

**Universidade Federal de Ouro Preto**

Núcleo de Geotecnia

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia  
PPGEO

---

Tese

---

**CONCRETO DE BAIXO CARBONO À  
BASE DE CIMENTO BINÁRIO DE  
CINZA DE BIOMASSA E SÍLICA  
ATIVA PARA PRODUÇÃO DE  
BLOCOS ECOLÓGICOS DE  
PAVIMENTAÇÃO.**

*André Henrique Campos Teixeira*

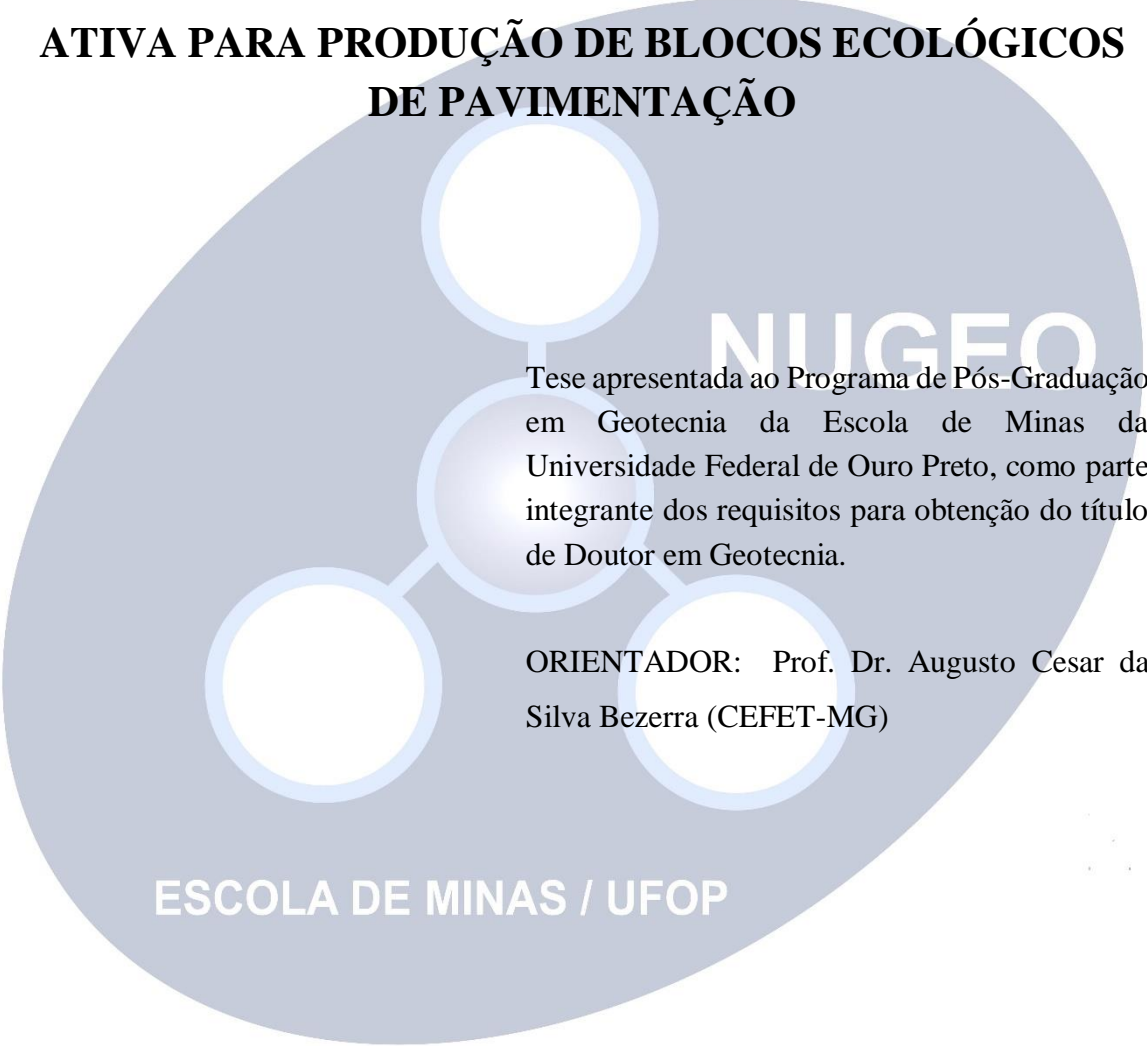
Ouro Preto  
2021



**UFOP**

**André Henrique Campos Teixeira**

**CONCRETO DE BAIXO CARBONO À BASE DE  
CIMENTO BINÁRIO DE CINZA DE BIOMASSA E SÍLICA  
ATIVA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS ECOLÓGICOS  
DE PAVIMENTAÇÃO**



Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra (CEFET-MG)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

**OURO PRETO  
2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T266c Teixeira, Andre Henrique Campos.

Concreto de baixo carbono à base de cimento binário de cinza de biomassa e sílica ativa para produção de blocos ecológicos de pavimentação. [manuscrito] / Andre Henrique Campos Teixeira. - 2021. 123 f.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra.

Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia.

1. Concreto. 2. Construção civil - resíduos. 3. Biomassa. 4. Sílica. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**André Henrique Campos Teixeira**

**Concreto de baixo carbono à base de cimento binário de cinza de biomassa e sílica ativa para produção de bloco ecológicos de pavimentação**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**

Aprovada em 10 de dezembro de 2021

### Membros da banca

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra - Orientador (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais)  
Prof. Dr. Antonio Maria Claret de Gouveia - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Gilberto Fernandes - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto - (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais)  
Prof. Dr. Sérgio Luiz Costa Saraiva - (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais)

O Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 30/03/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Luis de Almeida Prado Bacellar, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**, em 30/03/2022, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0302507** e o código CRC **FEB32D3B**.

# DEDICATÓRIA

Em memória de meu pai Antônio Teixeira.

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e à minha família.

Ao meu orientador, Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra, pela paciência e conselhos.

Ao Prof. Dr. Sérgio Luiz Costa Saraiva, pela ajuda.

Ao Paulo Roberto Ribeiro Soares Junior, pelos trabalhos em conjunto.

Ao Thiago Henrique Silva, pelas discussões e ajuda na execução do ensaio.

Ao Richard Rodrigues, pela ajuda no laboratório.

Às alunas Eduarda e Karen, pela ajuda nos ensaios.

À empresa CEMIG, na forma do projeto de P&D ANEEL GT 331 e P&D ANEEL GT 616, a qual financiou a compra e manutenção de equipamentos utilizados neste estudo.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais CEFET-MG, pela disponibilidade do laboratório.

À empresa Nestlé SA, pelo fornecimento das amostras de cinzas.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, me ajudaram para a conclusão desta tese.

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”*

Albert Einsten

## RESUMO

O setor de construção civil consome enormes quantidades de matéria prima e energia, especialmente obras de infraestrutura. Assim, o uso de materiais ecológicos é indispensável para promover o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o presente trabalho investigou concretos de baixo carbono para produção de blocos ecológicos de pavimentação. O aglomerante foi definido segundo duas abordagens: na primeira, foi utilizado cimento binário desenvolvido com cinza de biomassa de eucalipto (CBE) e sílica ativa (SA) em substituição total ao cimento Portland; já na segunda, a mistura dos resíduos foi utilizada como precursor em reações de álcali-ativação, formando cimento álcali-ativado. A abordagem experimental foi realizada com uso de cinco misturas diferentes, obtidas pela variação da quantidade de água ou de solução de hidróxido de sódio. A caracterização desse novo material foi realizada por meio de resistência à compressão, expansibilidade, absorção de água, abrasão profunda, investigação microestrutural e potencial fotocatalítico. Os resultados evidenciaram que o sistema CBE-SA possui desempenho compatível ao cimento Portland, quando utilizado como aglomerante alternativo, além de funcionar como precursor de concreto álcali-ativado. Os blocos produzidos degradaram matéria orgânica, sendo esta degradação mais intensa com a incidência de UV. Dessa forma, o aglomerante CBE-SA pode ser utilizado com sucesso para fabricação de blocos ecológicos de pavimentação com baixa emissão de carbono.

Palavras chave: Concreto de baixo carbono; Resíduos de cimento binário; Material álcali-ativado; Cinza de biomassa; Sílica ativa; Bloco de pavimentação ecológico.



# ABSTRACT

The civil construction industry consumes huge amounts of raw materials and energy, especially infrastructure. Thus, the use of eco-friendly materials is indispensable to promote sustainable development. In this context, the present work investigated low-carbon concrete to produce eco-friendly paving blocks. The binder was defined according to two approaches. In the first, a binary binder developed with eucalyptus biomass ash (EBA) and silica fume (SF) was used, in total replacement for Portland cement. In the second, the mixture of residues was used as a precursor in alkali-activation reactions, forming alkali-activated binder. The experimental approach was carried out using five different mixtures, obtained by varying the amount of water or sodium hydroxide solution. The characterization of this new material was carried out using compressive strength, expandability, water absorption, deep abrasion, microstructural investigation, and organic matter degradation potential. The results showed that the EBA-SF system has a performance compatible with Portland cement when used as an alternative binder, in addition to functioning as a precursor to alkali-activated concrete. The blocks produced degraded organic matter, and this degradation is more intense with the incidence of UV. In this way, the EBA-SF binder can be successfully used for the manufacture of ecological paving blocks with low carbon emissions.

