a/c – idade, não obtiveram resultados significativos.

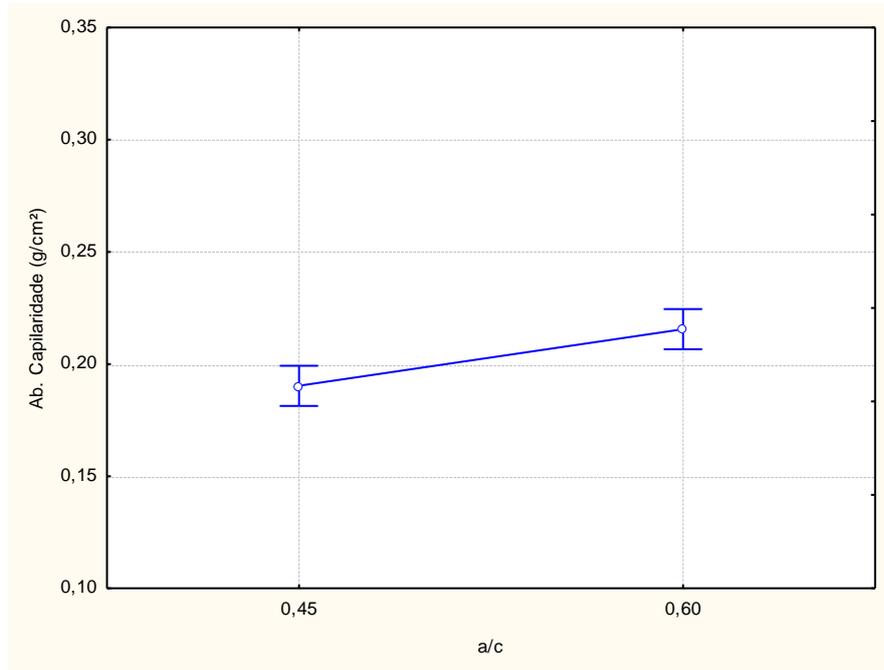
A figura 50 demonstra o efeito isolado da variável %RBMF sobre a absorção por capilaridade dos concretos.

Figura 50 - Efeito isolado da porcentagem de RBMF sobre a absorção por capilaridade

Fonte: Autor

O efeito das adições de RBMF foram benéficas aos concretos, com a redução da absorção por capilaridade, como pode ser observado na figura 50. Esse efeito demonstra a descontinuidade dos poros, causada pela adição do resíduo. De acordo com a figura 50, quanto maior o nível de adição, menor será a quantidade de vazios capilares.

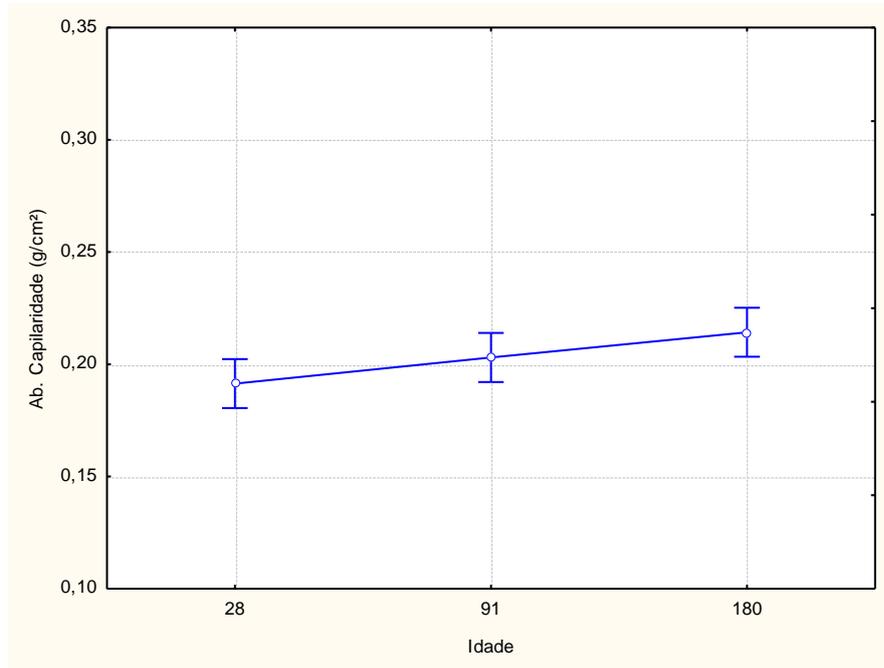
A figura 51 demonstra o efeito isolado da relação a/c sobre a absorção por capilaridade dos concretos.

Figura 51 - Efeito isolado da relação a/c sobre a absorção por capilaridade

Fonte: Autor

Era esperado que os concretos com relação $a/c = 0,60$ obtivessem resultados maiores de absorção por capilaridade, visto que a água de amassamento é indiretamente responsável pela permeabilidade da pasta de cimento hidratada, porque o seu teor determina, primeiramente, o espaço total e, subsequentemente, o espaço não preenchido depois de a água ter sido consumida pelas reações da hidratação do cimento ou pela evaporação para o ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na figura 52, pode ser observado o efeito isolado da idade sobre a absorção por capilaridade dos concretos.

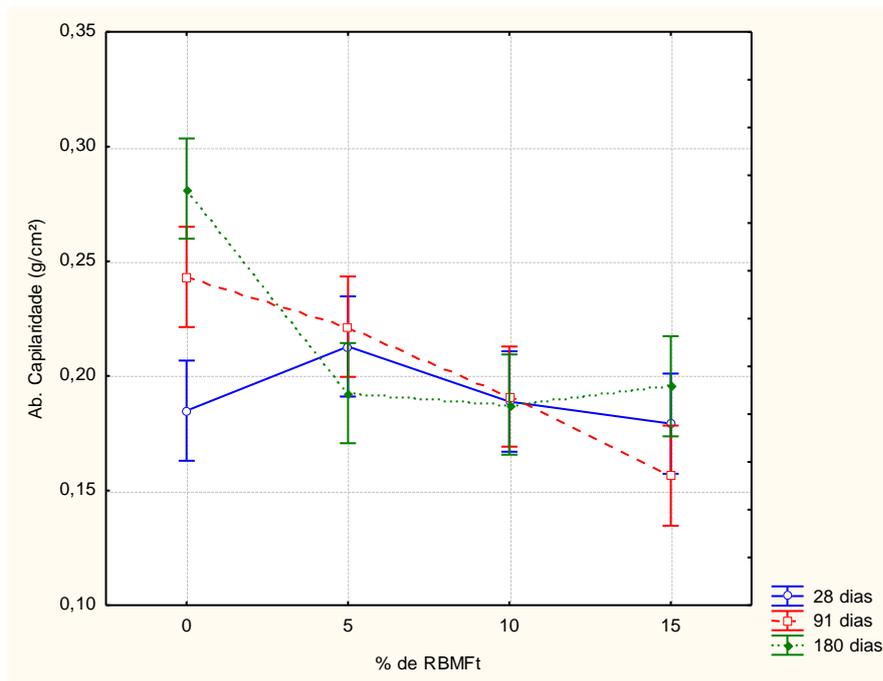
Figura 52 - Efeito isolado da idade sobre a absorção por capilaridade

Fonte: Autor

Comumente, concretos apresentam a diminuição dos poros capilares com o tempo, portanto, concretos com 28 dias tendem a reduzir seu volume de vazios devido à contínua hidratação do cimento, essa diferença pode ser constatada na idade de 365 dias (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Pode-se notar na figura 52, uma tendência contrária à mencionada por Mehta e Monteiro, a absorção por capilaridade aumenta com o tempo. Este comportamento pode ser explicado em nível microestrutural que será explicado posteriormente. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o motivo pelo qual a permeabilidade da argamassa e ou do concreto ser maior do que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente está nas microfissuras normalmente presentes na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento.

Na figura 53, estão apresentados os resultados da influência da interação entre a porcentagem de RBMF e a idade sobre a absorção por capilaridade dos concretos.

