

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG
REGIONAL CATALÃO – RC
MESTRADO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

**ANÁLISE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO POR REJEITO MAGNÉTICO NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO**

MARCOS VINICIUS AGAPITO MENDES

CATALÃO – GOIÁS
2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: Marcos Vinicius Agapito Mendes

Título do trabalho: Análise técnica da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético na produção de concreto

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Marcos Vinicius Agapito Mendes

Data: 24 / 08 / 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

MARCOS VINICIUS AGAPITO MENDES

**ANÁLISE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO POR REJEITO MAGNÉTICO NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Gestão Organizacional, da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Gestão Organizacional, linha de pesquisa Inovação, Desenvolvimento e Tecnologia.

Orientador: André Carlos Silva

Coorientador: Heber Martins de Paula

CATALÃO – GOIÁS

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Mendes, Marcos Vinicius Agapito

Análise Técnica da Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Rejeito Magnético na Produção de Concreto [manuscrito] / Marcos Vinicius Agapito Mendes.-2016.

123 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Silva; co-orientador Dr. Heber Martins de Paula.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Gestão e Negócios, Catalão, Programa de Pós Graduação em Gestão Organizacional (profissional), Catalão, 2016.

Bibliografia.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Concreto. 2. Inovação. 3. Materiais alternativos. 4. Rejeito magnético. I. Silva, André Carlos, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL CATALÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ORGANIZACIONAL



ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE EXAME DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO MESTRADO PROFISSIONAL NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM GESTÃO ORGANIZACIONAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS.

No dia doze (12) de agosto de dois mil e dezesseis, às 8:00 horas, na sala 215 do CGEN- Centro de Gestão e Negócios, Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás, MARCOS VINICIUS AGAPITO MENDES, discente do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Gestão Organizacional (52001016061P6) da Universidade Federal de Goiás, expôs, em Sessão Pública, o exame de defesa da dissertação intitulado **ANÁLISE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR REJEITO MAGNÉTICO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**, para Comissão de Avaliação composta pelos (as) docentes: **Dr. André Carlos Silva** (Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional/Universidade Federal de Goiás, Presidente da Comissão), **Dr. Geraldo Sadoyama Leal** (Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional/Universidade Federal de Goiás, Membro Convidado Interno) e **Dr. Wellington Andrade da Silva** (Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização/Universidade Federal de Goiás, Membro Convidado Externo). O trabalho da Comissão de Avaliação foi conduzido pelo docente Presidente que, inicialmente, após apresentar os docentes integrantes da Comissão, concedeu 30 minutos o (a) discente candidato (a) para que este (a) expusesse o trabalho. Após a exposição, o docente Presidente concedeu a palavra a cada membro convidado da Comissão para que estes arguissem o (a) discente candidato (a). Após o encerramento das arguições, a Comissão de Avaliação do trabalho de defesa avaliou a dissertação e o desempenho do (a) discente candidato (a) na exposição, considerando a trajetória deste no curso de mestrado profissional. Como resultado da avaliação, a Comissão de Avaliação deliberou pela:

Aprovação do trabalho de defesa



A Comissão de Avaliação declara o (a) discente candidato (a) **APROVADO NO EXAME DE DEFESA PÚBLICA**. A Comissão de Avaliação pode sugerir alterações de forma e/ou conteúdo consideradas aceitáveis, as correções, quando identificadas, devem ser realizadas no prazo máximo de 30 dias contados a partir do recebimento da Ata de Defesa. As alterações deverão ser indicadas no Anexo ao presente documento e/ou podem constar na versão lida pelo membro da Comissão de Avaliação para a sessão de defesa do trabalho de dissertação. Neste caso, a versão lida corrigida deverá ser entregue ao (a) discente candidato (a) no final da sessão

Reprovação do trabalho de defesa



De acordo com a Resolução – CEPEC Nº 1109 e previsto a reprovação quando a Comissão de Avaliação determina que o trabalho apresentado não satisfaz as condições mínimas para ser considerado projeto de mestrado válido, em condições de se desenvolver um trabalho de conclusão de mestrado.

A Comissão de Avaliação:

Para uso da Coordenação/Secretaria do PPGGO	
 Dr. André Carlos Silva Membro Presidente Universidade Federal de Goiás	 Prof. Dr. Wagner Rosalem Coordenador do Mestrado Profissional no Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional Universidade Federal de Goiás Coord. do Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional-RC/UFG SIAPE: 1563237 - Port. 0321
 Dr. Geraldo Sadoyama Leal Membro Convidado Interno Universidade Federal de Goiás	 Prof. Dr. Geraldo Sadoyama Leal Vice-Coordenador do Mestrado Profissional no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Gestão Organizacional Universidade Federal de Goiás
 Dr. Wellington Andrade da Silva Membro Convidado Externo Universidade Federal de Goiás	
 Marcos Vinicius Agapito Mendes Discente Candidato (a) Matrícula: 2014-1638	Observações: Visto Secretária: EX. Defesa. nº.13/2016 <i>Isabela Gomes dos Santos</i> Catalão, 12/08/2016

Dedico essa dissertação aos meus pais, Marcos Serafim Agapito e Suely de Fátima Mendes, pelo apoio e incentivo para continuar trilhando esse tortuoso caminho.

À minha avó, Eleuza de Fátima, pelas preces, incentivo, carinho e exemplo de pessoa guerreira e vencedora.

À minha esposa, Marcella Lourenço Bueno Agapito, pelo companheirismo, total apoio, compreensão das dificuldades e motivação nas horas difíceis.

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer, primeiramente, a Deus, que me deu forças para chegar até aqui com saúde, vencendo uma série de desafios pelo caminho.

À minha família, em especial minha avó, Eleuza de Fátima; minha mãe, Suely de Fátima Mendes; e meu pai, Marcos Serafim Agapito, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis pelos quais passei.

À técnica do laboratório do curso de Química da Universidade Federal de Goiás – Campus Catalão - Francielle Campos Lima, que auxiliou na caracterização química dos materiais.

Ao técnico do laboratório de Física da Universidade Federal de Goiás – Campus Catalão - Anivaldo Ferreira de Rezende, que auxiliou na medição do campo magnético dos corpos de prova.

A José Camargo e Marizete Vicente Camargo, proprietários da mercearia Nascer do Sol, que permitiram a utilização da balança de seu comércio para pesagem dos corpos de prova.

À Rocha Tecnologia e Projetos, na pessoa de Alfredo dos Santos, que muito auxiliou com equipamentos e conhecimento na realização dos ensaios para avaliação dos corpos de prova de concreto produzidos com rejeito magnético.

À Anglo American – Fosfatos Brasil, na pessoa de Ângelo Pereira da Silva Junior (*in memoriam*), pela doação do material necessário a realização dos ensaios deste trabalho.

A Vinicius Campos da Silva, eterno amigo, que colaborou grandemente na realização dos ensaios em laboratório.

Ao meu orientador, André Carlos Silva, que me incentivou a ingressar no programa de mestrado e permitiu que este sonho pudesse se concretizar, sempre apoiando em momentos difíceis.

Ao meu coorientador, Heber Martins de Paula, pelos conselhos e incentivo, contribuindo de forma significativa para concretização deste trabalho.

Ao professor Wellington Andrade da Silva, pelo apoio técnico e conselhos para realização do programa experimental.

Aos meus colegas de trabalho, Alexandre, André, Aníbal e Douglas, pelo apoio e conselhos importantes em momentos difíceis.

A todos os amigos que permaneceram ao meu lado nesta difícil e longa caminhada, em especial, Diego Henrique Braga Maya Barbosa e Evair Nunes da Costa, que contribuíram de forma significativa com bons conselhos desde o início.

A todos que, de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Por fim, em especial, quero agradecer à minha esposa, Marcella Lourenço Bueno Agapito, mulher que esteve sempre ao meu lado nos momentos difíceis, dando-me forças para continuar, com intenso carinho e imensa compreensão, que acreditou no meu potencial até nos momentos em que eu mesmo não acreditava mais, e que nunca desistiu de perseguir este sonho comigo.

Muito obrigado a todos!

*Eu faço da dificuldade a minha motivação.
A volta por cima, vem na continuação.*

(Pontes Indestrutíveis, Charlie Brown Jr)

RESUMO

O desenvolvimento sustentável tornou-se, atualmente, importante para os processos e produtos das organizações. Considerando este contexto, os setores de construção civil e de mineração buscam inovar para reduzir custos e diminuir impactos ambientais. Materiais alternativos que substituam os principais componentes do concreto podem inovar o mercado e garantir o desenvolvimento sustentável das organizações. Este estudo buscou estudar o comportamento da resistência mecânica de concretos convencionais moldados com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético proveniente do processamento de rocha fosfática da região de Catalão/GO. Foram realizados ensaios de caracterização dos componentes do concreto (físicos e químicos), avaliação do comportamento da consistência no estado fresco por meio de ensaios de abatimento do tronco de cone (*slump test*), resistência mecânica à compressão e tração, inferência de condições de permeabilidade a partir de ensaios de absorção por imersão, mensuração de possíveis propriedades magnéticas e determinação do percentual de aumento da massa específica, permitindo definir as dosagens com características finais semelhantes ou melhores que o concreto referência. Os resultados indicam a influência da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético nos resultados do abatimento do tronco de cone para concretos com quantidade moderada de água. Os índices de absorção por imersão acusam permeabilidades maiores em concretos com altas taxas de água. A massa específica sofreu pequena influência da substituição e os concretos não apresentaram propriedades magnéticas. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica semelhantes ao concreto padrão comprovam a possibilidade de substituição da areia por rejeito magnético em 5, 10 e 30%. Ainda existe a possibilidade de moldagem com 20% de substituição em concretos com quantidades baixas e moderadas de água, apresentando resultados de resistência mecânica superiores as demais dosagens propostas neste estudo.

Palavras-chave: Concreto; Inovação; Materiais alternativos; Rejeito magnético.

ABSTRACT

The sustainable development becomes important to the processes and products of organizations. Considering this context, the construction and mining seek to innovate to reduce costs and environmental impacts. Alternative materials that replace the main concrete components, one of the most used materials in construction, may innovate the market and ensure the sustainable development of organizations. This work studied the behavior of the mechanical strength of conventional molded concrete with partial replacement of fine aggregate by magnetic tailings from the phosphate rock processing Catalan/GO region. Characterization tests were performed for concrete components (physical and chemical), consistency of performance evaluation in fresh through frustum of abatement tests (slump test), compressive strength and tensile, inference permeability conditions from immersion absorption tests, measurement of possible magnetic properties and determining the percentage of increase in density, allowing set dosages similar final characteristics or better than the reference concrete. The results indicate the influence of the partial replacement of fine aggregate by magnetic reject the frustum of abatement in the results for concrete with moderate amounts of water. The immersion absorption rates accuse larger permeabilities in concretes with high rates of water. The density was slightly influence of replacement and concrete didn't show magnetic properties. The results of mechanical resistance tests show similar to standard concrete the possibility of replacing the sand by magnetic reject at 5, 10 and 30%. There is still the possibility of forming with 20% replacement in concrete with low and moderate amounts of water, showing results of mechanical strength higher than all other proposed dose in this study.

Keywords: Concrete; Innovation; Alternative materials; Magnetic tailing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da demanda do volume de concreto preparado em central no Brasil, em milhões de metros cúbicos (m ³).	22
Figura 2 – Participação do custo do concreto na cesta de materiais utilizados pelas construtoras no Brasil.....	23
Figura 3 – Esquema de classificação dos aglomerantes.	28
Figura 4 – Esquema representativo da rota de produção a seco de cimento Portland.....	30
Figura 5 – Processo de hidratação dos constituintes primários do cimento Portland.	31
Figura 6 – Cristais de etringita depositados no espaço de um grão anidro de cimento altamente hidratado.	32
Figura 7 – Micrografia eletrônica de transmissão de uma pasta de cimento com seis meses de idade.	33
Figura 8 – Micrografia de uma pasta de cimento deixando claro a morfologia hexagonal dos cristais de hidróxido de cálcio.	33
Figura 9 – Modelo realístico da reação do cimento Portland com adição de água e avanço do tempo. A imagem à esquerda representa o cimento sem adição de água; no centro, uma pasta formada com cimento após a adição de água onde a hidratação já avançou 30% (um dia após a mistura) e, à direita, uma pasta aproximadamente 70% hidratada (um mês após a mistura)...	34
Figura 10 - Resistência mecânica desenvolvida pelos constituintes primários do cimento Portland.....	35
Figura 11 – Secção polida de um corpo de prova de concreto.....	39
Figura 12 – Micrografia óptica de um concreto, apresentando os vazios causados pelo ar incorporado (círculos pretos).....	41
Figura 13 – Representação esquemática da zona de transição, agregado e matriz da pasta de cimento.	42
Figura 14 – Relação entre a razão água/cimento e a permeabilidade do concreto.	47
Figura 15 – Tendência atual de substituição dos componentes do concreto ou adição junto aos mesmos.	51
Figura 16 – Levantamento do número de artigos publicados por país nos periódicos constantes na base de dados Science Direct.....	53
Figura 17 – Curva de Abrams de um cimento CP 32.....	56
Figura 18 – Curvas de Walz para determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.	57

Figura 19 – Representação esquemática do molde tronco cônico e obtenção do abatimento do concreto.	65
Figura 20 – Disposição do corpo de prova para ensaio entre os pratos da máquina de compressão sendo auxiliado por uma chapa de aço usinado.....	66
Figura 21 – Realização do ensaio de obtenção da massa unitária do agregado graúdo.	70
Figura 22 – Peneirador suspenso de laboratório realizando os ensaios de peneiramento.	71
Figura 23 – EDX-7000 utilizado na análise química dos materiais componentes do concreto.	72
Figura 24 – Recipiente com o material centralizado no equipamento antes da análise química.	73
Figura 25 – Componentes do concreto após dosagem de acordo com o traço utilizado.....	74
Figura 26 - Slump test sendo apoiado com os pés pelo operador e haste de adensamento golpeando o material.	76
Figura 27 – Mensuração do abatimento com o auxílio da haste de adensamento e uma régua milimetrada.....	76
Figura 28 – Mistura resultante do amassamento dos componentes do concreto sendo golpeada na fôrma de moldagem.	77
Figura 29 – Mistura preenchendo a fôrma em processo de cura durante 24 horas.	78
Figura 30 – Mistura retirada da fôrma após período de 24 horas de cura, resultando nos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios no estado endurecido.	78
Figura 31 – Corpo de prova de concreto posicionado na faceadora para realização do procedimento de corte e regularização de sua superfície.	79
Figura 32 – Corpos de prova de concreto com superfície regular após faceamento.....	79
Figura 33 – Tanque utilizado na cura dos corpos de prova de concreto.	80
Figura 34 – Corpo de prova posicionado na prensa hidráulica antes do ensaio de ruptura por compressão.	81
Figura 35 – Corpo de prova após ruptura por compressão na prensa hidráulica.	82
Figura 36 – Corpo de prova devidamente posicionado entre os pratos de compressão da prensa e as chapas de aço antes do ensaio de ruptura por tração.	83
Figura 37 – Corpo de prova após ruptura por tração por meio do ensaio de compressão diametral.	83
Figura 38 – Estufa utilizada na secagem dos corpos de prova de concreto para realização dos ensaios de absorção por imersão.	84

Figura 39 – Corpo de prova e gaussímetro utilizado na medição do campo magnético.....	85
Figura 40 – Medição do campo magnético do corpo de prova de concreto utilizando uma sonda tangencial.....	85
Figura 41 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados utilizados na formulação do concreto.	87
Figura 42 – Gráfico de análise química da areia por meio de fluorescência de raios – X (EDX).	88
Figura 43 - Gráfico de análise química da brita por meio de fluorescência de raios – X (EDX).	89
Figura 44 - Gráfico de análise química do cimento por meio de fluorescência de raios – X (EDX).	89
Figura 45 - Gráfico de análise química do rejeito magnético por meio de fluorescência de raios – X (EDX).	90
Figura 46 - Partículas de rejeito magnético retidas na malha de 200# e gráficos de análise química dos pontos destacados (imagem obtida com microscopia eletrônica de varredura)..	91
Figura 48 – Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,4$	94
Figura 49 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,4$ aos 28 dias de cura.	95
Figura 50 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$	96
Figura 51 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$ aos 28 dias de cura.	97
Figura 53 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$	98
Figura 54 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$ aos 7 dias de cura.	99
Figura 55 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$ aos 28 dias de cura.	99

Figura 56 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,7$	101
Figura 58 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,4$	103
Figura 59 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,4$ aos 28 dias de cura.....	103
Figura 60 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$	105
Figura 61 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$ aos 28 dias de cura.....	105
Figura 62 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$	107
Figura 63 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$ aos 28 dias de cura.....	107
Figura 64 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,7$	109
Figura 65 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,7$ aos 28 dias de cura.....	109
Figura 66 – Percentual médio de absorção por imersão e desvio padrão de corpos de prova com 28 dias de cura.....	111
Figura 67 – Percentual médio de aumento da massa específica dos corpos de prova com relação ao concreto referência (substituição A).....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de alguns bens minerais no Brasil em 2014.	23
Tabela 2 – Composição da matéria prima do clínquer, principal componente do cimento Portland.....	29
Tabela 3 – Principais compostos formados após a calcinação dos insumos utilizados na produção do cimento.	30
Tabela 4 – Calor de hidratação (cal/g) dos compostos do cimento Portland em uma dada idade.	36
Tabela 5 – Periódicos encontrados, número de artigos publicados e selecionados após leitura do título e resumo.	51
Tabela 6 – Artigos relacionados à substituição dos componentes do concreto e seus autores.	52
Tabela 7 – Principais materiais utilizados como alternativa de substituição no concreto nas publicações encontradas através do mapeamento sistemático.	53
Tabela 8 – Porcentagem máxima de substituição do cimento Portland por materiais alternativos na composição do concreto por autor.	54
Tabela 9 – Porcentagem máxima de substituição do agregado miúdo por materiais alternativos na composição do concreto por autor.	54
Tabela 10 – Porcentagem máxima de substituição do agregado graúdo por materiais alternativos na composição do concreto por autor.	55
Tabela 11 – Relações entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto.	57
Tabela 12 – Abatimento recomendado para vários tipos de construção.	58
Tabela 13 – Requisitos aproximados do consumo de água para diferentes abatimentos e dimensão nominal máxima dos agregados	58
Tabela 14 – Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto....	59
Tabela 15 – Conjunto de peneiras da série normal e intermediária com suas respectivas aberturas nominais em milímetros.....	61
Tabela 16 – Características do recipiente para obtenção da massa unitária do material.	61
Tabela 17 – Método de adensamento do concreto de acordo com a classe de abatimento.	63
Tabela 18 – Número de camadas e golpes por moldagem de corpos de prova.....	63
Tabela 19 – Tolerância permitida para cada idade de ensaio.	66

Tabela 20 – Nomenclatura adotada para descrever as diferentes proporções de substituição da areia por magnetita na formulação do concreto.....	68
Tabela 21 - Consumo dos componentes e traço inicial obtido com o auxílio do método da ABCP e corrigido experimentalmente.....	86
Tabela 22 – Descrição dos agregados utilizados no concreto, massa específica, dimensão máxima característica, módulo de finura e massa unitária.....	87
Tabela 23 – Resultados da análise química (em porcentagem) dos materiais realizada com EDX.....	90
Tabela 24 – Resultados do abatimento do tronco de cone (slump test) em milímetros para avaliação da consistência do concreto.....	92
Tabela 25 – Umidade relativa do ar (%) do laboratório durante a moldagem dos corpos de prova.....	92
Tabela 26 – Temperatura (°C) do laboratório durante a moldagem dos corpos de prova.....	92
Tabela 27 – Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,4$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	93
Tabela 28 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,5$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	95
Tabela 29 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,6$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	98
Tabela 30 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,7$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	100
Tabela 32 - Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,4$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	102
Tabela 33 – Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,5$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.....	104

Tabela 34 – Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,6$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.	106
Tabela 35 - Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,7$ e análise estatística utilizando o teste Scott-Knott com 5% de significância.	108
Tabela 37 – Percentual médio de absorção por imersão de corpos de prova com 28 dias de cura e resultados do Teste Scott-Knott com 5% de significância.	111

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. JUSTIFICATIVA	24
1.2. OBJETIVOS	24
1.2.1. Objetivo geral	24
1.2.2. Objetivos específicos	25
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1. REJEITO MAGNÉTICO.....	26
2.2. CONCRETO	27
2.2.1. Aglomerantes	28
2.2.1.1. Cimento Portland.....	28
2.2.1.1.1. Processo de fabricação.....	29
2.2.1.1.2. Hidratação do cimento Portland	31
2.2.1.1.3. Propriedades do cimento.....	35
2.2.2. Agregados.....	36
2.2.2.1. Classificação dos agregados	37
2.2.2.2. Importância da granulometria.....	37
2.2.2.3. Propriedades dos agregados.....	37
2.2.3. Microestrutura do concreto	39
2.2.3.1. Microestrutura da fase agregado.....	40
2.2.3.2. Microestrutura da pasta de cimento hidratada.....	40
2.2.3.3. Microestrutura da zona de transição	41
2.2.4. Propriedades do concreto no estado fresco	42
2.2.4.1. Trabalhabilidade	43
2.2.4.2. Perda de abatimento	44
2.2.4.3. Segregação e exsudação	45
2.2.5. Propriedades do concreto no estado endurecido	45
2.2.5.1. Resistência Mecânica	45
2.2.5.2. Permeabilidade	47
2.2.5.3. Durabilidade	48
2.2.6. Tipos de concreto	49

2.3. CONCRETO COM MATERIAIS ALTERNATIVOS.....	50
2.4. DOSAGEM DE CONCRETOS.....	55
2.5. NORMAS REGULAMENTADORAS	60
2.5.1. Agregados para concreto	60
2.5.2. Moldagem e cura de corpos de prova de concreto	62
2.5.3. Consistência pelo abatimento do tronco de cone	64
2.5.4. Concreto no estado endurecido	65
3. MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1. PORCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO	68
3.2. NOMENCLATURA	68
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES	69
3.3.1. Massa específica.....	69
3.3.2. Massa unitária	70
3.3.3. Módulo de finura.....	70
3.3.4. Dimensão máxima característica.....	71
3.3.5. Análise química.....	72
3.4. TRAÇO	73
3.5. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	74
3.6. CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	80
3.7. ENSAIOS DO CONCRETO ENDURECIDO	80
3.7.1. Resistência mecânica à compressão	80
3.7.2. Resistência mecânica à tração	82
3.7.3. Absorção por imersão.....	84
3.7.4. Campo magnético.....	84
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO CONCRETO	86
4.1.1. Caracterização física	86
4.1.2. Caracterização química	88
4.2. CONCRETO NO ESTADO FRESCO	92
4.3. CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	93
4.3.1. Resistência mecânica à compressão	93
4.3.2. Resistência mecânica à tração	102
4.3.3. Absorção por imersão.....	110

4.3.4. Campo magnético.....	112
4.3.5. Massa específica.....	112
5. CONCLUSÕES.....	114
5.1. TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS	117

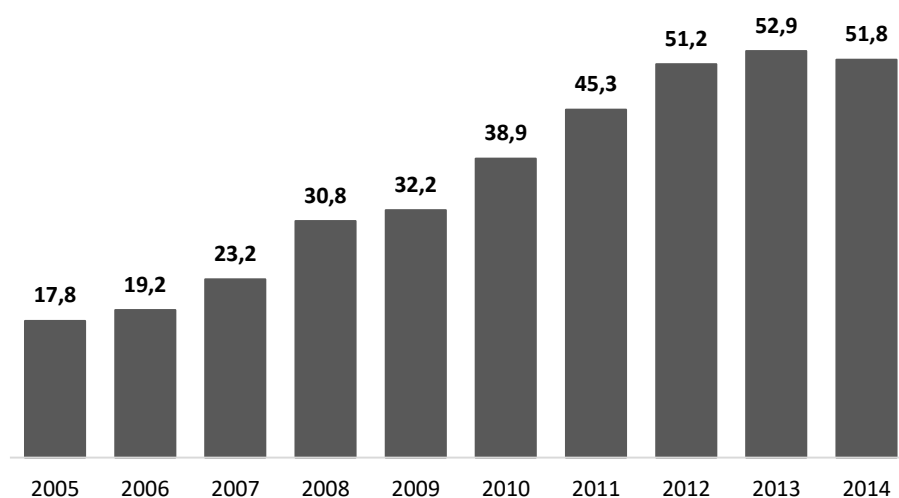
1. INTRODUÇÃO

A atual situação de um mercado acirrado competitivamente obriga as organizações a repensarem seus procedimentos. Neste contexto, a gestão organizacional encaixa-se e auxilia o gerenciamento da organização de forma otimizada com o objetivo de alcançar metas e conquistar resultados positivos e rentáveis. Além disso, fornece subsídios para condução de pessoas e processos de forma eficaz, promovendo melhorias através de inovações.

As obras de infraestrutura são fundamentais para a economia dos países em desenvolvimento e movimentam grandes investimentos. Já nos países desenvolvidos, a necessidade está na substituição de antigas obras de infraestrutura, de mais de cinquenta anos, por novas construções. Segundo Fiorentino *et al.* (2012), a infraestrutura torna-se uma das grandes tendências de crescimento até 2020.

Este cenário aquece o setor de construção civil, proporcionando o crescimento da demanda de concreto (Figura 1) e, conseqüentemente, dos insumos necessário à sua produção. Dentre os materiais utilizados pelas construtoras no Brasil, Taniguti (2016) aponta o concreto como responsável por grande parte dos custos (Figura 2). Materiais alternativos de baixo custo que substituam os atuais insumos necessários à sua produção significam inovações importantes para as organizações que procuram atingir o patamar de desenvolvimento sustentável pregado pela sociedade moderna, além de reduzir custos de produção em algumas situações.

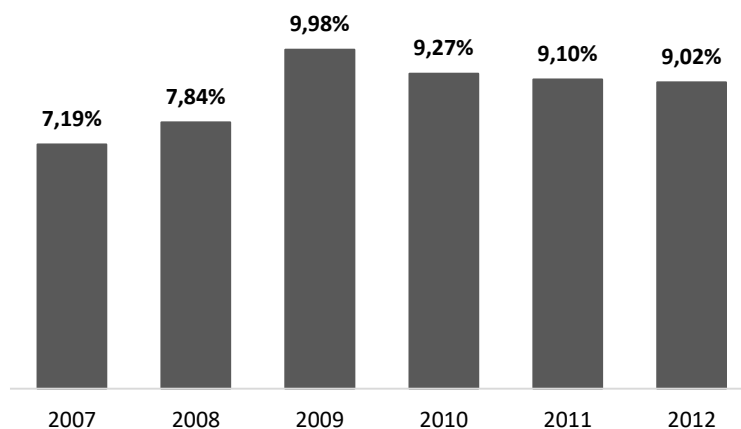
Figura 1 – Evolução da demanda do volume de concreto preparado em central no Brasil, em milhões de metros cúbicos (m³).



FONTE: Adaptado de Taniguti (2016).

Obs.: Estimativa realizada a partir de dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC).

Figura 2 – Participação do custo do concreto na cesta de materiais utilizados pelas construtoras no Brasil.



FONTE: Adaptado de Taniguti (2016).

Obs.: Estimativa realizada a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O fortalecimento da economia também alavanca o setor de mineração no momento em que há o crescimento da demanda por matérias-primas. Conseqüentemente, a movimentação de materiais em larga escala e o descarte de resíduos pelas mineradoras aumenta. Observa-se na Tabela 1 a grande quantidade de bens minerais produzidos em 2014, merecendo destaque os agregados para construção civil. Altos índices de produção acarretam descarte de grandes quantidades de resíduos.

Tabela 1 – Produção de alguns bens minerais no Brasil em 2014.

Bens Minerais	Valores em Toneladas
Agregados para construção civil	673.000.000
Minério de ferro	400.000.000
Bauxita	32.000.000
Fosfato	6.800.000
Alumínio primário	962.000
Potássio concentrado	460.000
Zinco concentrado	250.000
Cobre	219.000
Liga de nióbio	80.000
Níquel contido	80.000
Ouro	80

FONTE: Adaptado de IBRAM (2016).

Grandes barragens de rejeito para descarte dos resíduos gerados no processamento de bens minerais são inevitáveis, culminando em sérios impactos ambientais. O beneficiamento de rocha fosfática para produção de fertilizantes na região de Catalão/GO, segundo Silva *et al.* (2016, no prelo), descarta vários resíduos em barragens, entre eles, rejeito magnético

proveniente de processos de separação magnética. São gerados aproximadamente 230 t/h de rejeito magnético, de acordo com dados apresentados pelos autores.

A gestão organizacional aplicada às organizações deste setor tenta constantemente a otimização dos processos buscando alcançar metas preestabelecidas. Inovações permitem a busca pela redução da quantidade de resíduos descartados, minimizando os impactos ambientais.

A cooperação entre setores diferentes da economia é interessante a partir do momento que possibilita inovações em conjunto que otimizem os processos das organizações, reduzindo custos de produção e minimizando os impactos ambientais causados pela atividade.

Este estudo busca viabilizar a utilização do rejeito magnético gerado no processamento de rocha fosfática como agregado miúdo alternativo para produção de concreto. Isto implica na redução de impactos ambientais dos setores de mineração, diminuindo a quantidade de resíduos depositados em barragens de rejeito, e de construção civil, com a redução da extração de areia de leitos de rios de forma ambientalmente impactante.

1.1. JUSTIFICATIVA

Estudos técnico-econômicos apontam a possibilidade de operações de lavra nos complexos carbonatíticos de Catalão/Goiás nas próximas décadas, permitindo a concentração de rocha fosfática e gerando rejeito magnético descartado em barragens de rejeitos. Assim, buscar alternativas de utilização deste material é importante no atual cenário de desenvolvimento sustentável que ganhou força nos últimos anos.