**Keywords:** low-carbon concrete; waste binary binder; alkali-activated material; biomass ash; silica fume; eco-friendly paving block

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Cargas aplicadas em um pavimento.....	10
Figura 2.2 - Distribuição de cargas no pavimento flexível.....	12
Figura 2.3 - Seção transversal típica de um pavimento flexível.....	13
Figura 2.4 - Distribuição de cargas no pavimento rígido.....	14
Figura 2.5 - Seção típica de pavimento rígido.....	15
Figura 2.6 - Camadas comuns em um pavimento semi-flexível.....	20
Figura 2.7 - Estrutura típica de um pavimento intertravado.....	22
Figura 2.8 - Principais tipos de assentamentos das peças pré-moldadas de concreto.....	24
Figura 2.9 - Efeito do arranjo de assentamento das peças de concreto no desempenho do pavimento sob solicitação do tráfego.....	24
Figura 2.10 - Formatos típicos das peças pré-moldadas de concreto mais habituais.....	25
Figura 2.11 - Procedimento de construção.....	26
Figura 2.12 - Aplicações das peças pré-moldadas de concreto.....	27
Figura 2.13 - Efeito relativo de diversas cargas por eixo simples.....	29
Figura 2.14 - Espessura necessária de sub-base.....	29
Figura 2.15 - Espessura necessária de base de concreto.....	30
Figura 2.16 - Ponto A – carga de fissuração e Ponto C – carga máxima.....	35
Figura 2.17 - Ilha de Portland.....	42
Figura 2.18 - Mecanismos de redução da exsudação na pasta de cimento pela adição de sílica ativa.....	49
Figura 3.1 - Fluxograma para desenvolvimento da pesquisa.....	54
Figura 3.2 - Água utilizada.....	55
Figura 3.3 - Areia e pó de pedra.....	56
Figura 3.4 - Brita 0 e brita 1.....	56
Figura 3.5 - Aditivo.....	57
Figura 3.6 - Sílica ativa.....	58
Figura 3.7 - Cinza de cavaco de eucalipto.....	59
Figura 3.8 - Moinho planetário.....	60
Figura 3.9 -. Resíduos usados para substituir o cimento Portland (a) cinza de biomassa de eucalipto (CBE) antes da moagem (b) CBE após moagem e (c) sílica ativa.....	61

Figura 3.10 - XRD de: (a) - CBE e (b) SF.....	62
Figura 3.11 - Figura 3.11 - Curva de distribuição do tamanho de partícula com um histograma para (a) CBE e (b) SA.....	64
Figura 3.12 - Imagens obtidas por MEV (a) CBE como recebidas, (b) CBE terrestre e (c) SA.....	65
Figura 3.13 - Materiais utilizados no concreto de baixo carbono: (a) areia fina, (b) pó de pedra, (c) e (d) agregado grosso com dimensões de 4,8 a 9,5 mm e 9,5 a 19,5 mm, respectivamente, (e) água e (f) aditivo superplastificante.....	66
Figura 3.14 - Consistência no estado fresco para cada mistura de concreto medida pelo teste de slump.....	69
Figura 3.15 - Etapas de produção para blocos de concreto (1) mistura de materiais, (2) teste de slump, (3) moldagem e espessamento, (4) acabamento de superfície, (5) blocos após desmoldagem e (6) cura submersa em água.....	70
Figura 3.16 - Comprimento de onda X absorbância.....	74
Figura 3.17 - Calibração curva de absorbância X concentração.....	74
Figura 4.1 - Ensaio de resistência à compressão.....	76
Figura 4.2 - Resistência à compressão para cada mistura de concreto.....	78
Figura 4.3 - Ensaio à tração na flexão.....	80
Figura 4.4 - Resistência à tração na flexão para cada mistura de concreto.....	81
Figura 4.5 - XRD da (a) pasta BBC06, (b) pasta BBC05, e (c) pasta AABC06.....	82
Figura 4.6 - Ensaio de absorção de água (peso imerso).....	83
Figura 4.7 - Densidade seca e densidade saturada para cada mistura de concreto.....	84
Figura 4.8 - Absorção de água e porosidade para cada mistura de concreto.....	84
Figura 4.9 - Paver na estufa.....	86
Figura 4.10 - Paver imerso.....	86
Figura 4.11 - Variação dimensional linear dos blocos de pavimentação produzidos com cada mistura de concreto.....	87
Figura 4.12 - Abrasômetro com roda de borracha.....	88
Figura 4.13 - Balança.....	89
Figura 4.14 - Areia de granulometria 100.....	89
Figura 4.15 - Perda de massa após o teste de abrasão profunda para cada mistura.....	90
Figura 4.16 - Concentração de corante x tempo no escuro.....	92
Figura 4.17 - Concentração de corante x tempo sob luz UV.....	92

Figura 4.18 - Curvas de absorvância para cada mistura (a-e) no escuro e (f-j) sob luz UV.....	93
Figura 4.19 - Imagens SEM de concreto de ligante binário. (A) BBC-WCA-100X; (B) BBC-WCA-1000X; (C) BBC06-100X; (D) BBC06-1000X-1; (E) BBC06-1000X-2; (F) BBC06-50X.....	97
Figura 4.20 - Imagens MEV de concreto aglutinante alcalino (A) AABC-06-200X; (B) AABC-06-500X; (C) AABC-06-300X; (D) AABC-06-2000X; (E) AABC-06 -250X; (F) AABC-06-250X.....	98

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Gradação de deformidades dos pavimentos flexíveis.....	12
Tabela 3.1 - Propriedades físicas e químicas do NaOH.....	58
Tabela 3.2 - Composição química da CBE e sílica ativa (SA).....	61
Tabela 3.3 - Projeto de proporção de materiais.....	68
Tabela 4.1 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego.....	100
Tabela 4.2 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento.....	100

## Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AM - Azul-de-metileno  
CaO - Óxido de cálcio  
C-A-S-H - Aluminos silicato de cálcio hidratado  
CB - Cinza de biomassa  
CBE - Cinza de biomassa de eucalipto  
CCE - Cinza de cavaco de eucalipto  
CA - Cinza da madeira  
CBM - Cinzas de biomassa de madeira  
C/Co - Concentração do corante  
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
CH<sub>4</sub> - Metano  
CO - Monóxido de carbono  
CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono  
COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais  
cm - Centímetro  
CP - Copo de prova  
CP II Z - Cimento Portland composto com pozolana  
C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado  
DET - Departamento de Engenharia de Transportes  
DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem  
ETA - Estação de Tratamento de Água  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de ferro  
g - Gramas  
g/cm<sup>3</sup> - Gramas por centímetro cúbico  
g/mol - Gramas por mol  
ICPI - Interlocking Concrete Pavement Institute  
kg - Quilograma  
kgf - Quilograma-força  
kN - Quilonewton

kV - Quilovolt  
MCS - Materiais cimentícios suplementares  
MAA - Material álcali-ativado  
MEV - Microscópio eletrônico de varredura  
MPa - Megapascal  
m - Metro  
m<sup>3</sup> - Metro cúbico  
mm - Milímetro  
Ph - Potencial hidrogeniônico  
POA - Processos de Oxidação Avançados  
NaOH - Hidróxido de sódio  
NBR - Norma Brasileira  
NO<sub>2</sub> - Dióxido de nitrogênio  
RAA - Reação Álcali-Agregado  
rcc - Resíduo da construção civil  
rpm - Rotação por minuto  
SA - Sílica ativa  
SiO - Monóxido de silício  
SiO<sub>2</sub> - Dióxido de silício  
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento  
SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre  
TiO<sub>2</sub> - Dióxido de titânio  
UV - Radiação ultravioleta  
ZrO<sub>2</sub> - Óxido de Zircônio  
% - Por cento  
°C - Graus centígrados  
λ - Comprimentos de onda

# SUMÁRIO

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	7
1.3	OBJETIVOS.....	7
	1.3.1- Objetivo geral.....	7
	1.3.2- Objetivos específicos.....	8

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1	PAVIMENTOS.....	9
	2.1.1 - Pavimentos flexíveis.....	11
	2.1.2- Pavimentos rígidos.....	14
	2.1.3- Pavimentos semi-flexíveis ou semi-rígidos.....	19
	2.1.4 - Pavimentos intertravados.....	20
	2.1.4.1- Arranjo.....	23
	2.1.4.2- Forma.....	25
	2.1.4.3- Procedimento de implantação dos pavimentos intertravados.....	26
	2.1.4.4- Dimensionamento.....	28
2.2	CONCRETO.....	30
2.2.1	- Resistência a compressão.....	32
	2.2.2- Resistência à tração na flexão.....	34
	2.2.3- Expansibilidade.....	35
	2.2.4- Absorção.....	36
	2.2.5- Abrasão profunda.....	37
	2.2.6- Investigação microestrutural.....	39
2.3	AGLOMERANTES.....	40
2.4	MATERIAIS ALCALI-ATIVADOS.....	44
2.5	CINZAS A PARTIR DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	46
2.6	SÍLICA ATIVA.....	48
2.7	CINZAS DE CAVACO DE EUCALIPTO (CCE) OU CINZAS DE BIOMASSA DE EUCALIPTO (CBE).....	49
2.8	DEGRADAÇÃO E ADSORÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA PELOS MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS.....	51