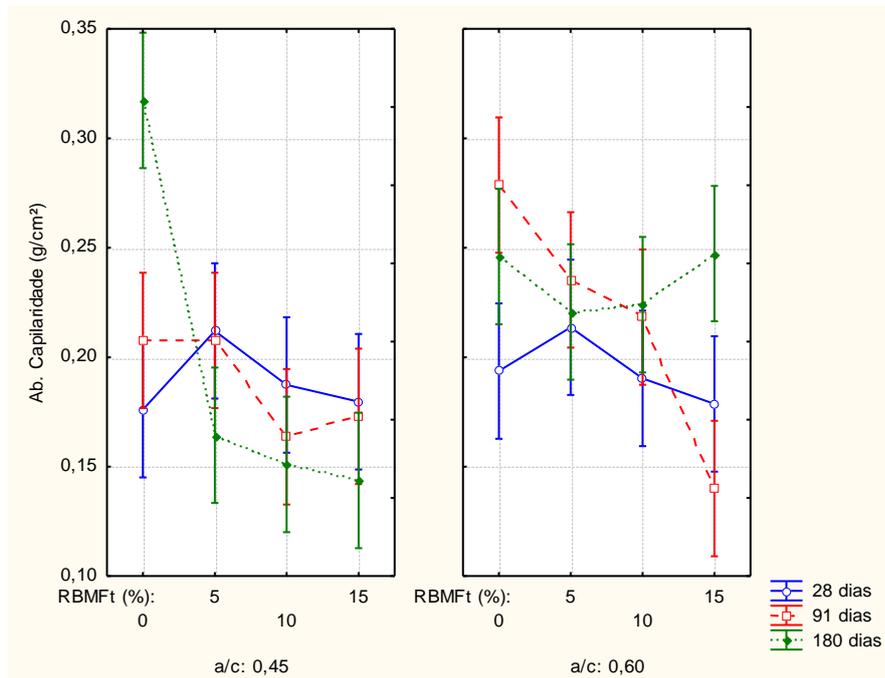
Figura 53 - Efeito da interação da porcentagem de RBMF e a idade sobre a absorção por capilaridade



Fonte: Autor

Observa-se uma tendência de redução da absorção de água por capilaridade nos concretos com a adição de RBMF, em todas as idades. Os concretos aos 28 dias, apresentam resultados de redução por absorção menos significativos, com o aumento da adição.

Figura 54 – Efeito da interação entre percentual de RBMF, relação a/c e idade sobre a absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autor

As reduções de absorção de água com a adição de RBMF são mais significativas nos concretos com idades avançadas. O concreto com relação a/c = 0,45 e com 15% de RBMF, aos 180 dias apresenta uma redução de 54,88% em relação à referência, enquanto, para o mesmo concreto aos 28 dias, é mantido o nível de absorção por capilaridade.

Nos concretos com relação a/c = 0,60, nota-se o melhor desempenho, com os níveis de adição de resíduo, aos 91 dias, a adição de 15% de RBMF, proporciona uma redução de 54,89% da absorção de água, em relação à referência. Aos 28 dias observa-se níveis menores de absorção de água, o concreto com adição de 15% de RBMF, apresenta uma redução de 7,77% comparado à referência.

Em geral, a adição do RBMF nas misturas de concreto ou mantiveram ou proporcionaram redução da absorção de água por capilaridade, demonstrando o efeito filler, ocupando espaços vazios, podendo proporcionar uma maior durabilidade aos concretos.

4.2.2.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Com base nos resultados apresentados nos ensaios do concreto no estado endurecido, pode-se afirmar que concretos com adição de RBMF obtiveram significativo incremento na resistência e reduções na absorção de água. Estes benefícios estão ligados a um possível efeito físico, promovido pelo resíduo, que age provocando um refinamento na estrutura dos poros.

De acordo com Castro e Pandouf elli (2009), com a introdução de adições minerais nas misturas de concreto, as propriedades mecânicas e a coesão entre partículas dos mesmos são melhoradas, enquanto a permeabilidade e a porosidade capilar são reduzidas. Com o refinamento dos poros, a zona de interface entre o agregado e a matriz é reduzida e a exsudação interna e superficial da mistura, minimizada. Tudo isso leva a um melhor desempenho mecânico do concreto com consequente aumento de sua durabilidade.

Com o intuito de observar a microestrutura e a morfologia dos concretos com RBMF, foram retiradas amostras das misturas com relação $a/c = 0,45$ e $a/c = 0,60$ e todos os níveis de adição, aos 180 dias. As amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e logo após, realizada a comparação dos concretos com adição com suas respectivas referências.

As figuras 55 (a) e (b) ilustram a formação dos cristais na zona de transição do concreto referência de relação $a/c = 0,45$.

Figura 55 – MEV – Zona de transição concreto referência, a/c = 0,45, 180 dias



Fonte: Autor

Na figura 55 (a), percebe-se a formação de etringita de forma densa na zona analisada, o que pode ter influenciado o comportamento da absorção por capilaridade nos concretos com idade de 180 dias. Para a formação de etringita tardia, é necessária uma fonte de sulfatos que de acordo com Mehta e Monteiro (2008), pode ser proveniente de um agregado contaminado com gipsita ou cimento contendo um teor de sulfato muito alto.

Levando-se em consideração que nem a composição química e nem a jazida de extração do agregado miúdo serem conhecidas, pode ser que o mesmo esteja contaminado com gipsita.

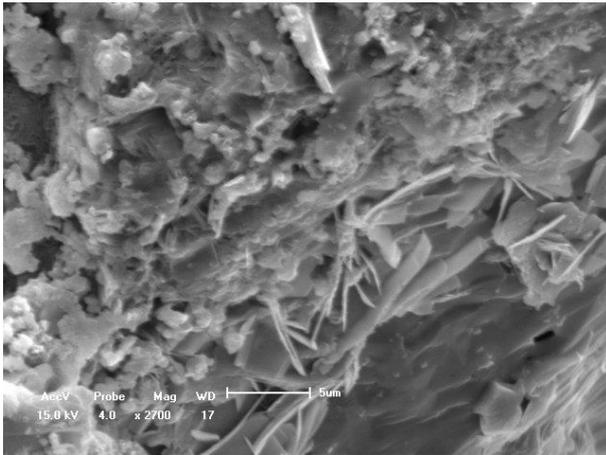
Segundo Casanova *et al.* (1997), danos são causados a concretos submetido a ataque de sulfatos, podem surgir microfissuras resultantes da formação de produtos expansivos. Acredita-se que esse efeito seja causado da reação de íons sulfato com portlandita, produzindo gesso que por sua vez, reagirá com o aluminato tricálcico do cimento, resultando em monossulfoaluminato e/ou etringita.

Uma fonte provável de aluminato para a formação de cristais de etringita, pode ser o RBMF, em sua composição química, nota-se uma presença significativa de aluminatos, e esses podem estar contribuindo com a formação de cristais de etringita em idades avançadas.

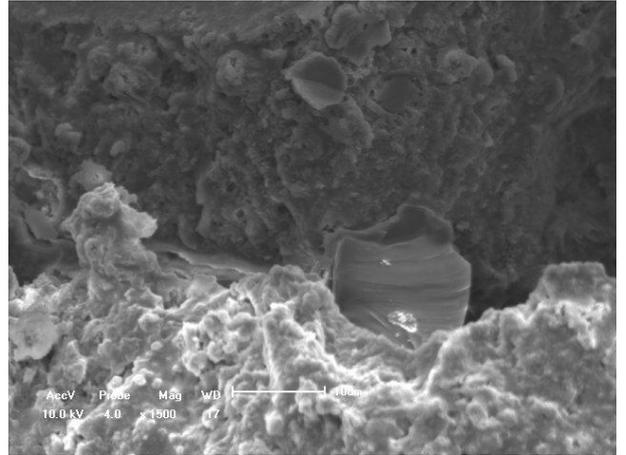
As figuras 56 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) apresentam os concretos com adições de RBMF.