Este estudo justifica-se no momento em que busca encontrar uma alternativa de utilização do rejeito magnético, possuindo como principal opção a utilização como material alternativo para o agregado miúdo (areia) na composição do concreto, reduzindo impactos ambientais causados pelo descarte de rejeitos em barragens na mineração e extração de areia de leito de rios para agregado miúdo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Analisar o comportamento da resistência mecânica à compressão e à tração de concretos convencionais moldados com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Realizar caracterização física e química dos materiais necessários à moldagem dos corpos de prova de concreto;
- ii. Identificar o comportamento da consistência do concreto no estado fresco através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump* test);
- iii. Relacionar a substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético ao comportamento da resistência mecânica à compressão do concreto;
- iv. Relacionar a substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético ao comportamento da resistência mecânica à tração do concreto;
- v. Inferir condições de permeabilidade do concreto endurecido a partir de ensaios de absorção por imersão em água;
- vi. Verificar possíveis propriedades magnéticas do concreto moldado com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético;
- vii. Determinar o aumento percentual da massa específica dos corpos de prova de concreto com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético;
- viii. Definir as dosagens que apresentem características finais do concreto semelhantes ou melhores que o padrão.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em cinco grandes seções, descritas na sequência. A seção 1 apresenta a parte de introdução, justificativa, objetivos e a estrutura do trabalho.

A seção 2 apresenta a revisão bibliográfica. Abrange conteúdos referente ao rejeito magnético, concreto, materiais alternativos utilizados em sua produção, dosagem pelo método da ABCP e normas regulamentadoras necessárias à execução do estudo.

As seções 3 e 4 apresentam, respectivamente, a metodologia utilizada no trabalho e os resultados obtidos com os ensaios dos corpos de prova de concreto moldados com e sem substituição parcial do agregado miúdo por rejeito magnético. A seção 5 apresenta a conclusão do trabalho e perspectivas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se nessa seção o embasamento teórico necessário para o completo entendimento da problemática de pesquisa, apresentando um breve panorama sobre a geração de rejeito magnético proveniente do processamento de rocha fosfática, conceitos relativos ao concreto, estudos que visam à utilização de materiais alternativos na dosagem do concreto, descrição do método de dosagem utilizado e apresentação das principais normas regulamentadoras que fazem referência à problemática de pesquisa.

2.1. REJEITO MAGNÉTICO

Os complexos alcalinos carbonatíticos de Catalão/GO representam importantes reservas dos minerais apatita e pirocloro no cenário nacional e internacional. Atualmente, são explorados dois depósitos na região denominados Catalão I e II. No primeiro, as empresas mineradoras Vale Fertilizantes e Anglo American Fosfatos Brasil (recentemente comprada pela empresa China Molybdenum Co.) extraem rocha fosfática (mineral apatita) para produção de fertilizantes. O complexo Catalão II é explorado pela empresa Anglo American Nióbio Brasil para extração de nióbio, também adquirida pela empresa chinesa.

As rotas de processamento de ambas as mineradoras que beneficiam rocha fosfática são semelhantes, sem discrepâncias significativas, visto que extraem o mineral minério do mesmo complexo alcalino carbonatítico (Catalão I). Aproximadamente 35% da alimentação das usinas tornam-se rejeito magnético, 30% são rejeitos de flotação e 12% são lamas de acordo com dados apresentados por Nicolí (2014). Devido a composição mineralógica semelhantes dos complexos, o processamento de nióbio também gera quantidades significativas de rejeito magnético. Silva *et al.* (2014), Mendes *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2016) também mencionam que 30% da alimentação da usina de processamento de rocha fosfática torna-se rejeito magnético, o que representa aproximadamente 230 t/h. Todo este material é descartado em barragens de rejeitos ou em pilhas controladas (MENDES, 2014).

Palmieri (2011) relata a presença de minerais de terras raras, titânio, vermiculita e magnetita nos complexos alcalinos carbonatíticos. De acordo com Ribeiro (2008), o complexo Catalão I possui concentrações consideráveis de Fe_2O_3 , representados pelos minerais goethita e hematita. Lapido-Loureiro (2013) também menciona os minerais goethita, hematita e magnetita neste

mesmo complexo, com a porcentagem de ferro total distribuída entre os minerais (Fe_2O_3 total) em torno de 25%, podendo variar de acordo com a região do depósito.

Goethita, hematita e magnetita são os principais minerais minério de ferro. De acordo com Branco (2008) e Klein e Dutrow (2012), a goethita é um óxido de ferro hidratado ($\text{FeO}(\text{OH})$) possuindo 90% de Fe_2O_3 e 10% de H_2O , associada, normalmente, à hematita e com hábito prismático, fibroso, maciço, radial ou estalactítico; a hematita é um óxido de ferro (Fe_2O_3) possuindo 70% de Fe com susceptibilidade magnética moderada (paramagnético) e hábito romboédrico, tabular, granular, laminar ou botroídalo; e a magnetita também é um óxido de ferro (Fe_3O_4) possuindo 72,4% de Fe, apresentando alta susceptibilidade magnética (ferromagnético) e com hábito octaédrico, dodecaédrico, cúbico, maciço ou granular. Neves *et al.* (2011) destacam a presença de hematita e magnetita nos complexos Catalão I e II na descrição que faz desses minerais.

2.2. CONCRETO

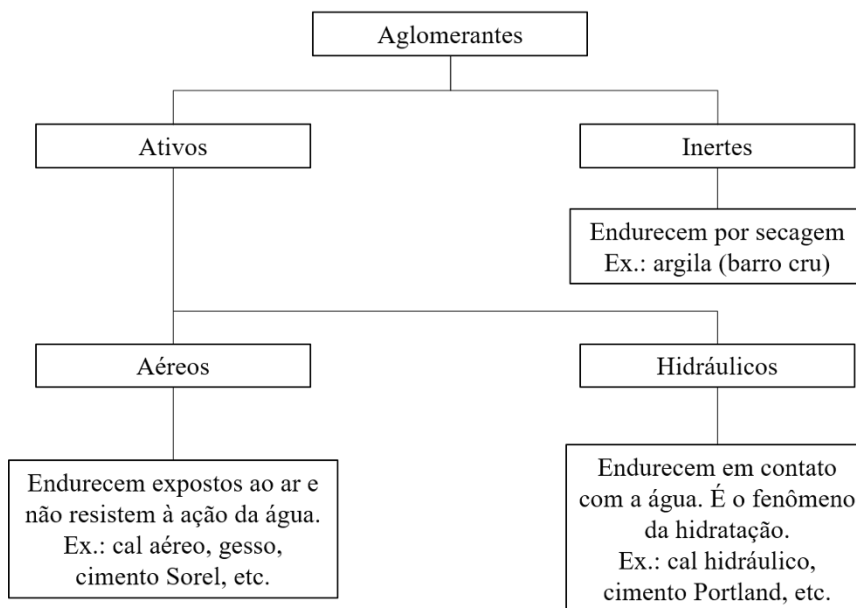
O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, com um consumo anual estimado em 19 bilhões de toneladas, e o segundo em volume consumido pelo homem, ficando atrás somente da água. Mesmo não sendo tão resistente como o aço, sua boa durabilidade quando exposto a água, facilidade de obtenção de elementos estruturais com uma ampla variedade e tamanho de fôrmas e o baixo custo de produção aliado à rápida disponibilidade para obra, colocam este material na ponta do consumo de matéria-prima no canteiro de obras (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O setor de construção adota alguns termos para definir a mistura de um aglomerante com água e agregados, os quais são descritos por Li (2011) e Ambrozewicz (2012). A mistura de água com cimento Portland leva à formação da pasta. A água em excesso nesta mistura dá origem à nata. A argamassa e o concreto são obtidos acrescentando-se, respectivamente, agregado miúdo e graúdo à pasta. Aditivos ainda podem ser adicionados ao concreto buscando inserir características especiais. Entre eles, podem-se destacar os aditivos modificadores de pega, os redutores de água, aditivos incorporadores de ar, entre outros.

2.2.1. Aglomerantes

O aglomerante é um material que reage em presença de água (quimicamente ativo) formando uma pasta que promove a ligação entre os grãos de agregado (material inerte) presente na mistura (ALVES, 2006). Pode ser classificado segundo o esquema apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de classificação dos aglomerantes.



FONTE: Adaptado de Alves (2006).

Ambrozewicz (2012) relata a argila como o primeiro aglomerante utilizado em construções pelo homem, segundo registros históricos. Material quimicamente inativo, adquire resistência com a evaporação da água presente na mistura, mas é vulnerável à ação da umidade após seu endurecimento.

Os primeiros relatos de misturas semelhantes ao concreto utilizando aglomerantes são da Roma antiga, segundo Li (2011), onde pequenos fragmentos de cascalho e areia grossa constituíram, juntamente com cal e água, uma mistura resistente utilizada por estes povos.

2.2.1.1. Cimento Portland

O cimento Portland é classificado como um aglomerante hidráulico, adquirindo resistência após reação com a água. Pode ser definido como:

[...] um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínques constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como

adição na moagem. Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas com proporcionamento adequado é aquecida sob altas temperaturas. (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 217).

Ambrozewicz (2012) destaca o cimento Portland como o principal aglomerante utilizado no setor de construção civil devido às suas características de rápido endurecimento e formação de um material resistente à água com propriedades mecânicas satisfatórias. Logo, é fundamental conhecer suas propriedades e aproveitá-las de maneira otimizada.

2.2.1.1.1. Processo de fabricação

Devido a importância do cimento Portland para a obtenção do concreto, entender seu processo de produção torna-se interessante para este estudo, permitindo visualizar quais são seus principais componentes e sua influência durante processos posteriores de hidratação para obtenção do concreto em centrais e canteiros de obras.

Ramachandran e Beaudoin (2000), Ramachandran *et al.* (2002), Huntzinger e Eatmon (2009), Mamlouk e Zaniewski (2010), Li (2011), Rahman *et al.* (2013) e Rahman *et al.* (2015) destacam que os principais constituintes do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃). As rochas calcárias serão a principal fonte de cal e as argilas, de sílica, alumina e óxidos de ferro. Apresenta-se na Tabela 2 as fontes das matérias-primas necessárias à produção do cimento.

Tabela 2 – Composição da matéria prima do clínquer, principal componente do cimento Portland.

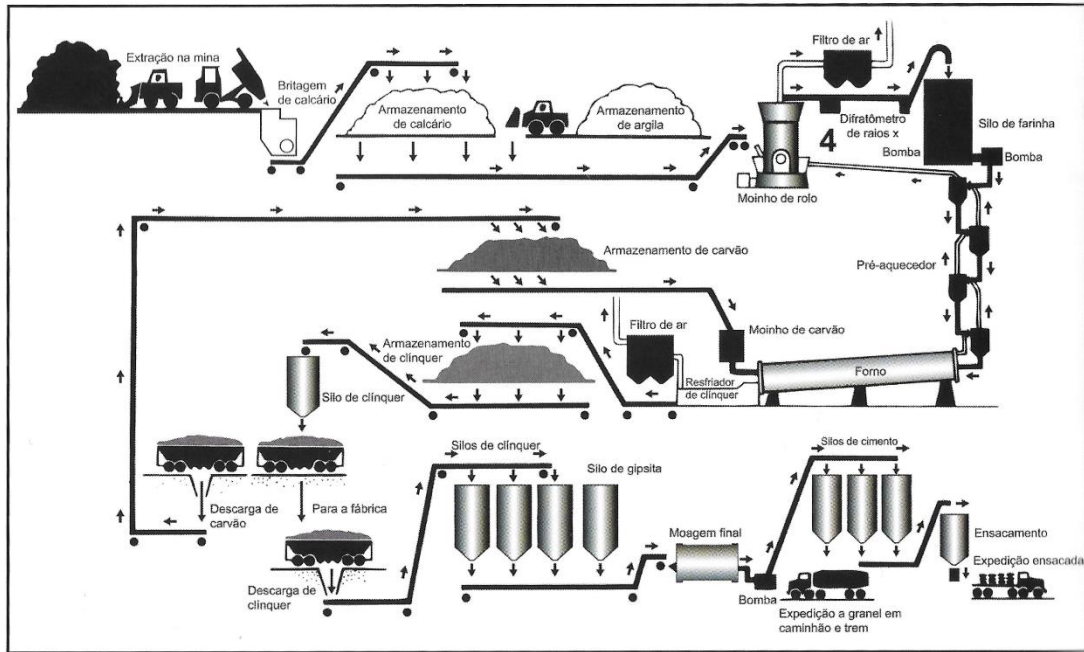
Matéria prima	Fontes	Percentual em massa
Cal	Calcário, giz, marmóre, conchas do mar	60 – 67
Sílica	Areia, argila, xistos argilosos	17 – 25
Alumina	Bauxita, argila, xistos	2 – 8
Óxido de ferro	Minério de ferro, argila	0 – 6

FONTE: Adaptado de Huntzinger e Eatmon (2009).

Os mesmos autores ainda descrevem o processo de fabricação do cimento Portland. A britagem da rocha calcária é o primeiro passo, seguido da moagem deste insumo juntamente com a argila visando à redução das partículas até uma granulometria consideravelmente fina. A descarga da moagem alimenta um forno calcinador onde os materiais queimam em temperaturas próximas a 1400 °C (Figura 4). Este procedimento causa a sinterização do material e sua fusão parcial na forma de clínquer. A este produto é adicionado gipsita (sulfato de cálcio) a fim de controlar as

reações iniciais de pega e endurecimento, ocorrendo uma nova moagem, resultando em um pó fino conhecido comercialmente como cimento Portland.

Figura 4 – Esquema representativo da rota de produção a seco de cimento Portland.



FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Os compostos formados durante as reações de sinterização dos insumos dentro do forno são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais compostos formados após a calcinação dos insumos utilizados na produção do cimento.

Composto	Composição	Abreviação	Percentual em massa (%)	Cor
Alita	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45 – 60	Branco
Belita	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 – 30	Branco
Aluminato	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 12	Branco/Verde
Ferrita	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6 – 8	Preto

FONTE: Adaptado de Mamlouk e Zaniewski (2010) e Li (2011).

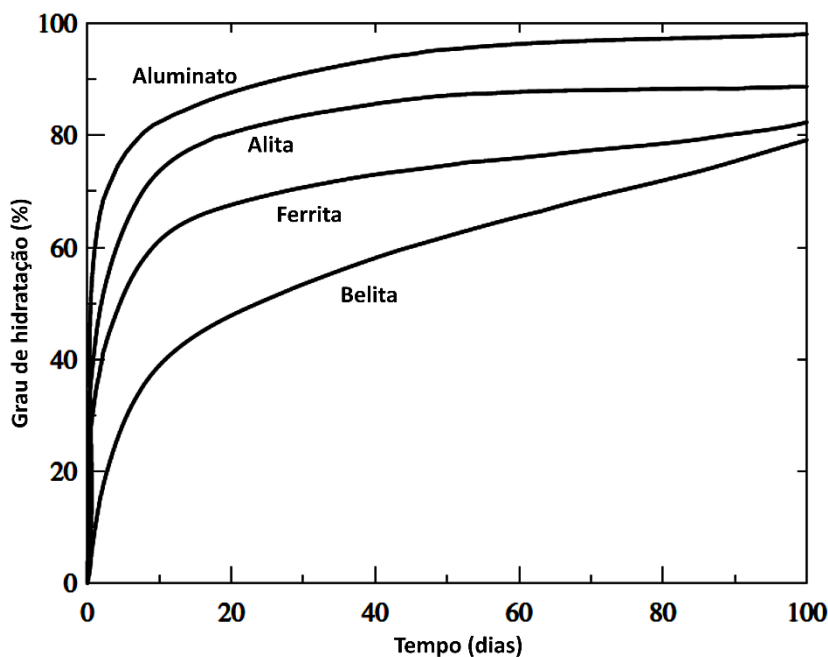
Algumas adições podem ser incorporadas ao cimento como as escórias de alto forno, que melhoram a durabilidade e resistência final; e materiais pozolânicos, permitindo que o concreto adquira maior impermeabilidade (AMBROZEWICZ, 2012; RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000).

2.2.1.1.2. Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland anidro não consegue aglomerar os grãos de areia e brita. É necessário que haja a hidratação do mesmo, permitindo a formação de compostos hidratados, os quais possuem características cimentantes. Desta maneira, é importante conhecer as reações e os produtos gerados durante a hidratação.

Neville e Brooks (2013) descrevem o cimento Portland como uma mistura heterogênea de vários compostos, entre eles, os silicatos e aluminatos, os principais constituintes, que possuem velocidades de hidratação diferentes. Portanto, é interessante considerar os mecanismos de hidratação destes compostos separadamente. Os aluminatos possuem alta porcentagem de hidratação inicial, fato contrário ocorrendo com a belita, um dos compostos dos silicatos (Figura 5).

Figura 5 – Processo de hidratação dos constituintes primários do cimento Portland.



FONTE: Adaptado de Li (2011).

A hidratação dos aluminatos (C_3A) é imediata após a adição de água ao cimento (Figura 5). Segundo Ramachandran e Beaudoin (2000) e Bullard *et al.* (2011), está interligada a hidratação da ferrita (C_4AF) e gera os primeiros cristais de etringita em forma de agulha (Figura 6), que, posteriormente, se torna instável e converte-se em monossulfato, produto final da hidratação. É responsável pelo enrijecimento (perda de consistência), a pega (solidificação da pasta) e o

desenvolvimento da resistência inicial, sendo sua velocidade de hidratação controlada com adição de gipsita ao clínquer (SCRIVENER *et al.*, 2011).

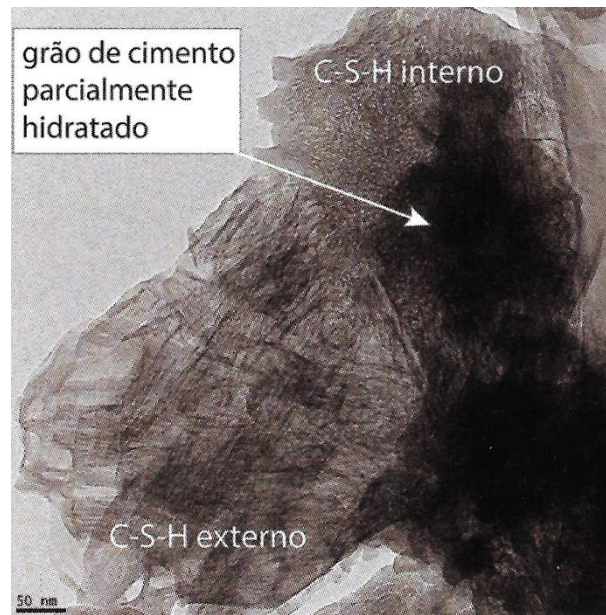
Figura 6 – Cristais de etringita depositados no espaço de um grão anidro de cimento altamente hidratado.



FONTE: Adaptado de Thomas e Jennings (2009).

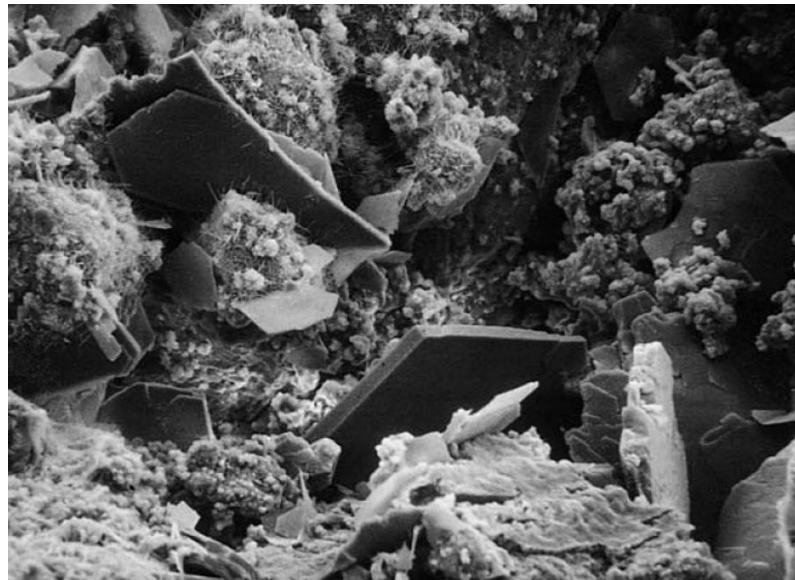
A hidratação dos silicatos forma cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) dentro dos limites dos grãos anidros de cimento ou externamente na solução, estes últimos possuindo morfologia fibrosa e sendo responsáveis pela porosidade capilar do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Apresenta-se na Figura 7 os cristais de silicato de cálcio hidratados formados no interior do grão anidro de cimento e na solução externa, deixando clara a diferença morfológica entre os cristais. Cristais de hidróxido de cálcio (C-H) também são formados pela hidratação dos silicatos e possuem morfologia hexagonal (Figura 8).

Figura 7 – Micrografia eletrônica de transmissão de uma pasta de cimento com seis meses de idade.



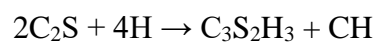
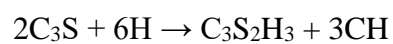
FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Figura 8 – Micrografia de uma pasta de cimento deixando claro a morfologia hexagonal dos cristais de hidróxido de cálcio.



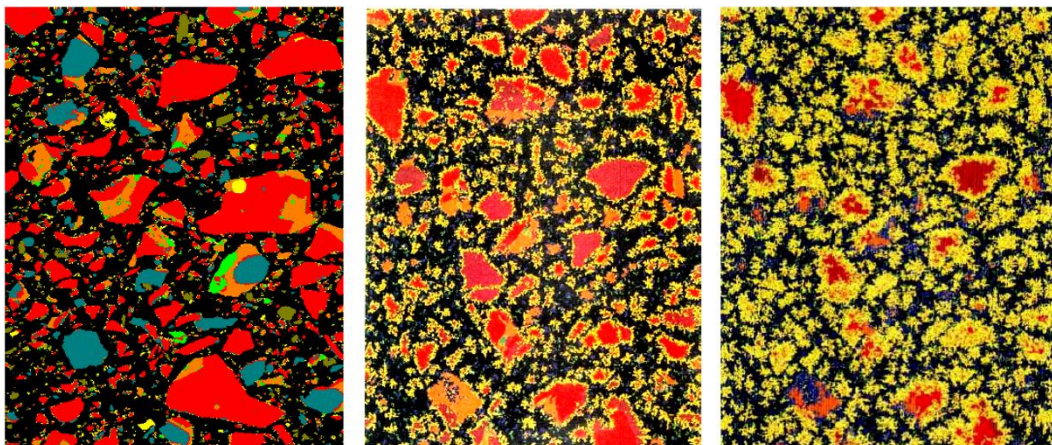
FONTE: Adaptado de Thomas e Jennings (2009).

As reações estequiométricas de hidratação dos silicatos são apresentadas na sequência. São formados silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxidos de cálcio (C-H).



A hidratação da alita produz 61% de silicatos de cálcio hidratados e 39% de hidróxido de cálcio, enquanto a hidratação da belita produz, respectivamente, 82% e 18% dos mesmos compostos (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002; MAMLOUK e ZANIEWSKI, 2010; LI, 2011). A hidratação da alita (C₃S) contribui com a resistência inicial do cimento e sua pega final, enquanto a belita (C₂S) influencia na resistência final devido à formação de grande quantidade de silicato de cálcio hidratado, composto que possui boas propriedades adesivas (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000; RAKI *et al.*, 2010).

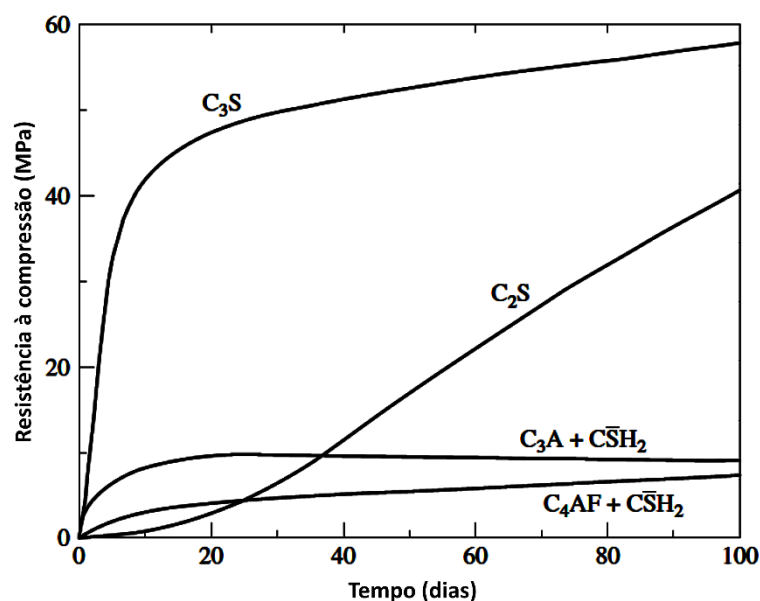
Figura 9 – Modelo realístico da reação do cimento Portland com adição de água e avanço do tempo. A imagem à esquerda representa o cimento sem adição de água; no centro, uma pasta formada com cimento após a adição de água onde a hidratação já avançou 30% (um dia após a mistura) e, à direita, uma pasta aproximadamente 70% hidratada (um mês após a mistura).



FONTE: Adaptado de Thomas e Jennings (2009).

O avanço do processo de hidratação do cimento fica claro no modelo realístico apresentado na Figura 9. À medida que o tempo avança, após a adição de água, os grãos de cimento, até então anidros, hidratam-se e formam cristais que preenchem os espaços inicialmente ocupados pela água.

Figura 10 - Resistência mecânica desenvolvida pelos constituintes primários do cimento Portland.



FONTE: Adaptado de Li (2011).

O gráfico proposto por Li (2011), apresentado na Figura 10, retrata a influência dos constituintes primários do cimento Portland em sua resistência mecânica. A alita (C₃S) contribui de forma significativa com a resistência durante todo o processo de hidratação. Em períodos mais avançados, a belita (C₂S) tem atuação importante. Os aluminatos (C₃A) e a ferrita (C₄AF) são responsáveis por uma pequena parcela.

2.2.1.1.3. Propriedades do cimento

Atualmente existe no mercado uma grande variedade de cimentos, cada um com propriedades diferentes que irão conferir características finais únicas. Portanto, entender como as propriedades relacionam-se e influenciam o cimento em seu estado final é muito importante.

A finura é uma propriedade que influencia as reações de hidratação, em que altos índices significam uma área específica maior disponível para reação, aumentando a velocidade de hidratação, o calor de hidratação, a resistência inicial da pasta de cimento, argamassa ou concreto, a impermeabilidade, a trabalhabilidade, a coesão e diminuindo a exsudação (AMBROZEVICZ, 2012).

A expansibilidade do cimento é causada pela presença de cal livre e magnésio que se combinam com água e geram novos compostos hidratados, fazendo aumentar o volume do material após o endurecimento do cimento, causando desagregação e fissuração excessiva. Esses aspectos são

considerados por Neville e Brooks (2013) como uma propriedade prejudicial e que deve ser controlada.

A evolução das propriedades mecânicas do cimento, causadas por reações químicas de hidratação que levam ao endurecimento por meio do aumento da consistência, é definida como tempo de pega por Bauer (2008), sendo importante propriedade do cimento que varia com as características apresentadas pelo aglomerante.

O calor liberado pelas reações exotérmicas de hidratação do cimento (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002) pode ser benéfico em regiões de clima frio, contribuindo com a ativação das reações subsequentes, mas pode ser extremamente prejudicial quando sua liberação excessiva causa o aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa (AMBROZEWICZ 2012). Apresenta-se na Tabela 4 o calor liberado pelos compostos do cimento durante as reações de hidratação em algumas idades, deixando claro a influência dos aluminatos nesta propriedade.

Tabela 4 – Calor de hidratação (cal/g) dos compostos do cimento Portland em uma dada idade.

Composto	3 dias	90 dias	13 anos
C ₃ S	58	104	122
C ₂ S	12	42	59
C ₃ A	212	311	324
C ₄ AF	69	98	102

FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A resistência do cimento talvez seja a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros, podendo ser mensurada através de ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos e variando de acordo com os diversos tipos de cimentos disponíveis no mercado, conferindo características específicas para cada aplicação (BAUER, 2008).

2.2.2. Agregados

Os agregados são materiais inertes, relativamente baratos, adicionados ao concreto, ocupando aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume total e influenciando, diretamente, as características de resistência mecânica e durabilidade, o que impulsiona a necessidade de aquisição de agregados de qualidade (NEWMAN e CHOO, 2003). Logo, a razão entre agregados e cimento deve ser tal que proporcione o melhor custo benefício de produção de concreto sem prejuízos de suas propriedades finais.

2.2.2.1. Classificação dos agregados

Mehta e Monteiro (2014) classificam os agregados em miúdos (0,075 – 4,75 mm) e graúdos (4,75 – 50 mm). Os primeiros geralmente são areias provenientes do leito de rios ou da britagem de rochas, enquanto os últimos são constituídos por pedregulhos obtidos de forma natural ou por brita resultante da fragmentação de rochas.

Almeida e Luz (2009) e Li (2011) mencionam a possibilidade de obtenção dos agregados de forma natural, por meio da extração diretamente de fragmentos como areia e cascalho ou de forma artificial, em que os materiais passam por processo de fragmentação (britagem e/ou moagem) e classificação.

Os agregados ainda podem ser obtidos por meio da reciclagem de outros materiais (entulho de construção civil, por exemplo) ou através de materiais alternativos descartados por outras atividades, que se caracterizam como fonte causadora de algum tipo de impacto ambiental.

A classificação dos agregados quanto a massa específica também é recorrente. Os agregados leves são aqueles com massa unitária menor que 2.000 kg/m^3 (argila e vermiculita expandida). Os agregados normais possuem massa unitária entre 2.000 kg/m^3 e 3.000 kg/m^3 (areias e pedregulhos) e os agregados pesados têm massa unitária superior a 3.000 kg/m^3 (barita, magnetita e hematita) (AMBROZEWICZ, 2012).