### **CAPÍTULO 3 – ESTUDO EXPERIMENTAL**

3.1	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS.....	54
3.1.1-	Água.....	54
3.1.2-	Agregado miúdo.....	55
3.1.3-	Agregado graúdo.....	56
3.1.4-	Aditivo.....	57
3.1.5-	Hidróxido de sódio (NaOH).....	57
3.1.6-	Preparo da sílica ativa.....	58
3.1.7 -	Preparo da cinza de cavaco de eucalipto (CCE) ou cinzas de biomassa de eucalipto (CBE).....	59
3.2	MATERIAIS E PROPORÇÃO DAS MISTURAS.....	60
3.3	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	69
3.4	AVALIZAÇÃO DE DESEMPENHO.....	71

### **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

4.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	76
4.2	ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	80
4.3	PICOS DE CRISTALINIDADE.....	81
4.4	DENSIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE.....	83
4.5	ESPANSIBILIDADE.....	85
4.6	REISITÊNCIA À ABRASÃO.....	88
4.7	POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA.....	90
4.8	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	94
4.9	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO.....	99

### **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

### **CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

### **CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção consome grande quantidade de recursos e energia, se contrastando e se diferenciando, portanto, de outros setores da economia contemporânea (Buylem, Braet e Audenaert, 2013). Nesse cenário destaca-se o concreto, que é um material de construção utilizado extensivamente em obras de infraestrutura e edificação (Carmo e Júlio, 2017). A respeito dele, dados consistentes apresentados por Scrivener *et al.* (2018) revelaram que o concreto é o material mais utilizado no mundo, se comparado a outros materiais como madeira, ferro, cerâmica e asfalto. Apesar da pegada de carbono do concreto ser baixa, a indústria do cimento está entre as indústrias que mais emitem gases de efeito estufa na atmosfera, devido à calcinação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) do calcário e aos imensos volumes de cimento Portland produzidos em todo planeta. Assim sendo, levando em conta que o cimento representa aproximadamente 15% do concreto (em massa), fica evidente o impacto gerado pelas atividades construtivas (Monteiro, Miller e Horvath, 2017) bem como o fato de que essa enorme demanda por insumos necessita, indispensavelmente, de cuidados com meio ambiente.

A Organização das Nações Unidas, por meio da Agenda 2030 (ONU, 2015), definiu vários objetivos para promover o desenvolvimento sustentável mundial, entre os quais, destacam-se os objetivos 9, 11 e 13, relacionados à infraestrutura, às cidades sustentáveis e à mudança global do clima, respectivamente. O atendimento aos objetivos citados é alcançado inevitavelmente pela adoção de práticas sustentáveis no setor de construção (Andrade e Bragança, 2011). Nesse ínterim, a possibilidade de uso de resíduos em substituição aos tradicionais materiais de construção à base de cimento Portland aparece como uma possibilidade viável e inteligente de mitigação de impactos ambientais, podendo conferir à construção civil um caráter convergente com as tendências globais de

desenvolvimento sustentável (Rodrigues e Joekes, 2011; Benhelal *et al.*, 2019, He *et al.*, 2019; Nidheesh e Kumar, 2019).

Nesse cenário, mediante a crescente demanda por materiais ecológicos, os materiais cimentícios suplementares (MCS) surgem como alternativa ao tradicional cimento Portland (Lothenbach *et al.*, 2011). Geralmente na forma de resíduos industriais e agrícolas, como sílica ativa, escória de alto forno, cinzas volantes, cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana de açúcar, os MCS são utilizados com sucesso para produção de aglomerantes ecológicos com baixa emissão de carbono (Thomas *et al.*, 2019; Aprianti, 2017; Solak *et al.*, 2018; Letelier *et al.*, 2018; Coppola *et al.*, 2018). Dessa forma, além das vantagens ambientais, como diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, redução do gasto energético e destinação sustentável para resíduos sólidos, o uso de MCS pode implicar em melhorias de desempenho do compósito cimentício resultante (De Carvalho *et al.*, 2019). Esse desempenho otimizado pode ser alcançado em termos de comportamento mecânico (resistência à compressão, flexão etc.), ou relacionado a parâmetros que indicam durabilidade (porosidade, resistência à penetração de cloretos, resistência à carbonatação, envelhecimento acelerado etc.) (Lee *et al.*, 2012).

Nesse sentido, à medida que o conhecimento sobre o tema avança, os percentuais de substituição tendem a aumentar e novas misturas de cimento Portland com MCS são desenvolvidas. A literatura pertinente enfatiza as substituições parciais, que apresentam larga escala de abrangência (3% - 80% de MCS), resultando em aglomerantes binários, ternários ou quaternários, dependendo dos materiais suplementares utilizados (Al-Mansour *et al.*, 2019). Todavia, a substituição total (100% de MCS) precisa ser melhor investigada (Al-Mansour *et al.*, 2016). Assim, para ampliar as possibilidades de uso dos MCS, contribuir ainda mais com a solução de problemas ambientais e impulsionar o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho avaliou substituições totais de cimento Portland por MCS.

A cinza de biomassa (CB) constitui opção vantajosa para uso em misturas de cimentos ecológicos (Aprianti, 2017; Medina *et al.*, 2019; Vassilev *et al.*, 2013). Obtida pela queima de resíduos em usinas de energia elétrica, a CB pode ter como origem qualquer material orgânico, principalmente o de culturas energéticas já destinadas à obtenção de

biomassa e à produção de energia, como culturas oleaginosas (coco, girassol, azeitona etc.), culturas de amido e açúcar (beterraba, cana de açúcar etc.), culturas lignocelulósicas (capim e madeira lenhosa, como o eucalipto) ou resíduos sólidos da agricultura, indústria de alimentos, indústria madeireira, criação de animais e processos industriais diversos (restos de plantações, bagaço, palha, aparas, serragem, resíduos biodegradáveis de animais e do tratamento de águas residuais etc.) (Pavlíková, 2019).

Nesse âmbito, cumpre lembrar que, atualmente, toneladas de cinzas são geradas pela queima da madeira na forma lenha, resíduos ou pequenos pedaços processados (cavaco). Como se trata de uma fonte de energia renovável, a tendência é que o consumo de madeira, principalmente eucalipto, aumente substancialmente nos próximos anos, gerando enormes quantidades de cinzas.

A respeito dos materiais cimentícios suplementares, destacam-se as cinzas provenientes da queima de madeira, chamadas de cinzas de biomassa de madeira (CBM) ou cinzas da madeira (CA) (Aprianti, 2017). Diversas pesquisas têm sido realizadas para viabilizar o uso das CBM no cimento e concreto. De modo geral, a CBM funciona como material pozolânico (Del Bosque *et al.*, 2019), que promove efeito fíler (Berra *et al.*, 2015) e pode ser utilizada como aglomerante junto a outros MCS (Giergiczny, 2019) ou atuar como precursora de materiais álcali-ativados (Font *et al.*, 2020). As propriedades conferidas aos materiais cimentícios com CBM vão desde comportamento mecânico otimizado (Farinha *et al.*, 2019), até melhorias em termos de durabilidade (Omran *et al.*, 2018).

A sílica ativa (SA) é um subproduto proveniente da produção de silício metálico e ligas de ferrosilício (Nochaiyaet *et al.*, 2010). Na forma de pó muito fino, apresenta partículas esféricas bem pequenas, alto teor de sílica amorfa, alta atividade pozolânica e igual alta reatividade (Skibsted e Snellings, 2019). De modo geral, a SA pode ser utilizada em substituição parcial ao cimento Portland, como adição, promovendo melhorias significativas de desempenho, tanto no estado fresco quanto no endurecido (Neville, 2012). Além disso, pode ser utilizada como precursor em materiais álcali-ativados, muitas vezes associado a outros MCS (Batista *et al.*, 2019). A adição de SA promove densificação da matriz cimentícia e torna a zona de transição interfacial mais coesa, melhorando a ligação entre pasta e agregados. Conseqüentemente, o comportamento

mecânico é melhorado, com aumento significativo das resistências à compressão, flexão e tração (Smarzewski, 2019). Em termos de durabilidade, o uso de SA diminui a permeabilidade e aumenta a resistência à corrosão, ao ataque de sulfatos e ao desgaste superficial (Paris *et al.*, 2016). Por isso, a SA é muito utilizada em concretos de alto desempenho e passou a ser um MCS com alto valor agregado (Dybel e Furtak, 2017).