Figura 56 – MEV – concretos com adição de RBMF, a/c = 0,45, 180 dias

ADIÇÃO 5%

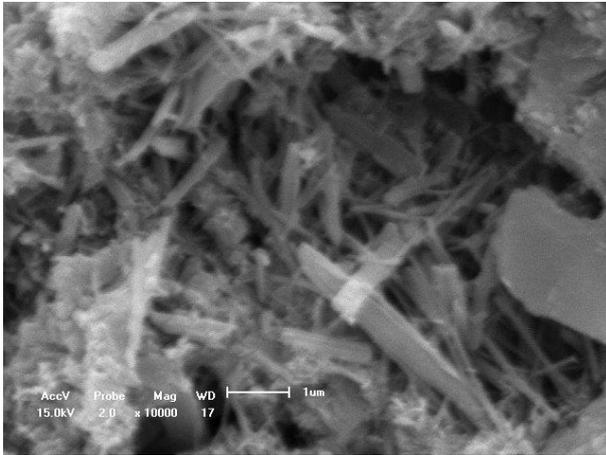


(a)

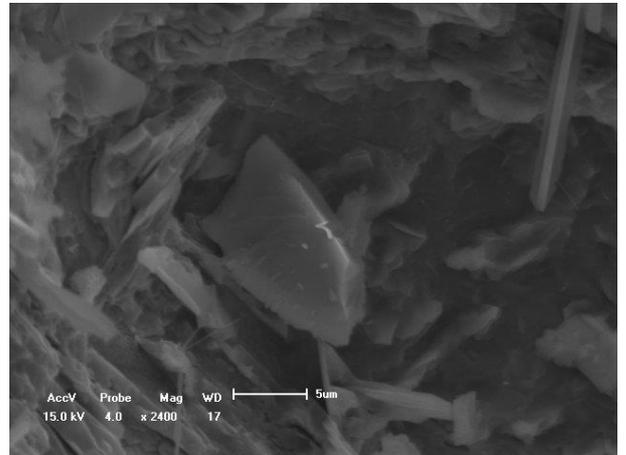


(b)

ADIÇÃO 10%

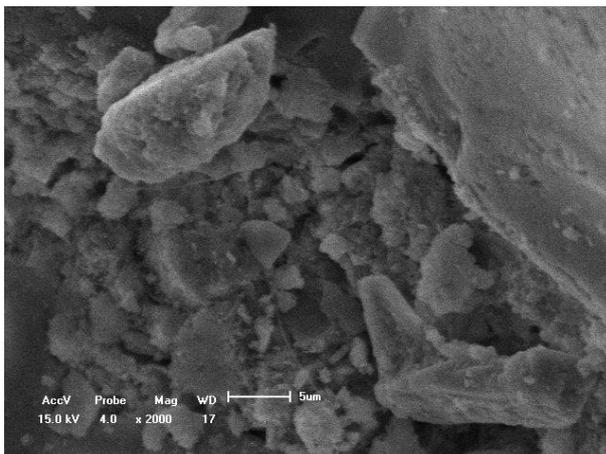


(c)

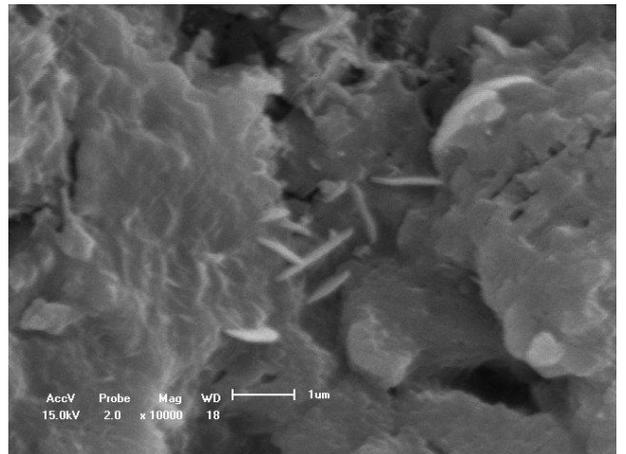


(c)

ADIÇÃO 15%



(e)

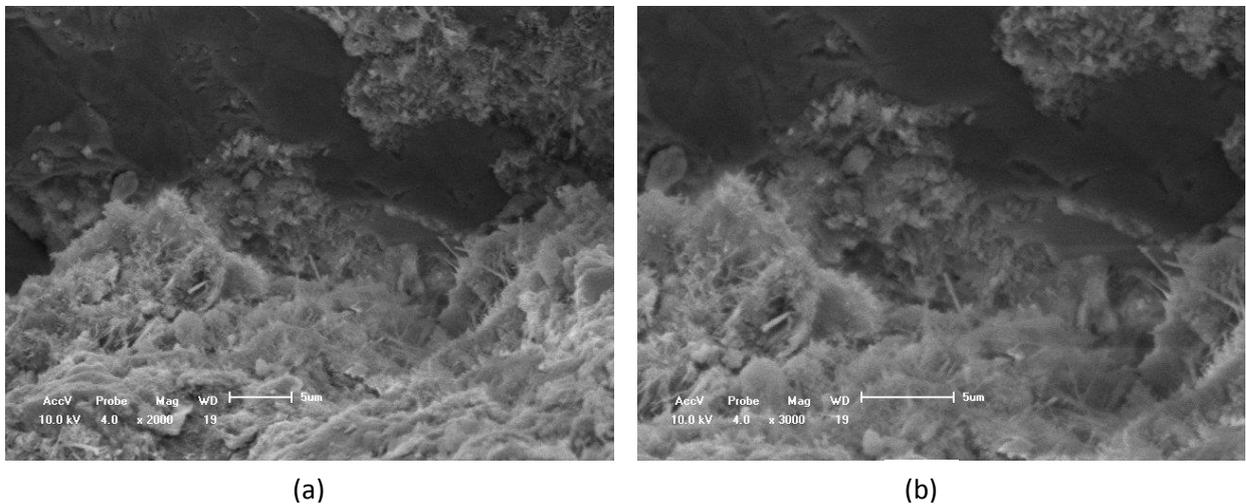


(f)

Nas figuras 56 (b), (d) e (e), nota-se a presença de prováveis partículas do RBMF, o formato dos grãos apresentados assemelham-se aos grãos da figura 18. Essas partículas ocupam espaços, promovendo a descontinuidade dos poros e conseqüentemente contribuindo com a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos.

As figuras 57 (a) e (b), ilustram a zona de transição do concreto referência com relação $a/c = 0,60$.

Figura 57 – MEV – concreto referência, $a/c = 0,60$, 180 dias

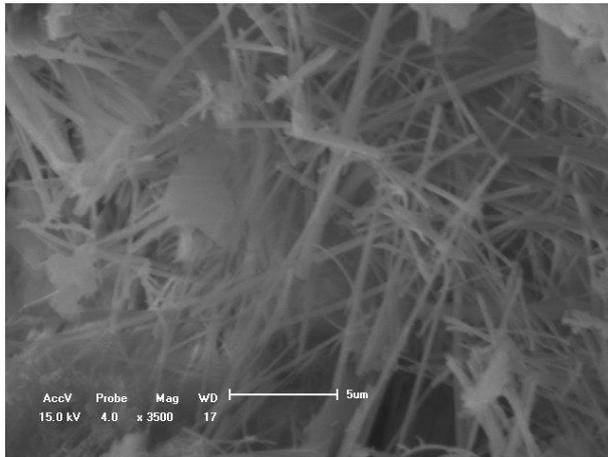


Observa-se a ocorrência de grânulos de silicato de cálcio hidratado C-S-H e a presença de pequenos cristais do que parece ser etringita.

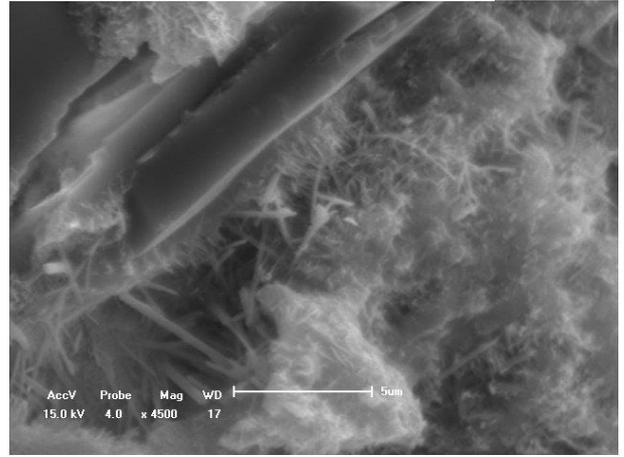
Nas figuras 58 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), são demonstradas imagens da microestrutura da zona de transição dos concretos com adição de RBMF e relação $a/c = 0,60$.