2.2.2.2. Importância da granulometria

A granulometria dos agregados está relacionada diretamente com o módulo de finura e, consequentemente, com o empacotamento dos grãos e a área superficial disponível para contato com os compostos do cimento durante as reações de hidratação, influenciando a trabalhabilidade da mistura no estado fresco, cujas altas taxas de consumo de água são causadas por materiais bem finos; e a resistência mecânica no estado endurecido (DAY, 2006; LI, 2011). Os ensaios de peneiramento laboratorial determinam a granulometria dos agregados.

2.2.2.3. Propriedades dos agregados

Mehta e Monteiro (2014) classificam as propriedades dos agregados da seguinte maneira:

- Propriedades dependentes da porosidade do material: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza e módulo de elasticidade;

- Propriedades dependentes das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- Propriedades dependentes da composição química e mineralógica: resistência mecânica, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias;
- Propriedades influenciadoras no estado fresco do concreto: porosidade, composição granulométrica, forma e textura superficial dos grãos;
- Propriedades influenciadoras no estado endurecido do concreto: porosidade e composição mineralógica.

A resistência à compressão, resistência à abrasão e o módulo de elasticidade são propriedades mecânicas dos agregados que influenciam fortemente as características finais do concreto, tornando-se necessário uma seleção criteriosa (MAMLOUK e ZANIEWSKI, 2010).

A massa específica está relacionada à massa do agregado em determinado volume sem considerar os poros e os espaços vazios formados entre eles. Entretanto, a massa unitária, de acordo com Bauer (2008), considera estes espaços vazios, visto que o empacotamento dos agregados é um importante fator a ser considerado na obtenção das propriedades finais do concreto. Além disso, os vazios interiores dos grãos de agregados (porosidade) determinam a capacidade de absorção de água destes e devem ser considerados durante os processos de dosagem de concretos.

O inchamento da areia (agregado miúdo) ocorre devido à tensão superficial e ao volume de água presente entre os agregados, permitindo que os grãos tenham a tendência de afastamento uns dos outros por meio do filme de água em seu entorno, causando um aumento de volume e tornando-se uma propriedade a ser considerada (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Agregados grosseiros produzem misturas ásperas e pouco trabalháveis, enquanto aqueles situados em faixas granulométricas mais finas aumentam, consideravelmente, a demanda por água e o consumo de cimento, não sendo economicamente viáveis. Logo, Mamlouk e Zaniewski (2010) e Li (2011) destacam a importância da dimensão máxima do agregado e a necessidade de obter materiais com granulometrias contínuas.

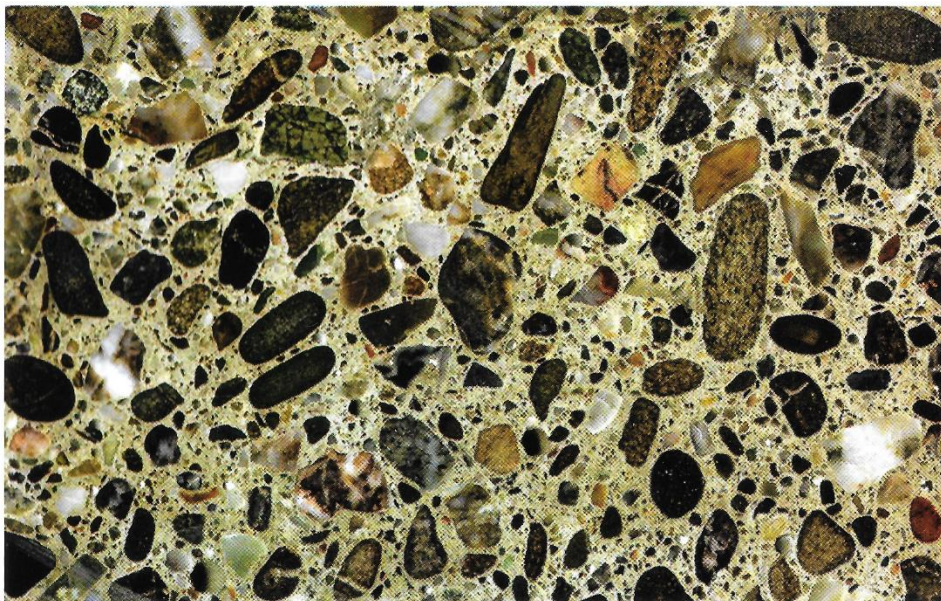
As substâncias deletérias aparecem em pequenas quantidades tanto no agregado miúdo quanto no agregado graúdo e podem afetar notavelmente a trabalhabilidade, a pega, o endurecimento e as características de durabilidade do concreto, como descrito por Alves (2006). Newman e

Choo (2003) mencionam a existência de três principais categorias dessas substâncias. A primeira corresponde às impurezas que interferem nos processos de hidratação do cimento. Películas de substâncias deletérias impedem uma boa aderência entre o agregado e a pasta de cimento e constituem outra categoria. Além disso, ainda existem partículas individuais de agregados que são fracas mecanicamente e instáveis quimicamente.

2.2.3. Microestrutura do concreto

A seção polida de um corpo de prova de concreto (Figura 11) em escala macroscópica permite distinguir pelo menos duas principais fases: partículas de agregados com as mais diversas formas e tamanhos e uma pasta de cimento hidratada constituída por diversas fases microscópicas.

Figura 11 – Seção polida de um corpo de prova de concreto



FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Em escala microscópica é possível identificar uma zona de transição entre os grãos de agregado graúdo e a pasta de cimento, região muito fraca, quando comparada as outras duas fases do concreto, devido a presença de grandes quantidades de cristais de hidróxido de cálcio (C-H). A ação do tempo, umidade e temperatura podem causar alterações na microestrutura do concreto (SHETTY, 2005).

2.2.3.1. Microestrutura da fase agregado

A composição mineralógica dos agregados, principalmente dos grosseiros, pode variar ao longo dos grãos, de acordo com sua dimensão, em escala microscópica. De forma geral, estão distribuídos em faixas granulométricas bem definidas e podem apresentar porosidade variável que, em quantidade excessiva, influencia diretamente na resistência final do concreto.

A dimensão e a forma dos agregados graúdos possuem relação direta com a resistência final do concreto, exercendo forte influência na zona de transição. Grãos alongados e achatados possuem capacidade de acumulação de um filme de água em sua superfície, tornando a zona de transição extremamente frágil, com tendência a microfissuração, contribuindo para ruptura por cisalhamento. Além disso, as demais propriedades dos agregados também se relacionam as características finais do concreto (NEWMAN e CHOO, 2003; DAY, 2006; LI, 2011).

2.2.3.2. Microestrutura da pasta de cimento hidratada

A relação água/cimento possui variações bruscas dentro da pasta devido à capacidade das partículas anidras de cimento se atraírem e formarem flocos que aprisionam grande quantidade de água, causando heterogeneidade na microestrutura. Tal fato permite diferenciar regiões com tamanho e forma dos poros diferentes (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A microestrutura da pasta de cimento é constituída por cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H), responsáveis pela pega e resistência do concreto (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000); e cristais de etringita, posteriormente convertidos em monossulfatos hidratados, responsáveis pelos ganhos de consistência do concreto nos primeiros instantes da hidratação (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002).

Os grãos anidros de cimento Portland também influenciam na microestrutura da pasta de cimento e podem ser encontrados após alguns anos da modelagem do concreto. Estes grãos possuem dissolução gradativa de seus compostos. Logo, uma rede de cristais bem formados de silicatos, hidróxido de cálcio, etringita e monossulfato são formados em sua região externa, pouco densa. Com o avanço da hidratação, a dissolução diminui e permite a formação de uma rede de cristais no interior do grão de forma bastante densa (LI, 2011).

A resistência final do concreto também se relaciona aos vazios presentes na pasta de cimento, devendo a porosidade excessiva ser evitada. Os cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-

H) possuem espaços vazios no interior de sua rede de cristais devido sua morfologia fibrosa, contribuindo para o aumento da porosidade e diminuição da resistência final do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os vazios capilares representam os espaços que não são preenchidos pelos sólidos da pasta hidratada e contribuem para o aumento da porosidade. Dependem da distância original entre os grãos anidros de cimento e o grau de hidratação. Além destes vazios, uma pequena quantidade de ar que é englobada ao concreto durante o procedimento de modelagem (Figura 12) causa espaços vazios na estrutura do concreto que também contribuem para o aumento da porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 12 – Micrografia óptica de um concreto, apresentando os vazios causados pelo ar incorporado (círculos pretos).



FONTE: Adaptado de Thomas e Jennings (2009).

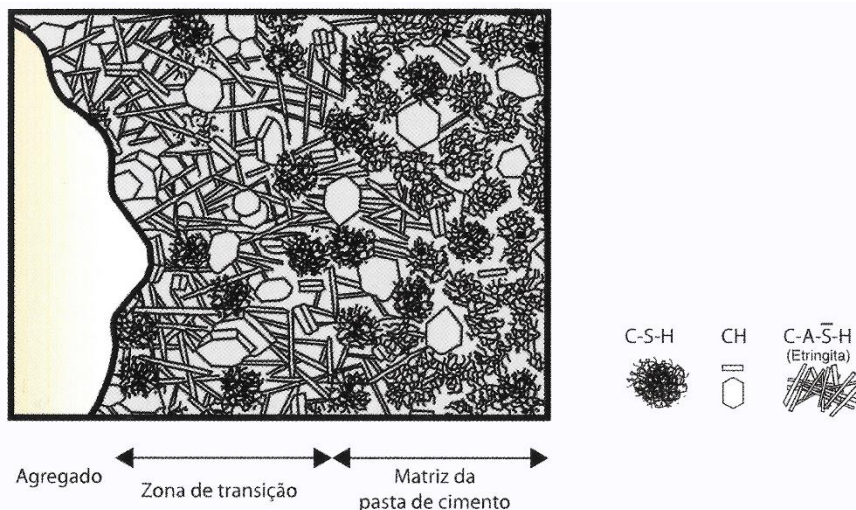
2.2.3.3. Microestrutura da zona de transição

A zona de transição compreende a faixa entre o agregado graúdo e a pasta de cimento e, embora composta pelos mesmos elementos da pasta de cimento hidratada, sua microestrutura e propriedades são diferentes da matriz da pasta.

De acordo com Li (2011), filmes de água formam-se na superfície dos grãos de agregado graúdo na zona de transição, aumentando, consideravelmente, a relação água/cimento desta região. Com o avanço das reações de hidratação, grandes cristais de etringita e hidróxido de cálcio formam-se, tornando a zona de transição altamente porosa.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) vão formar-se nos vazios da zona de transição entre os cristais de etringita e hidróxido de cálcio, melhorando a densidade desta região (Figura 13).

Figura 13 – Representação esquemática da zona de transição, agregado e matriz da pasta de cimento.



FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A zona de transição é o elo mais fraco do concreto devido à alta porosidade, presença de grandes cristais de hidróxido de cálcio que possuem baixa aderência e formam estrutura pouco densa e microfissuras preferencialmente nesta região. Desta forma, a resistência do concreto é limitada pela resistência desta zona (LI, 2011).

2.2.4. Propriedades do concreto no estado fresco

O desempenho obtido pelo concreto depende, basicamente, da qualidade dos componentes utilizados (cimento Portland, agregados e água), de suas proporções na mistura, do grau de adesão ao concreto e das condições de exposição (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000).

As propriedades que um concreto possui no estado fresco são importantes para garantir que a moldagem seja realizada de forma eficiente e permita a obtenção das características finais adequadas. Bauer (2008) destaca que estas devem assegurar a obtenção de uma mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, apresentando uma mistura homogênea e com o mínimo de vazios após o lançamento.

A mistura dos componentes do concreto, o transporte até o local de aplicação, lançamento, adensamento, acabamento, cura e desmoldagem são processos importantes nos primeiros

instantes de vida útil do concreto e afetados pelas propriedades no estado fresco, as quais devem ser monitoradas e controladas (LI, 2011).

As principais propriedades do concreto no estado fresco são trabalhabilidade, perda de abatimento, segregação e exsudação, influenciando diretamente as propriedades do concreto no estado endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.2.4.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é fundamental ao concreto no estado fresco e pela importância pode-se descrevê-la como:

[...] propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manusear inclui as operações de primeiras idades como lançamento, adensamento e acabamento. O esforço necessário para lançar o concreto é principalmente determinado pelo esforço total necessário para iniciar e manter o fluxo, o que, por um lado, depende das propriedades reológicas do lubrificante (pasta de cimento) e do atrito interno entre as partículas dos agregados e, por outro lado, do atrito externo entre o concreto e a superfície da fôrma. (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 388).

Conforme descrito por Day (2006), a consistência traduz o comportamento físico da trabalhabilidade e representa o índice de mobilidade da massa ou o índice de fluidez do concreto fresco. Para Bauer (2008), o esforço necessário para adensar o concreto depende de suas características de consistência e facilidade de redução de vazios sem prejuízos à estabilidade do concreto.

A trabalhabilidade é uma propriedade que varia segundo as condições de lançamento, adensamento e acabamento presentes na obra. Deste modo, cada situação vivenciada exigirá do concreto no estado fresco trabalhabilidades únicas que permitam o desenvolvimento das atividades de forma eficiente (SHETTY, 2005).

O ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) é universalmente utilizado para determinar a consistência e estimar a trabalhabilidade do concreto. No entanto, o ensaio de Vebe também mensura a consistência de misturas mais secas. Bauer (2008) ainda destaca o ensaio de compactação, penetração, escorregamento e remoldagem que permitem aferir a trabalhabilidade do concreto.

Neville e Brooks (2013) mencionam a existência de vários fatores que podem afetar a trabalhabilidade de concretos. Entre elas pode-se destacar o consumo de água e de cimento pela mistura, as características do agregado e a utilização de aditivos e adições.

Pequenas quantidades de água ou de cimento podem contribuir para formação de uma mistura bastante áspera e pouco trabalhável. O tamanho das partículas de agregado graúdo e a utilização de areias finas com grãos angulosos alteram a quantidade de água necessária para atingir uma consistência imposta inicialmente. Aditivos ainda podem reduzir a quantidade de água necessária à mistura e aumentar sua fluidez, interferindo de forma direta na consistência (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000).

2.2.4.2. Perda de abatimento

Segundo Ramachandran e Beaudoin (2000), a perda de abatimento é definida como a perda de consistência do concreto no estado fresco e é um fenômeno em decorrência do enrijecimento gradual de uma pasta de cimento devido ao consumo da água à medida que as reações de hidratação avançam e ocorre a formação de cristais de etringita e silicato de cálcio hidratado. É um fenômeno natural e acontece em todas as misturas de cimento.

A perda de abatimento ou enrijecimento prematuro do concreto no estado fresco pode trazer consequência negativas tais como:

[...] acréscimo de torque na caçamba da betoneira, uma necessidade de mais água na betoneira ou no canteiro, aderência do concreto dentro da caçamba do caminhão betoneira, dificuldades em bombear e lançar o concreto, maior consumo de mão-de-obra para operações de tratamento e acabamento e, finalmente, queda na produtividade e qualidade do trabalho da mão-de-obra, perda de resistência, de durabilidade e de outras propriedades quando a dosagem de água é excessiva ou não é misturada homogeneamente. (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 394).

As causas da perda de abatimento do concreto no estado fresco são o emprego de cimento com pega anormal, longos períodos de mistura, transporte, lançamento, adensamento ou acabamento e alta temperatura do concreto devido ao calor de hidratação excessivo ou devido à temperatura ambiente alta (LI, 2011).

2.2.4.3. Segregação e exsudação

Ambrozewicz (2012) define a segregação como a tendência dos agregados graúdos se separarem da argamassa (cimento, areia e água), deixando o concreto não homogêneo ou cheio de vazio, reduzindo de forma considerável sua resistência mecânica final.

Este autor também considera a exsudação como uma forma de segregação, onde existe a tendência da água de amassamento vir à superfície do concreto recém lançado, conferindo grande quantidade de poros e diminuindo a resistência mecânica. Além disso, a água da exsudação pode carrear finas partículas de cimento para a superfície do concreto, formando uma pasta prejudicial à resistência.

Mehta e Monteiro (2014) apontam algumas causas principais que permitem que o fenômeno aconteça: 1) consistência inadequada, 2) quantidade excessiva de partículas de agregado graúdo muito densas ou pouco densas, 3) pouca quantidade de partículas finas (areia), 4) métodos impróprios de lançamento e adensamento.

Os fenômenos de segregação e exsudação podem ser controlados pelo correto proporcionamento dos componentes para formação de um concreto trabalhável. Em certas situações, pode-se corrigir a exsudação por meio da adição de grãos relativamente finos que compensam as deficiências dos agregados.

2.2.5. Propriedades do concreto no estado endurecido

As propriedades mais importantes do concreto no estado endurecido talvez sejam a resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade. No entanto, Bauer (2008) destaca, ainda, os fatores: densidade, atrito com a água, módulo de elasticidade, calor específico, dilatação térmica, condutibilidade térmica, elétrica e do som, absorção de radioatividade, resistência ao fogo, reação álcali-agregado, corrosão das armaduras, aderência e fissuramento.

2.2.5.1. Resistência Mecânica

A resistência mecânica é uma propriedade muito importante do concreto e traduz-se na resistência à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento. É a resistência que permite que elementos estruturais de concreto suportem altas cargas em serviço sem entrar em colapso.

O processo de endurecimento de concretos à base de cimento Portland é muito longo e pode perdurar por anos. O aumento da idade permite que o mesmo ganhe resistência, isto é, aumente sua capacidade de resistência mecânica. Com 28 dias, o concreto adquire de 75 a 90% de sua resistência final e é com base neste valor, obtido por meio de ensaios, que os elementos de concreto são projetados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Vários fatores podem influenciar de forma significativa a resistência mecânica do concreto no estado endurecido. Ambrozewicz (2012) destaca como principais os fatores água/cimento, a idade do concreto, a forma e granulometria dos agregados, o tipo de cimento utilizado para formulação do concreto e as condições de cura.

A variação da relação água/cimento influencia, diretamente, na resistência mecânica do concreto no estado endurecido. O aumento pode significar maior quantidade de água na mistura, causando diminuição da resistência mecânica. Sua redução, ao contrário, pode permitir a obtenção de concretos com maior resistência mecânica quando diminui a quantidade de água adicionada. Entretanto, a trabalhabilidade da mistura fica prejudicada. Daí, a importância de uma relação água/cimento que permita que propriedades como a trabalhabilidade e a resistência mecânica sejam atendidas de forma satisfatória (REMAHANDRAN e BEAUDOIN, 2000).

As reações de hidratação do concreto permanecem em constante evolução por vários anos e conferem ao mesmo as propriedades de resistência mecânica. Assim, concretos com idades avançadas possuem maior resistência mecânica, desde que em condições normais de operação (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A forma e a resistência dos agregados também exercem influência direta na resistência mecânica dos concretos. Torna-se importante a utilização de agregados provenientes de materiais de qualidade comprovada, com forma, granulometria e resistência adequadas (DAY, 2006).

Atualmente, existe no mercado uma grande quantidade de tipos de cimento Portland disponível. A resistência do concreto está relacionada de forma direta com a resistência que o cimento adquire na mistura após seu endurecimento. Portanto, cada diferente cimento confere ao concreto características únicas de resistência mecânica (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

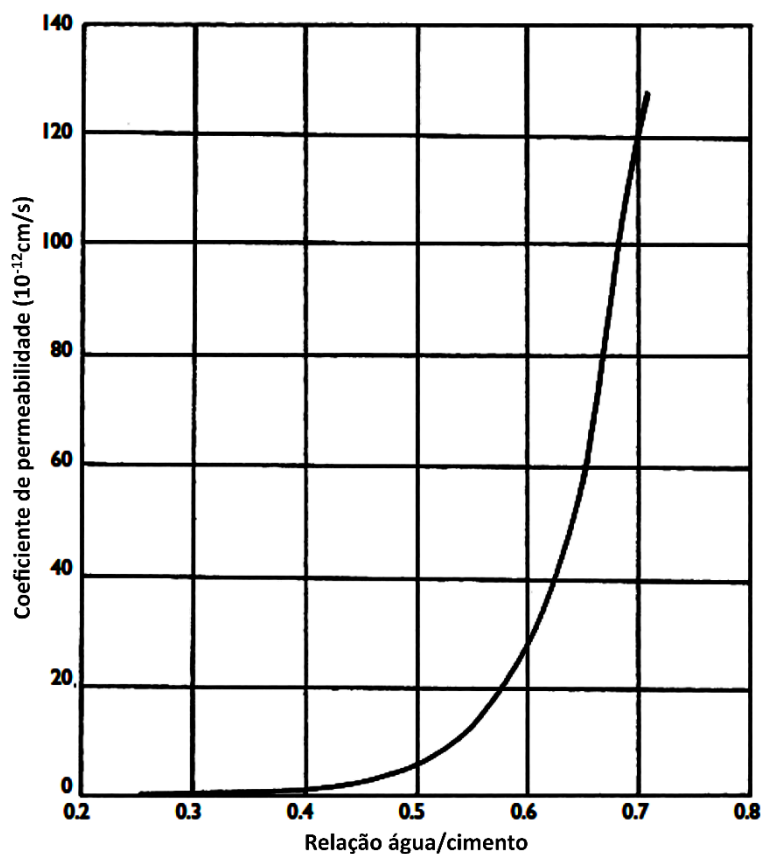
Por fim, a cura é um procedimento utilizado para favorecer a hidratação do cimento pelo controle da temperatura e movimento de água para dentro e para fora do concreto. Deste modo,

influencia diretamente na umidade e na temperatura do concreto nas primeiras idades, garantindo que as propriedades de resistência mecânica do concreto sejam atingidas (SHETTY, 2005).

2.2.5.2. Permeabilidade

O concreto é um material poroso devido a várias circunstâncias que lhe são impostas durante sua obtenção. Entre elas, podemos destacar o excesso de água na mistura necessária para atingir a trabalhabilidade adequada (Figura 14), diminuição do volume absoluto resultante da hidratação dos constituintes do concreto, ar incorporado à mistura, eventualmente ou de forma proposital, e fissuras de diversas origens (BAUER, 2008). 10^{-12}

Figura 14 – Relação entre a razão água/cimento e a permeabilidade do concreto.



FONTE: Adaptado de Day (2006).

A permeabilidade é muito importante quando são consideradas as condições de trabalho, principalmente em concretos armados. Por vezes, podem ser expostos à ação de agentes agressivos que o atacam quimicamente e destroem sua estrutura. Nestes casos, torna-se interessante a impermeabilidade destes concretos, evitando que a água ou o ar com agentes

químicos agressivos penetrem suas estruturas, causem sua corrosão e levem-no ao colapso (DAY, 2006).

2.2.5.3. Durabilidade

A durabilidade do concreto depende, fundamentalmente, das condições em que o mesmo está sujeito em serviço. Agentes agressivos podem levar a estrutura à desagregação causando o colapso. Portanto, entender as características do concreto utilizado e as condições a que está sujeito é importante para buscar sanar estes problemas.

Bauer (2008) menciona uma grande quantidade de agentes que contribuem para que a durabilidade do concreto diminua drasticamente. Entre eles, destacam-se os agentes mecânicos, físicos, físico-químicos, ecológicos e químicos, intrínsecos e biológicos.

A água estará presente em, praticamente, todos os mecanismos que envolvem a deterioração do concreto devido à sua capacidade de agir como solvente dos materiais da estrutura. Age lixiviando os elementos químicos assim como na intemperização natural de rochas de extrema dureza no meio ambiente (DAY, 2006).

Mehta e Monteiro (2014) consideram como agentes físicos extremamente prejudiciais à durabilidade do concreto o desgaste da superfície, fissurações devido à cristalização de sais nos poros do concreto pela alta permeabilidade e contato constante com a água que carrega estes sais para o interior do concreto, exposição a temperaturas extremas como o congelamento e o fogo. Além disso ainda mencionam a ação de agentes químicos como a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas que reagem com os componentes e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão de armaduras de concreto.

Agentes biológicos como mencionado por Bauer (2008) também podem ser extremamente prejudiciais à durabilidade dos concretos. O ataque biológico ocorre quando condições de umidade, nutrientes orgânicos, fungos e bactérias ativas estão presentes em conjunto. Normalmente, instalações industriais de processamento de alimentos e outros produtos orgânicos sofrem, consideravelmente, com estes problemas. Os microrganismos sintetizam ácidos que dissolvem a cal do concreto causando a deterioração das estruturas.

Portanto, torna-se extremamente importante o conhecimento do tipo de aplicação em que o concreto será usado. A partir desta premissa, considera-se a utilização, em determinados casos,

de concretos especiais ou com formulações diferentes, para atender a demanda de serviço e aumentar sua durabilidade.

2.2.6. Tipos de concreto

Atualmente, existem no mercado vários tipos de concreto com características e aplicações específicas, sendo estes descritos na sequência de acordo com o proposto pelos autores Ambrozewicz (2012), Mehta e Monteiro (2014) e pelos *websites* das empresas Concremix, Holcim Brasil, Redmix e Supermix.

- Concreto convencional: utilizado na maioria das obras civis (prediais, industriais, comerciais e estruturas pré-moldadas), é lançado nas fôrmas pelo método convencional. Possui consistência seca e resistência variando de 10 a 40 MPa.
- Concreto de alto desempenho: dosado a partir de insumos nobres como sílica ativa, metacaulim e aditivos superplastificantes, produz concretos de alta durabilidade, baixa permeabilidade e resistência mecânica à compressão acima de 100 MPa. Utilizado em obras prediais, obras marítimas, pontes e viadutos, melhora a aderência entre o concreto e o aço.
- Concreto de alta resistência inicial: atinge elevada resistência nas primeiras idades de cura, permitindo ganhos de produtividade importantes. Utilizado na fabricação de estruturas convencionais e pré-fabricadas, tubos e artefatos de concreto.
- Concreto para pavimentação: elevada resistência à tração na flexão, ao desgaste superficial e à compressão. Concreto de fácil lançamento e execução. Utilizado em pavimentos rodoviários, aeroportos, pisos industriais, postos de gasolina e estacionamentos.
- Concreto pesado: alta densidade (2800 a 4500 kg/m³) obtida com agregados especiais, provenientes do minério de ferro (hematita e magnetita). A resistência pode alcançar 30MPa. Aplicado em gasodutos, hospitais e usinas nucleares como isolante radioativo.
- Concreto projetado: baixa trabalhabilidade, lançado em alta velocidade sobre as superfícies por equipamentos especiais. Utilizados em revestimentos de túneis, paredes, pilares, contenção de taludes e galerias.
- Concreto leve: baixa densidade (1600 a 1800 kg/m³), podendo alcançar resistências de 20 MPa, proporcionando isolamento acústico. Podem ser dosados sem finos ou com agregados leves como isopor, vermiculita e argila expandida. Aplicado em enchimento

de lajes, fabricação de blocos, regularização de superfícies, envelopamento de tubulações, entre outros.

- Concreto autoadensável: concreto com elevada plasticidade (utilização de aditivos), atingindo abatimentos de até 250 mm e resistências de 35 MPa. Aplicado em fundações, peças delgadas, peças densamente armadas, lajes e pisos e paredes diafragmas.
- Concreto com adição de fibras: baixa retração, elevada resistência às intempéries, aos meios agressivos e ao desgaste superficial graças à adição de fibras de nylon, prolipropileno ou aço na composição. Utilizados em pavimentos, abrigos antiaéreos, reservatórios e pisos industriais.
- Concreto poroso: elevada permeabilidade e baixa densidade obtida com utilização de cimento, agregado graúdo e água, alcançando baixas resistências. Utilizado em drenagens, pisos permeáveis e enchimento de lajes.

2.3. CONCRETO COM MATERIAIS ALTERNATIVOS

O alto consumo mundial de concreto permite que diversos estudos sejam realizados na busca por materiais que possam substituir os atuais componentes da mistura, de forma eficiente e sustentável, minimizando os impactos ambientais.

Um mapeamento sistemático sobre os principais materiais utilizados como alternativa de substituição concede uma visão macro das tendências atuais no setor de construção civil. Neste estudo, o mapeamento seguiu o proposto pelos autores Petersen *et al.* (2008), Costa *et al.* (2014) e Paula e Ilha (2016).

A busca foi realizada utilizando a base de dados *Science Direct*, considerando somente o primeiro semestre de 2016 e os descritores “Concrete” e “Waste” como palavras-chave. Foram encontrados 68 artigos e, após leitura do título e do resumo, foram selecionados somente 35 que estavam relacionados de forma íntima à produção de concreto utilizando materiais alternativos.

Apresenta-se na Tabela 5 os periódicos encontrados no mapeamento e a quantidade de artigos publicados. Destacam-se *Construction and Building Materials* e *Journal of Cleaner Production* com o maior número de publicações.

Tabela 5 – Periódicos encontrados, número de artigos publicados e selecionados após leitura do título e resumo.

Periódico	Artigos publicados	Artigos selecionados
<i>Advanced Powder Technology</i>	1	-
<i>Annals of Nuclear Energy</i>	1	-
<i>Archives of Civil and Mechanical Engineering</i>	1	1
<i>Cement and Concrete Composites</i>	1	-
<i>Composites Part B</i>	1	-
<i>Construction and Building Materials</i>	24	17
<i>Engineering Geology</i>	1	-
<i>International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences</i>	1	-
<i>Journal of Building Engineering</i>	1	-
<i>Journal of Cleaner Production</i>	23	11
<i>Journal of Environmental Management</i>	2	1
<i>Journal of Environmental Radioactivity</i>	1	-
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	1	-
<i>Materials and Design</i>	2	2
<i>Procedia Engineering</i>	1	1
<i>Procedia Environmental Sciences</i>	1	-
<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	1	-
<i>Sustainable Environment Research</i>	1	-
<i>Waste Management</i>	3	2
Total	68	35

Apresenta-se na Tabela 6 os componentes do concreto e a quantidade de artigos publicados que buscam substituí-los, com os respectivos autores. Há uma tendência atual de busca por materiais alternativos que substituam principalmente os agregados miúdos (44% dos artigos) e, em menor proporção, os agregados graúdos (Figura 15).