Em linha com os materiais ecológicos, várias pesquisas são desenvolvidas sobre aglomerantes alternativos, como cimentos de aluminato de cálcio, cimentos de sulfoaluminato de cálcio, cimentos supersulfatados e materiais álcali-ativados (MAA) (Juenger *et al.*, 2011). Os MAA são formados a partir da reação de álcali-ativação, na qual um determinado tipo de aluminosilicato sólido reage em meio alcalino aquoso, produzindo um aglomerante composto por fases hidratadas de álcali-aluminosilicatos. De acordo com as definições da literatura recente, os precursores são fontes de aluminosilicatos, enquanto os ativadores induzem as condições alcalinas (Provis, 2019). Além disso, pesquisas mostram que os materiais produzidos com aglomerantes álcalis ativados podem alcançar propriedades mecânicas e durabilidade similares ou superiores aos materiais cimentícios (Tashima *et al.*, 2013). Os MAA têm alcançado destaque no meio científico, visto que, geralmente, são produzidos com resíduos industriais, além de constituírem uma alternativa ecológica e sustentável aos tradicionais materiais de construção (Bernal e Provis, 2014).

Os materiais funcionais estão na vanguarda da pesquisa sobre materiais, em vista do crescente avanço tecnológico da sociedade e da necessidade de aplicações cada vez mais específicas (Banerjee e Tyagi, 2012). No campo dos materiais de construção, frequentemente essas aplicações visam à preservação do meio ambiente, como descontaminação de efluentes, captura e degradação de CO<sub>2</sub>, superfícies autolimpantes, materiais despoluentes, entre outras (Shen *et al.*, 2015). As propriedades despoluentes e autolimpantes estão relacionadas ao potencial fotocatalítico do material e aos fenômenos físicos de superfície. O material funciona como catalizador e sítio para reações de oxidação e degradação de matéria orgânica, enquanto a superfície se torna super-hidrofílica (Dalawai *et al.*, 2020). Entretanto, a maioria dos estudos sobre fotocatalise em materiais de construção têm base nos efeitos fotocatalíticos do óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), frequentemente nanoestruturado em filmes finos, adicionado em cobrimentos como tintas

e selantes ou misturado em materiais cimentícios (Jimenez-Relinque *et al.*, 2015). Esses processos são dispendiosos em termos financeiros. Logo, materiais naturais com propriedades fotocatalíticas, autolimpantes e despoluentes são alternativas viáveis para difundir os materiais de construção funcionais.

As obras de infraestrutura servem de base para promover o crescimento mundial e melhorar a qualidade de vida das pessoas (Fischer e Amekudzi, 2011). Sem a infraestrutura e instalações necessárias não é possível se locomover ou transportar cargas (rodovias, ferrovias, portos, aeroportos etc.), bem como obter água tratada (sistema abastecimento de água potável), lançar e tratar efluentes em locais adequados (sistema de esgotamento sanitário), ter acesso a serviços públicos (iluminação, energia, gás, telefonia, internet etc.) ou manter o funcionamento de indústrias e da agricultura e pecuária (Zhou *et al.*, 2017). É nesse contexto que os objetivos 6 - “água limpa e saneamento” e 9 - “indústria, inovação e infraestrutura” da Agenda 2030 das Nações Unidas evidenciam que o desenvolvimento sustentável mundial está intimamente associado à infraestrutura necessária para suprir as demandas de cada um dos setores da sociedade contemporânea.

Nesse sentido, é possível observar que as obras de pavimentação são indispensáveis à infraestrutura básica. Em virtude da relevância desse tipo de construção, que possui (i) alto consumo de matérias primas, (ii) grandes extensões de ambiente construído (usualmente concreto ou asfalto), (iii) contato permanente com o ambiente externo e (iv) contínuo trânsito de veículo e pessoas, novas opções de pavimentos ecológicos têm surgido para atender à demanda por materiais sustentáveis (Zhang, 2013; Cabrera *et al.*, 2018). Nesse escopo, os pavimentos intertravados (*paving blocks* ou *paver*) têm sido vastamente utilizados porque sua aplicação não estrutural amplia o uso de resíduos como matérias primas (agregados, substituições etc.), sem necessidade de exigências excessivas com desempenho elevado, mas atendendo aos requisitos necessários do projeto (Wang *et al.*, 2019; Pennarasi *et al.*, 2019). Em vista das características mencionadas acima, o uso de pavimentos com propriedades fotocatalíticas e consequente capacidade autolimpante impulsiona a preservação do meio ambiente (Sikkema *et al.*, 2019).

Outro aspecto importante é que as cidades estão cada vez mais impermeáveis, principalmente em países em desenvolvimento. A impermeabilização do solo, aliada ao

crescimento urbano desorganizado e descontrolado, ou mesmo à urbanização em bacias mais propensas a impactos de chuvas intensas com infiltração reduzida e ausência de defesas naturais, levam a incidentes como inundações. As inundações repentinas estão entre os riscos naturais mais catastróficos que causam perturbações no meio ambiente e nas sociedades (Khajehei *et al.*, 2020), além de serem a forma mais cara de desastre natural (Johnson *et al.*, 2020), principalmente quando vinculadas aos cursos de água, como rios (Blöschl *et al.*, 2019). As inundações em áreas urbanas causam danos significativos à infraestrutura, às comunidades e ao meio ambiente (Luo *et al.*, 2018). Episódios recentes de enchentes, alagamentos e enxurradas em cidades no Brasil (G1 Minas, 2020), por exemplo, poderiam ser minimizados com uma ocupação urbana mais adequada e uma infraestrutura urbana verde, como técnicas inovadoras de “ruas verdes”, pavimentos permeáveis, paredes verdes ou jardins de chuva (Gaffin *et al.*, 2012). Nesse sentido, os pavimentos de blocos de concreto se apresentam mais permeáveis que pavimentos convencionais de asfalto ou concreto de cimento Portland.

Em vista do exposto, existe um intenso movimento da comunidade científica para promover novas descobertas relacionadas aos materiais ecológicos com vistas ao desenvolvimento sustentável. Quando se tratam de obras para infraestrutura, os desafios são acentuados pela necessidade de grandes volumes da matéria prima utilizada e, por isso, o uso de resíduos em substituição parcial ao cimento Portland tem sido abordado em diversos trabalhos da literatura pertinente (Bezerra *et al.*, 2017). Outras pesquisas investigam o desenvolvimento de materiais álcali-ativados a partir de materiais cimentícios suplementares (Bezerra *et al.*, 2019). Entretanto, uma abordagem conjunta sobre substituição total ao cimento Portland, aglomerantes álcali-ativados e uso de resíduos como matéria prima, com foco na produção de blocos de pavimentação intertravada, ainda é pouco disponível na literatura. Nesse cenário, o presente trabalho estudou concretos com baixa emissão de carbono, utilizando cimento binário composto por cinza de biomassa e sílica ativa para a produção de blocos de pavimentação ecológicos. A caracterização dos blocos de pavimentação foi realizada de forma abrangente, desde a resistência mecânica até a sua investigação microestrutural. Além da baixa emissão de carbono associada ao uso de resíduos, foi investigado o potencial de degradação de matéria orgânica e as consequentes propriedades autolimpantes dos concretos produzidos. Esta alternativa representa uma oportunidade de aliar o uso de

resíduos a propriedades autolimpantes, sem adição de óxidos fotocatalíticos ou processamento adicional, produzindo um material funcional com alta relevância para o meio ambiente, além de possuir o potencial de diminuir os custos de produção.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O cimento é o ator central da indústria de construção moderna, já que é essencial na aplicação como aglomerante nos concretos e argamassas (Mellado *et al.*, 2014). Sua produção, entretanto, baseia-se em um processo de alto impacto ambiental, uma vez que emite uma quantidade significativa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e que, algumas de suas etapas, como a de calcinação e a de moagem das matérias-primas, do carvão e do clínquer, demandam uma quantidade elevada de energia elétrica (Zhang *et al.*, 2014). É nesse âmbito que o emprego de aglomerantes alternativos ao cimento Portland pode atuar com grande relevância, do ponto de vista ambiental.

O aglomerante álcali-ativado poderia proporcionar economia no consumo de energia elétrica, além da redução da extração de recursos naturais, já que jazidas minerais seriam supostamente poupadas pela economia de cimento Portland e de argila caulim. Nesse contexto é necessário ressaltar, ainda, que tanto atividades de produção de energia elétrica como de mineração geram consideráveis impactos ambientais, usualmente deixando inúmeros passivos ambientais. Por isso, é preciso pensar em alternativas sustentáveis e imediatas e, a esse respeito, as pesquisas têm mostrado que os materiais produzidos com ligantes álcalis ativados podem alcançar propriedades mecânicas similares ou superiores ao aglomerante mais comumente empregado no planeta, o cimento Portland.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve como objetivo produzir e avaliar blocos intertravados para pavimentação a partir de materiais álcali-ativados, produzidos com cinzas geradas no processo de queima do cavaco de lenha de eucalipto e fuligem de fornos de ferro silício (sílica ativa), em substituição total do concreto de cimento Portland.



### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar as cinzas de cavaco de eucalipto (CCE) geradas através da queima em caldeira de uma indústria, bem como da sílica ativa;
- b) Determinar as dosagens otimizadas para produção de elementos de concreto para produção de pavimento intertravado;
- c) Caracterizar os aglomerantes compostos por diferentes proporções de CCE e de sílica ativa;
- d) Avaliar a resistência mecânica dos blocos de concreto desenvolvidos com substituição total do cimento por CCE no estado endurecido;
- e) Avaliar os parâmetros relacionados à expansibilidade, absorção de água e desgaste e investigação dos detalhes das microestruturas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com análise de degradação de efluentes.

# CAPÍTULO 2

---

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAVIMENTOS

No parecer de Medina (1997) e Silva (2011), o pavimento é compreendido como uma estrutura de variadas camadas de espessuras limitadas, fundada sobre o perfil proposto da terraplenagem, com o objetivo técnico e econômico de resistir aos esforços procedentes da circulação de veículos e do clima, assim proporcionando aos usuários melhores condições de rolamento em conjunto com conforto, economia e segurança. Balbo (2007) afirma que o pavimento é uma armação composta por materiais de revestimento de uma superfície que são compostos por distintos materiais compactados, apropriados de modo a atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de modo durável e com menor custo.

De acordo com a Norma Brasileira NBR 7207/82, Pavimentação, a terminologia determina o pavimento como “uma estrutura construída após terraplenagem”, tendo finalidades econômicas simultaneamente associadas a:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços verticais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O esqueleto do pavimento é constituído, ainda de acordo com a NBR 7207/82, pelo subleito, sub-base, base e revestimento. As bases possuem a função de resistir e distribuir os esforços verticais, fazendo com que esses impulsos aplicados no revestimento sejam transmitidos com pressões inferiores ao subleito, sendo a capa ou o revestimento o elemento que permanece em constante contato com a base e com os pneus (Senço, 1997).

Em um momento no qual ao pavimento é requisitada uma carga de veículo  $Q$ , que se transporta sobre o revestimento com um aceleramento  $V$ , há uma possibilidade de tensão normal da direção vertical  $\sigma_0$  (de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal  $\tau_0$  (de cisalhamento), como é evidenciado na Figura 2.1.

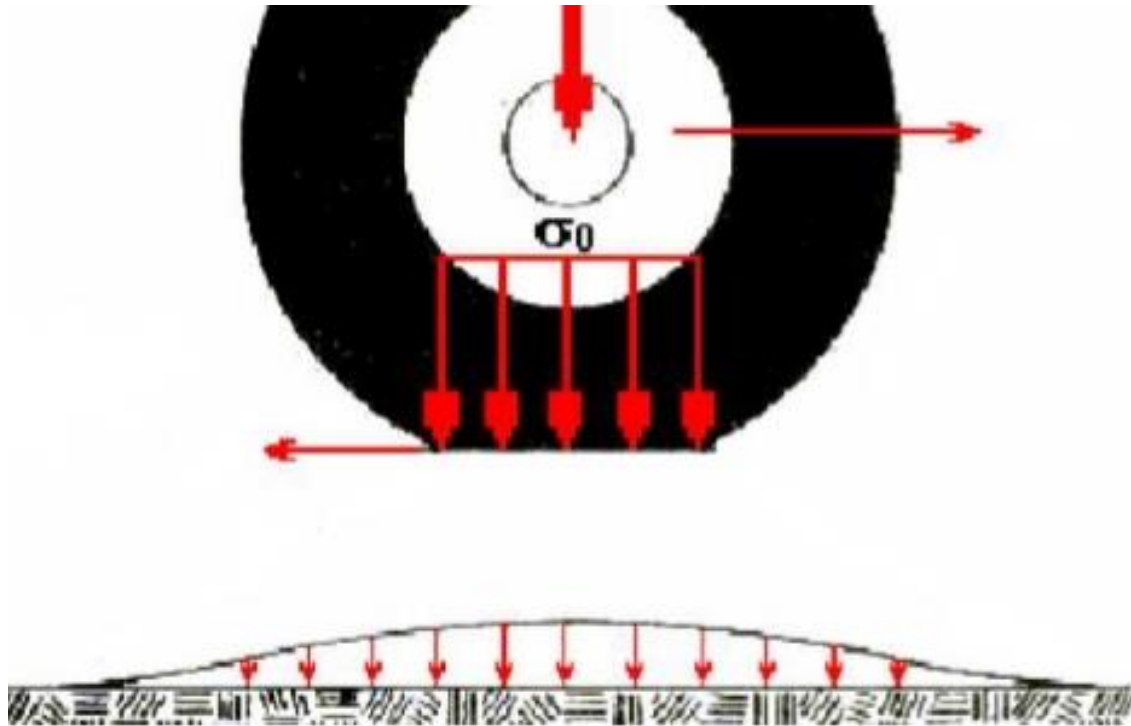


Figura 2.1 - Cargas aplicadas em um pavimento (Silva, 2011).

O subleito, em concordância com a NBR 7207/82, é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento. A espessura do subleito é definida por sua capacidade de suporte e, por isso, os subleitos de qualidade inferiores requerem uma espessura de pavimento maior. Nas camadas superiores dos pavimentos devem ser utilizados materiais com características elevadas, referentes à sua nobreza, uma vez que as forças provenientes dos pneumáticos são maiores. Já nas camadas inferiores em direção ao subleito são utilizados materiais abaixo dos nobres, uma vez que há uma dissipação das solicitações no pavimento (Senço, 1997).

As demais definições, ainda de acordo com a NBR 7207/82, esclarecem que:

- A sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando, por qualquer circunstância, não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem.
- A base é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento.
- O revestimento, por seu turno, é a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e é destinado, simultaneamente:
  - a) a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e à segurança;
  - b) a resistir aos esforços que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

De modo geral, o revestimento dos pavimentos deve possuir boa resistência ao desgaste, dando segurança, confiança e conforto ao usuário. Na seção seguinte serão apresentadas as classificações de pavimento de acordo com as suas tipologias.

### **2.1.1 Pavimentos flexíveis**

O pavimento flexível não é um objetivo proposto neste trabalho, mas é importante referenciá-lo para que talvez seja possível realizar análises comparativas. De acordo com a classificação de pavimento rodoviário, Bernucci *et al.* (2006) caracterizam essa estrutura em duas conformidades principais: flexível e rígida. O costume de novas nomenclaturas atualmente é visto diariamente como o uso de Pavimentos Asfálticos e Concreto de Cimento Portland, respectivamente, de modo a designar a variedade de revestimento do pavimento.

O pavimento flexível usufrui de variadas camadas de modo a partilhar as cargas para uma seção mais aglomerada do subleito (Figura 2.2). Esse tipo de pavimento é deformado, até certa demarcação, não ocorrendo uma ruptura. Os pavimentos asfálticos são compostos por camadas granulares, que se configuram por uma mistura constituída de agregados, as quais trabalham a compressão e as camadas asfálticas, ligantes asfálticos que se relacionam diretamente com a tração e a compressão. De forma geral o objetivo é resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança do usuário e impermeabilizar as camadas inferiores da estrutura.

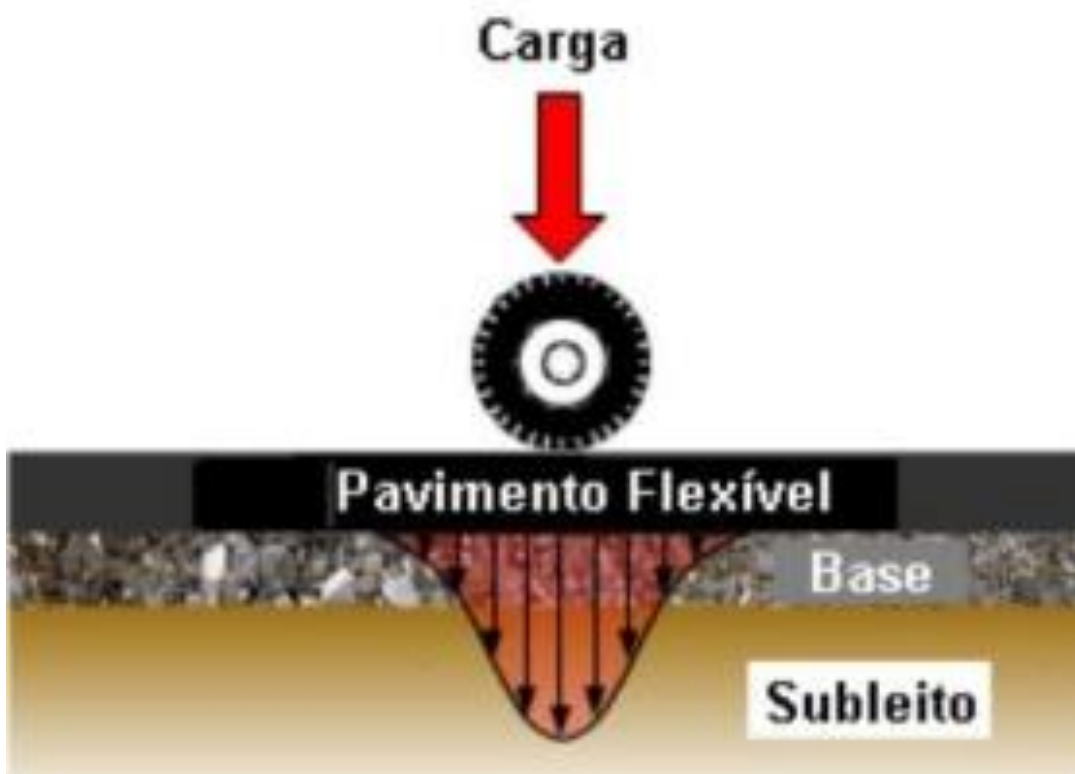


Figura 2.2 - Distribuição de cargas no pavimento flexível (Departamento de Transportes da UFPR, 2009).