Figura 58 – MEV – concretos com adição de RBMF, a/c = 0,60, 180 dias

ADIÇÃO 5%

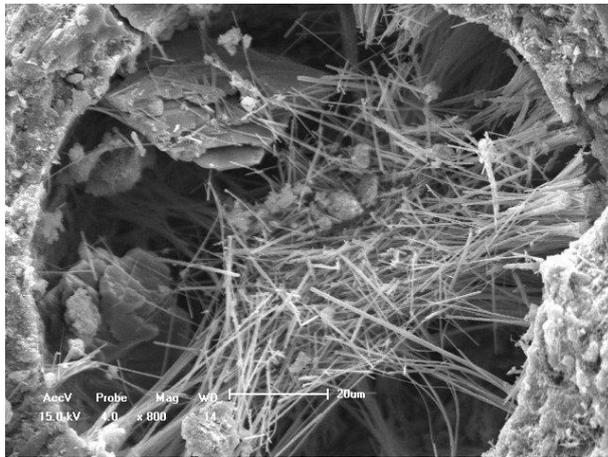


(a)

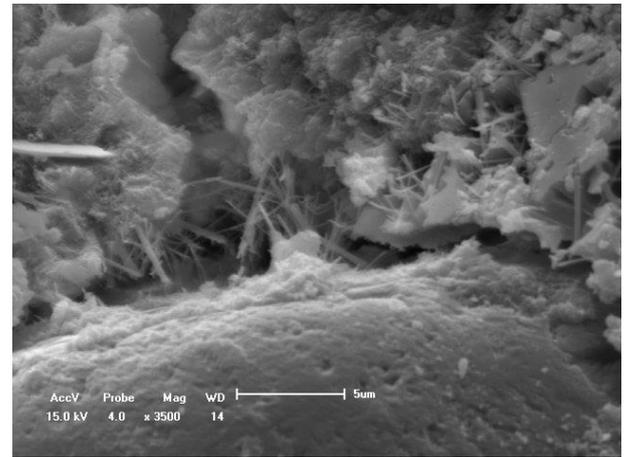


(b)

ADIÇÃO 10%

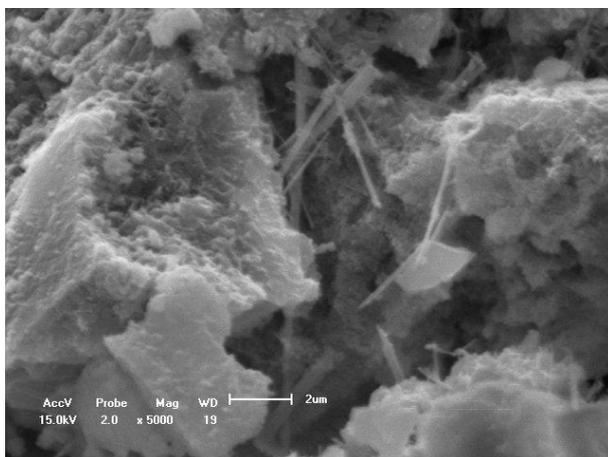


(c)

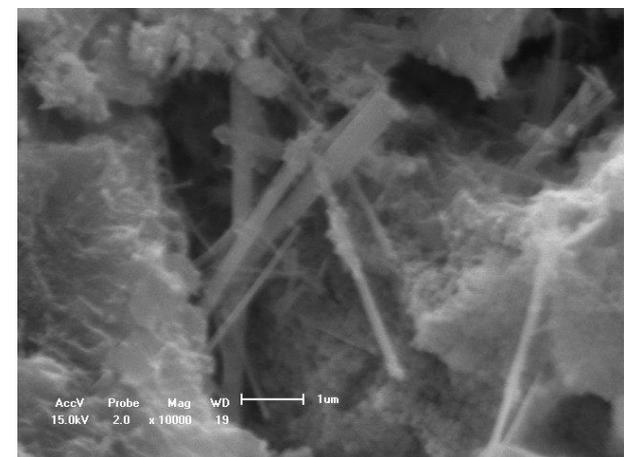


(d)

ADIÇÃO 15%



(e)



(f)

Em todas concretos, pode ser observado a presença de etringita. A figura 58 (c), ilustra um poro no interior da amostra de concreto com 10% de adição de RBMF, parcialmente preenchido com cristais de etringita e o que parece ser uma portlandita.

Nas imagens dos concretos com relação $a/c = 0,60$, notou-se uma menor presença de grãos de RBMF, devido à quantidade inferior de cimento utilizada nesses concretos, já que as adições foram realizadas em função da massa de cimento.

4.2.3 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

A coloração final do concreto está ligada à soma da composição das cores originais dos materiais que o compõe (aglomerantes, agregados, adições e aditivos) e a dosagem empregada na mistura (PASSUELO, 2004). Neste trabalho, verificou-se a influência da adição de porcentagens diferentes de RBMF e da relação a/c na cor final dos concretos

As variações nas cores foram calculadas utilizando o espaço de cor CIELAB, onde leva-se em consideração a teoria das cores opostas, nesta teoria duas cores não podem ser verdes e vermelhas ao mesmo tempo, ou amarelas e azuis ao mesmo tempo, portanto, o L^* indica a luminosidade e o a^* (a^* vermelho; $-a^*$ verde) e b^* (b^* amarelo; $-b^*$ azul), são as coordenadas cromáticas. Avaliou-se, também, A diferença colorimétrica (ΔE) entre os concretos com adições e suas respectivas referências, buscando avaliar o nível de percepção humano da diferença colorimétrica.

Com os dados colorimétricos obtidos nas leituras espectrofotométricas realizou-se a análise de variância (ANOVA), com o intuito de avaliar a influência do teor de adição e da relação a/c sobre cada coordenada colorimétrica. Na tabela 31 observa-se os resultados da ANOVA, que define o nível de significância das variáveis sobre a luminosidade dos concretos.

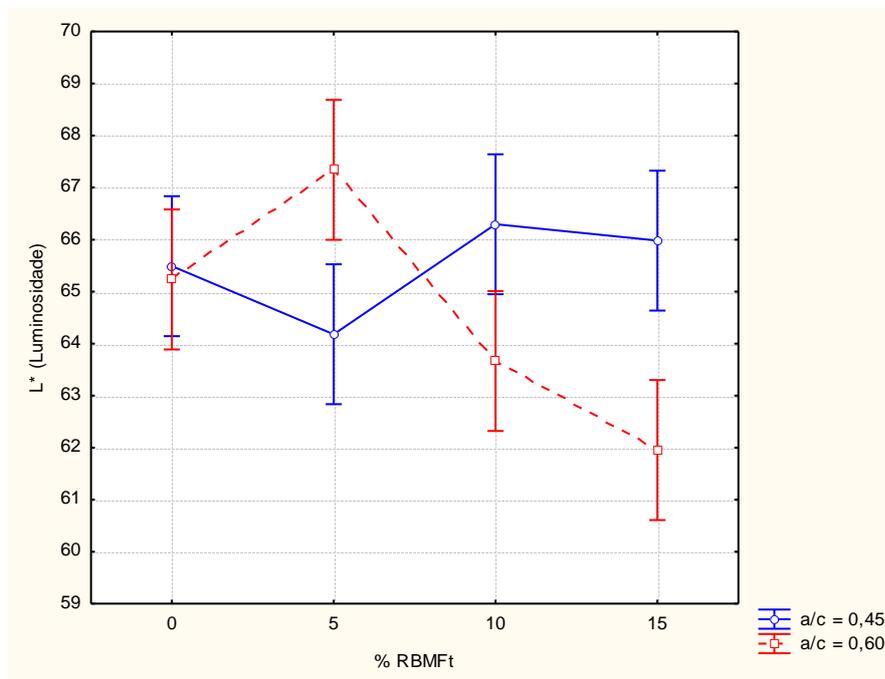
Tabela 31 - ANOVA - Luminosidade

Fonte de variação	SM	GL	SQ	F	P	RESULTADO
% RBMF	7,10	3	2,37	3,48	0,070546	NS
a/c	3,52	1	3,52	5,16	0,052676	NS
% RBMF - a/c	29,65	3	9,88	14,52	0,001335	S
Erro	5,45	8	0,68			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Apenas a interação entre a porcentagem de adição de RBMF e a relação a/c obteve resultado significativo sobre a luminosidade dos concretos, ou seja, o percentual de resíduo não influencia na luminosidade dos concretos. Os resultados estão expostos na figura 59.