Figura 15 – Tendência atual de substituição dos componentes do concreto ou adição junto aos mesmos.

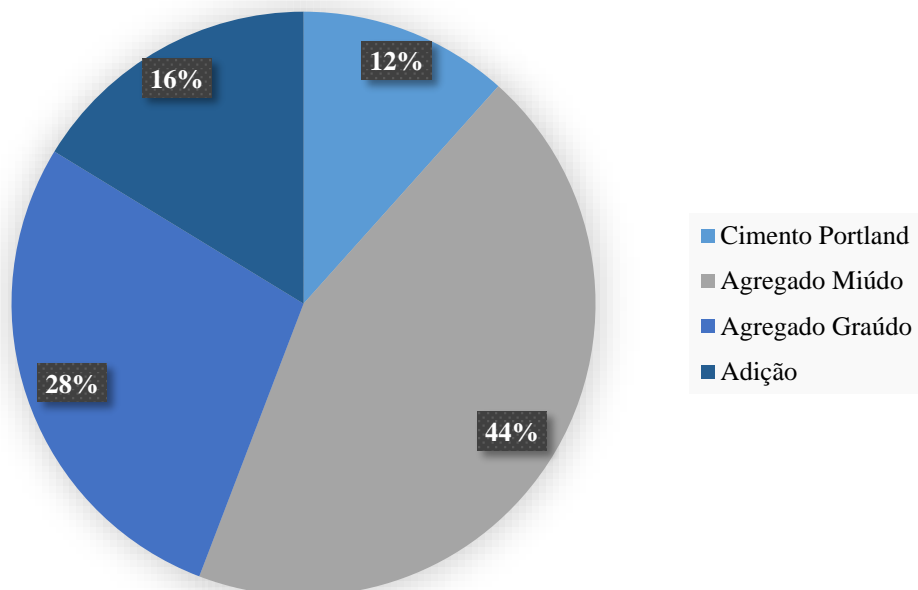


Tabela 6 – Artigos relacionados à substituição dos componentes do concreto e seus autores.

Material substituído	Número de artigos	Autores
Cimento Portland	5	Acharya e Patro (2016); Hesami <i>et al.</i> (2016); Mo <i>et al.</i> (2016); Penteadó <i>et al.</i> (2016); Sardinha <i>et al.</i> (2016)
Agregado Miúdo	19	Awoyera <i>et al.</i> (2016); Azhdarpour <i>et al.</i> (2016); Dulsang <i>et al.</i> (2016); Gupta <i>et al.</i> (2016); Güneyisi <i>et al.</i> (2016); Lima e Zulanas (2016); Malaiskiene <i>et al.</i> (2016); Moretti <i>et al.</i> (2016); Nikbin <i>et al.</i> (2016); Özalp <i>et al.</i> (2016); Penteadó <i>et al.</i> (2016); Puthussery <i>et al.</i> (2016); Rahimi <i>et al.</i> (2016); Rózycka e Pichór (2016); Sadrmomtazi <i>et al.</i> (2016); Singh <i>et al.</i> (2016a); Singh <i>et al.</i> (2016b); Vieira <i>et al.</i> (2016); Xiao <i>et al.</i> (2016).
Agregado Graúdo	12	Anderson <i>et al.</i> (2016); Awoyera <i>et al.</i> (2016); Borg <i>et al.</i> (2016); Güneyisi <i>et al.</i> (2016); Khalid <i>et al.</i> (2016); Moretti <i>et al.</i> (2016); Özalp <i>et al.</i> (2016); Palankar <i>et al.</i> (2016); Puthussery <i>et al.</i> (2016); Thomas <i>et al.</i> (2016); Xiao <i>et al.</i> (2016); Yu <i>et al.</i> (2016).
Adições	7	Kaya e Kar (2016); Khalid <i>et al.</i> (2016); Ruiz-Herrero <i>et al.</i> (2016); Smarzewski e Barnat-Hunek (2016); Stonys <i>et al.</i> (2016); Wang <i>et al.</i> (2016); Yu <i>et al.</i> (2016).

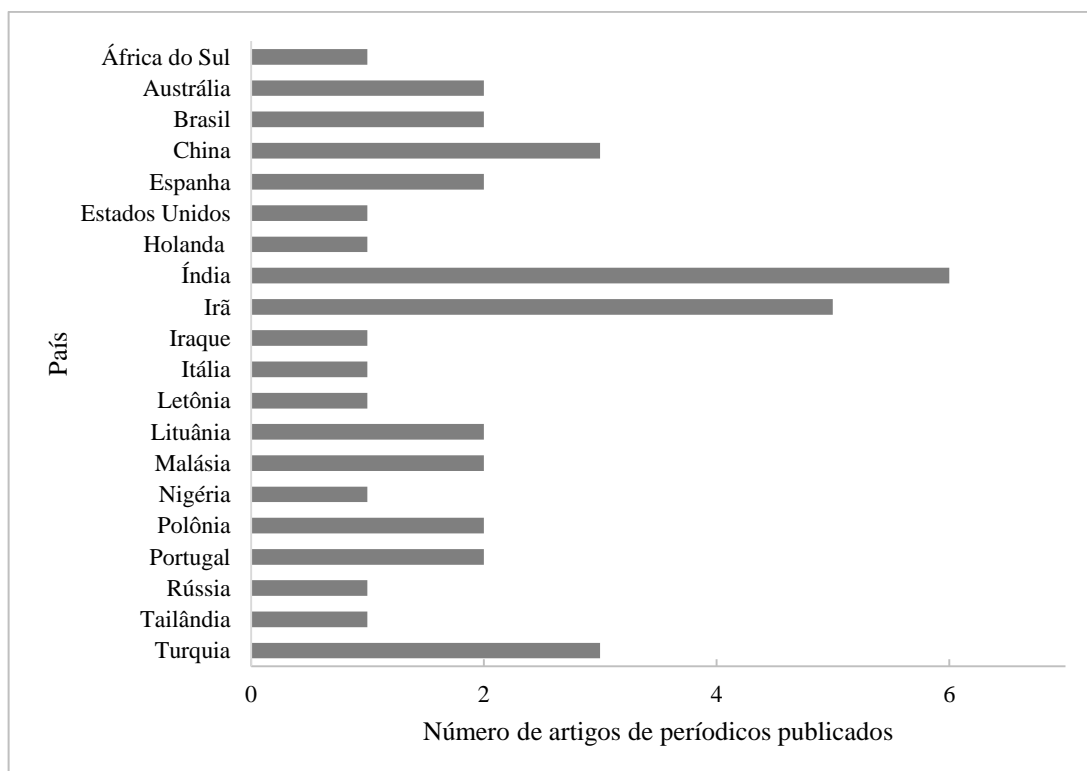
Vários materiais, descartados como resíduos de diversas atividades, são estudados como propostas de substituição e os principais descritos no mapeamento sistemático estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais materiais utilizados como alternativa de substituição no concreto nas publicações encontradas através do mapeamento sistemático.

Materiais alternativos	Número de artigos
Cinzas de palma da produção de óleo combustível	1
Isopor	1
Lama de tratamento de esgoto	1
Lã mineral ultrafina	1
PET (Polietileno Tereftalato)	4
Resíduos de borracha	3
Resíduos de carvão	3
Resíduos de cerâmica	5
Resíduos de concreto	2
Resíduos de construção	3
Resíduos de escória	4
Resíduos de espuma da indústria de calçados	1
Resíduos de perlita expandida	1
Resíduos de plástico	1
Resíduos de vidro expandido	1
Resíduos do corte de granito	2
Resíduos do corte de mármore	1

Alguns países destacam-se nos estudos de concreto com materiais alternativos. Na Figura 16 observa-se em destaque os países Índia, Irã, Austrália e Turquia em publicações nos periódicos presentes na base de dados *Science Direct*.

Figura 16 – Levantamento do número de artigos publicados por país nos periódicos constantes na base de dados *Science Direct*.



Observa-se nas Tabelas 8, 9 e 10 as porcentagens máximas de substituição, propostas nas publicações selecionadas, dos componentes do concreto cimento Portland, agregados miúdos e agregados graúdos, respectivamente.

Tabela 8 – Porcentagem máxima de substituição do cimento Portland por materiais alternativos na composição do concreto por autor.

Autores	Material alternativo utilizado	Porcentagem máxima de substituição (%)
Acharya e Patro (2016)	Resíduos de escória	40
Hesami <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de carvão	20
Mo <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de escória	60
Penteado <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	30
Sardinha <i>et al.</i> (2016)	Resíduos do corte de mármore	20

O cimento Portland é substituído em proporções que chegam até 60%, com média de 32%. Como é um dos componentes mais dispendiosos do concreto, altas taxas de substituição são atraentes, desde que as características finais necessárias sejam satisfeitas.

Tabela 9 – Porcentagem máxima de substituição do agregado miúdo por materiais alternativos na composição do concreto por autor.

Autores	Material alternativo utilizado	Porcentagem máxima de substituição (%)
Awoyera <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	30
Azhdarpour <i>et al.</i> (2016)	PET (Polietileno Tereftalato)	30
Dulsang <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de espuma da indústria de calçados	10
Gupta <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de borracha	25
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de borracha	25
Lima e Zulanis (2016)	Lama de tratamento de esgoto	5
Malaiskiene <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	10
Moretti <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	30
Nikbin <i>et al.</i> (2016)	PET (Polietileno Tereftalato)	15
Özalp <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	20
Penteado <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	30
Puthussery <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de concreto	100
Rahimi <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de borracha	15
Rózycka e Pichór (2016)	Resíduos de perlita expandida	40
Sadrmomtazi <i>et al.</i> (2016)	PET (Polietileno Tereftalato)	15
Singh <i>et al.</i> (2016a)	Resíduos do corte de granito	70
Singh <i>et al.</i> (2016b)	Resíduos do corte de granito	50
Vieira <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	100
Xiao <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	100

A média de substituição do agregado miúdo e graúdo por materiais alternativos é aproximadamente 38% e 69%, respectivamente, de acordo com os dados apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 10 – Porcentagem máxima de substituição do agregado graúdo por materiais alternativos na composição do concreto por autor.

Autores	Material alternativo utilizado	Porcentagem máxima de substituição (%)
Anderson <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	100
Awoyera <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de cerâmica	100
Borg <i>et al.</i> (2016)	PET (Polietileno Tereftalato)	1,5
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de borracha	25
Khalid <i>et al.</i> (2016)	Cinzas da palma da produção de óleo combustível	30
Moretti <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	50
Özalp <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	20
Palankar <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de escória	100
Puthussery <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de concreto	100
Thomas <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de concreto	100
Xiao <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de construção	100
Yu <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de escória	100

Há uma tendência de altas porcentagens de substituição dos agregados por materiais alternativos devido ao grande volume que estes ocupam no concreto. Logo, grandes quantidades de resíduos podem ser reaproveitadas. Além disso, 72% das substituições propostas nos artigos selecionados pelo mapeamento sistemático são dos agregados miúdos e graúdos.

2.4. DOSAGEM DE CONCRETOS

A dosagem de concretos permite o proporcionamento adequado dos insumos visando obter características finais específicas e otimizar os custos de produção. Pode ser realizada por meio do traço em obras de pequeno porte de forma não experimental, baseada na experiência do profissional ou, experimentalmente, utilizando as propriedades dos insumos.

Mehta e Monteiro (2014) indicam em sua obra uma sequência de passos que deve ser seguida para obtenção do traço ótimo, atingindo as características finais necessárias ao concreto de acordo com o método proposto pela *American Concrete Institute* (ACI).

- 1º) Escolha do abatimento
- 2º) Escolha da dimensão máxima característica do agregado
- 3º) Estimativa do consumo da água de amassamento e do teor de ar
- 4º) Seleção da relação água/cimento
- 5º) Estimativa do consumo de cimento
- 6º) Estimativa do consumo de agregado graúdo
- 7º) Estimativa do consumo de agregado miúdo

8º) Ajustes da umidade do agregado

9º) Ajustes na mistura experimental

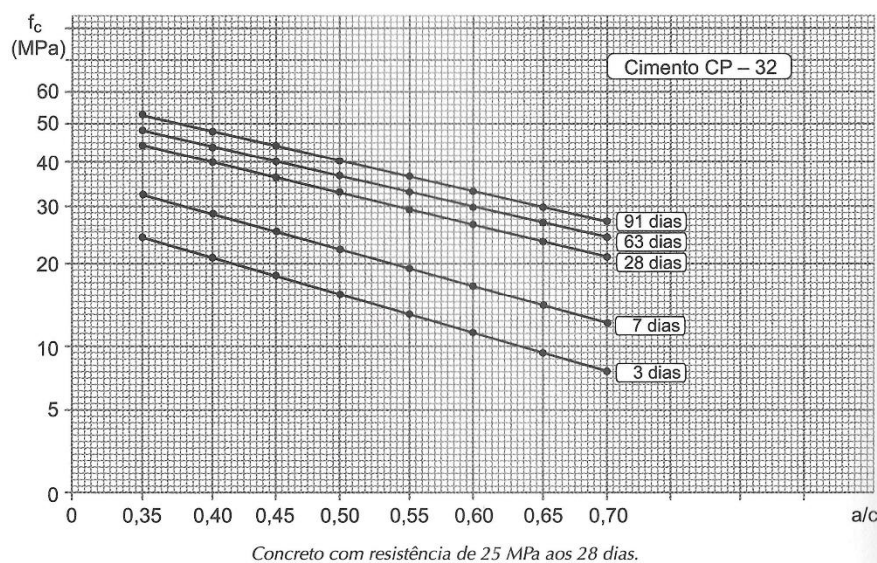
Existe uma grande quantidade de métodos que buscam o cálculo do traço do concreto de forma eficiente e otimizada. No Brasil, os principais buscam a otimização da dosagem de acordo com os materiais disponíveis na região. Assunção (2002) cita em sua obra quatro métodos, que são apresentados na sequência.

- 1 - Método do Instituto de Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (ITERS);
- 2 - Método do Instituto Nacional de Tecnologia do Rio de Janeiro (INT);
- 3 - Método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S A (IPT);
- 4 - Método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

O método da ABCP é uma tradução do método da ACI mencionado por Mehta e Monteiro (2014), buscando adequar-se aos padrões nacionais e aos materiais disponíveis no local. Este método permite a obtenção de um traço com base nos dados de caracterização dos materiais componentes do concreto, relacionando seu abatimento e a relação água/cimento.

O primeiro parâmetro determinado pelo método é a relação água/cimento considerando a resistência média à compressão do concreto com base no projeto. A curva de Abrams (Figura 17) auxilia na seleção deste parâmetro.

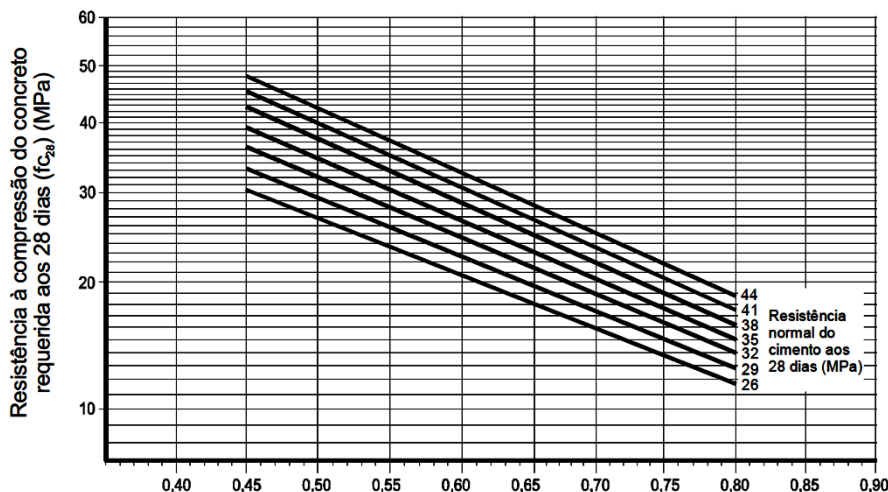
Figura 17 – Curva de Abrams de um cimento CP 32.



FONTE: Adaptado de Ambrozewicz (2012).

De acordo com Assunção (2002), quando não se dispõe da curva de Abrams para os materiais que serão utilizados na dosagem do concreto e não existirem restrições quanto a durabilidade do mesmo, pode-se utilizar as curvas de Walz apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Curvas de Walz para determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.



FONTE: Adaptado de Rodrigues (1998) *apud* Assunção (2002).

A relação água/cimento ainda pode ser determinada de acordo com tabelas de resistência à compressão, como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Relações entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto.

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Relação água/cimento, em massa	
	Concreto sem ar incorporado	Concreto com ar incorporado
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

O abatimento da mistura pode ser determinado em tabelas ou mesmo pela experiência profissional. Dependerá da finalidade para a qual o concreto está sendo projetado. Apresenta-se na Tabela 12 algumas opções de escolha do abatimento.

Tabela 12 – Abatimento recomendado para vários tipos de construção.

Tipos de construção	Abatimento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Paredes de fundações armadas e sapatas	75	25
Sapatas não armadas, caixões e paredes de vedação	75	25
Vigas e paredes armadas	100	25
Pilares de edifício	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Concreto massa	50	25

FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

O consumo de água é determinado de acordo com o abatimento e o diâmetro máximo do agregado graúdo (Tabela 13).

Tabela 13 – Requisitos aproximados do consumo de água para diferentes abatimentos e dimensão nominal máxima dos agregados

Abatimento (mm)	Dimensão máxima dos agregados (mm)							
	9,5	12,5	19,0	25,0	37,5	50,0	75,0	150,0
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-

FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A estimativa do consumo de cimento é possível com base na Equação 1.

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad (1)$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto (Kg/m³)

C_a = consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³)

a/c = relação água/cimento

Com os dados do módulo de finura do agregado miúdo e a dimensão máxima característica do agregado graúdo é possível obter por meio da Tabela 14 o valor do volume compactado seco do agregado graúdo (V_{ag}) e obter o consumo por metro cúbico deste agregado com a fórmula apresentada na Equação 2.

Tabela 14 – Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto

Módulo de finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

FONTE: Adaptado de Rodrigues (1998) *apud* Assunção (2002).

A estimativa de consumo do agregado graúdo por metro cúbico de concreto é possível com a Equação 2.

$$C_{ag} = V_{ag} * M_{ag} \quad (2)$$

Onde:

C_{ag} = consumo do agregado graúdo por metro cúbico de concreto (kg/m^3)

V_{ag} = volume compactado seco do agregado graúdo por m^3 de concreto

M_{ag} = massa unitária compactada do agregado graúdo por m^3 de concreto (kg/m^3)

A estimativa de consumo do agregado miúdo é feita com relação ao consumo de cimento, água e agregado graúdo. É possível encontrar com a Equação 3 o volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto e com a Equação 4 o consumo deste material.

$$V_{am} = 1 - \left(\frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ac}} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (3)$$

Onde:

V_{am} = volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (m^3)

$\gamma_c, \gamma_{ag}, \gamma_a$ = massa específica do cimento, agregado graúdo e da água, respectivamente (kg/m^3)

$$C_{am} = \gamma_{am} * V_{am} \quad (4)$$

Onde:

C_{am} = consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (kg/m^3)

γ_{am} = massa específica do agregado miúdo (kg/m^3)

O traço pode ser apresentado de acordo com a Equação 5.

$$1,0 : \frac{c_{am}}{c} : \frac{c_{ag}}{c} : (a/c) \quad (5)$$

O traço pode ser obtido tanto em volume como em massa com relação à quantidade de cimento. A escolha correta vai depender da situação encontrada no canteiro de obras.

2.5. NORMAS REGULAMENTADORAS

Este estudo realizou uma grande quantidade de ensaios que visaram à caracterização dos insumos utilizados e as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Portanto, os próximos tópicos se propõem a sintetizar de forma simples as principais normas regulamentadoras utilizadas.

2.5.1. Agregados para concreto

Os agregados para concreto são regulamentados pela norma NBR 7211 (2009). São divididos em agregado miúdo e graúdo. Os primeiros são partículas que passam pela peneira com abertura de 4,75 mm. Os agregados graúdos correspondem às partículas limitadas pelas peneiras com abertura de 75 e 4,75 mm.

O módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados são obtidos com a distribuição granulométrica realizada por peneiras da série normal e intermediária apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Conjunto de peneiras da série normal e intermediária com suas respectivas aberturas nominais em milímetros.

Série Normal	Série Intermediária
75,0	-
-	63,0
-	50,0
37,5	-
-	31,5
-	25,0
19,0	-
-	12,5
9,50	-
-	6,3
4,75	-
2,36	-
1,18	-
0,60	-
0,30	-
0,15	-

FONTE: Adaptado de NBR 7211 (2009).

A norma define o módulo de finura como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras divididas por 100. A dimensão máxima característica utiliza do mesmo ensaio de peneiramento e consiste na abertura nominal da peneira em milímetros na qual a porcentagem retida acumulada do material é menor ou igual a 5%.

A massa unitária dos agregados é outra característica mensurável e importante descrita pela norma NBR NM 45 (2006). Corresponde a massa em determinado volume ocupado pelo material e os vazios formados entre as partículas. É obtido para agregados secos com dimensão máxima característica menor ou igual a 75 mm.

O material a ser ensaiado é colocado em um recipiente com volume conhecido, com dimensões descritas na Tabela 16. Além disso, ainda é necessário a utilização de uma haste cilíndrica, concha e balança com resolução de 50 gramas.

Tabela 16 – Características do recipiente para obtenção da massa unitária do material.

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Recipiente		
	Capacidade mínima (dm ³)	Diâmetro interior (mm)	Altura interior (mm)
$d \leq 37,5$	10	220	268
$37,5 < d \leq 50$	15	260	282
$50 < d \leq 70$	30	360	294

FONTE: Adaptado de NBR NM 45 (2006).

Três métodos são descritos pela norma e estão relacionados à dimensão máxima característica dos agregados. O método A é aplicável aos materiais com dimensão igual ou menor a 37,5 mm. A massa do recipiente deve ser determinada e o material é adicionado em três camadas, cada uma sendo compactada com 25 golpes. A massa do recipiente e do material é mensurada.

O método B refere-se aos materiais com dimensão compreendida entre 37,5 e 75 mm. O procedimento é semelhante ao anterior. A diferença corresponde à forma de compactação do material. O recipiente deve ser solto de uma altura de aproximadamente 50 mm contra uma base fixa, permitindo a compactação de cada camada de material.

Materiais no estado solto são ensaiados de acordo com o proposto pelo método C da norma. O material é adicionado a partir de uma altura de 50 mm acima da borda do recipiente. Tal procedimento permite a compactação das camadas e a massa pode ser determinada.

Independente de qual método seja empregado, a massa unitária pode ser obtida com os dados coletados empregando-se à Equação 6.

$$\rho_u = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ_u = massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado (kg);

m_r = massa do recipiente vazio (kg);

V = volume do recipiente (m³).

2.5.2. Moldagem e cura de corpos de prova de concreto

A moldagem dos corpos de prova é crucial para garantia da qualidade dos ensaios subsequentes no estado endurecido. A norma NBR 5738 (2015) descreve os procedimentos necessário à moldagem e à cura dos corpos de prova.

Moldes cilíndricos ou prismáticos podem ser utilizados para moldagem de corpos de prova. Os primeiros possuem o dobro do diâmetro como altura e suas bases e laterais devem ser confeccionadas de aço ou outro material não absorvente, impedindo uma possível reação com o cimento Portland durante a moldagem.

Os moldes devem ser revestidos com uma fina camada de óleo mineral ou óleo lubrificante que não reaja com o cimento Portland. Tal procedimento auxilia a desmoldagem dos corpos de prova.

A mistura resultante do amassamento dos componentes do concreto deve ser adicionada aos moldes com o auxílio de uma concha de seção U, permitindo que a distribuição seja simétrica dentro do molde.

A moldagem pode ser realizada com adensamento mecânico ou manual, sendo necessário, neste último, a utilização de uma haste cilíndrica de aço, com 16 mm de diâmetro e comprimento de 600 a 800 mm, com pelo menos um de seus extremos em forma semiesférica. A escolha do método de adensamento está relacionada à classe do concreto e ao abatimento, que são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Método de adensamento do concreto de acordo com a classe de abatimento.

Classe	Abatimento (mm)	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	Manual
S220	$A \geq 220$	

FONTE: Adaptado de NBR 5738 (2015).

Estabelece-se na Tabela 18 o número de camadas em que o material deve ser adicionado ao molde e o número de golpes necessários para o adensamento manual.

Tabela 18 – Número de camadas e golpes por moldagem de corpos de prova.

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (mm)	Número de camadas		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	-	-
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450	3	-	-

FONTE: Adaptado de NBR 5738 (2015).

O material permanece nos moldes durante 24 horas, sendo posteriormente desmoldados. Os corpos de prova seguem para o processo de cura que pode ser realizada em câmara úmida ou tanque com água. Permanecem neste processo até atingir a idade de realização dos ensaios.

A cura úmida é realizada em câmaras que possuem umidade e temperatura controladas. A cura em tanque deve ser realizada com os corpos de prova submersos em água saturada em cal.

Para os ensaios de compressão dos corpos de prova, é necessário que os mesmos possuam a base plana e lisa. Tal fato pode ser obtido com capeamento, utilizando produtos químicos, ou retificação por meios mecânicos, que consistem em remover uma fina camada das bases dos corpos de prova.

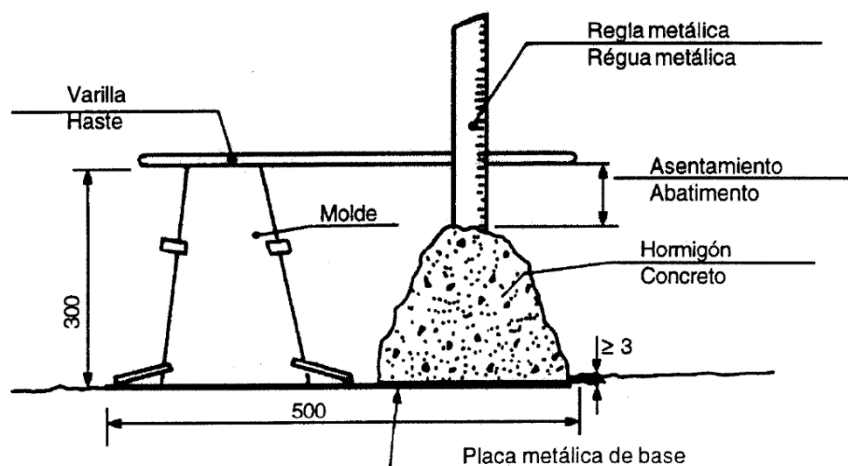
A norma NBR 9479 (2006) descreve as condições do tanque utilizado para cura saturada dos corpos de prova. Este deve possuir água potável não corrente saturada em cal, protegida da incidência de raios solares e com temperatura controlada em 23 ± 2 °C. Dispositivos de troca de água e aquecimento da água devem estar instalados. A temperatura deve ser monitorada três vezes ao dia em intervalos de tempo regulares, alimentando um livro de registro.

2.5.3. Consistência pelo abatimento do tronco de cone

A consistência do concreto no estado fresco pode ser determinada a partir de diversos ensaios. O *slump test* ou abatimento do tronco de cone é um destes ensaios e é largamente empregado devido sua eficiência e simplicidade de execução. É descrito pela norma NBR NM 67 (1998).

O ensaio é realizado com o auxílio de um molde com fôrma de tronco de cone, uma base plana, um funil, uma concha para adicionar o material ao molde e uma haste de adensamento manual. O molde tem 200 mm de diâmetro na base inferior e 100 mm na superior, com uma altura de 300 mm (Figura 19).

Figura 19 – Representação esquemática do molde tronco cônico e obtenção do abatimento do concreto.



FONTE: Adaptado de NBR NM 67 (1998).

O molde e sua base devem ser umedecidos ou recobertos com uma fina película de óleo mineral ou óleo lubrificante que não reaja com o cimento Portland. A mistura resultante do amassamento dos componentes do concreto é adicionada ao molde tronco cônico em três camadas, cada uma sendo golpeada 25 vezes com a haste. Durante este procedimento, o operador deve posicionar-se com os pés sobre as aletas laterais do molde, de forma a mantê-lo estável.

Com o preenchimento total do molde e o nivelamento da superfície superior, a base deve ser limpa. O molde será removido cuidadosamente na direção vertical. Este procedimento deve ser realizado em 5 a 10 segundos. O abatimento é mensurado colocando-se o molde ao lado da mistura e utilizando-se da haste e uma régua milimetrada (Figura 19).

2.5.4. Concreto no estado endurecido

Existem alguns ensaios que permitem mensurar as propriedades do concreto no estado fresco. A norma NBR 5739 (2007) descreve o ensaio de resistência à compressão, propriedade extremamente interessante para os engenheiros e projetistas.

De acordo com o proposto pela norma, os corpos de prova são ensaiados em máquinas (prensas) que suportem a capacidade para qual foram projetados. São posicionados no centro de aplicação de força da máquina sobre pratos de compressão. O correto posicionamento do corpo de prova garante que a força aplicada seja distribuída uniformemente, garantindo resultados confiáveis.

A idade de ruptura dos corpos de prova é estabelecida previamente e deve obedecer às tolerâncias indicadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Tolerância permitida para cada idade de ensaio.

Idade de ensaio (dias)	Tolerância permitida (horas)
1	0,5
3	2
7	6
28	24
63	36
91	48

FONTE: Adaptado de NBR 5739 (2007).