Em conformidade com o DNER/98, são três as gradações dominantes de defeitos que sintetizam a deterioração dos pavimentos flexíveis, sendo essas: trinamento, deformação e desagregação. A Tabela 2.1 condensa as características de deterioração e seus feitos.

Tabela 2.1 - Gradação de deformidades dos pavimentos flexíveis (Vieira, 2002).

Categoria do Defeito	Causa Genérica	Causa Específica
<u>Trincamento</u>	Associada com Tráfego	Cargas Repetidas (Fadiga)
		Carga Excessiva
		Escorregamento de Capa
	Não associada com o Tráfego	Alterações de Umidade
		Alterações Térmicas
		Retração (Propagação)

Categoria do Defeito	Causa Genérica	Causa Específica
<u>Deformação</u>	Associada com Tráfego	Carga Excessiva (Cisalhamento)
		Fluência Plástica
		Densificação (Compactação)
	Não associada com o Tráfego	Expansão
		Consolidação de Substratos
<u>Desagregação</u>	Associada com Tráfego	Degradação do Agregado
	Não associada com o Tráfego	Falta de atributos dos materiais

As deformidades estão relacionadas com a influência do tráfego e as condições ambientais, de acordo com Vieira (2002). As camadas em sobreposição exercem a capacidade de suporte em função das características dos materiais utilizados nas porções. Nesse sentido, a Figura 2.3 demonstra um exemplo de seção-tipo de um pavimento flexível.

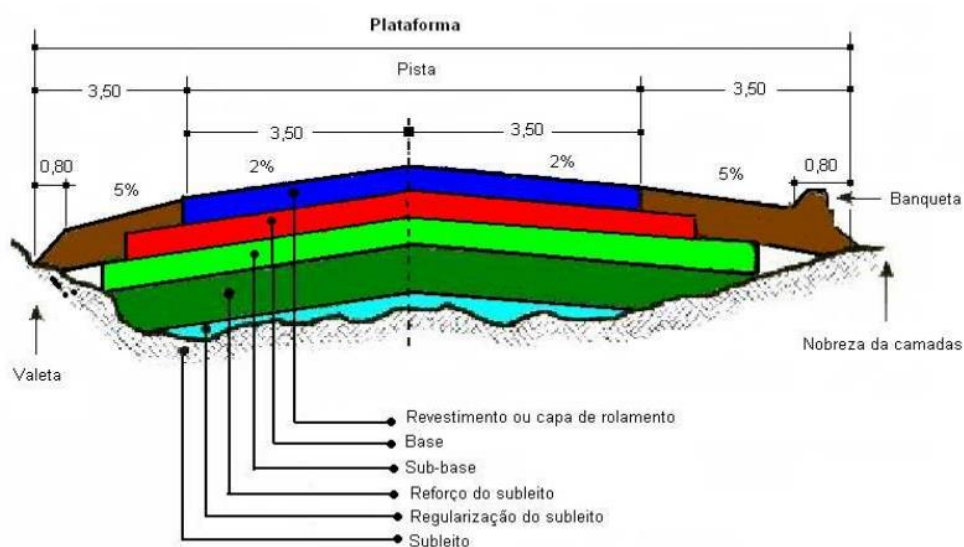


Figura 2.3 - Seção transversal típica de um pavimento flexível (Silva, 2011).

### 2.1.2 Pavimentos rígidos

De modo sintetizado, pode-se determinar um pavimento rígido como sendo aquele que denota uma camada possuidora de inflexibilidade transcendente com relação às demais inferiores, a qual se impregna da maior parte das tensões provenientes do tráfego. Consoante o DNIT (2003), o pavimento rígido constitui-se de placas de concreto de cimento Portland sobre uma base de material granular ou cimentada.

Em conformidade com Padula (2008), o pavimento rígido é fundamentado por uma placa de concreto de cimento Portland que cumpre a função de revestimento e base em conjunto, além de sub-base com o intuito de aperfeiçoar a capacidade de suporte do subleito. Conforme Balbo (1993), em termos funcionais, a distinção dominante entre o pavimento flexível e o pavimento rígido consiste na ocorrência de que as cargas injetadas no primeiro tendem a estabelecer uma superfície de tensões mais agrupada junto ao ponto de aplicação das mesmas, na mesma proporção que no pavimento rígido. Então, a área de tensões é mais disseminada, sendo dividida por toda a dimensão da placa e assim suavizando os esforços que regressam ao subleito, conforme a Figura 2.4 evidencia.

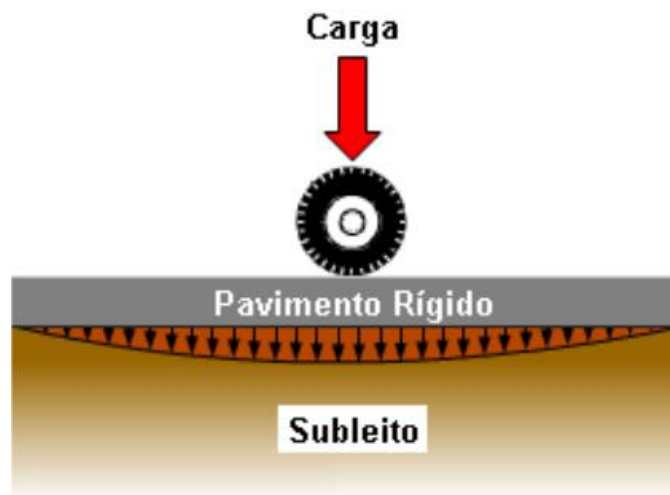


Figura 2.4 - Distribuição de cargas no pavimento rígido (Departamento de Transportes da UFPR, 2009).

No pavimento rígido, as placas de concreto replicam-se pelo grande segmento da capacidade estrutural do pavimento, sendo a resistência mecânica do concreto fundamental para o seu dimensionamento. Desse modo, sua função é substancialmente

ligada à tração, possuindo diversos parâmetros para o seu dimensionamento do tráfego de veículos, do número de passadas e da carga por eixo.

Helene *et al.* (2004) garantem que o pavimento rígido é estabelecido por camadas que trabalham essencialmente a tração. Suas estimativas são baseadas nas particularidades de resistências mecânicas das placas de concreto de cimento Portland, as quais se constituem a seção característica de pavimento de concreto, conforme ilustrado na Figura 2.5.

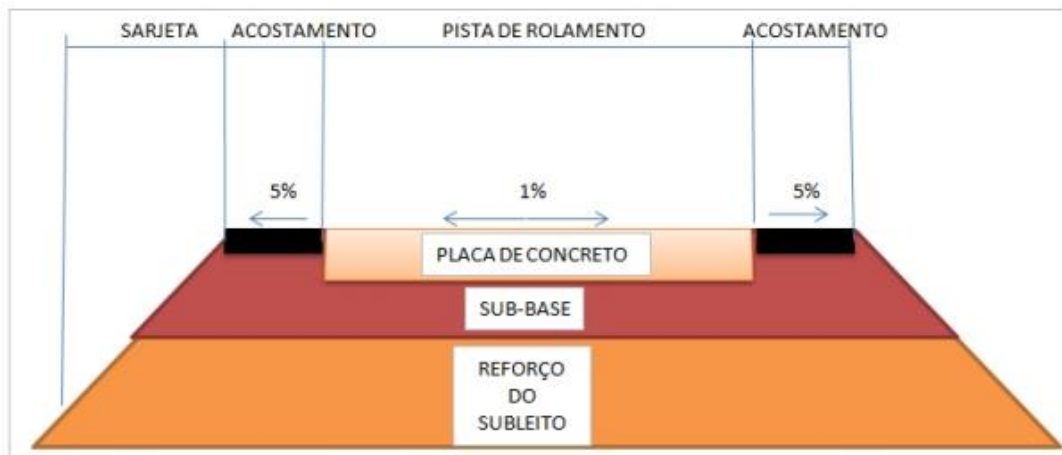


Figura 2.5 - Seção típica de pavimento rígido (Helene *et al.*, 2017).