Figura 59 - Efeito da interação entre adição de RBMF e relação a/c sobre a luminosidade



Fonte: Autor

Piovesan (2004), diz que o aumento na relação a/c produz um crescimento na luminosidade, indicando que quanto mais água, mais clara fica a superfície do concreto.

De acordo com a tabela 31, a relação a/c não foi significativa para a luminosidade dos concretos, entretanto, sua interação com o teor de RBMF, obteve significância. Na figura 59, nota-se que os concretos com relação a/c inferior, obtiveram maior luminosidade, com a exceção das adições de 5% de RBMF, onde as adições provocaram uma redução de 1,98% da luminosidade do concreto a/c = 0,45 e o incremento de 3,29% na luminosidade do concreto a/c = 0,60.

Para o concreto com adição de 15% e a/c = 0,45 houve um aumento, não muito significativo, de 0,77% na luminosidade em relação à referência. Para o concreto com adição de 15% e a/c = 0,60 o resultado foi mais significativo, com uma redução de 4,98% na luminosidade.

Os materiais utilizados por Piovesan (2004), foram para produção de concreto branco (cimento branco e agregados de origem calcária, na cor branca). Esse fator provavelmente influenciou na luminosidade das misturas. Para os concretos produzidos nesta pesquisa foram utilizados cimento CPV – ARI, agregado graúdo proveniente da britagem de rochas naturais e areia branca de origem quartzosa.

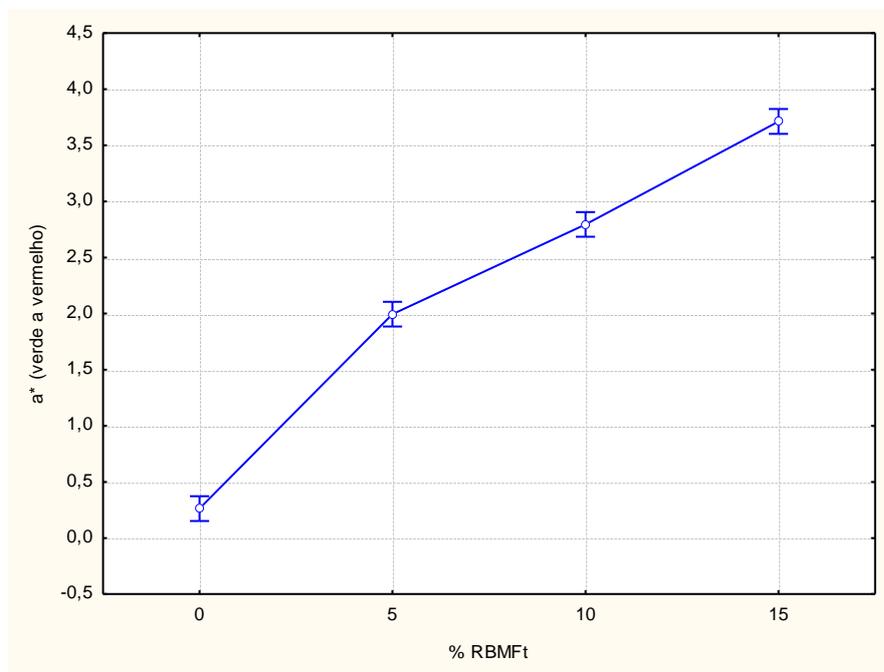
Na tabela 32 é apresentado a contribuição de cada variável independente sobre a variável coordenada a* (verde/vermelho), com o nível de confiança de 95%. As variáveis %RBMF, a/c e a interação entre elas, demonstraram contribuição estatística significativa, sobre a coordenada a* (verde/vermelho).

Tabela 32 - ANOVA - Coordenadas verde (-a)/ vermelho (a)

Fonte de variação	SM	GL	SQ	F	P	RESULTADO
%RBMFt	25,74923	3	8,58308	934,212	0,000000	S
a/c	0,49703	1	0,49703	54,098	0,000080	S
%RBMFt – a/c	1,38682	3	0,46227	50,316	0,000015	S
Erro	0,07350	8	0,00919			

SQ – soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média dos quadrados; F – Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S – Efeito significativo; NS Efeito não significativo.
Fonte: Autor

Figura 60 – Efeito isolado da adição de RBMF sobre a coordenada vermelho (a)/ verde (-a)



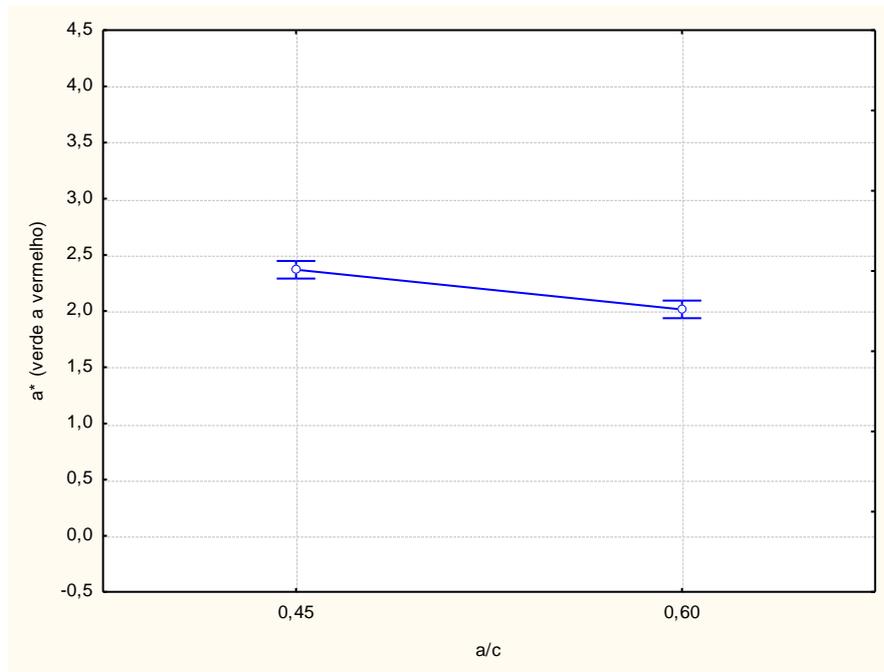
Fonte: Autor

De acordo com a figura 60, os níveis de adição contribuíram de forma pouco significativa com uma coloração mais avermelhada aos concretos, levando-se em consideração que a escala para medição do tom avermelhado no espaço de cor CIELAB vai de 0 a 100. Nota-se que, quanto maior os níveis de adição de RBMF mais vermelhos os concretos serão. Piovesan (2004), adicionou pigmento vermelho à mistura de concreto branco e notou que quanto maior era o nível de adição, mais a coloração do concreto se aproximava à do pigmento.

Apesar do concreto produzido neste trabalho não possuir as mesmas características do de Piovesan (2004), o RBMF contribuiu com a mudança de tonalidade, devido à presença de Fe_3O_2 (hematita) em parte da sua composição, que responsável pela coloração avermelhada do resíduo. Porém, para que ocorra maior influência do RBMF sobre a coloração dos concretos, teor de Fe_3O_2 deve ser maior que o de SiO_2 .