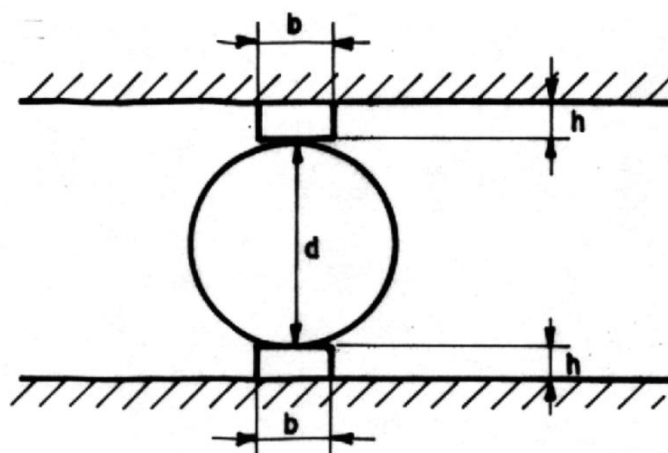
A inserção de carga ao corpo de prova no ensaio de compressão deve ser realizada de maneira contínua e sem choques. A aplicação da carga só deve cessar quando ocorrer uma queda brusca na pressão indicada no manômetro, representando a ruptura.

A tração é outra propriedade do concreto no estado endurecido que permite analisar sua resistência mecânica. É determinada através do ensaio de compressão diametral descrito pela norma NBR 7222 (2011).

O ensaio é realizado em máquina (prensa) que permite a compressão do corpo de prova no seu eixo diametral. Dispositivos que auxiliem o posicionamento do corpo de prova também podem ser necessários, garantindo sua centralização ao ponto de aplicação da força e distribuição uniforme da pressão.

Em situações em que o corpo de prova possua comprimento maior que o maior diâmetro do prato da máquina, torna-se necessário a utilização de uma chapa de aço usinado, disposta ao longo de todo o corpo de prova e garantindo a distribuição uniforme de pressão (Figura 20).

Figura 20 – Disposição do corpo de prova para ensaio entre os pratos da máquina de compressão sendo auxiliado por uma chapa de aço usinado.



FONTE: Adaptado de NBR 7211 (2011).

Assim, como nos ensaios de ruptura por compressão dos corpos de prova, a carga deve ser aplicada de maneira constante e uniforme até o limite em que a ruptura por tração aconteça, caracterizando uma queda brusca na pressão acusada no manômetro.

A absorção por imersão dos corpos de prova de concreto é uma importante propriedade e está relacionada à permeabilidade do mesmo. Descrita pela norma NBR 9778 (2005), é necessário que os corpos de prova permaneçam no processo de secagem em estufa à temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 72 horas consecutivas, obtendo-se a massa seca. Após este procedimento, são imergidos em água à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas.

Com a saturação realizada, os corpos de prova são colocados em um recipiente cheio de água, progressivamente levada à ebulição, mantida por um período de 5 horas. Após o esfriamento natural até a temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, a massa do corpo de prova é registrada com uma balança hidrostática. Obtém-se com a equação 7 a absorção dos corpos de prova de concreto em porcentagem.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

A = Absorção em porcentagem

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura

m_s = massa da amostra seca em estufa

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental realizado buscou identificar a potencialidade de substituição do agregado miúdo por rejeito magnético na composição do concreto. Vários ensaios foram realizados até a obtenção dos resultados finais. As seções seguintes descrevem de forma minuciosa o procedimento utilizado em cada etapa.

3.1. PORCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO

Definir a porcentagem de substituição do agregado miúdo pelo rejeito magnético é fundamental e permite o planejamento dos experimentos subsequentes. O mapeamento sistemático apresentado na revisão da literatura permitiu obter referências para definir a porcentagem de substituição.

A porcentagem média de substituição do agregado miúdo apresentada pelo mapeamento gira em torno de 38%. Considerando este dado, foi estabelecida a margem de 30% como teto máximo da porcentagem de substituição. Portanto, definiu-se 5, 10, 20 e 30% como padrão de substituição neste estudo.

3.2. NOMENCLATURA

Neste estudo, foram utilizadas nomenclaturas específicas para facilitar o perfeito entendimento dos resultados obtidos. Apresenta-se na Tabela 20 as porcentagens de substituição propostas e sua respectiva nomenclatura.

Tabela 20 – Nomenclatura adotada para descrever as diferentes proporções de substituição da areia por magnetita na formulação do concreto.

Porcentagem de substituição (%)	Dosagem
0	A (referência)
5	B
10	C
20	D
30	E

Um concreto referência, sem substituição de areia por rejeito magnético, também foi moldado para efeitos de comparação durante a realização dos ensaios no estado endurecido. Logo, é possível concluir se as porcentagens propostas para substituição são adequadas para a moldagem dos corpos de prova de concreto.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

A caracterização dos componentes utilizados no concreto foi necessária para obtenção do traço e comparação. Foram realizados ensaios físicos e químicos.

Como agregado graúdo foi utilizado brita 1 proveniente de basaltos explorados em pedreiras e o agregado miúdo consistiu em areia quartzosa média obtida da dragagem de leito de rios da região de Catalão/GO.

Cimento Portland CP II-Z-32 da marca CIPLAN foi o aglomerante utilizado no estudo. O material proposto como alternativa de substituição à areia consistiu em rejeito magnético resultante da separação magnética de alto campo realizada no processamento de rocha fosfática.

3.3.1. Massa específica

A massa específica dos agregados e do rejeito magnético foi obtida por meio de picnometria. O ensaio consistiu em obter a massa, com o auxílio de uma balança de precisão, do picnômetro vazio, com o material, com o material e água e, por fim, somente com água. A brita, devido sua granulometria grosseira, foi fragmentada previamente com uma marreta, permitindo que o material fosse adicionado ao picnômetro.

Após realizar as pesagens necessárias, foi possível adquirir com a equação 8 a massa específica dos materiais.

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (8)$$

Onde:

ρ_e = massa específica (g/cm³)

P_1 = massa do picnômetro (g)

P_2 = massa do picnômetro e amostra (g)

P_3 = massa do picnômetro, amostra e água (g)

P_4 = massa do picnômetro e água (g)

A quantidade de material adicionado ao picnômetro foi aproximadamente 1/3 de seu volume disponível. Repetiu-se o ensaio duas vezes para cada material. A massa específica do cimento foi obtida no site do fabricante.

3.3.2. Massa unitária

A massa unitária do agregado graúdo é um dado necessário à obtenção do traço utilizando o método do ABCP. Foi obtida de acordo com o proposto na norma NBR NM 45 (2006). Apresenta-se na Figura 21 o recipiente cilíndrico utilizado no ensaio, possuindo 26,8 cm de altura e 22,0 cm de diâmetro interno.

Figura 21 – Realização do ensaio de obtenção da massa unitária do agregado graúdo.



O primeiro passo consistiu em obter a massa do recipiente vazio. O agregado graúdo foi então adicionado em três camadas. Cada uma delas foi compactada com o auxílio de uma haste de adensamento com 25 golpes. Após este procedimento, o conjunto do recipiente e o agregado graúdo foram pesados, sendo a massa unitária obtida

3.3.3. Módulo de finura

O módulo de finura foi determinado para a areia e o rejeito magnético. Seguiu o recomendado pela norma NBR 7211 (2009). Apresenta-se na Figura 22 o peneirador suspenso de laboratório com as malhas de peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 22 – Peneirador suspenso de laboratório realizando os ensaios de peneiramento.



Aproximadamente 500g de material seco, homogeneizado e quarteado foi peneirado durante 15 minutos. Uma balança de precisão permitiu a pesagem do material retido em cada malha da série normal e intermediária proposta pela norma. O módulo de finura foi obtido somando-se as porcentagens retidas acumuladas em cada malha do peneiramento e dividindo este valor por 100. O ensaio foi repetido três vezes, gerando uma média. Os resultados do peneiramento ainda permitiram a obtenção da curva de distribuição granulométrica dos materiais.

3.3.4. Dimensão máxima característica

A dimensão máxima característica do agregado graúdo foi obtida utilizando-se o descrito pela norma NBR 7211 (2009). O material seco, homogeneizado e quarteado foi peneirado durante 15 minutos nas malhas da série normal e intermediária. Finalizado o procedimento, o material retido foi pesado em uma balança de precisão. A malha com a porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% correspondeu à dimensão máxima característica do material.

O mesmo peneiramento permitiu obter a curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo. A dimensão máxima característica do agregado miúdo (areia) e do rejeito magnético

foi obtida com o mesmo procedimento, utilizando os resultados já gerados no ensaio de determinação do módulo de finura.

3.3.5. Análise química

A análise química elementar foi realizada para todos os componentes do concreto utilizando-se o equipamento EDX-7000 (Shimadzu) de fluorescência de raios – X apresentado na Figura 23. Os resultados foram computados através do *software* PCEDX – Navi.

Figura 23 – EDX-7000 utilizado na análise química dos materiais componentes do concreto.



Os materiais foram adicionados em um recipiente de polipropileno e o mesmo posicionado no centro do equipamento (Figura 24). Ajustou-se o colimador em 10 mm e o ensaio foi iniciado. O tempo de análise foi de aproximadamente 2 minutos para cada material.

Figura 24 – Recipiente com o material centralizado no equipamento antes da análise química.



O equipamento realiza somente análise elementar de sódio (Na) a urânio (U), de acordo com a tabela periódica. Assim, as análises químicas realizadas foram semi quantitativas, isto é, o equipamento fez a varredura da amostra encontrando o elemento químico de maior predominância e proporcionou o restante dos elementos em função deste pico.

Amostras do rejeito magnético peneirado em diversas faixas granulométricas também foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca *Seal Laboratories*, modelo Jeol JSM – 6610 equipado com EDS, no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da Universidade Federal de Goiás.

3.4. TRAÇO

A caracterização dos materiais permitiu obter o traço do concreto utilizando-se o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A princípio, os dados de massa específica, dimensão máxima característica, módulo de finura e massa unitária dos componentes permitiram obter um traço inicial em que a relação água/cimento 0,5 foi estabelecida.

O amassamento dos materiais utilizando o traço inicial proposto foi realizado. O ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) revelou um concreto com baixa trabalhabilidade

(pouca fluidez). Assim, água foi adicionada a mistura e o traço corrigido. Um novo amassamento aconteceu para verificar a trabalhabilidade do novo traço. Caso as condições necessárias não fossem satisfeitas, nova quantidade de água deveria ser adicionada, o traço corrigido e um novo amassamento realizado.

O traço que apresentou boa trabalhabilidade com uma relação água/cimento 0,5 foi utilizado como padrão neste estudo. Somente a quantidade de água adicionada variou, visto que foram moldados corpos de prova com diferentes relações água/cimento.

3.5. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A dosagem correta dos componentes do concreto foi o primeiro passo para a moldagem dos corpos de prova, possível após a obtenção do traço. Com o auxílio de uma balança de precisão, a quantidade exata de cada componente foi pesada e reservada (Figura 25). Foram moldados 4 corpos de prova para cada situação de ensaio, isto é, para cada idade de ruptura, relação água/cimento e porcentagem de substituição. Assim, devido à grande quantidade, as moldagens foram realizadas em datas diferentes. A temperatura e umidade relativa do ar no interior do laboratório foi monitorada em todas as ocasiões.

Figura 25 – Componentes do concreto após dosagem de acordo com o traço utilizado.



A imprimação da betoneira permite a formação de uma película de material em sua superfície interna, evitando que os componentes destinados à moldagem dos corpos de prova fiquem

grudados e gerem perdas significativas no traço dosado. Foi realizada com uma pequena quantidade de material de acordo com o traço utilizado na moldagem. A inclinação do tambor da betoneira em ângulos diferentes permitiu que o material atingisse e recobrisse toda a superfície interna.

O amassamento dos componentes (mistura) foi realizado em uma betoneira de 120 L. Foram adicionados na sequência 60% de toda a água dosada, 100% do agregado graúdo, 100% do cimento, 100% do agregado miúdo e 100% do rejeito magnético nas moldagens com substituição parcial. Por fim, o restante da água foi adicionado.

Após a adição de todos os componentes, estes permaneceram em processo de amassamento durante cinco minutos. Eventualmente a betoneira foi desligada para que o material grudado na superfície interna da mesma pudesse ser removido, voltando a fazer parte da mistura.

Com o amassamento finalizado e o concreto no estado fresco obtido, foi realizada a mensuração de sua consistência. Utilizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) descrito pela norma NBR NM 67 (1998).

O procedimento consistiu em utilizar uma fôrma tronco cônica, uma base plana, haste de compactação, funil e concha para adicionar o material à fôrma. O primeiro passo foi o recobrimento dos materiais com uma fina camada de óleo mineral, impedindo que a mistura resultante do amassamento aderisse à sua superfície.

Na sequência, o operador responsável pela realização do ensaio posicionou o tronco de cone sobre a base plana fixando-o com os pés (Figura 26). Em seguida, adicionou a mistura resultante do amassamento dentro do tronco de cone em três camadas, cada uma sendo golpeada 25 vezes com o auxílio da haste.

Figura 26 - *Slump test* sendo apoiado com os pés pelo operador e haste de adensamento golpeando o material.



Finalizando-se o preenchimento da fôrma tronco cônica, a mesma foi removida na direção vertical. Com a auxílio da haste e utilizando-se uma régua milimetrada, o abatimento do concreto no estado fresco pôde ser mensurado (Figura 27).

Figura 27 – Mensuração do abatimento com o auxílio da haste de adensamento e uma régua milimetrada.



A moldagem dos corpos de prova seguiu o proposto pela norma NBR 5738 (2015). Os moldes utilizados foram fôrmas cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, previamente

recobertos com uma fina película de óleo mineral para facilitar a retirada posterior dos corpos de prova.

A mistura resultante do amassamento dos componentes do concreto foi adicionada com o auxílio de um funil e uma concha às fôrmas cilíndricas em duas camadas, cada uma sendo golpeada 12 vezes com a haste de compactação (Figura 28). A superfície superior foi acertada com uma colher de pedreiro.

Figura 28 – Mistura resultante do amassamento dos componentes do concreto sendo golpeada na fôrma de moldagem.



A mistura permaneceu na fôrma em processo de cura durante 24 horas após a moldagem (Figura 29), sendo posteriormente removida (Figura 30). Seguindo ainda o proposto pela norma NBR 5738 (2015), os corpos de prova foram adicionados a um tanque com água saturada em cal, onde permaneceram em processo de cura até atingirem as idades de ruptura.

Figura 29 – Mistura preenchendo a fôrma em processo de cura durante 24 horas.



Figura 30 – Mistura retirada da fôrma após período de 24 horas de cura, resultando nos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios no estado endurecido.



A superfície irregular dos corpos de prova de concreto após a remoção das fôrmas, como é possível notar na Figura 30, obrigou a realização do faceamento, permitindo obter bases com superfícies lisas e paralelas, evitando-se que o carregamento durante os ensaios de compressão não fosse excêntrico. Este procedimento foi executado com o auxílio de uma faceadora, apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Corpo de prova de concreto posicionado na faceadora para realização do procedimento de corte e regularização de sua superfície.



A nova superfície regular da extremidade superior e inferior dos corpos de prova permitiu que os ensaios de resistência à compressão pudessem ser realizados com aplicação uniforme de carga, sem excentricidade. Apresenta-se na Figura 32 alguns corpos de prova após o processo de faceamento.

Figura 32 – Corpos de prova de concreto com superfície regular após faceamento.



3.6. CURA DOS CORPOS DE PROVA

A cura úmida dos corpos de prova foi realizada em um tanque com água saturada em cal protegido da incidência de raios solares seguindo o proposto pela norma NBR 9479 (2006). Este processo é apresentado na Figura 33. A temperatura foi mantida em 23 ± 2 °C, monitorada com um termômetro digital a laser e registrada em um livro controle.

Figura 33 – Tanque utilizado na cura dos corpos de prova de concreto.



O tanque possuía um dreno, um chuveiro quente, torneira com água natural e aquecedores para controle da temperatura, monitorada três vezes ao dia. A água era esgotada caso a temperatura fosse diferente do padrão necessário, sendo adicionada nova quantidade quente (chuveiro) ou fria (torneira).

3.7. ENSAIOS DO CONCRETO ENDURECIDO

A vida útil de um concreto utilizado em uma obra se dará basicamente no estado endurecido. Portanto, obter informações acerca das propriedades do concreto neste estado é fundamental. As seções seguintes apresentam a metodologia empregada na realização de alguns ensaios com os corpos de prova de concreto após sua cura e endurecimento.

3.7.1. Resistência mecânica à compressão

Os ensaios para a determinação da resistência mecânica à compressão dos corpos de prova foram realizados seguindo o proposto pela norma NBR 5739 (2007). A prensa I-3001-C

Contenco hidráulica manual digital, com precisão de 10 kg e capacidade de 100 toneladas, auxiliou no procedimento.

Os corpos de prova foram posicionados no centro dos pratos de compressão da prensa (Figura 34). O ensaio realizou-se com aplicação uniforme e constante de carga até o corpo de prova romper. Todos os ensaios foram realizados pelo mesmo operador, buscando minimizar oscilações nos resultados. O valor correspondente à carga de ruptura foi obtido no manômetro digital através do pico máximo alcançado.

Figura 34 – Corpo de prova posicionado na prensa hidráulica antes do ensaio de ruptura por compressão.



Apresenta-se na Figura 35 o corpo de prova após ruptura. Os resultados foram anotados, inicialmente, em cadernetas de campo e, posteriormente, transferidos para planilhas eletrônicas.

Figura 35 – Corpo de prova após ruptura por compressão na prensa hidráulica.



3.7.2. Resistência mecânica à tração

O ensaio de compressão diametral para obtenção da resistência à tração dos corpos de prova também foi realizado na mesma prensa hidráulica manual seguindo o estabelecido pela norma NBR 7222 (2011) de forma adaptada.

O prato superior da prensa hidráulica não possuía diâmetro condizendo com o comprimento do corpo de prova (20 cm) para realização do ensaio de tração por compressão diametral. Logo, foi necessário a confecção de uma chapa de aço totalmente lisa, livre de ranhuras ou rugosidade, com 20 cm de comprimento, 5 cm de largura e 2,54 cm de espessura. A mesma foi utilizada na parte inferior e superior do corpo de prova, buscando manter um padrão no ensaio.

O corpo de prova foi posicionado no centro dos pratos da prensa e das chapas de aço, de forma que a carga aplicada fosse distribuída uniformemente no mesmo plano axial, tanto na parte inferior como superior. Observa-se na Figura 36 o corpo de prova devidamente posicionado antes da realização do ensaio de tração.

Figura 36 – Corpo de prova devidamente posicionado entre os pratos de compressão da prensa e as chapas de aço antes do ensaio de ruptura por tração.



A carga foi aplicada de maneira uniforme e constante até a ruptura do corpo de prova (Figura 37). O pico máximo de carga alcançado foi mensurado no manômetro digital da prensa hidráulica e anotado na caderneta de campo.

Figura 37 – Corpo de prova após ruptura por tração por meio do ensaio de compressão diametral.



3.7.3. Absorção por imersão

Os ensaios de absorção por imersão foram realizados de forma adaptada ao proposto pela norma NBR 9778 (2005) aos 28 dias de cura de cada formulação utilizada pelo estudo. Os corpos de prova seguiram em processo de cura à temperatura de 23 ± 2 °C até atingirem a idade de 25 dias, quando foram removidos do tanque e direcionados a uma balança para aferição de seu peso saturado.

Os corpos de prova foram então encaminhados a uma estufa, da marca Odontobras, à temperatura de 105 ± 5 °C, onde permaneceram durante 72 horas, atingindo a idade de 28 dias (Figura 38). Após sua remoção da estufa e processo de equilíbrio térmico à temperatura ambiente por alguns minutos, o peso seco dos corpos de prova foi mensurado novamente com o auxílio de uma balança. Estes dados propiciaram o cálculo da porcentagem de absorção por imersão de cada formulação de concreto utilizada.

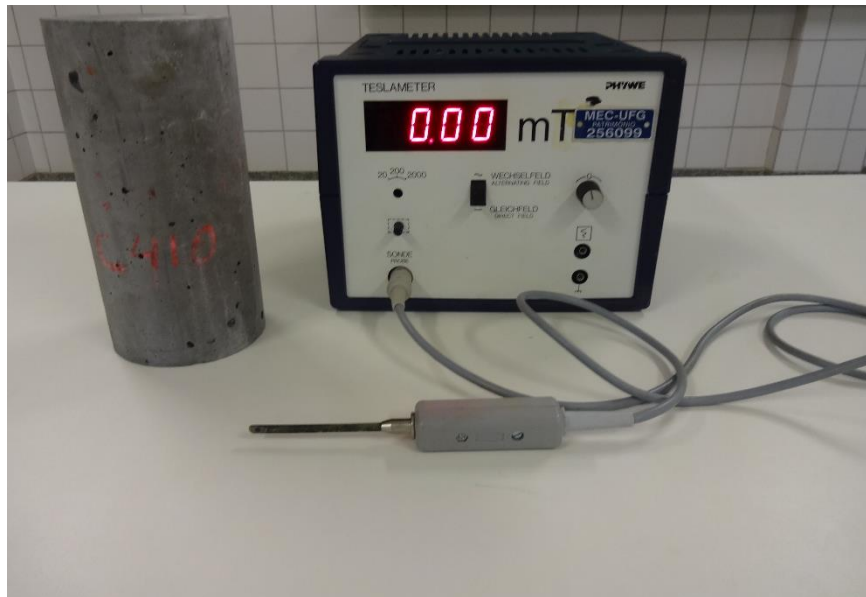
Figura 38 – Estufa utilizada na secagem dos corpos de prova de concreto para realização dos ensaios de absorção por imersão.



3.7.4. Campo magnético

A mensuração do possível campo magnético gerado pelos corpos de prova foi realizada com o auxílio de um gaussímetro digital Phywe (Figura 39) que abrangia várias faixas de medição (0 a 1000 mT).

Figura 39 – Corpo de prova e gaussímetro utilizado na medição do campo magnético.



A escala de medição do gaussímetro foi zerada e o campo magnético dos corpos de prova mensurado com o auxílio das sondas axiais e tangenciais. O ensaio foi realizado em quatro amostras de cada composição proposta no estudo. Apresenta-se na Figura 40 a medição do campo magnético utilizando a sonda tangencial.

Figura 40 – Medição do campo magnético do corpo de prova de concreto utilizando uma sonda tangencial.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos com os ensaios do concreto moldado com substituição da areia por rejeito magnético e realiza discussão acerca dos mesmos.

Apresenta-se na Tabela 21 o consumo dos componentes do concreto por metro cúbico e o traço inicial utilizado na moldagem dos corpos de prova. As variações estão relacionadas à quantidade de água adicionada (relação água/cimento) e a porcentagem de substituição da areia por rejeito magnético.

Tabela 21 - Consumo dos componentes e traço inicial obtido com o auxílio do método da ABCP e corrigido experimentalmente.

	Cimento	Areia	Brita	Água
Consumo (kg/m ³)	440	643	1088	220
Traço	1,0	1,5	2,5	0,5

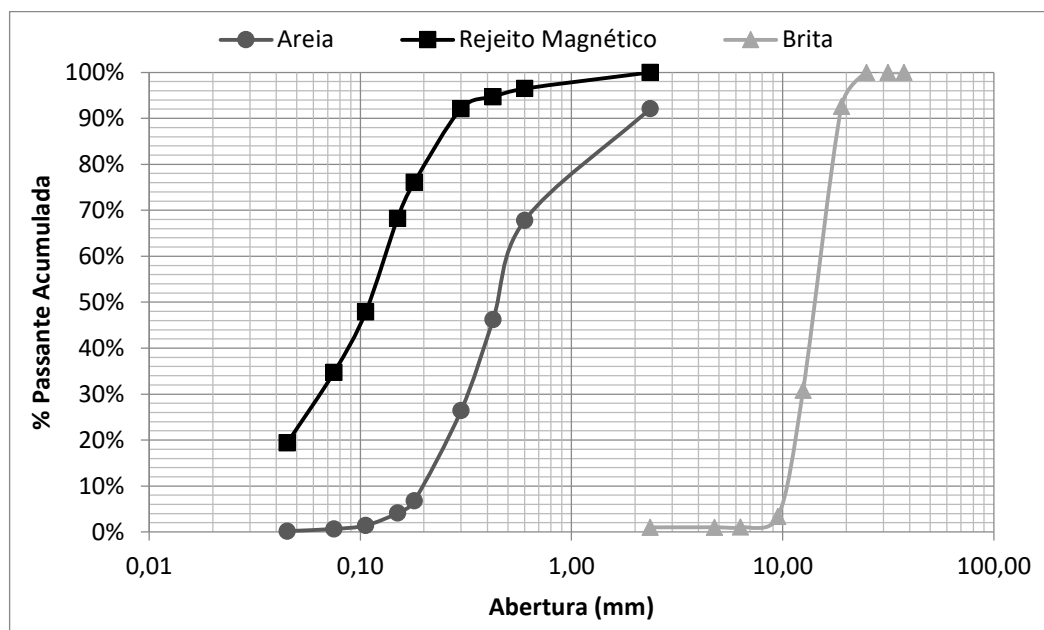
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO CONCRETO

A caracterização física e química dos componentes utilizados na moldagem dos corpos de prova de concreto é necessária para se entender sua influência nas propriedades no estado fresco e endurecido.

4.1.1. Caracterização física

Apresenta-se na Figura 41 as curvas de distribuição granulométrica dos materiais que considera o tamanho das partículas e sua concentração nas faixas granulométricas utilizadas no peneiramento.

Figura 41 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados utilizados na formulação do concreto.



Atenção especial é necessária à comparação entre as massas específicas da areia e do rejeito magnético. A discrepância entre os dois dados proporciona concretos com massa específica superior ao padrão.

4.1.2. Caracterização química

Nas Figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam-se os gráficos de análise química elementar dos materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova de concreto e, a Tabela 23, as respectivas porcentagens de cada elemento químico presente, permitindo a comparação entre os mesmos.

Figura 42 – Gráfico de análise química da areia por meio de fluorescência de raios – X (EDX).

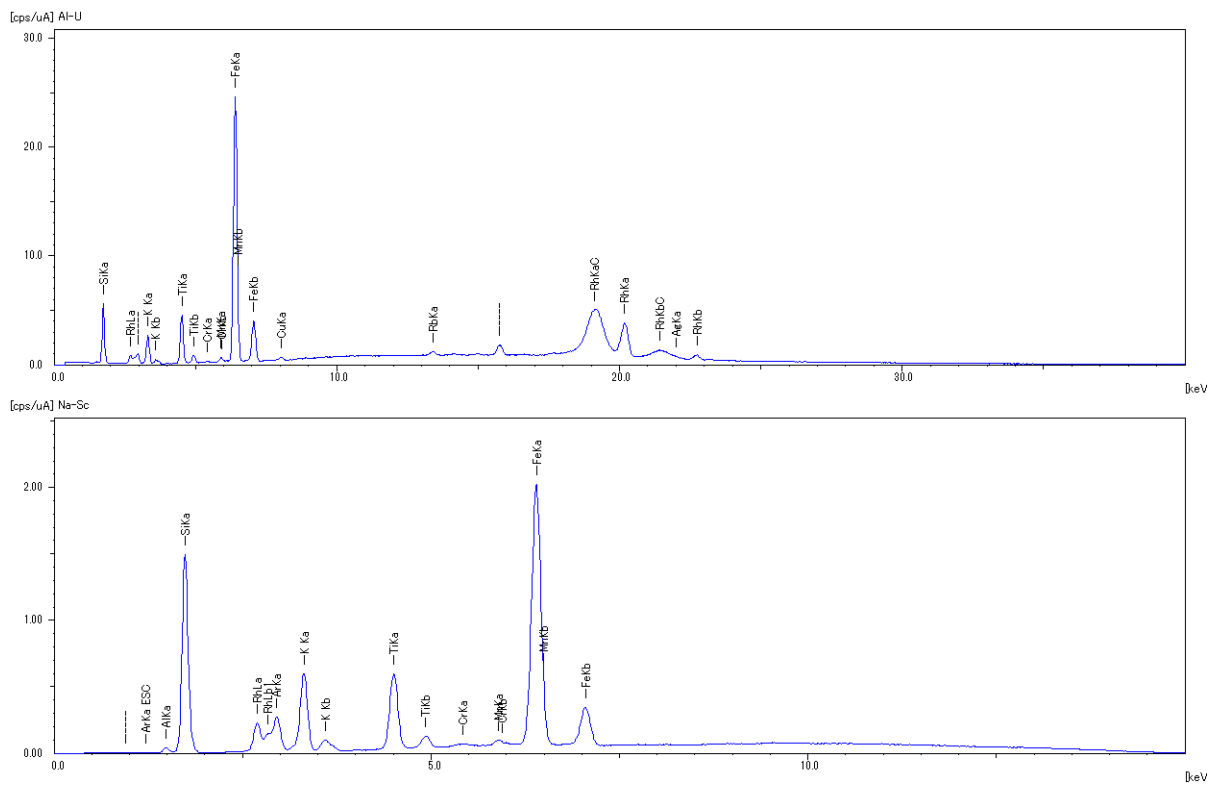


Figura 43 - Gráfico de análise química da brita por meio de fluorescência de raios - X (EDX).