Em conformidade com Rodrigues (1995), a placa de concreto de cimento Portland é um imprescindível constituinte estrutural, amenizando as tensões nas camadas inferiores devido à sua grande capacidade de rigidez à tração. Outrossim, o pavimento rígido é pouco deformável em comparação aos demais pavimentos.

Mesmo não sendo foco desta pesquisa, seguem alguns comparativos entre o pavimento rígido e o pavimento flexível, dividido em determinadas categorias como de desempenho e de projeto, consoante Mesquita (2001).

Do ponto de vista econômico, o pavimento rígido em concreto de cimento Portland apresenta as seguintes características:

- Custo inicial alto;
- Menor necessidade de manutenção;



- Custo anual baixo e previsível;
- Maior qualidade, durando por muitos anos;
- Há economia de até 30% em iluminação, pois, devido à sua superfície clara, que tem maior capacidade de reflexão da luz.

O pavimento flexível em concreto de cimento asfáltico pétreo apresenta as seguintes características:

- Custo varia com o preço do petróleo;
- São necessárias manutenções rotineiras de alto custo;
- Custo anual alto e de difícil determinação;
- Danifica-se facilmente, causando danos aos veículos que transitam sobre este;
- O custo com iluminação é mais elevado.

O desempenho do pavimento é muito importante e, nesse sentido, o pavimento rígido em concreto de cimento Portland apresenta as seguintes características:

- Vida útil de mais de 20 anos;
- Resistente a agentes químicos e intempéries;
- Conserva toda a seção transversal;
- Tem uma boa distribuição das cargas;
- Pouco afetado pelo calor.

O pavimento flexível de cimento asfáltico possui características inferiores em relação ao seu desempenho:

- Vida útil de menos de 10 anos;
- Não resiste aos mesmos agentes químicos e intempéries;
- Formam-se facilmente trilhas de rodas e buracos;
- Concentra as cargas em poucas partes do pavimento;
- Não resiste a altas temperaturas, podendo ocorrer o amolecimento e a perda do material.

O projeto de um pavimento é muito importante para toda a sua vida útil. Por isso, o pavimento rígido em concreto de cimento Portland possui as seguintes técnicas:

- Dimensionamento pouco variável;
- A resistência aumenta com o tempo;
- Os meios-fios e sarjetas podem ser construídos junto com o pavimento;
- A seção total do pavimento é menor que a do asfalto;
- A estrutura de drenagem é mais simples de ser realizada, uma vez que a água escoar mais facilmente.

O pavimento flexível de cimento asfáltico possui técnicas como:

- Os métodos de projeto são muito variáveis;
- A resistência diminui com o tempo, principalmente em locais de temperaturas mais altas;
- Os meios-fios e sarjetas devem ser construídos separadamente;
- Requer maior escavação e movimentação de terra, aumentando seu tempo de produção;
- Sua estrutura de drenagem é mais complexa, pois, devido à sua textura, retém mais água.

Em relação à natureza de consumo de energia, o pavimento rígido em concreto de cimento Portland possui as seguintes atribuições:

- Uso materiais locais e abundantes na natureza, como carbonato de cálcio, sílica, alumínio e minério de ferro;
- Em grande parte das obras são utilizados equipamentos de menor porte, e, conseqüentemente, menos combustível;
- Mistura feita a frio, utilizando-se energia elétrica.

Todavia, há que se destacar que o consumo de energia do pavimento flexível de cimento asfáltico é maior em relação ao consumo de energia do pavimento de concreto pois:

- Origina-se do petróleo, material escasso na natureza;
- Usam-se apenas equipamentos de grande porte, consumindo muita energia;
- O asfalto é usinado a quente, consumindo energia vinda do petróleo.

São necessários para a construção do pavimento rígido de concreto de cimento Portland:

- São usadas, no máximo, duas camadas;
- Equipamentos simples;
- Mão de obra ampla e não especializada.

E são necessários para a construção do pavimento flexível em concreto de cimento asfáltico:

- Diversas camadas;
- Equipamentos mais complexos e difíceis de serem encontrados;
- Pouca quantidade de serviços e materiais.

Pensando na manutenção de um pavimento, há uma grande preocupação com custos financeiros futuros. Nesse sentido, o pavimento rígido de concreto tem o seguinte caráter:

- Mais durável, necessitando de pouca manutenção rotineira;
- Quando são feitos reforços, estes ficam uniformes;
- Necessita de menos mão de obra e os equipamentos são simples.

O pavimento flexível tem como caráter de manutenção os seguintes aspectos:

- Precisa ser realizada a manutenção constante;
- Reforços ou recapeamentos irregulares;
- Muita mão de obra e equipamentos complexos.

A segurança é o item mais importante dentre os outros citados anteriormente, pois está relacionada à vida do usuário de uma via. Nesse ínterim, o pavimento rígido de concreto possui aspectos que podem fazer diferença para o usuário, pois:

- Reflete a luz mais facilmente, facilitando a visão dos condutores que trafegam pela via;
- Pode ser dado ao concreto a textura desejada, deixando-a mais lisa ou dando a ela ranhuras, que aumentam o atrito;
- A inclinação da seção transversal é baixa, dando mais controle dos veículos;
- Sua superfície resiste melhor ao tempo, dando segurança a quem trafega na via;
- A estrutura de drenagem é mais simples de ser realizada. A água escoar mais facilmente.

Também visando à segurança, o pavimento flexível possui características inferiores em relação ao pavimento de concreto, como:

- Reflete pouco a luz e a visibilidade horizontal também é baixa;
- Não há muito controle de textura. Quando molhada, sua superfície torna-se escorregadia;
- Alta inclinação transversal, dificultando o controle dos veículos;
- A superfície deteriora-se facilmente, criando-se buracos, que conseqüentemente diminuem a segurança da via;
- Sua estrutura de drenagem é mais complexa, pois, devido à sua textura, retém mais água.

### **2.1.3 Pavimentos semirrígidos ou semiflexíveis**

De acordo com o DNIT (2006), os pavimentos semirrígidos podem ser definidos como uma fundação cimentada por algum aglutinante - material frequente no uso da construção, como a cal e o cimento, que associa entre si as partículas de um agregado - dispondo de atributos cimentícios, e tendo como exemplo uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica. Em síntese, a conformidade do pavimento semirrígido refere-se a uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis, ou seja, apresenta-se como combinações tais como o solo-cimento, o solo-cal ou o solo-betume. Essas mesclas, e outras, possuem caráter aceitável no ensaio de resistência à tração.

O pavimento que dispõe de um reforço de concreto asfáltico na parte superior da placa de concreto é classificado como pavimento composto. Os pavimentos rígidos possuem a constituição do tipo direta e indireta. A característica direta pode ser descrita como aquela em que uma camada de revestimento asfáltico é realizada acima da camada de base cimentada. Já o traço indireto ou invertido especifica-se quando a camada de revestimento é efetuada sobre a camada de base granular e sub-base cimentada. Este tipo de pavimento vem sendo bastante utilizado em corredores de ônibus mais modernos, onde as paradas são de concreto, e os intervalos são semi-rígidos. Seu custo é menor que o pavimento rígido tanto na manutenção, quanto na implantação e por conta da ação de óleos e combustíveis, são as placas de concreto mais indicadas. A Figura 2.6 evidencia as camadas comuns em um pavimento semiflexível, caracterizando-se do tipo direto.