Na figura 61, é apresentado o efeito isolado da relação a/c sobre a coordenada a^* (vermelho/verde).

Figura 61 - Efeito isolado da relação a/c sobre a coordenada Vermelho (-a)/ verde (-a)

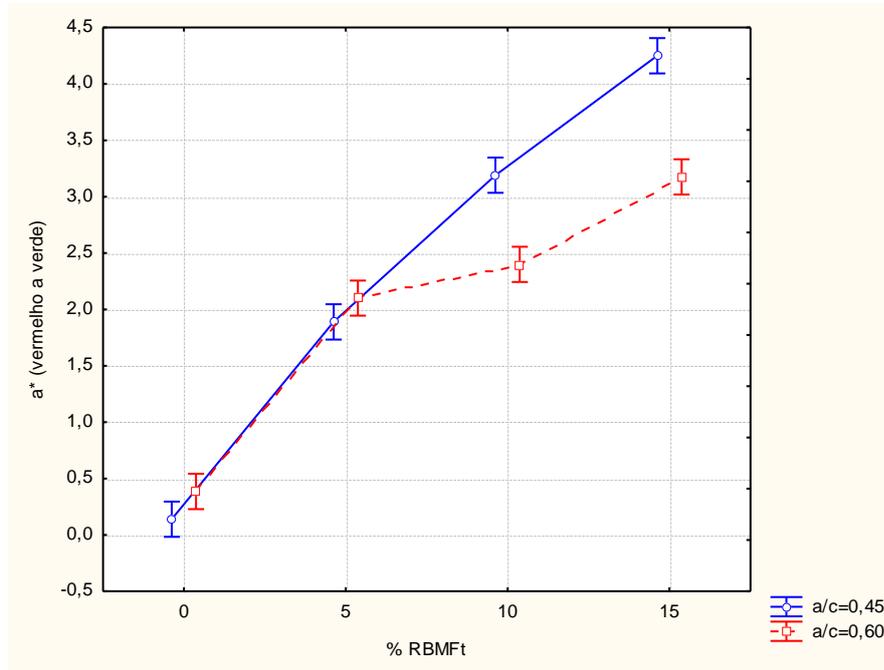


Fonte: Autor

A relação a/c possui influência significativa sobre a cor dos concretos, nota-se que a relação $a/c = 0,45$ proporciona um aumento da cor vermelha, cerca de 37,5% em relação à $a/c = 0,60$. Esse resultado era esperado, devido as adições de resíduo serem realizadas baseadas na massa de cimento utilizado, portanto, os concretos com relações a/c menores, tendem a possuir uma modificação estética maior.

Na figura 62, é apresentado o efeito da interação entre o teor de RBMF e a relação a/c sobre a coordenada a^* (verde/ vermelho).

Figura 62 - Efeito da interação entre percentual de RBMFt e relação a/c sobre a coordenada a* (vermelho/ verde)



Fonte: Autor

Como esperado, o aumento do teor de pigmento influencia as características colorimétricas finais do concreto, os resultados demonstraram que houve um crescimento da coordenada a^* , indicando um aumento da cor vermelha nos concretos com relação a/c diferentes, de acordo com os níveis de adição. Os concretos que apresentaram resultados mais significativos em relação à pigmentação avermelhada foram os concretos com maiores adições, com destaque para os concretos de relação a/c igual a 0,45 nos níveis de adição de 10 e 15%.

4.2.3.1 DIFERENÇA COLORIMÉTRICA

Um ponto que vale a pena ser discutido é se essa diferença colorimétrica é perceptível ao olho humano. Passuelo (2004), afirma que a percepção visual humana depende de diversos fatores como a fonte de luz, o objeto e outros parâmetros. Apesar da maior imprecisão da leitura colorimétrica a olho nu, essas

leituras sempre estarão de acordo com as leituras cromáticas, ou seja, as variações registradas na pesquisa poderão ser relacionadas com a sensibilidade das pessoas.

De acordo com Wendt (2006), a diferença de cor (ΔE) quantifica matematicamente a variação de cor, dentro do sistema L^*a^*b , entre diferentes corpos-de-prova ou de um mesmo espécime em diferentes situações.

Por meio da colorimetria diferencial é possível verificar os níveis de percepção humano para diferenças colorimétricas. A norma alemã DIN 6174 faz a relação entre a diferença colorimétrica (ΔE) e a percepção humana, de maneira geral, aceita-se que o olho humano não tem capacidade para perceber diferenças colorimétricas menores do que 1 (WENDT, 2006).

A tabela 33 expõe os resultados das diferenças colorimétricas entre os concretos com adição de RBMF e suas referências, utilizando a norma alemã como base para identificação da percepção humana.

Tabela 33 - Nível de percepção das diferenças colorimétricas

CONCRETO	ΔE MÉDIO	C.V. (%)	DIN 6174, 1997	
REF.	-	-	-	
a/c = 0,45	AD5%	4,40	4,34	Facilmente distinguível
	AD10%	6,35	0,67	Grande
	AD15%	8,30	7,08	Grande
REF.	-	-	-	
a/c = 0,60	AD5%	4,03	3,16	Facilmente distinguível
	AD10%	4,00	0,88	Facilmente distinguível
	AD15%	5,82	2,31	Facilmente distinguível

ΔE – diferença total de cor; C.V. – Coeficiente de variação; Fonte: Autor

Os resultados demonstraram que a diferença de cor é perceptível a olho nu, em alguns casos como nos concretos de relação $a/c = 0,45$ e com adições de 10 e 15% a diferença de cor é grande, enquanto os outros concretos foram classificados como facilmente distinguíveis.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e principais conclusões decorrentes da execução do programa experimental. Serão apresentadas algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros que possam ser realizados dentro da mesma linha de pesquisa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

No ensaio de lixiviação, nenhum dos seus compostos apresentou concentração superior ao limite máximo estabelecido pela NBR 10004/04, de forma que o RBMF não apresenta risco ao meio ambiente e à saúde humana. Em relação ao ensaio de solubilização, apenas o Ferro (Fe) apresentou concentração superior ao recomendado pela NBR 10004/04, portanto, o resíduo foi classificado como classe II A – Não inerte.

Foi possível observar, com as análises de granulometria e composição química que o resíduo pode ser utilizado como uma adição mineral em concreto, atuando como filler. Essa atuação proporciona ao concreto maior resistência mecânica e durabilidade.

Observa-se, pela análise de difração de raios-x, a presença de minerais como hematita e goetita e também uma alta taxa de óxidos de ferro notada em sua composição química, o que tornando viável a utilização do RBMF como pigmento.

5.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Apesar das misturas de concretos com adição de RBMF apresentarem maior coesão e uma diminuição da exsudação, observou-se a redução do abatimento dos mesmos de acordo com o teor de adição do resíduo.

5.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Quanto à resistência à compressão axial, a adição de resíduo do beneficiamento de minério de ferro tratado à composição dos concretos, mostrou-se significativa em seu estudo estatístico. A adição de RBMF proporciona aos concretos, desempenho melhor do que suas referências, na maioria dos casos.

Apenas o concreto com 5% de adição e relação $a/c = 0,60$, aos 28 dias, obteve uma redução de resistência correspondente a 4,6% em relação à sua referência. Em todas as idades os outros concretos com adições obtiveram resultados positivos, com incrementos em sua resistência. Os maiores destaques foram os concretos com relação $a/c = 0,45$ e adição de 10% de RBMF, aos 91 dias, que obteve um aumento 9,62% em sua resistência por compressão axial e os concretos com relação $a/c = 0,60$ e idade de 180 dias, onde as adições de 5% e 10% obtiveram incrementos de 10,95% e 11,18% em suas resistências, respectivamente.

5.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

No que se refere à resistência à tração por compressão diametral, a adição de RBMF, não foi significativa de acordo com a ANOVA realizada, entretanto, quando analisada a interação das porcentagens de adição com a relação a/c e idade os resultados apresentados foram significativos.