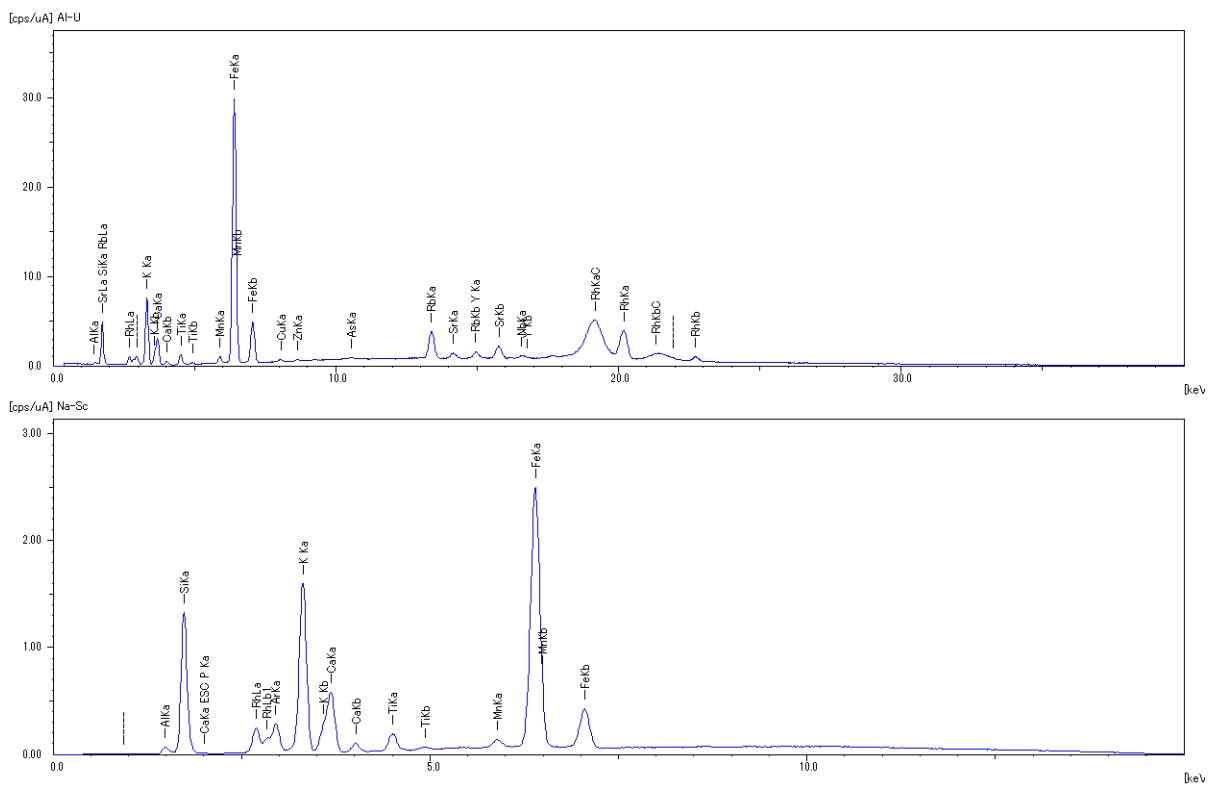


Figura 44 - Gráfico de análise química do cimento por meio de fluorescência de raios - X (EDX).

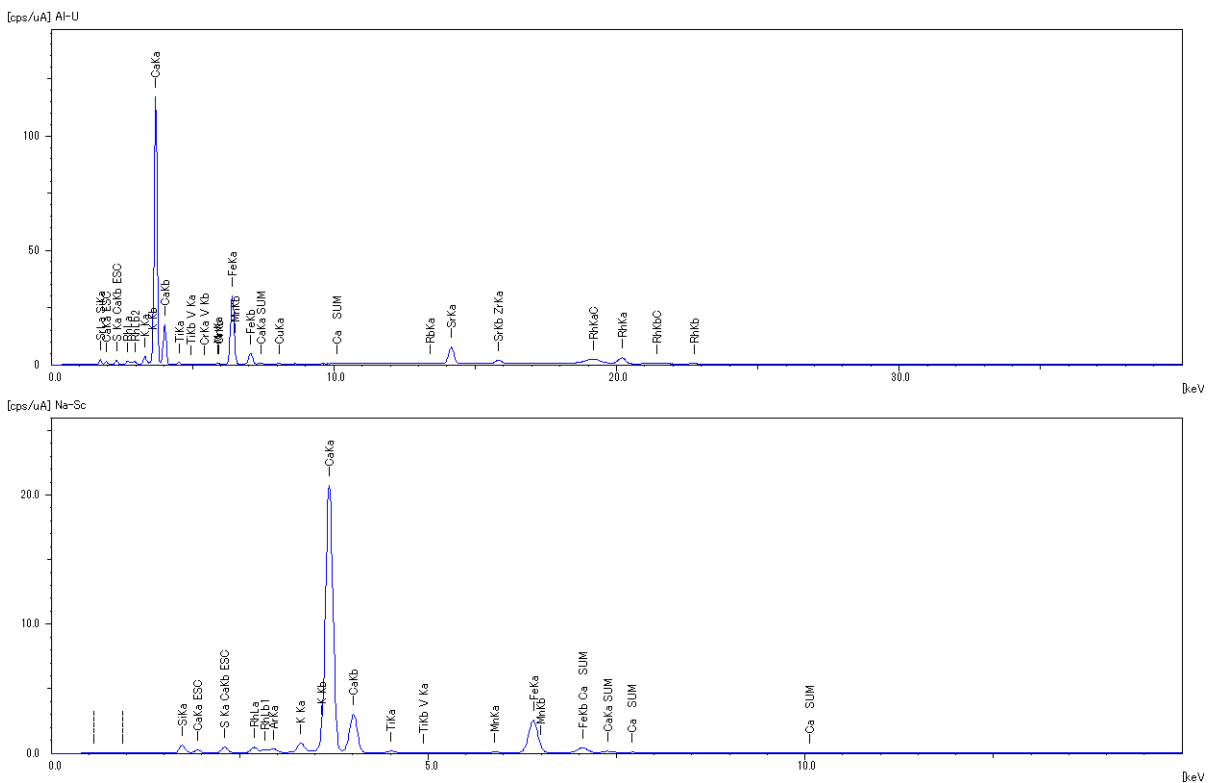


Figura 45 - Gráfico de análise química do rejeito magnético por meio de fluorescência de raios – X (EDX).

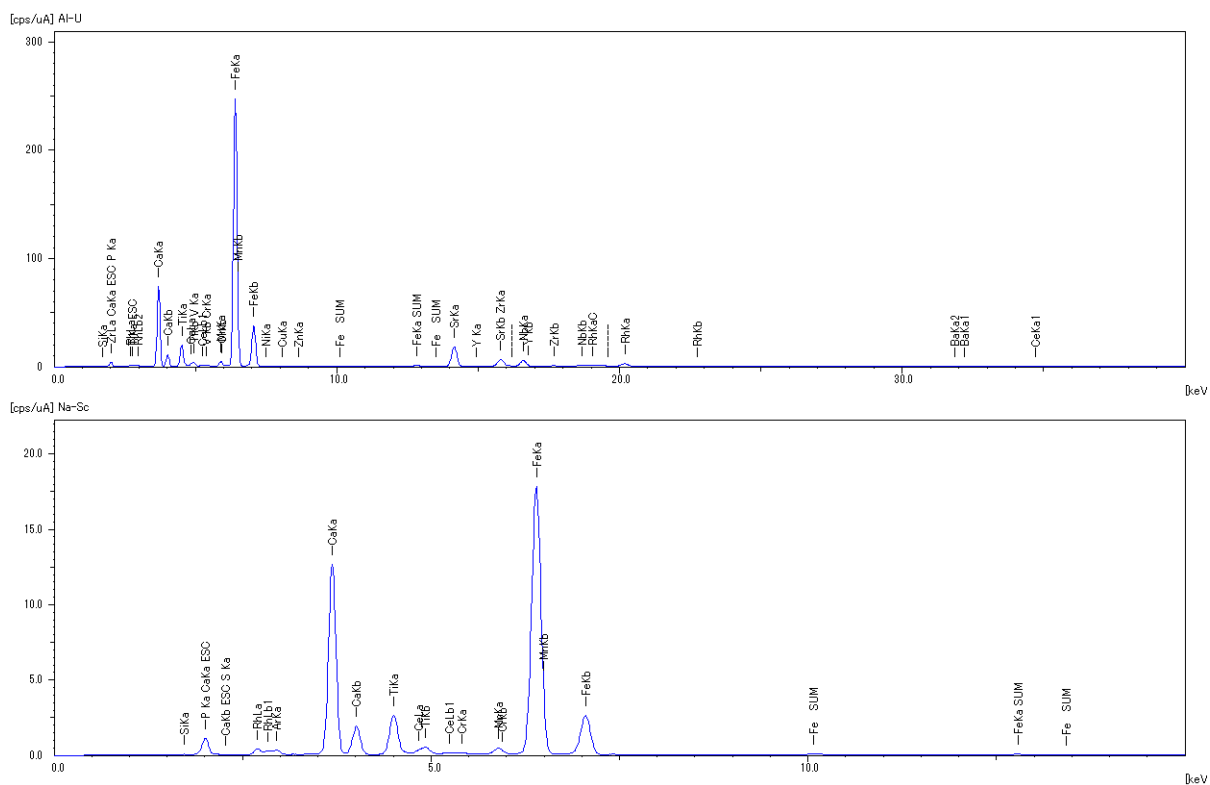


Tabela 23 – Resultados da análise química (em porcentagem) dos materiais realizada com EDX.

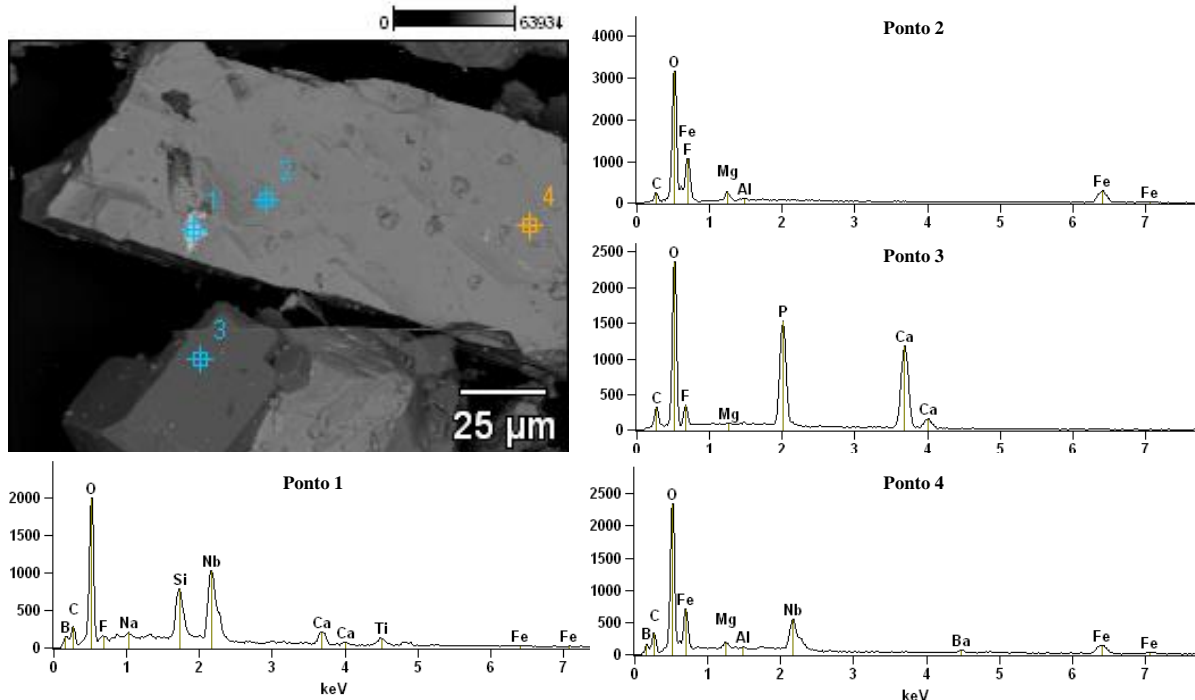
Elemento	Areia	Brita	Cimento	Rejeito magnético
Al	6,84	11,03	0,00	0,00
Si	76,24	62,06	15,36	1,59
P	0,00	0,07	0,00	11,58
S	0,00	0,00	1,94	0,02
K	6,89	14,49	2,45	0,00
Ca	0,00	4,14	71,24	31,70
Ti	3,40	0,80	0,72	7,38
V	0,00	0,00	0,04	0,16
Cr	0,04	0,00	0,03	0,19
Mn	0,12	0,22	0,15	0,85
Fe	6,29	6,79	7,39	42,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,03
Cu	0,05	0,05	0,03	0,09
Zn	0,00	0,03	0,00	0,07
Rb	0,03	0,25	0,02	0,00
Sr	0,00	0,05	0,59	1,66
Y	0,00	0,02	0,00	0,03
Zr	0,00	0,00	0,03	0,32
Nb	0,00	0,02	0,00	0,50
Ag	0,10	0,00	0,00	0,00
Ce	0,00	0,00	0,00	1,80

A análise do rejeito magnético e da areia revela dois materiais quimicamente diferentes, o último possuindo altas concentrações de sílica, fato que revela sua origem a partir de minerais de quartzo presentes no leito de rios de onde é extraída. O rejeito magnético, ao contrário, apresenta altas concentrações de ferro e cálcio.

O ferro, juntamente com o oxigênio, são os dois elementos químicos componentes da magnetita, mineral predominante no rejeito magnético, justificando sua alta concentração. Além disso, as altas concentrações de cálcio representam a presença do mineral-minério apatita.

Apresenta-se na Figura 46 partículas de rejeito magnético retido na malha de 200# (*mesh*). Observando-se os gráficos de análise química dos pontos destacados na imagem de microscopia eletrônica de varredura é possível inferir a presença de diversos elementos químicos. Logo, o rejeito magnético é composto por vários minerais diferentes. As propriedades magnéticas deste material, que permitem sua separação no processamento de rocha fosfática, são atribuídas aos minerais de ferro (magnetita, hematita e goethita), também presentes.

Figura 46 - Partículas de rejeito magnético retidas na malha de 200# e gráficos de análise química dos pontos destacados (imagem obtida com microscopia eletrônica de varredura).



4.2. CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Os dados de consistência (*slump test*) do concreto no estado fresco coletados durante a moldagem dos corpos de prova são apresentados na Tabela 24. Além disso, a umidade e a temperatura do laboratório são apresentadas nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 24 – Resultados do abatimento do tronco de cone (*slump test*) em milímetros para avaliação da consistência do concreto.

Dosagem	Relação a/c			
	0,4	0,5	0,6	0,7
A	1,8	10,2	24,7	26,3
B	2,8	9,0	22,0	26,0
C	2,3	8,7	22,0	26,0
D	0,0	5,2	22,3	27,7
E	3,8	5,7	22,3	27,0

Tabela 25 – Umidade relativa do ar (%) do laboratório durante a moldagem dos corpos de prova.

Dosagem	Relação a/c			
	0,4	0,5	0,6	0,7
A	89	68	60	89
B	76	74	83	86
C	74	75	85	83
D	86	83	86	79
E	81	88	89	75

Tabela 26 – Temperatura (°C) do laboratório durante a moldagem dos corpos de prova.

Dosagem	Relação a/c			
	0,4	0,5	0,6	0,7
A	23,6	27,1	29,8	26,3
B	29,6	26,9	28,0	26,9
C	28,7	26,6	26,6	25,8
D	25,9	26,4	24,6	27,9
E	26,1	23,5	25,6	30,1

A adição crescente de água ao concreto torna-o menos consistente e melhora sua trabalhabilidade, traduzindo-se em maiores abatimentos. O alto módulo de finura do rejeito magnético influencia diretamente o concreto com relação água/cimento 0,5. A crescente porcentagem deste material permite obter concretos mais coesos e com menor trabalhabilidade.

A situação descrita não é apresentada pelos concretos moldados com relação água/cimento 0,4, 0,6 e 0,7. A quantidade de água, mínima ou exagerada, mascara a influência do rejeito

magnético, neutralizando o efeito que materiais extremamente finos causam a quantidade de água consumida pelo concreto em ambas as dosagens.

4.3. CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados com os corpos de prova após a cura úmida são necessários para determinar as propriedades do concreto no estado endurecido. Os tópicos subsequentes apresentam os dados de resistência mecânica à compressão e à tração, absorção por imersão e campo magnético.

4.3.1. Resistência mecânica à compressão

A análise estatística permite obter conclusões a respeito da comparação entre os resultados considerando o desvio padrão dos mesmos. Portanto, ao longo desta e das próximas seções os dados iguais serão aqueles estatisticamente semelhantes.

Na Tabela 27, é possível avaliar os resultados de resistência mecânica à compressão para os corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,4. Considerando a análise dos dados em linha, a dosagem E apresenta ganhos mínimos de resistência entre 7 e 14 dias de cura, somente 2,1% em relação à resistência final. Entretanto, aos 28 dias, atinge 92,7% da resistência final, que ainda sofre acréscimo aos 56 dias. As dosagens A e D apresentam resultados semelhantes entre 7 e 14 dias, com acréscimo importante aos 28 e 56 dias. A dosagem B atinge 92,4% de sua resistência final aos 14 dias e a dosagem C apresenta resistência final logo nos primeiros dias de cura, considerando a análise estatística realizada.

Tabela 27 – Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,4$ e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	27,77	aA	26,21	aA	32,21	bA	36,01	bA
B	26,99	aA	29,91	bA	30,52	bA	32,37	bA
C	29,56	aA	33,53	aB	33,93	aA	35,66	aA
D	34,48	aB	34,90	aB	38,78	bB	41,05	bB
E	27,70	aA	28,41	aA	30,52	bA	32,91	cA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

A análise estatística dos resultados em coluna demonstra um fato importante. De forma geral, a dosagem D obteve a melhor resistência mecânica à compressão em todas as idades de cura propostas, excetuando-se aos 14 dias em que a dosagem C também se sobressai.

É importante destacar que em todas as idades de cura e dosagens propostas os resultados são semelhantes ou melhores (dosagem D, no caso) ao concreto de referência adotado para efeitos de comparação. Logo, moldagens com relação água/cimento 0,4 substituições de até 30% da areia por rejeito magnético não causam prejuízos às propriedades de resistência mecânica à compressão.

Apresenta-se na Figura 48 o gráfico dos valores médios de resistência mecânica à compressão das dosagens e idades de cura propostas, além do desvio padrão dos resultados. Sua análise superficial deixa claro que a dosagem D obtém os melhores resultados (Figura 49). A dosagem A (referência) apresenta dados de resistência mecânica maior que as dosagens B, C e E em algumas idades de ruptura. Entretanto, o desvio padrão dos resultados observado na Figura 48, torna os dados semelhantes.

Figura 47 – Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,4.

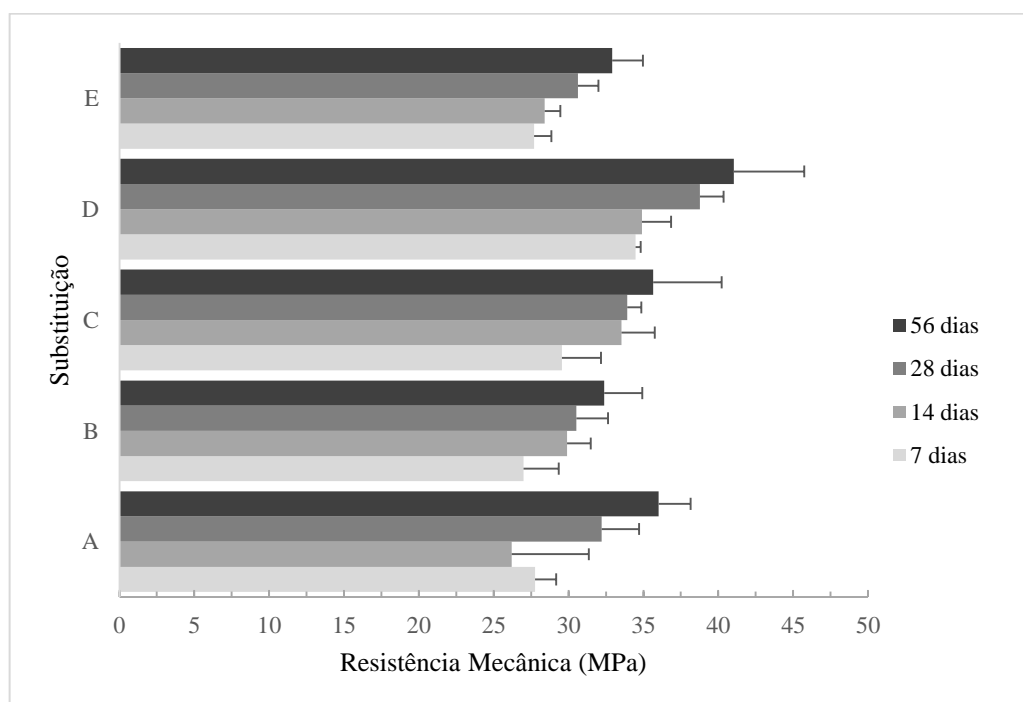
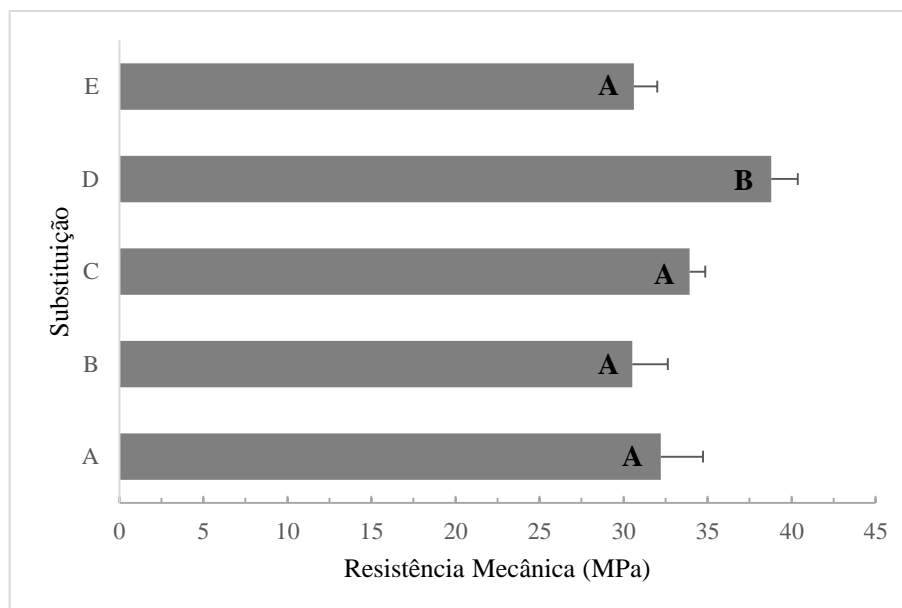


Figura 48 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,4$ aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Os resultados dos ensaios de ruptura por compressão dos corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,5 são apresentados na Tabela 28. As dosagens A, B, C e D têm comportamento semelhante considerando a resistência mecânica à medida que a idade de cura avança. Entre 7 e 14 dias de cura, a resistência mantém-se. Aos 28 dias, há um acréscimo considerável, em que os corpos de prova atingem a maior parte de sua resistência final, perdurando-se nas idades subsequentes.

A dosagem E, entretanto, segue comportamento diferente. Aos 7 dias de cura, o concreto atinge resistência considerável, aumentando até os 14 dias, quando atinge 91,4% de sua resistência final. Nas idades posteriores, os resultados tendem a se manter.

Tabela 28 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,5$ e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	19,02	aA	20,82	aA	24,18	bA	26,23	bA
B	20,16	aA	23,46	aB	26,32	bA	29,71	bA
C	24,09	aB	25,43	aC	27,61	bB	29,57	bA
D	25,68	aB	26,93	aD	29,58	bB	31,78	bA
E	24,21	aB	28,15	bD	30,06	bB	30,81	bA

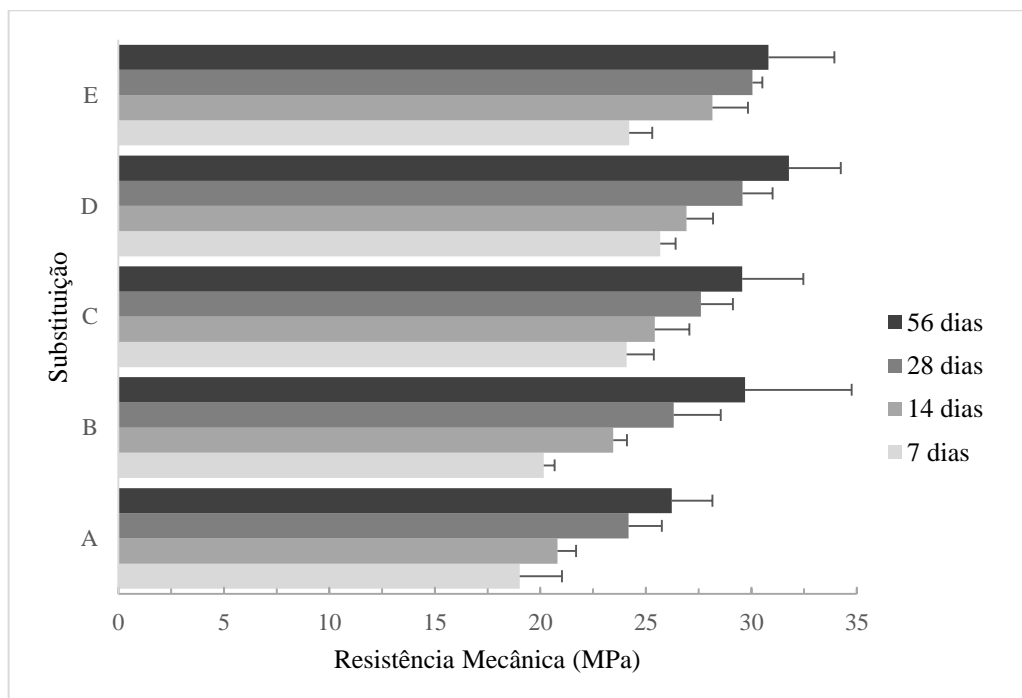
Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Analisando os dados em coluna, percebe-se que, aos 7 e 28 dias de cura, as dosagens C, D e E obtêm os melhores resultados de resistência mecânica à compressão. Aos 14 dias, o aumento corresponde à adição crescente de rejeito magnético em substituição da areia no concreto, estabilizando-se nas dosagens D e E. Em idades de cura mais avançadas (56 dias), todas as dosagens propostas apresentam dados semelhantes de resistência.

Portanto, de forma geral, desde as primeiras idades de cura até os 28 dias, as dosagens C, D e E proporcionam os melhores resultados. Entretanto, vale ressaltar que, de acordo com a aplicação do concreto, aos 56 dias de cura, todas as substituições levam a resultados semelhantes. Em todas as idades de cura e dosagens propostas, os resultados sempre são semelhantes ou melhores que o concreto de referência (dosagem A), o que permite a substituição de areia por rejeito magnético até 30% na composição de um concreto sem prejuízos às propriedades de resistência mecânica à compressão.

Apresenta-se na Figura 50 a média dos resultados de ruptura por compressão dos corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,5 e seus respectivos desvios padrões.

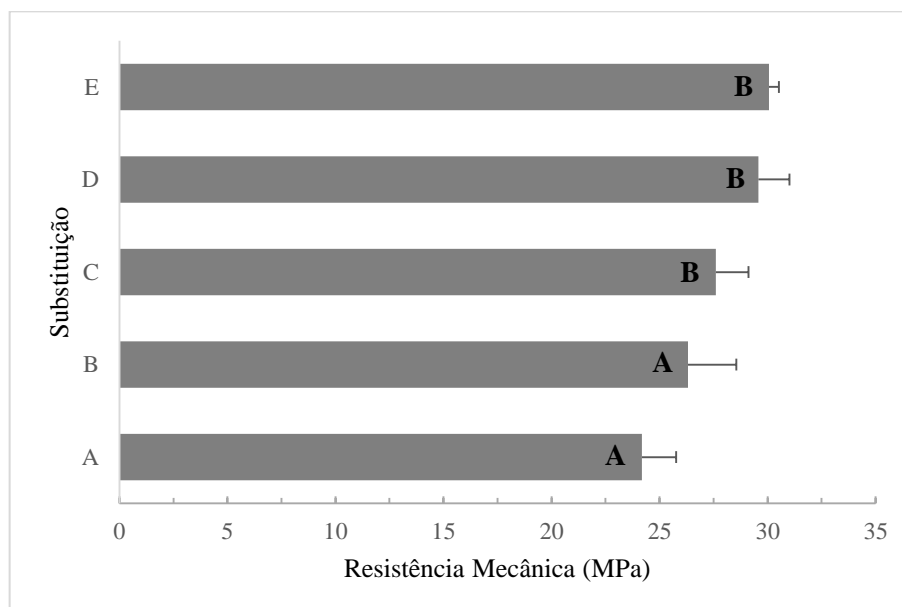
Figura 49 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,5.



Apresenta-se na Figura 51 o gráfico individual dos resultados médios de ruptura por compressão dos corpos de prova, moldados com relação água/cimento 0,5, aos 28 dias de cura,

os respectivos desvios padrões e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott*. Fica claro que os melhores resultados são obtidos pelas dosagens C, D e E.

Figura 50 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$ aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Apresenta-se na Tabela 29 os dados de resistência mecânica à compressão de corpos de prova de concreto, moldados com relação água/cimento 0,6. A análise em linha da dosagem A revela um concreto com ganhos de resistência até os 56 dias de cura. A dosagem B apresenta comportamento semelhante. No entanto, ocorre estabilização dos resultados entre 14 e 28 dias de cura, com posterior acréscimo ainda aos 56 dias.

A resistência mecânica adquirida nas primeiras idades pela dosagem C mantém-se semelhante até 14 dias de cura, período em que os corpos de prova apresentam novamente melhora nos resultados e estabilizam-se entre 28 e 56 dias de cura. Na dosagem D, ocorre um ganho considerável após 7 dias de cura e com 14 dias os corpos de prova já atingiram 90% da resistência final alcançada aos 56 dias. A dosagem E, porém, contraria todos os outros resultados. Estatisticamente, os corpos de prova atingem sua resistência final logo nos primeiros 7 dias de cura, mantendo-se constante em idades posteriores.

Tabela 29 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação a/c=0,6 e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	16,83	aB	18,92	bA	20,05	cA	21,79	cA
B	17,01	aB	19,80	bA	20,75	bA	23,13	cA
C	18,44	aB	19,62	aA	21,28	bA	22,40	bA
D	14,10	aA	18,12	bA	20,04	bA	20,13	bA
E	17,15	aB	19,19	aA	19,12	aA	22,23	aA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Os resultados da Tabela 29 mostram-se iguais para todas as dosagens propostas nas idades de 14, 28 e 56 dias de cura, considerando a análise dos dados em coluna. Entretanto, em períodos iniciais de cura, a dosagem D apresentou-se inferior aos resultados obtidos nas demais dosagens, inclusive com relação à referência (dosagem A).