Os concretos com adição que apresentaram melhor resultado, quando comparados com sua referência, foram o com relação $a/c = 0,45$ e 5% de adição, aos 28 dias e o concreto com relação $a/c = 0,45$ e 10% de adição, aos 91 dias. Estes concretos apresentaram incrementos em suas resistências de 21,24% e 19,81%, respectivamente.

5.3.3 DURABILIDADE

5.3.3.1 ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

A absorção por imersão está relacionada à quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto endurecido. Na análise realizada neste trabalho a variável absorção de água dos concretos apresentam melhor desempenho nos concretos com adição de 10 e 15% e relação $a/c = 0,45$, aos 28 e 180 dias. Para os concretos com relação $a/c = 0,60$, a adição de resíduo mostrou-se eficaz apenas aos 180 dias, quando os concretos com 10 e 15% de adição mostraram níveis de absorção inferiores à referência. Analisando o efeito isolado da adição de RBMF sobre a absorção de água, nota-se que as adições de 10 e 15% tem contribuição significativa sobre a durabilidade dos concretos. Nestes casos, possivelmente o RBMF contribuiu com a descontinuidade da estrutura de poros desses concretos.

Com relação ao índice de vazios apresentado pelos concretos, os melhores índices ocorrem, na maioria dos casos, nas adições de 10%. Aos 180 dias, os concretos com relação $a/c = 0,60$ e $0,45$ apresentam índices de vazios inferiores à referência nos concretos com 10 e 15% de adição.

5.3.3.2 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O efeito das adições de RBMF foram benéficas aos concretos, com a redução da absorção por capilaridade, demonstrando o efeito da ocupação dos poros por grãos de RBMF.

No que se refere à análise do efeito isolado da idade dos concretos sobre a absorção por capilaridade, notou-se que com o tempo houve incremento na absorção de água, sinalizando que por algum motivo a porosidade capilar apresentava-se maior com o decorrer do tempo. Observa-se nas microscopias realizadas com os concretos de 180 dias, a presença de etringita na microestrutura dos mesmos. A formação de etringita em idades avançadas causa expansão e conseqüentemente fissuras internas que podem influenciar na resistência mecânica dos concretos e em sua durabilidade.

No entanto, a adição de resíduo proporcionou a redução da absorção por capilaridade, na maioria dos casos, como no caso do concreto com relação $a/c = 0,45$ e com 15% de RBMF, que aos 180 dias apresentou uma redução de 54,88% em relação à referência, enquanto, para o mesmo concreto aos 28 dias, foi mantido o nível de absorção por capilaridade.

Nos concretos com relação $a/c = 0,60$, o desempenho foi melhor aos 91 dias, a adição de 15% de RBMF, proporcionou uma redução de 54,89% da absorção de água, em relação à referência. Aos 28 dias notou-se níveis menores de absorção de água, o concreto com adição de 15% de RBMF, apresentou redução de 7,77% comparado à referência.

Contudo, percebe-se a atuação do RBMF como filler, atuando com agente redutor de espaços vazios nos concretos.

5.4 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

A cor do concreto é uma composição das cores originais dos materiais que o compõem, assim como a dosagem empregada na mistura. Utilizando as

coordenadas do sistema de cor CIELAB, avaliou-se a influência da porcentagem de adição do RBMF e da relação a/c.

Concluiu-se que a relação a/c possui influência significativa sobre a cor dos concretos, a relação a/c menor indica uma coloração mais avermelhada. A maior quantidade de água nas misturas de concreto cria tons menos avermelhados.

Em relação ao teor de RBMF, quantidades maiores do resíduo nos concretos com relação a/c = 0,45 forma tons mais claros, enquanto a maior adição do resíduo em concretos com relação a/c = 0,60 tendem a perder luminosidade.

Nota-se que o teor de RBMF tem influência significativa nas características colorimétricas finais dos concretos, à medida que se aumenta o teor de adição mais vermelhas se tornam as superfícies dos concretos, observando-se para os concretos com adições de 10 e 15% de RBMF e relação a/c igual a 0,45 mudanças de coloração mais significativas.

Com relação à diferença de cor, os concretos que apresentaram diferença mais significativa a olho nu, foram os concretos com relação a/c = 0,45 e adições de 10 e 15%. Segundo a norma alemã DIN 6174/97, a o nível de percepção humana da diferença de cor em relação à referência, é considerada grande, enquanto as demais adições são consideradas de fácil distinção.

Contudo, notou-se que o RBMF pode ser utilizado como pigmento em concretos com relação a/c igual a 0,45, quando utilizado, como adição, em porcentagens iguais ou superiores a 10%.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a utilização do resíduo de beneficiamento de minério de ferro na composição do concreto é viável e Ambientalmente adequada. Devido o resíduo ter sido classificado como Classe II – não inerte, foi verificada a sua estabilização por solidificação, que demonstrada a viabilidade de utilização dos concretos com adição do mesmo, devido à não lixiviação de metais prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

A ação como filler nos concretos, demonstra seus benefícios tanto nas funções mecânicas quanto nas de durabilidade, causando a descontinuidade de poros e impedindo que agentes agressivos penetrem o interior dos concretos, provocando a redução de sua vida útil. A adição de 10% de RBMF foi a apresentou os melhores resultados tanto nas resistências mecânicas quanto nos ensaios de durabilidade.

Sua atuação como pigmento também foi comprovada, demonstrando a modificação da cor dos concretos com teores mais elevados de RBMF.

Contudo, os resultados apresentados tendem a contribuir com o gerenciamento desse resíduo que é gerado em grandes quantidades e vem trazendo diversos transtornos à sociedade e ao meio ambiente.

5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da durabilidade estética de concretos coloridos, produzidos com resíduos de beneficiamento de minério de ferro.
- Avaliação dos aspectos de durabilidade de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de minério de ferro.
- Tratamento térmico de resíduos de beneficiamento de minério de ferro para produção pigmentos.
- Avaliação dos parâmetros influentes na cor e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento tradicional.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2244/ 05**: standard test method for calculation of colours differences from instrumentally measured colour coordinates. Pennsylvania, 2005.

ABNT **NBR 13.208**: Mineração -Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 10.005**: Procedimentos para obtenção do extrato lixiviado. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 10.006**: Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 13028**: Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção e sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **NBR 12653**. Materiais pozolanicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014

_____ **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

_____ **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075 mm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impureza orgânica. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

ANDRADE, R. C. L. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil.** 2014. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2014.

ANDRADE, L. C. R.; MARQUES. A. G.; PEIXOTO, R. A. F. Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção. **Geografias**, v. 12, n. 1, p. 32-44, 2016.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society For Testing And Materials. ASTM D-2244/84: Standart test method for calculation of colour differences from instrumentally measured colour coordinates. Penssylvania, 1984.

ARISTIMUNHO P. B. e A. BERTOCINI. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento portland. **IBRACON Structute and Materials Journal**, São Paulo, vol. 5, n.2, p. 153-165, Abril 2012.

BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral.** 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2008..

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 147, 03. ago. 2010, Seção 1, p. 37. 2010. Disponível em: < <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/7190464/pg-1-secao1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-03-08-2010/pdfView>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

BRITO A. L. Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação de Resíduos. Tese (Doutorado em engenharia ambiental), UFSC, Florianópolis, 180p. 2007.

CABRERA O. et al. Hormigones de Alta Resistência com cimentos de filer calcareo. In: Congreso Internacional de Tecnologia del Hormigón. Anais. Buenos Aires, Argentina. Junho. 1998.

CARVALHO P. S. L. et al. **Minério de ferro.** BNDES. P. 198 – 233, 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>.

CASTRO A. L.; PANDOUPELLI V. C. Conceitos de dispersão e empacotamento de Partículas para a Produção de Concretos Especiais Aplicados na Construção Civil. In: Cerâmica. Vol. 55. 2009.

CASANOVA I. et al. Aggregate Expansivity Due To Sulfide Oxidation - li. P Physico-Chemical Modeling Of Sulfate Attack 2. In: Cement and Concrete Research. Vol. 27. 1627-1632. 1997.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. 83 p.

D'AGOSTINO L. F. **Praias de barragens de rejeitos de mineração – Características e análise da sedimentação**. 2014. 374 p. Tese (doutorado engenharia de minas). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

DE GROOT, G. J.; SLOOT, H. A. van der. Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes. In: GILLIAN, T. M.; WILES, C. C. (eds.). Determination of leaching characteristics of waste materials to environmental product certification. v. 2. Baltimore, PA: American Society for Testing Materials, p. 149-170, 1992.

DEUTSCHES INSTITUT für NORMUNG. **DIN 6174**: Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB –Formel, Beuth Verlag, Berlin und Köln 1979.

DEPEC – DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS. Minério de Ferro: Junho de 2017. Disponível em: <https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_minerio_de_ferro.pdf>. Acesso em 01 fev. 2018.

DUARTE, A. P. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG.

DNPN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral - 2014**. Disponível em: <<http://www.dnppm.gov.br/dnppm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em 01 ago. 2017.

FERREIRA K. C; AGUIAR M. A. M; OLIVEIRA M. F. M; SILVA A. Q. N; PERES A. E. C. Estudo do aproveitamento de rejeitos de um minério de ferro itabírico na região de morro do pilar. **Holos**. V. 2. P. 77 – 83, 2016.

FONSECA G. C. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). UFMG. Belo Horizonte – MG. 2010.

FRANCO L. C; SANTOS D. H; ROSA P. P; SILVA G. J; PEIXOTO R. F. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto**. Natal, Anais... Rio Grande do Norte. 2014, 15 p.

GAMA, E. M.; GOMES, A. M.; VIEIRA, C. B. **Aproveitamento de capeamento de minas de minério de ferro através de processo de calcinação flash para**

produção de ligante de alta resistência. In: 44º Seminário de redução de minério de ferro e matérias primas. Belo Horizonte, 2014.

GALVÃO J. L. et al. Reuse of Iron Ore Tailings From Tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of cleaner products*, 412- 422, 2018.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Technological characterization of iron ore tailing. **Rev. Esc. Minas**, v.64 n.2, 2011, 4 p.

GONÇALVES J. P. Utilização do Resíduo de Corte de Granito como adição para a produção de concretos. Dissertação (mestrado em engenharia civil). UFRGS. Porto Alegre. 2000.

GUERRA A. N. Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto. Dissertação (mestrado em engenharia civil). UFMG. Belo Horizonte – MG. 2014

G1. **Desastre em Mariana-MG.** <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2018/10/26/acordo-assinado-nesta-sexta-impede-prescricao-de-direitos-das-vitimas-da-tragedia-de-mariana.ghtml> horário: 17:21h

G1. **Desastre em Brumadinho-MG.** https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/barragem-da-vale-se-rompe-em-brumadinho-mg-fotos.ghtml?utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_campaign=g1 horário: 18:03 dia

HENRIQUES A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocínéticas dos minerais de ferro: Hematita, Goethita e Magnetita.** Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2012.

HELENE P.; ANDRADE T. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* IBRACON, 2010.

HELENE P. TUTIKIAN B. *Concreto: Ciência e tecnologia.* IBRACON, 2011.

HUANG X. et al. Feasibility Study of developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. *J. Mater. Civ. Eng.* Vol. 25. 923-931. 2013.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira - 2018.** 2018. 25p.

ICOLD. *Tailings Dams Risks Of Dangerous Occurrences – Lessons learnt from practical experiences.* UNEP PNUE, 2001

LI C. et al. Innovative Methodology for Comprehensive Utilization of iron Ore Tailings Part 2. *Journal of Hazardous Materials.* 2009.

LUO L; ZHANG Y; BAO S; CHEN T. Utilization of iron ore Tailings as ra material for Portland cement clinker production. **Hindawi Publishing Corporation.** 6 p. 2016.

MACIEL E. F. Avaliação da Lixiviação de Cromo em Monólito de Concreto por Imersão e irrigação. Dissertação de Mestrado UNISINOS. 140 f. São Leopoldo, RS, 2015.

MAYER J.; SUSSA J. Solidification. Immobilization and encapsulation off waste and contaminats. Puratek international., 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. São Paulo: PINI, 2008.

MELCHIADES F.; BOSCHI A. Cores e Tonalidades Em Revestimentos Cerâmicos. Cerâmica industrial, Vol 4 (1-6), Dezembro, 1999.

MELPHI et al. **Recursos Minerais no Brasil: Problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 420 p.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO. Balança comercial de 2016. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/noticias/2194-balanca-bate-recorde-em-2016-com-superavit-de-us-47-7-bilhoes>>. Acesso em 02 de janeiro. 2018.

MINOLTA. **Precise color communication**: Color control from perception to instrumentation. Japão: Minolta Co. Ltd. 1998.

MONTE M. B. M. et al. **Usinas de beneficiamento de minério no Brasil**. Rio de Janeiro: CTEM/ MCT, 2001 – 398 p.

MOUSSABEC K. et al. Evaluation of the Impact of Ni, Cr and Pb Contained in Effluents of an Industrial unit by the Process of Stabilization/solidification using Hydraulic Binders. Journal Environmental residue Vol 7. 485 – 494, 2013.

MOURA W. A.; DAL MOULIN D. C. Influência da Adição de Escória de Cobre em Características Relacionadas à Durabilidade do Concreto. In: Ambiente Construído. Vol. 4. Porto Alegre. Jun. 2004.

PAN Y. et al. Stabilization/solidification characteristics of organic clay contaminated by lead when using cement. Journal of Hazadours materials, 2018.

PASSUELO, A. Análise de Parâmetros Influentes na Cromacidade e no Comportamento Mecânico de Concretos à Base de Cimento Branco. 2004, 133f. Dissertação (mestrado em engenharia civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2004.

PINTO C. A. Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados. Dissertação (mestrado em engenharia civil) USP, São Paulo, 2005.

PIOVESAN A. Z. Estudo Sobre a Influência da Adição de Pigmentos em Propriedades de Durabilidade e na Cromacidade do Concreto de Cimento Portland Branco. Dissertação (mestrado em engenharia civil). UFRGS. Porto Alegre. 2009.

REISHEDAT M.; AL-KHARABSHEH B. SEM and XRD Analyses and Testing of Milled Natural Oxides Used for Colored Concrete. Journaul of civil engeneering. Vol 10. 2016.

ROCHA G. G. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica e de minas). UFMG. Belo Horizonte, MG. 2005.

ROMANO R. C. O. et al. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. *Cerâmica*. Vol. 54. 456-461. 2008.

RUCHKYS U. A.; MACHADO M. M. M. Patrimônio Geológico e minério do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Caracterização e iniciativas de uso para educação e geoturismo, *Boletim Paranaense de geociência*. Vol. 70 120-136, 2013.

SCHOBENHAUS C.; BIZZI L. A.; VIDOTTI R. M.; GONÇALVES J. H. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, 2003.

SILVA, F. L., et al. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**. n. 40, p. 16085 – 16089, 2014.

SILVA C. A. Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). UNESP. São Paulo. 2004.

SOUZA C. C., et al. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **REVISTA MATERIA**. Rio de Janeiro, vol. 13, n. 1, jan. 2008.

SPAGNOL I. T. et al. Avaliação da lixiviação em concretos com incorporação do rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão – MG. 13 seminário Nacional de resíduos sólidos. ABES, 2018.

SHETTIMA A. U; HUSSIM M. W; AHMAD Y; MIRZA J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**. V. 120. P. 72 – 79. 2016.

TOFFOLO R. V., et al. **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro**. In: anais 56º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, Rio Grande do Norte, fev. 2014.

VENÂNCIO C. Avaliação das Propriedades Elétricas de Matrizes Cimentícias Contendo Metais pesados. Dissertação (mestrado em engenharia civil). UFSC, Florianópolis, 2012.

VORMITTAG et al. Helth Evaluation Of The Barra Longa Population Affected By The Disaster in Mariana County. *Ambiente e Sociedade*. Vol 21, São paulo, 2018.

WENDT. S. C. Análise da Mudança de Cor em Concretos Submetidos a Altas Temperaturas como Indicativo de Temperaturas Alcançadas e da Degradação Térmica. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Porto Alegre. 2006.