Apresenta-se na Figura 53 os valores médios de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,6 e seus respectivos desvios padrões. É possível notar a inferioridade do resultado apresentado pela dosagem D aos 7 dias de cura. O gráfico apresentado na Figura 54 dos resultados médios de resistência mecânica à compressão e análise estatística realizada com o teste *Scott-Knott* reforça ainda mais este fato.

Figura 51 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,6.

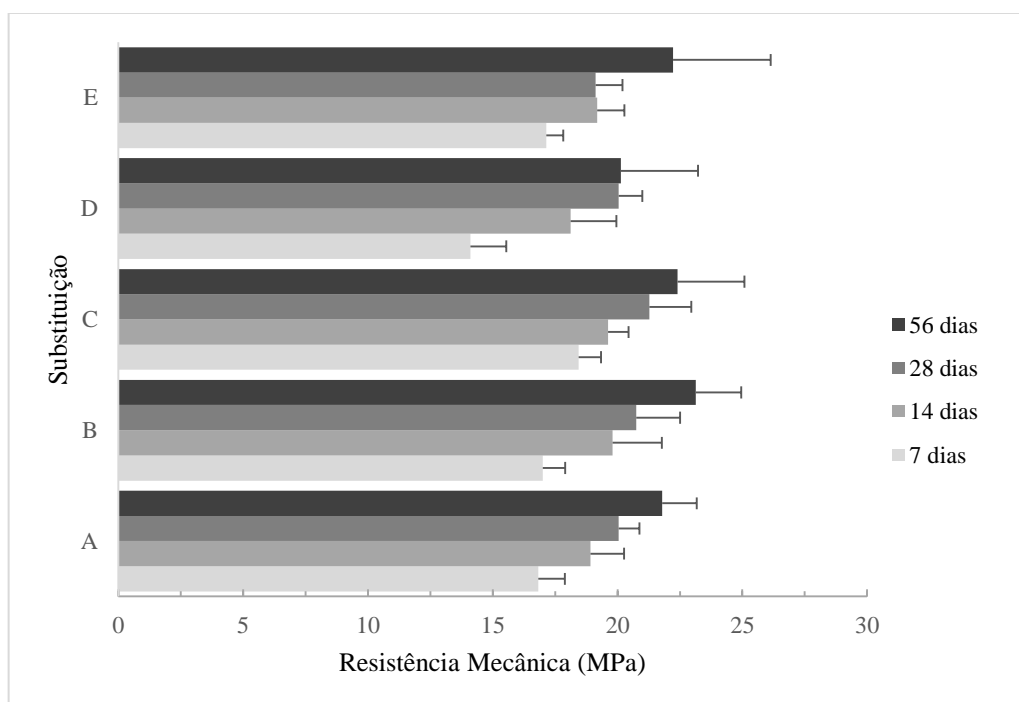
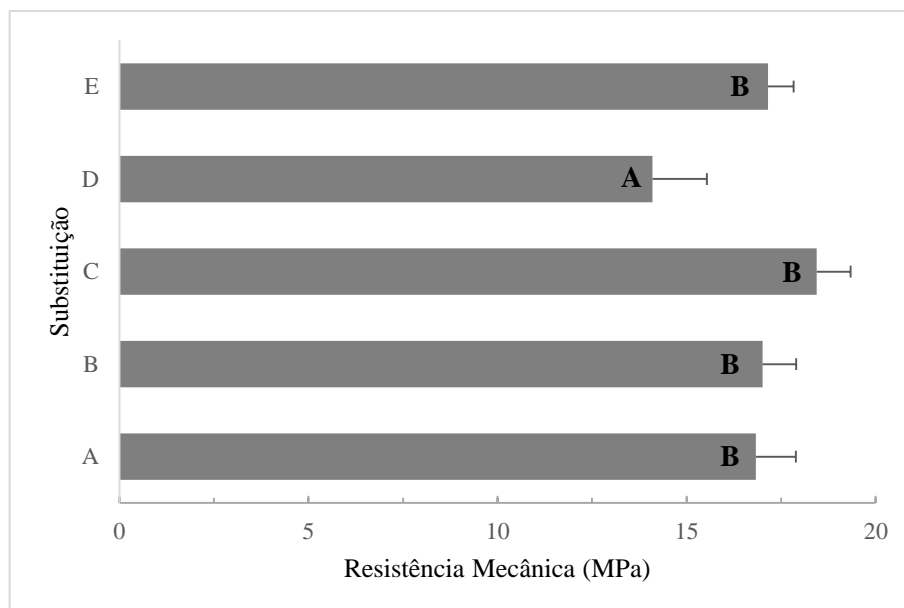


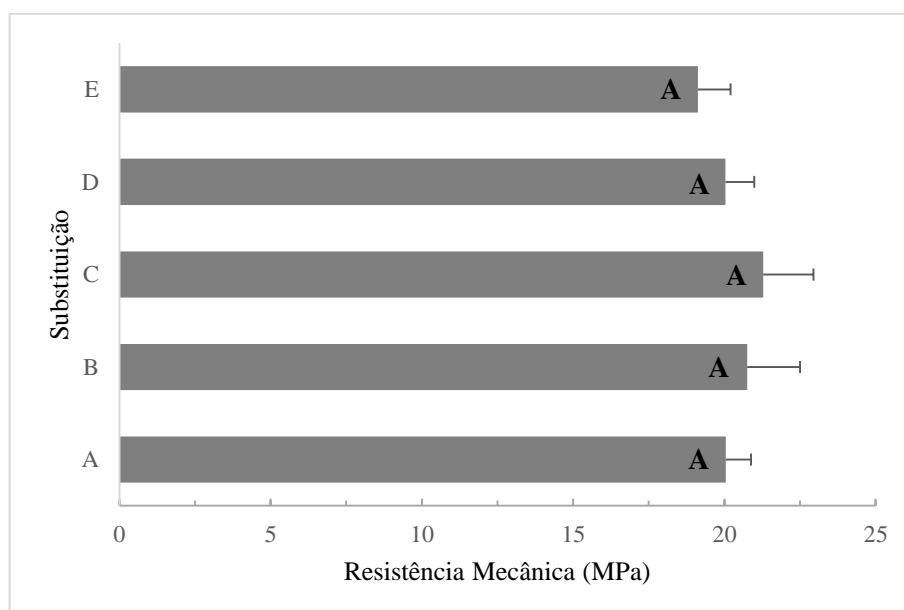
Figura 52 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$ aos 7 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Mesmo a dosagem D apresentando resultados inferiores as demais durante o período inicial de cura, aos 28 dias possui resultados semelhantes. Observa-se na Figura 55 os dados de resistência mecânica à compressão aos 28 dias de cura com a respectiva análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott*.

Figura 53 - Valores médios de resistência mecânica à compressão, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,6$ aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Na Tabela 30, estão os dados de resistência mecânica à compressão de corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,7 e sua respectiva análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott*.

Analisando os dados em linha, as dosagens D e E apresentam comportamento semelhante. Já nos primeiros dias de cura, os corpos de prova adquirem a maior parte de sua resistência final, fato que normalmente acontece aos 28 dias. A dosagem C mantém sua resistência estável entre 7 e 28 dias, aumentando, consideravelmente, na última idade de ruptura proposta. As dosagens A e B demonstram ganhos interessantes de resistência entre 7 e 14 dias, mantendo-se semelhante até os 56 dias de cura.

Tabela 30 - Valores médios de resistência mecânica à compressão (MPa) de corpos de prova com relação a/c=0,7 e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

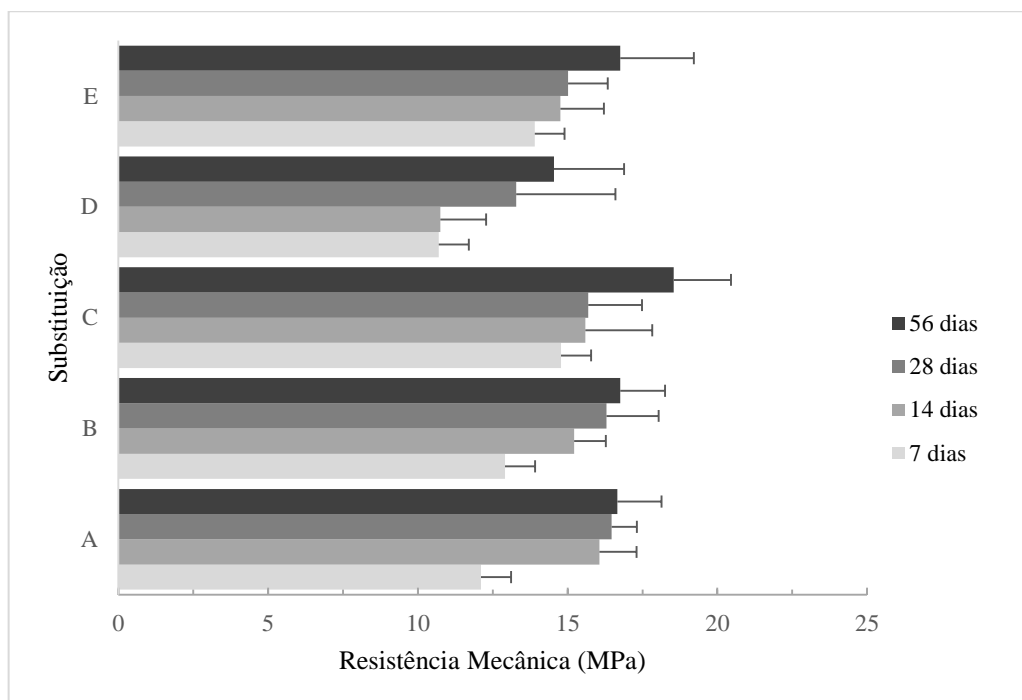
Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	12,11	aA	16,06	bB	16,47	bA	16,66	bA
B	12,91	aB	15,22	bB	16,30	bA	16,76	bA
C	14,78	aB	15,59	aB	15,69	aA	18,54	bA
D	10,70	aA	10,75	aA	13,28	aA	14,54	aA
E	13,90	aB	14,76	aB	15,01	aA	16,76	aA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Em ambas as idades de ruptura, a dosagem D apresenta valores de resistência mecânica à compressão inferior as demais dosagens. Entretanto, devido ao desvio padrão apresentado pelos dados, ainda é possível considerar esta dosagem semelhante as demais aos 28 e 56 dias de cura.

Apresenta-se na Figura 56 o gráfico com os valores médios de resistência mecânica à compressão de corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,7. Considerando somente os resultados sem o desvio padrão apresentado no gráfico, a dosagem D possui os piores resultados de resistência mecânica à compressão em todas as idades de cura em que os ensaios de ruptura são realizados.

Figura 54 - Valores médios de resistência mecânica à compressão e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,7.



Uma análise geral dos dados de resistência mecânica à compressão apresentada nesta seção é importante. Concretos com mínima quantidade de água apresentam resistência mecânica maior e baixa trabalhabilidade, com a dosagem D sobressaindo-se às demais.

A relação água/cimento 0,5 proporciona concretos com boa resistência mecânica e trabalhabilidade, sendo que as dosagens C, D e E se destacam nas primeiras idades de ruptura, estabilizando-se as demais em idades mais avançadas.

Com a adição contínua de água ao concreto, a trabalhabilidade melhora em prejuízo da resistência mecânica. A dosagem D apresenta os piores resultados em períodos iniciais de cura. No entanto, se iguala às demais em idades avançadas.

Uma relação água/cimento 0,7 deixa o concreto com resistência mecânica ainda menor. A dosagem D apresenta resultados insatisfatórios, abaixo do concreto moldado como referência sem substituição de areia por rejeito magnético.

Portanto, de forma geral, considerando a idade de 28 dias de cura, na qual o concreto já atingiu praticamente grande parte de sua resistência mecânica final, as dosagens B, C e E podem ser utilizadas sem prejuízos às propriedades do concreto em qualquer relação água/cimento, equiparando-se à dosagem A (concreto referência). A dosagem D apresenta excelentes

resultados de resistência mecânica em concretos moldados com baixa relação água/cimento. Em situação oposta, no concreto com grande quantidade de água, obtém os piores resultados.

4.3.2. Resistência mecânica à tração

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à tração de corpos de prova com relação água/cimento 0,4 são apresentados na Tabela 32. A análise em linha dos dados utilizando o teste estatístico de comparação *Scott-Knott* permite identificar comportamento semelhante entre as dosagens A, B, C e E. Estas atingem a grande parte resistência final logo nas primeiras idades, inclusive o concreto utilizado como referência (dosagem A). Somente a dosagem D foge a este padrão, demonstrando ganhos importantes entre 7 e 14 dias.

Tabela 31 - Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação a/c=0,4 e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	3,55	aA	3,34	aA	3,04	aA	3,47	aA
B	2,92	aA	3,48	aA	3,25	aA	3,11	aA
C	2,91	aA	3,36	aA	3,32	aA	3,77	aB
D	3,23	aA	3,98	bA	4,07	bB	4,14	bB
E	2,73	aA	2,83	aA	3,07	aA	3,48	aA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

A variação da resistência mecânica à tração das diversas dosagens propostas ao longo das idades de ruptura é analisada com o teste estatístico em coluna. Nos períodos iniciais de cura (7 e 14 dias), os dados são iguais, isto é, ambas as substituições apresentam valores semelhantes de resistência mecânica, deixando claro que a substituição de areia por rejeito magnético não causa prejuízos ao concreto. Aos 28 dias, a dosagem D destaca-se entre as demais. O comportamento repete-se aos 56 dias, além da dosagem C também obter bons resultados em comparação com a dosagem referência.

Apresenta-se na Figura 58 os valores médios de resistência mecânica à tração dos corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,4. Nota-se que em idades mais avançadas a dosagem D destaca-se entre as demais. Aos 28 dias (Figura 59), este fenômeno fica claro.

Figura 55 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,4.

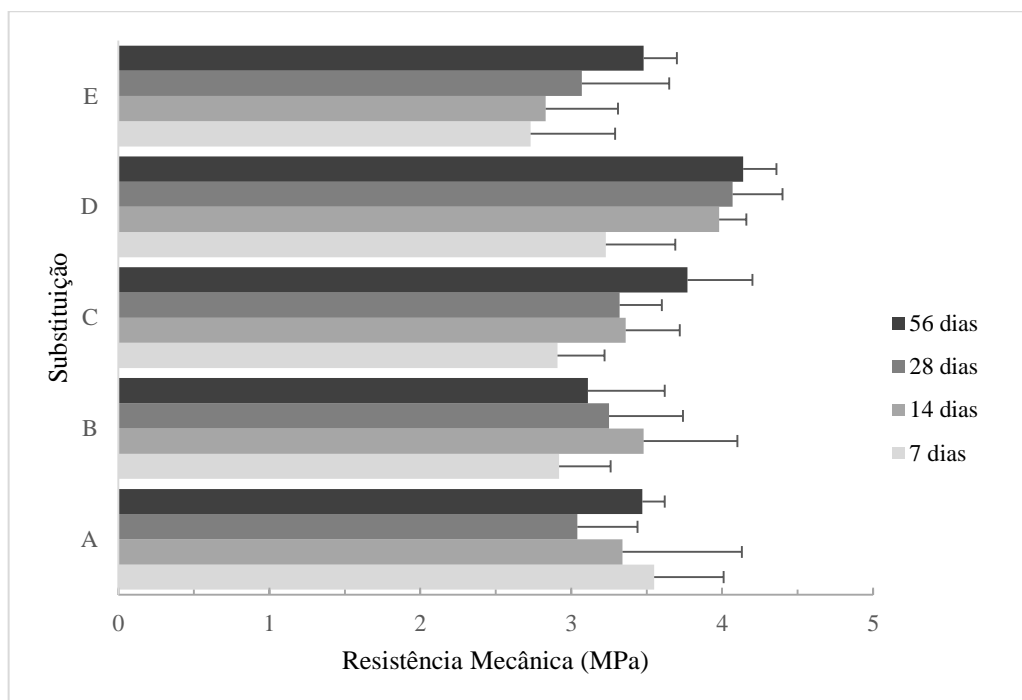
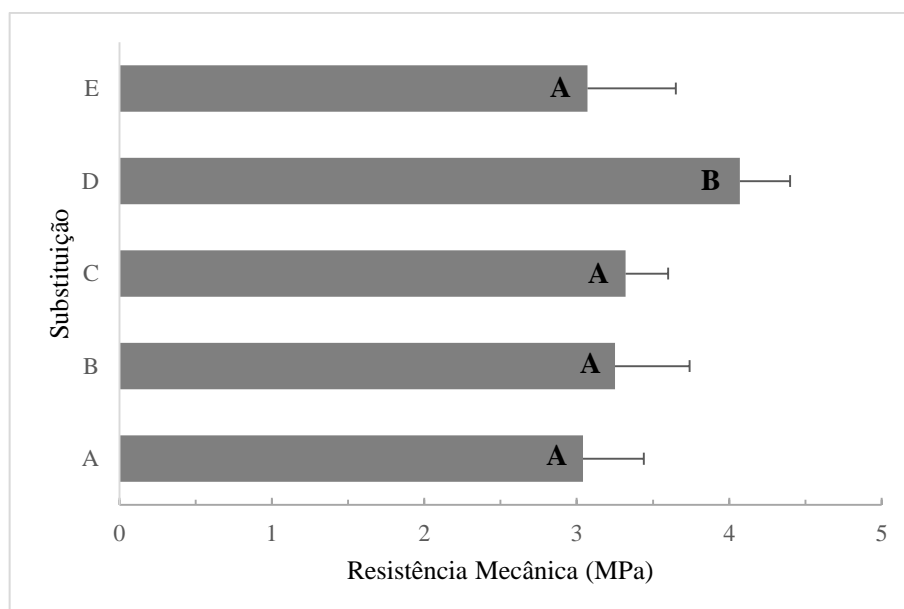


Figura 56 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,4 aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Apresenta-se na Tabela 33 os resultados de resistência mecânica à tração de corpos de prova de concreto moldados com relação água/cimento 0,5. As dosagens B, C, D e E atingem sua resistência final logo nos primeiros períodos de cura. Somente a dosagem A (concreto

referência) apresenta comportamento diferente. Entre 7 e 14 dias ocorrem ganhos significativos de resistência, estabilizando-se aos 28 e 56 dias.

Tabela 32 – Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,5$ e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	2,23	aA	2,73	bA	2,69	bA	2,68	bA
B	2,30	aA	2,67	aA	2,90	aA	2,84	aA
C	2,76	aB	2,56	aA	2,72	aA	2,99	aA
D	2,78	aB	3,30	aB	2,80	aA	2,66	aA
E	2,64	aB	3,16	aB	2,71	aA	3,13	aA

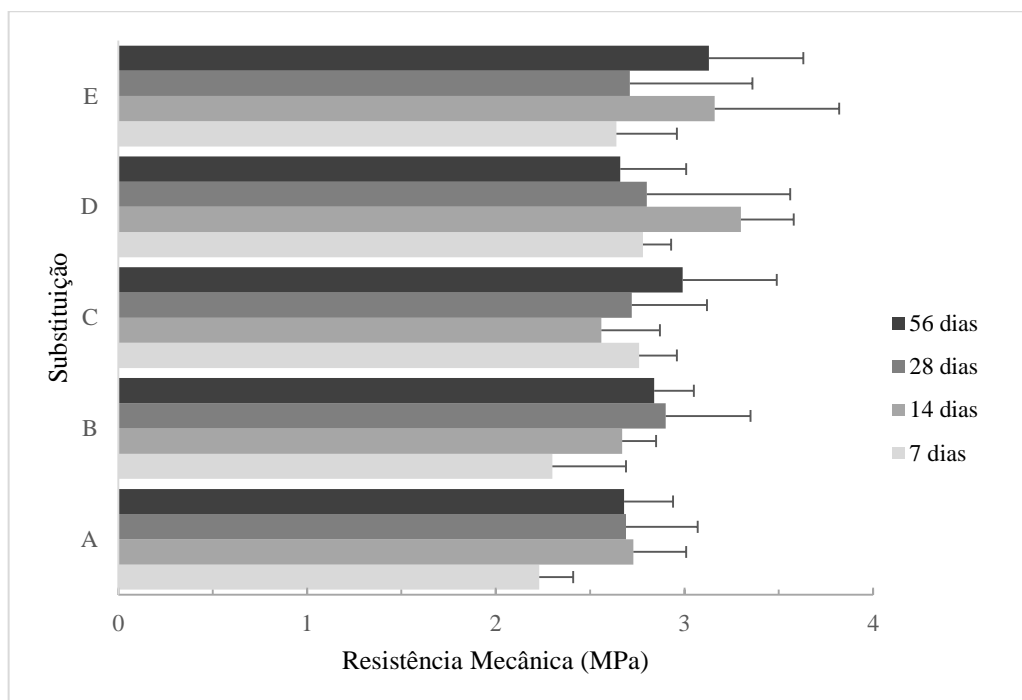
Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Em períodos iniciais de cura (7 dias), considerando a análise dos dados em coluna, as dosagens C, D e E apresentam bons resultados de resistência mecânica à tração. Entretanto, a dosagem B ainda apresenta valores semelhantes àqueles obtidos pela dosagem A. Aos 14 dias, as dosagens D e E sobressaem-se.

O avanço no período de cura revela concretos com resultados semelhantes, isto é, todas as dosagens têm comportamento semelhante ao concreto referência. Assim, aos 28 dias de cura, idade em que projetistas consideram que o concreto atinge a maior parte de sua resistência final, todas as dosagens podem ser utilizadas sem causar prejuízos às propriedades de resistência mecânica à tração do concreto.

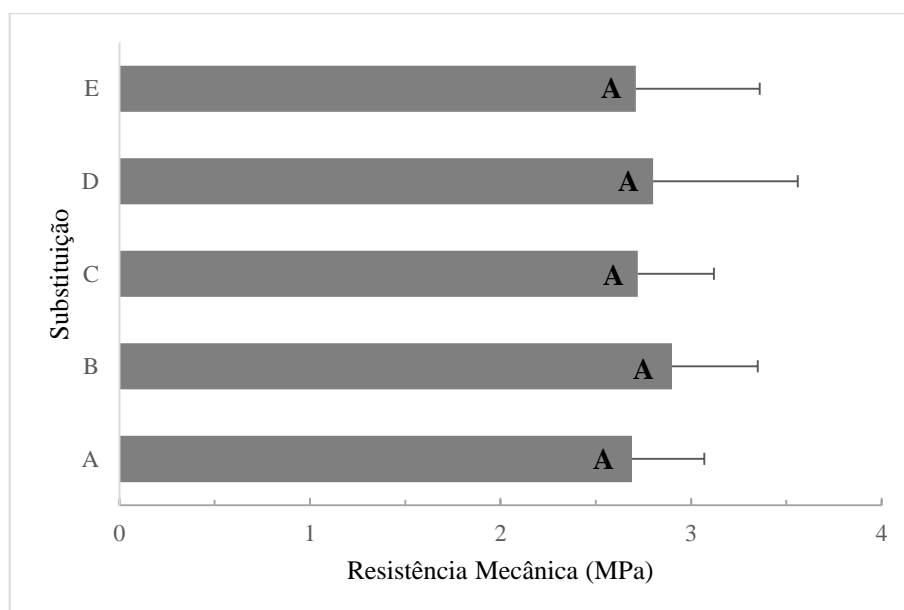
Na Figura 60 estão representados os resultados médios dos ensaios de resistência mecânica à tração dos corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,5. É possível notar que as dosagens possuem resultados semelhantes em períodos mais longos de cura.

Figura 57 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$.



Os resultados médios de resistência mecânica à tração aos 28 dias de cura e a respectiva análise estatística utilizando o teste de comparação *Scott-Knott* são apresentados na Figura 61, deixando clara a semelhança entre as dosagens.

Figura 58 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação $a/c=0,5$ aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Apresenta-se na Tabela 34 os valores médios de resistência mecânica à tração de corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,6. Analisando os dados em linha, as dosagens B e E seguem comportamento semelhante àquele apresentado pelo concreto referência (dosagem A). Há aumento gradual na resistência até 14 dias de cura, estabilizando-se após este período. As dosagens C e D já apresentam estabilização dos resultados logo aos 7 dias, adquirindo 83,5% e 82%, respectivamente, de sua resistência final.

Tabela 33 – Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação a/c=0,6 e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	2,00	aA	2,39	bA	2,64	bA	2,65	bA
B	2,00	aA	2,57	bA	2,53	bA	2,33	bA
C	2,18	aA	2,60	aA	2,55	aA	2,61	aA
D	2,00	aA	2,24	aA	2,23	aA	2,44	aA
E	2,14	aA	2,52	bA	2,49	bA	2,42	bA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Todas as dosagens moldadas com relação água/cimento 0,6 obtiveram resultados semelhantes nas idades de ruptura propostas quando os dados são analisados em coluna. Portanto, estão aptas a serem utilizadas sem causar prejuízos às propriedades de resistência mecânica à tração dos concretos.

Observa-se na Figura 62 o gráfico dos resultados médios de resistência mecânica à tração com seus respectivos desvios padrões, permitindo uma análise geral. Os resultados de ruptura aos 28 dias de cura estão no gráfico da Figura 63, que ainda apresenta uma análise estatística de comparação utilizando o teste *Scott-Knott* que demonstra que ambas as dosagens são semelhantes.

Figura 59 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,6.

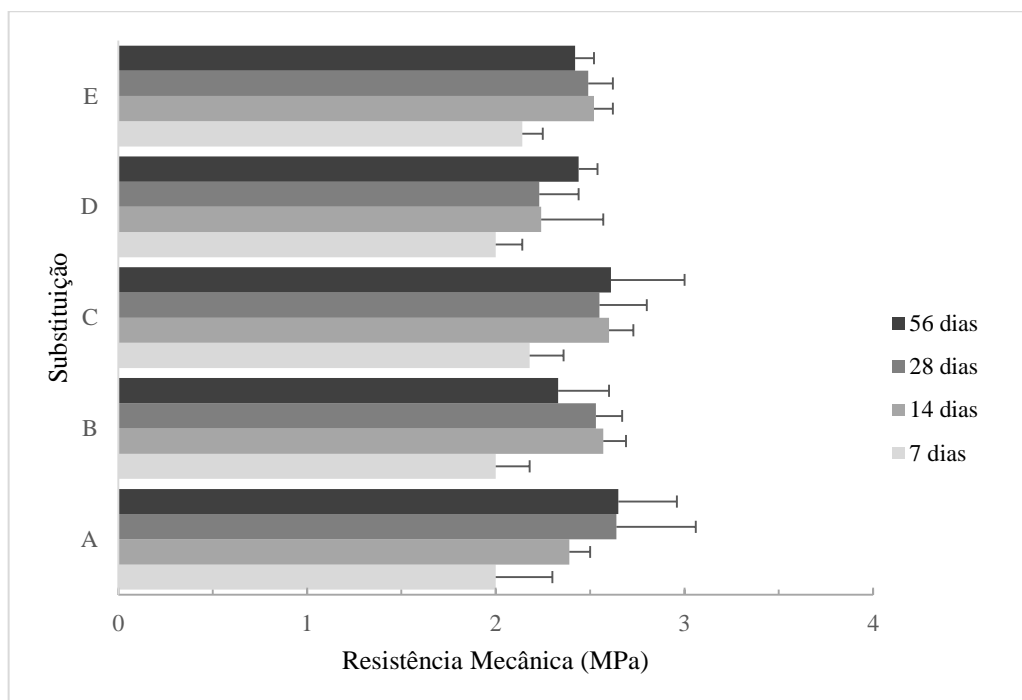
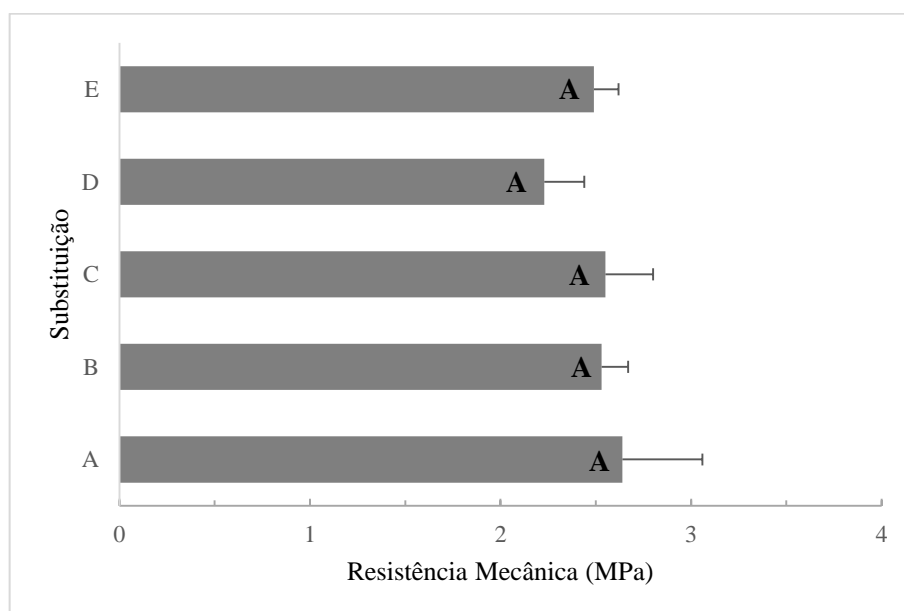


Figura 60 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,6 aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Observa-se na Tabela 35 os resultados médios de resistência mecânica à tração de corpos de prova moldados com relação água/cimento 0,7. A análise dos dados em linha revela padrão semelhante nas dosagens A, B e E. A resistência mecânica atinge valores finais em períodos iniciais de cura, estabilizando-se posteriormente. A dosagem C mantém-se estável entre 7 e 14

dias, com gradual acréscimo posterior até 56 dias. A dosagem D ganha resistência mecânica à tração entre 7 e 14 dias, atingindo 90,4% e estabilizando-se após este período.

Tabela 34 - Valores médios de resistência mecânica à tração (MPa) de corpos de prova com relação $a/c=0,7$ e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Idade de ruptura (em dias)							
	7		14		28		56	
A	1,92	aB	2,08	aB	2,14	aA	2,32	aB
B	2,01	aB	2,17	aB	2,31	aA	2,08	aA
C	1,67	aA	1,82	aA	2,08	bA	2,47	cB
D	1,47	aA	1,80	bA	2,14	bA	1,99	bA
E	1,86	aB	2,11	aB	2,03	aA	2,07	aA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Os resultados analisados em coluna utilizando o teste *Scott-Knott* revelam corpos de prova com resistência mecânica inferior à referência. Este fato acontece com as dosagens C e D, aos 7 e 14 dias, além de B, D e E, aos 56 dias. Entretanto, aos 28 dias, todas as dosagens são semelhantes.

De forma preocupante, a dosagem D apresentou os piores valores em idades iniciais e avançadas. Logo, resultados inferiores ao concreto referência em ensaios de resistência mecânica à tração tornam esta dosagem inviável quando são moldados corpos de prova com relação água/cimento 0,7.

Verifica-se no gráfico da Figura 64 que realmente algumas dosagens apresentam valores bem inferiores à referência, mesmo que, aos 28 dias, sejam semelhantes, considerando a análise utilizando o teste *Scott-Knott* (Figura 65).

Figura 61 - Valores médios de resistência mecânica à tração e desvio padrão de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,7.

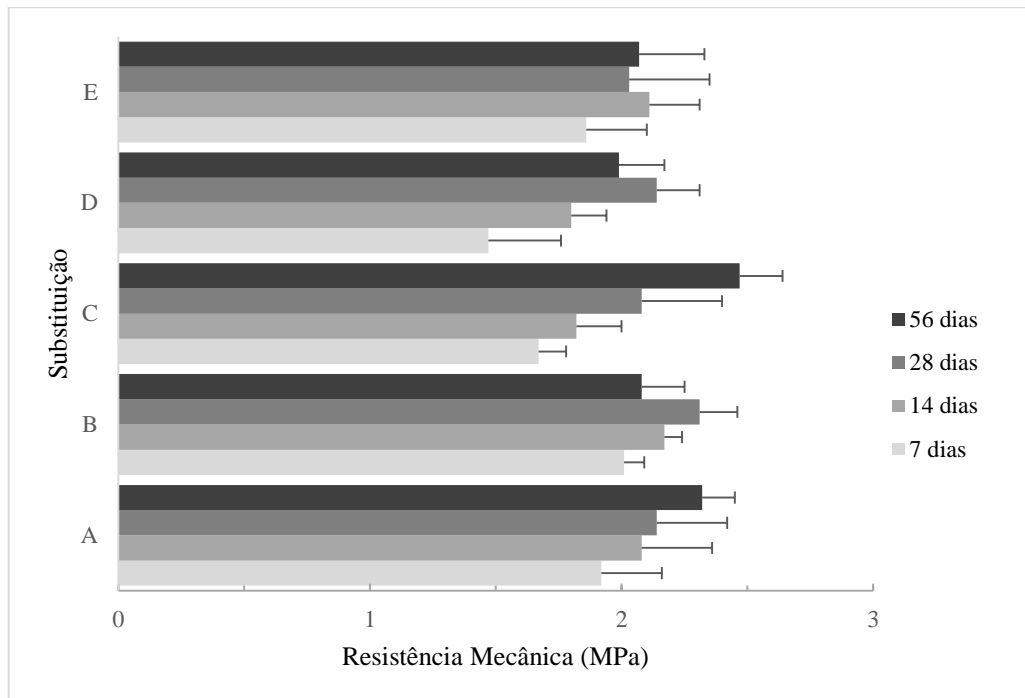
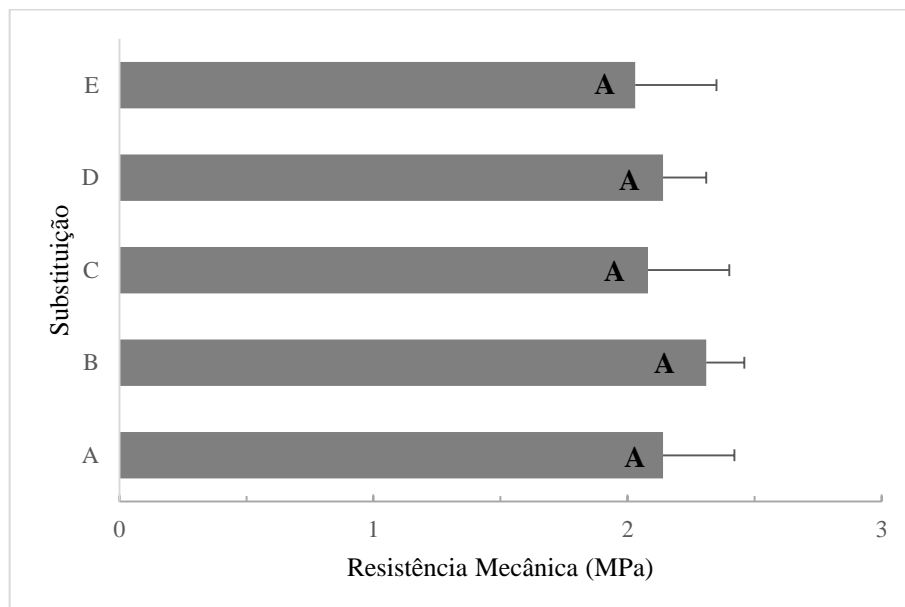


Figura 62 - Valores médios de resistência mecânica à tração, desvio padrão e análise estatística utilizando o teste *Scott-Knott* com 5% de significância de corpos de prova de concreto moldados com relação a/c=0,7 aos 28 dias de cura.



Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística entre os dados.

Após a apresentação de todos os resultados anteriores de resistência mecânica à tração, faz-se necessário uma análise geral dos dados para esclarecer o comportamento dos mesmos.

Em concretos moldados com pequenas quantidades de água (a/c 0,4) a dosagem D apresenta resultados superiores às demais em idades mais longas. Entretanto, todas as outras possuem resultados semelhantes ao concreto referência em todas idades de ruptura propostas, o que permite sua moldagem sem prejuízos à resistência mecânica.

As dosagens D e E são melhores em idades iniciais quando o concreto é moldado com maior quantidade de água (a/c 0,5), estabilizando-se as demais em períodos posteriores. Portanto, aos 28 dias, idade em que o concreto adquiriu praticamente sua resistência final, todas as dosagens são semelhantes.

A relação água/cimento 0,6 revela todas as dosagens com resistência mecânica igual nas idades de ruptura utilizadas. Entretanto, o contínuo aumento na quantidade de água adicionada ao concreto (a/c 0,7) leva a resultados inferiores à referência para as dosagens C e D em idades iniciais e B, D e E em idades mais avançadas.

Portanto, a dosagem D apresenta resultados interessantes em concretos moldados com relação água/cimento 0,4 e 0,5, mesmo que as outras dosagens ainda consigam satisfazer as exigências de resistência mecânica à tração quando comparadas à referência. Uma relação água/cimento 0,6 obtém todos os resultados semelhantes à referência em ambas as dosagens. Mas, altas quantidades de água adicionadas ao concreto (a/c 0,7) tornam todas as dosagens inferiores em resistência mecânica se comparadas à referência, seja em idades iniciais ou posteriores. Assim, a acréscimo excessivo de água ao concreto apresenta-se inviável às propriedades de resistência mecânica à tração quando as dosagens propostas neste estudo são utilizadas.

4.3.3. Absorção por imersão

O índice de absorção do concreto é um fator importante em sua durabilidade. Altas taxas refletem-se em permeabilidade excessiva, permitindo que a água danifique sua estrutura interna, principalmente se for concreto armado.

Apresenta-se na Tabela 37 o percentual médio de absorção dos corpos de prova aos 28 dias de cura. Além disso, observa-se na Figura 66 o gráfico destes dados com o respectivo desvio padrão. A absorção dos corpos de prova moldados, neste estudo, aumenta com o acréscimo de água adicionada ao concreto. Assim, a relação água/cimento 0,7 possui os maiores percentuais de absorção quando os dados da Tabela 37 são analisados em linha.

Quando a absorção do concreto é um problema em sua durabilidade, especificamente neste estudo, a relação água/cimento 0,4 apresenta os mais baixos índices de absorção quando comparadas às demais. Tal fato torna-a uma boa opção de utilização no concreto com substituição de areia por rejeito magnético.

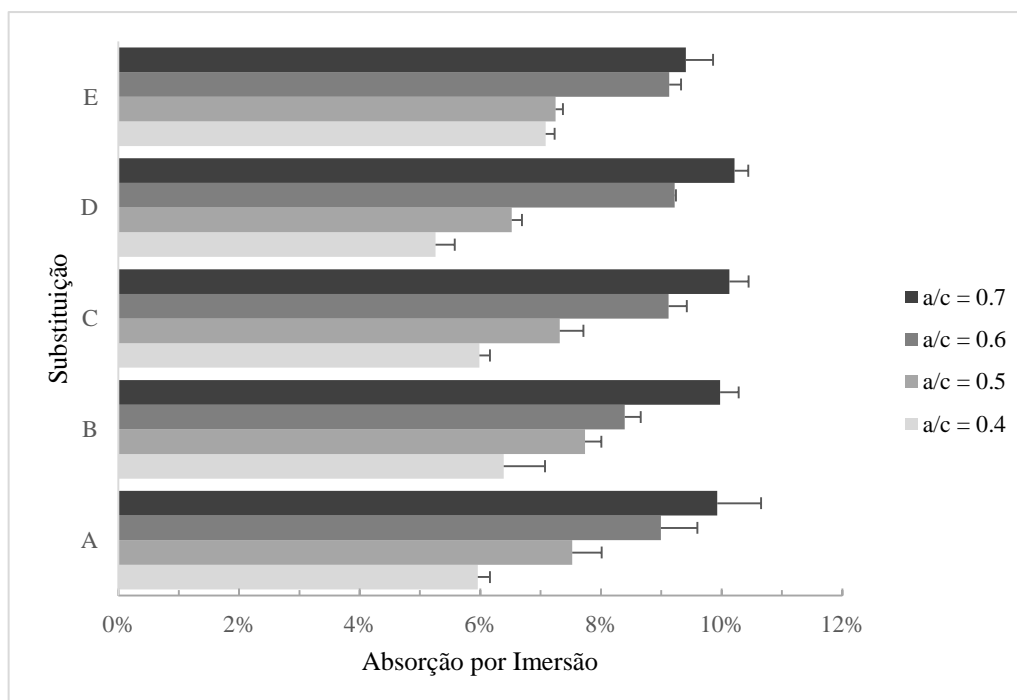
Tabela 35 – Percentual médio de absorção por imersão de corpos de prova com 28 dias de cura e resultados do Teste *Scott-Knott* com 5% de significância.

Dosagem	Relação a/c							
	0,4		0,5		0,6		0,7	
A	6,0	aB	7,5	bB	9,0	cB	9,9	cA
B	6,4	aC	7,7	bB	8,4	bA	10,0	cA
C	6,0	aB	7,3	bB	9,1	cB	10,1	dA
D	5,3	aA	6,5	bA	9,2	cB	10,2	dA
E	7,1	aD	7,2	aB	9,1	bB	9,4	bA

Obs.: Letras maiúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados em coluna; letras minúsculas iguais indicam semelhança estatística dos dados apresentados em linha.

Os dados em coluna revelam comportamentos diferentes de acordo com a relação água/cimento analisada. A dosagem D apresenta baixos índices de absorção nas relações 0,4 e 0,5. A dosagem B destaca-se na relação 0,6, mas nenhuma das dosagens apresentou resultados discrepantes na relação água/cimento 0,7. São todas estatisticamente semelhantes.

Figura 63 – Percentual médio de absorção por imersão e desvio padrão de corpos de prova com 28 dias de cura.



De forma geral, os melhores resultados, traduzidos por baixos índices de absorção, são obtidos na dosagem D com relação água/cimento 0,4. Portanto, o concreto moldado com esta composição obterá baixos índices de permeabilidade e melhores características de durabilidade.

O aumento gradual da porcentagem de substituição de areia por rejeito magnético não influenciou os resultados de absorção por imersão. Neste caso, a quantidade de água adicionada ao concreto foi o fator predominante para o controle do índice de absorção.

4.3.4. Campo magnético

O magnetismo é uma propriedade a ser considerada em concretos moldados com substituição de areia por rejeito magnético devido às propriedades magnéticas deste último material. Porém, nenhum campo magnético foi gerado nos corpos de prova de concreto moldados.

A justificativa está na quantidade de material adicionado em substituição da areia. Quantidades pequenas de rejeito magnético tornam as propriedades magnéticas do material imperceptíveis ao equipamento utilizado para detectá-las. Além disso, o material é composto por vários minerais, sendo que alguns não apresentam propriedades magnéticas.

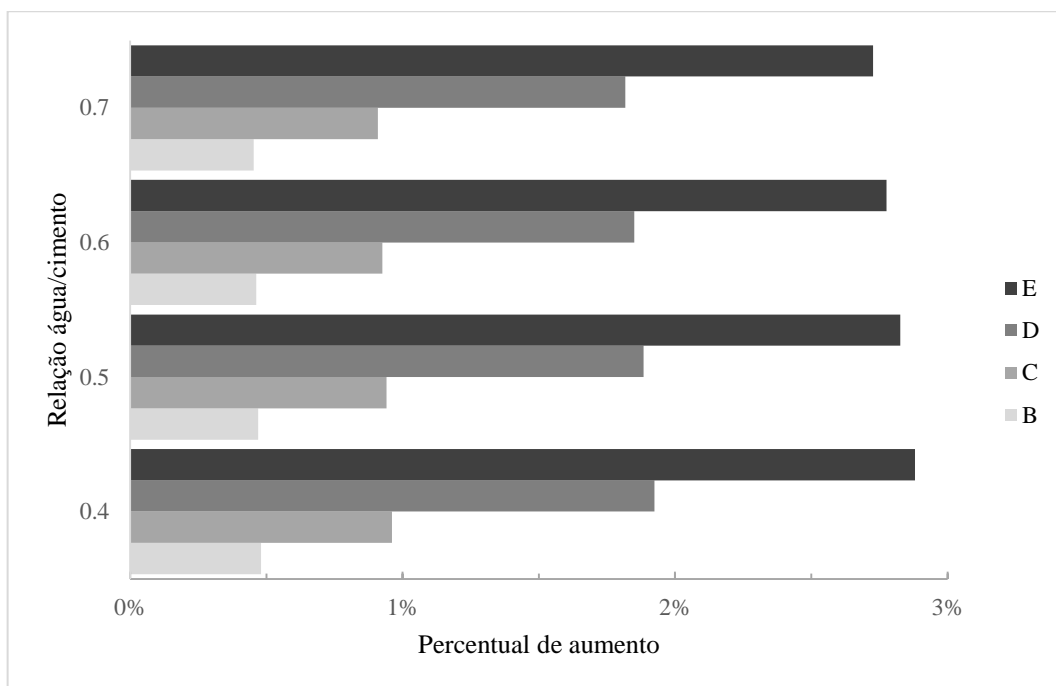
4.3.5. Massa específica

O rejeito magnético é um material com superior massa específica quando comparado à areia. Assim, mensurar esta propriedade dos corpos de prova moldados com a substituição proposta é importante para avaliar suas possibilidades de aplicação.

As dosagens dos materiais em cada formulação permitem calcular o peso dos corpos de prova de concreto com a substituição da areia por rejeito magnético em volume. Logo, é possível mensurar, matematicamente, os ganhos de densidade.

A comparação entre a massa específica do concreto referência e as dosagens propostas é realizada no gráfico apresentado na Figura 67. É notório o acréscimo nos valores à medida que a porcentagem de substituição de areia por rejeito magnético aumenta. Entretanto, o percentual máximo alcançado pela dosagem E não significa alterações consideráveis na massa específica dos corpos de prova.

Figura 64 – Percentual médio de aumento da massa específica dos corpos de prova com relação ao concreto referência (substituição A).



5. CONCLUSÕES

A substituição dos componentes do concreto por materiais alternativos é uma realidade e permite descobertas de novas tecnologias de produção sustentável, minimizando os impactos ambientais causados pela atividade de construção civil.

Este estudo permitiu que o rejeito magnético, material descartado em grandes quantidades em barragens de rejeitos por mineradoras da região de Catalão/Goiás, especificamente no processamento de rocha fosfática, pudesse ser avaliado como material alternativo ao agregado miúdo (areia) na moldagem de concretos convencionais.

A caracterização física e química dos materiais destacou a diferença entre a areia e o rejeito magnético. São materiais diferentes granulometricamente. O último melhora o empacotamento da mistura ao apresentar um maior grau de finura. A análise química também destaca a diferença e deixa claro que o rejeito magnético é composto por vários minerais, além daqueles provenientes do ferro que concedem suas propriedades magnéticas.

A relação água/cimento empregada influenciou diretamente a trabalhabilidade dos concretos moldados. Baixas quantidades de água (a/c 0,4) tornam a mistura áspera e prejudicam a trabalhabilidade. Pelo contrário, quantidades maiores (a/c 0,6 e 0,7) diminuem a coesão do material e tornam o concreto altamente trabalhável. O acréscimo na porcentagem de substituição da areia por rejeito magnético causou prejuízos a trabalhabilidade de concretos moldados com relação a/c 0,5. Nas demais relações água/cimento não foi possível identificar este padrão de comportamento.

De forma geral, a resistência mecânica à compressão e à tração dos corpos de prova moldados com substituição parcial da areia por rejeito magnético foi aceitável. As dosagens B, C e E são comparáveis ao concreto referência em todas as situações propostas. A dosagem D possui restrições. Em concretos com quantidade baixa e moderada de água, apresentou resultados de resistência mecânica superiores as demais dosagens. Entretanto, altas quantidades prejudicam a resistência mecânica, apresentando resultados inferiores ao concreto referência.

Os resultados de absorção por imersão dos corpos de prova de concreto estão relacionados a permeabilidade do mesmo. O acréscimo de água a mistura concedeu maior porosidade ao concreto, aumentando, conseqüentemente, seu percentual de absorção. A dosagem D se

destacou com baixos índices nas relações água/cimento 0,4 e 0,5. O aumento da porcentagem de substituição de areia por rejeito magnético não influenciou esta propriedade.

A massa específica dos corpos de prova sofreu acréscimo com o aumento da porcentagem de substituição de areia por rejeito magnético. O fato deve-se a superioridade da massa específica do último material. Entretanto, o percentual de aumento foi pequeno quando comparado ao concreto referência, permitindo a utilização do material sem alterações significativas ao peso do concreto.

Não foi possível identificar propriedades magnéticas nos concretos moldados com as dosagens propostas. Considerando toda a mistura, o rejeito magnético representa uma parcela mínima. Logo, suas propriedades magnéticas são ocultas. Além disso, a análise química deste material revela a presença de outros minerais que não apresentam propriedades magnéticas.

Portanto, este estudo comprova a possibilidade de utilização das dosagens B, C e E, representando, respectivamente, 5, 10 e 30% de substituição do agregado miúdo (areia) por rejeito magnético, em concretos convencionais, mantendo-se as propriedades mecânicas analisadas semelhantes ao concreto referência. A dosagem D (20% de substituição) surge como alternativa de resistência mecânica superior em concretos com quantidades baixas e moderadas de água.

Estas conclusões permitem destacar a possibilidade de utilização do rejeito magnético proveniente do processamento de rocha fosfática da região de Catalão/GO como material alternativo ao agregado miúdo (areia) utilizado na produção de concretos convencionais.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Os concretos pesados são produzidos com adição de agregados especiais (magnetita e hematita) e aplicados como isolantes de radioatividade. O rejeito magnético analisado neste estudo é composto por grande quantidade de magnetita. Logo, torna-se interessante uma análise minuciosa da possibilidade de utilização deste material como agregado na produção de concretos pesados.

A porcentagem máxima de substituição do agregado miúdo por rejeito magnético utilizada neste estudo foi de 30%. Torna-se pertinente a realização de ensaios para determinar os valores máximos possíveis de substituição. Quanto maior a quantidade de material reaproveitado como

agregado miúdo, menores os impactos causados pelo descarte em barragens de rejeito. Além disso, outra possibilidade de realização de trabalhos futuros seria estudar o potencial de utilização deste material para produção de argamassas.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, P. K.; PATRO, S. K. Use of ferrochrome ash (FCA) and lime dust in concrete preparation. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 237-246, 2016.

ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

ALVES, J. D. **Materiais de Construção**. 8ª ed. Goiânia: Editora da UFG e Editora da UCG, 2006.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção: Normas, Especificações, Aplicação e Ensaios de Laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.

ANDERSON, D. J.; SMITH, S. T.; AU, F. T. K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 20-28, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009, 13p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Argamassa e Concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006, 19p.

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

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de Dosagem para Concretos Convencionais e Aditivados Confeccionados com Materiais da Região Noroeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002, 254p.

AWOYERA, P. O.; AKINMUSURU, J. O.; NDAMBUKI, J. M. Green concrete production with ceramic wastes and laterite. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 29-36, 2016.

AZHARPOUR, A. M.; NIKOUDEL, M. R.; TAHERI, M. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 55-62, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Volume 1. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BORG, R. P.; BALDACCHINO, O.; FERRARA, L. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 29-47, 2016.

BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, n. 41, p. 1208-1223, 2011.

Concremix. Tipos de concreto. Website. Disponível em: <<http://www.concremix.com.br/concreto.html>>. Acesso em: 23 de junho de 2016.

COSTA, C. H. A.; STAUT, S. L. S.; ILHA, M. S. O. Projeto de sistemas prediais hidráulicos sanitários com BIM: mapeamento da literatura. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2014.

DAY, K. W. **Concrete mix design, quality control and specification**. Third Edition. New York: Taylor & Francis, 2006.

DULSANG, N.; KASEMSIRI, P.; POSI, P.; HISIROGLU, S.; CHINDAPRASIRT, P. Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. **Materials and Design**, v. 96, p. 350-356, 2016.

FIORENTINO, G.; BROSSI, L.; AMELONG, I.; CAMPANATTI, C. **As Oito Grandes Tendências de Crescimento até 2020**. Bain & Company, 2012.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; NAJI, N.; İPEK, S. Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel–Bulkley and modified Bingham models. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 16, n. 1, p. 9-19, 2016.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 702-711, 2016.

HESAMI, S.; MODARRES, A.; SOLTANINEJAD, M.; MADANI, H. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 625-636, 2016.

Holcim Brasil. Tipos de concreto. Website. Disponível em: < <http://www.holcim.com.br/produtos-e-solucoes/concreto/tipos-de-concreto.html>>. Acesso em: 23 de junho de 2016.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, 7^a ed., p. 668-675, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/> >. Acesso em: 16 de Agosto de 2016.

KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 572-578, 2016.

KHALID, N. H. A.; HUSSIN, M. W.; MIRZA, J.; ARIFFIN, N. F.; ISMAIL, M. A.; LEE, H. S.; MOHAMED, A.; JAYA, R. P. Palm oil fuel ash as potential green micro-filler in polymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 950-960, 2016.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. **O Brasil e a Reglobalização da Indústria das Terras Raras**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

LI, Z. **Advanced concrete technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

LIMA, D. A.; ZULANAS, C. Use of contaminated sludge in concrete. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1201-1208, 2016.

MALAIKIENE, J.; SKRIPKIUNAS, G.; VAICIENE, M.; KIZINIEVIC, O. The influence of mullite wool waste on the properties of concrete and ceramics. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 8-16, 2016.

MAMLOUK, M. S.; ZANIEWSKI, J. P. **Materials for Civil and Construction Engineers**. 3^a ed. New Jersey, United States of America: Pearson, 2010.

MENDES, M. V. A. **Aproveitamento de finos de magnetita gerados no processamento de rocha fosfática**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014, 103p.

MENDES, M. V. A.; SILVA, A. C.; BARBOSA, D. H. B. M. Substituição do agregado miúdo por magnetita na composição do concreto. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 513-523, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2^a ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MO, K. H.; CHIN, T. S.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z. Material and structural properties of waste-oil palm shell concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag

reinforced with low-volume steel fibres. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 414-426, 2016.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, 2016.

NEVES, P. C. P.; SCHENATO, F.; BACHI, F. A. **Introdução à Mineralogia Prática**. 3 ed. Canoas: Editora ULBRA, 2011.

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

NEWMAN, J.; CHOO, B. S. **Advanced concrete technology: constituent materials**. Elsevier, 2003.

NICOLI, T. A. **Proposição de uma nova sistemática de disposição dos rejeitos magnéticos provenientes do beneficiamento da rocha fosfática da mina chapadão, Catalão/GO**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, área de Mineração) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014, 99p.

NIKBIN, I. M.; RAHIMI, S.; ALLAHYARI, H.; FALLAH, F. Feasibility study of waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 108-117, 2016.

ÖZALP, F.; YILMAZ, H. D.; KARA, M.; KAYA, Ö.; SAHIN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 17-23, 2016.

PALANKAR, N.; SHANKAR, A. U. R.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437-448, 2016.

PALMIERI, M. **Modelo geológico e avaliação de recursos minerais do depósito de nióbio morro do padre, complexo alcalino-carbonatítico catalão II, GO**. Dissertação (Mestrado em Geociências, área de Geologia Econômica e Prospecção) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011, 126p.

PAULA, H. M.; ILHA, M. S. O. Uso da moringa oleífera no tratamento de águas residuárias de usinas de concreto: mapeamento sistemático. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC**, v. 11, n. 1, p. 50-60, 2016.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. C. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514-520, 2016.

PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. **Systematic Mapping Studies in Software Engineering**. School of Engineering, Blekinge Institute of Technology. University of Bari, Italy, 26 - 27 June. 2008.

PUTHUSSEY, J. V.; KUMAR, R.; GARG, A. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. **Waste Management**, Article in Press, 2016.

RAHIMI, S.; NIKBIN, I. M.; ALLAHYARI, H.; HABIBI, S. Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 166-177, 2016.

RAHMAN, A.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; SHARMA, S. Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview. **Procedia Engineering**, n. 56, p. 393-400, 2013.

RAHMAN, A.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; SHARMA, S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel: The science and technology of fuel and energy**, n. 145, p. 84-99, 2015.

RAKI, L.; BEAUDOIN, J.; ALIZADEH, R.; MAKAR, J.; SATO, T. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. **Journal Materials**, v. 3, p. 918-942, 2010.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications**. New York, U.S.A: Noyes Publications/William Andrew Publishing/Elsevier, 2000.

RAMACHANDRAN, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J.; DELGADO, A. N. **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications/William Andrew Publishing, 2002.

Redmix: 100% Brasileira. Tipos de concreto. Website. Disponível em: <<http://www.redimix.com.br/tiposdeconcreto>>. Acesso em: 23 de junho de 2016.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, Geometalurgia, Controles e Gênese dos Depósitos de Fósforo, Terras Raras e Titânio do Complexo Carbonatítico Catalão I, GO**. Tese (Doutorado em Geociências, área de Geologia Econômica e Prospecção) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008, 508p.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

RÓZYCKA, A.; PICHÓR, W. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 64-71, 2016.

RUIZ-HERRERO, J. L.; NIETO, D. V.; LÓPEZ-GIL, A.; ARRANZ, A.; FERNÁNDEZ, A.; LORENZANA, A.; MERINO, S.; SAJA, J. A.; REDRÍGUEZ-PÉREZ, M. A. Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 298-310, 2016.

SADRMOMTAZI, A.; DOLATI-MILEHSARA, S.; LOTFI-OMRAN, O.; SADEGHI-NIK, A. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of selfcompacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2363-2373, 2016.

SARDINHA, M.; BRITO, J.; RODRIGUES, R. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 45-52, 2016.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, n. 41, p. 651-665, 2011.

SHETTY, M. S. **Concrete technology: theory and practice**. Multicolor Illustrative Edition. New Delhi: S. Chand & Company, 2005.

SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; MENDES, M. V. A.; BARBOSA, D. H. B. M. Magnetite tailing replacing quartz sand in concrete formulation. In: PROCEEDINGS OF 14th INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING SYMPOSIUM, 2014, Kusadasi, Turkey. **Anais...** p.599-604.

SILVA, A. C.; MENDES, M. V. A.; SILVA, E. M. S. Substituição de areia por magnetita na formulação do concreto. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2016. No prelo.

SINGH, S.; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86-98, 2016.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 223-235, 2016.

SMARZEWSKI, P.; BARNAT-HUNEK, D. Mechanical and durability related properties of high performance concrete made with coal cinder and waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 9-17, 2016.

STONYS, R.; KUZNETSOV, D.; KRASNIKOVS, A.; ŠKAMAT, J.; BALTAKYS, K.; ANTONOVIČ, V.; ČERNAŠEJUS, O. Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 149-156, 2016.

Supermix. Tipos de concreto. Website. Disponível em: < <http://www.supermix.com.br/tipos-de-concreto/> >. Acesso em: 23 de junho de 2016.

TANIGUTI, E. Panorama do mercado de concreto. In: SEMINÁRIO – DESAFIOS DO PROJETO, PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DO CONCRETO, 2015, São Paulo. Disponível em: < http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/PanoramaMercadoConcretov2_Eliana-Taniguti.pdf >. Acesso em: 16 de agosto de 2016.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. **Materials of Cement Science Primer: The Science of Concrete**. 2009.

VIEIRA, T.; ALVES, A.; BRITO, J.; CORREIA, J. R.; SILVA, R. V. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. **Materials and Design**, v. 90, p. 767-776, 2016.

WANG, C.; NI, W.; ZHANG, S.; WANG, S.; GAI, G.; WANG, W. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 109-115, 2016.

XIAO, J.; MA, Z.; DIING, T. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. **Waste Management**, v. 48, p. 334-343, 2016.

YU, R.; VAN ONNA, D. V.; SPIESZ, P.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 690-701, 2016.

YU, X.; TAO, Z.; SONG, T.; PAN, Z. Performance of concrete made with steel slag and waste glass. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 737-746, 2016.