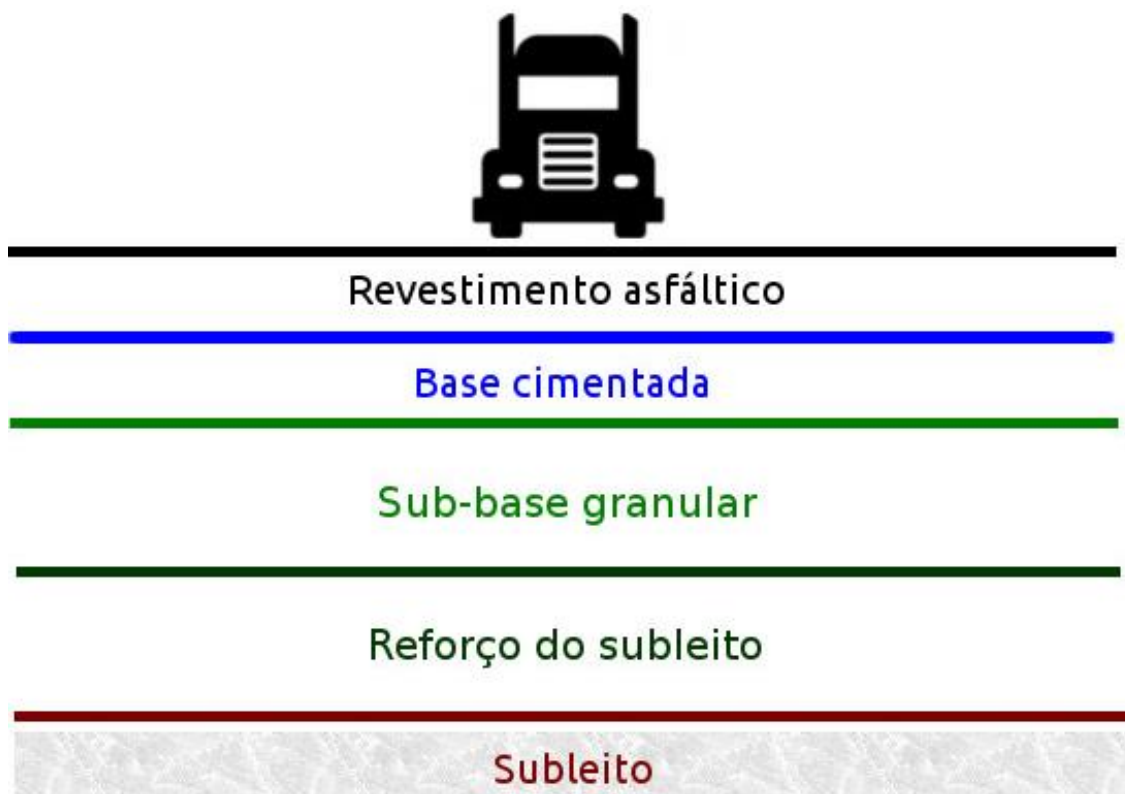


Figura 2.6 - Camadas comuns em um pavimento semiflexível (E-Civil, 2017).

#### 2.1.4 Pavimentos intertravados

Para melhor entender a importância dos pavimentos com camada de revestimento constituída de peças pré-moldadas de concreto é relevante recorrer a alguns dados históricos que mostram como os povos, através dos séculos, sentiram a necessidade de criar e construir caminhos, trilhas e atalhos com o objetivo de vencer as distâncias existentes entre os povoados e suas colônias, estabelecendo, assim, algum tipo de comunicação entre eles (Godinho, 2009).

Cruz (2003) cita que na história da pavimentação romana fica clara a importância da utilização de pedras talhadas manualmente, as quais serviam como revestimento final da via. Um dos exemplos vivos dessa tecnologia é a via Ápia, que foi uma importante rota que ligava a cidade de Roma até o sul da Itália. Grande parte da via Ápia foi pavimentada pelos construtores da época com pequenas peças de pedras aparelhadas em forma octogonal. Com relação a esse mesmo contexto, Godinho (2009) menciona que os

caminhos romanos foram construídos de várias formas, de acordo com sua importância e expectativa de utilização, bem como em conformidade com as disponibilidades locais de materiais para construção, clima e topografia. Os materiais utilizados como revestimento dos caminhos de longa distância eram geralmente constituídos por solos arenosos, misturados a pedras naturais do tipo seixos rolados. Já as pedras talhadas manualmente nas formas retangulares e poligonais eram utilizadas nos revestimentos das ruas mais utilizadas das cidades.

Similarmente ilustrados como Pavers e Paviess, os pavimentos intertravados são blocos pré-fabricados e maciços que possibilitam assoalhar plenamente uma superfície, de acordo com Wiebbelling (2015). A designação do conceito “intertravado” refere-se à eficiência com que o material tende a resistir às oscilações de deslocamento vertical, horizontal, de rotação, ou giração quanto aos elementos adjacentes.

Nos dias atuais, os pavimentos com blocos pré-moldados vêm sendo utilizados com maior frequência nos países, assim como no Brasil, uma vez que esse piso possui a possibilidade de utilização de materiais alternativos que se relacionam positivamente com os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos, consoante Fioriti, Akasaki e Ino (2006). Quando comparados aos pavimentos flexíveis, os pavimentos intertravados apontam deformação vertical ínfima - ambos possuindo a mesma espessura. Em concordância com Wiebbelling (2015), a vida útil dessa categoria de pavimento demonstra uma ressalva positiva, quando comparada aos tipos de pavimentos padrões, detendo de um aproveitamento de, ao menos, 25 anos.

Godinho (2009) afirma que normas vigentes não contemplam, sequer, o termo pavimento intertravado, quiçá abordam de maneira clara as características de peças que realmente se constituem componentes de um pavimento que promova sua propriedade fundamental, que é o intertravamento. O autor cita, ainda, que a normalização para pavimentos intertravados é preocupante, pois faltam diretrizes para atuação da engenharia. De acordo com ele, é necessária uma maior abertura quanto às especificações sobre a resistência mecânica ou adequação de análise de desgaste por abrasão. A Figura 2.7 evidencia a seção transversal típica dos pavimentos intertravados com omissão nos casuais abaulamentos e dispositivos de drenagem.

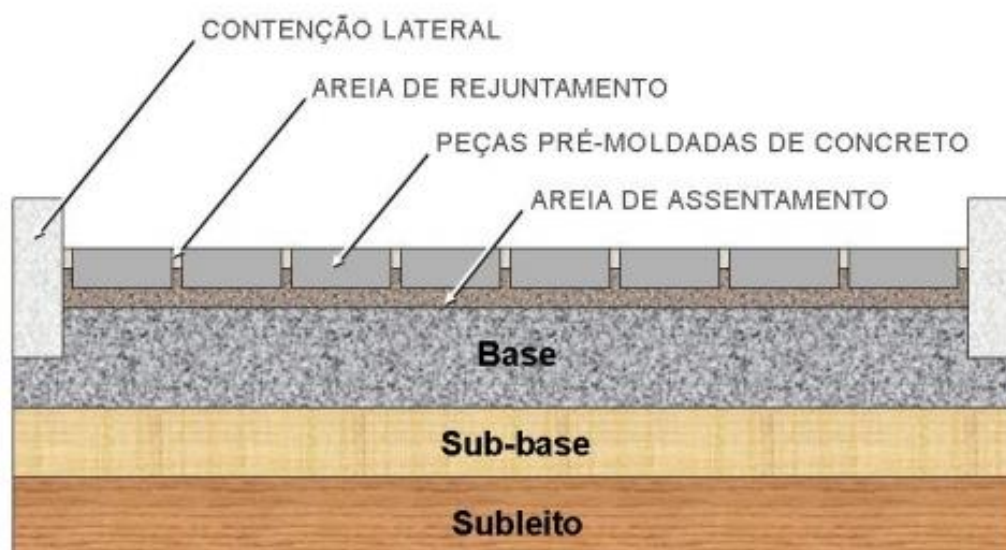


Figura 2.7- Estrutura típica de um pavimento intertravado (Godinho, 2009).

Nesse tipo de estrutura, a camada de rolamento é desenvolvida por peças pré-moldadas de concreto, compondo um revestimento assentado sobre uma demão tênue de areia. A base, como fundamento estrutural do pavimento, pode ser homogeneizada com material exclusivamente granular ou estabilizado. A camada deste deve ser pouco permeável ou até mesmo impermeável, evitando, evidentemente, o ingresso da água e a imatura degradação do subleito (Godinho, 2009).

O revestimento da sub-base refere-se a uma complementação da seção-tipo, admitindo um dimensionamento prévio relacionado com o leito regularizado ou com o subleito, de acordo com as cargas provenientes do tráfego gerado e demais características mecânicas e elásticas. Conforme Wiebbelling (2015), os blocos de concreto possuem os seguintes atributos:

- Possuem uma absorção menor de luz solar, diminuindo o desconforto causado pela grande elevação da temperatura ambiente;
- Pode possuir, ao mesmo tempo, capacidade estrutural e valor paisagístico;
- Possibilita simples ajuste quando ocorre recalque no subleito que prejudique a capacidade estrutural do pavimento;
- Permite simplificada acessibilidade a serviços subterrâneos e o ajuste não deixa marcas nítidas;

- Os blocos podem ser novamente utilizados;
- Não há necessidade de mão de obra altamente qualificada;
- Os materiais chegam à obra aptos a serem aplicados;
- Permite a liberação breve do tráfego, seguidamente à finalização da obra.

Atualmente, existem diversos modelos, tamanhos e cores de blocos.

#### **2.1.4.1 Arranjo**

Os condicionamentos da instalação das peças pré-moldadas de concreto afetam a aparência estética e o próprio desempenho do pavimento. Na Figura 2.8 são evidenciados os principais exemplos de arranjos existentes, consoante Hallack (1998).

Tanto a aparência estética como o desempenho dos pavimentos intertravados são afetados significativamente pelo arranjo de assentamento adotado. Há consenso entre pesquisadores quanto à hierarquia dos melhores arranjos. Em condições de tráfego intenso, o arranjo espinha-de-peixe é considerado o mais adequado, devido à sua boa resposta frente ao fenômeno de escorregamento analisado em relação ao travamento horizontal.

Sobre essa questão, Godinho (2009) entende que os pavimentos com arranjo do tipo “espinha-de-peixe” dispõem de favoráveis níveis de desempenho quando comparados aos demais, possuindo valores inferiores de deformação permanente, os quais estão relacionados ao tráfego. Por sua vez, os pavimentos com o arquétipo de assentamento do tipo “fileira” possuem maiores deformações permanentes, essencialmente quando o assentamento for paralelo ao sentido do tráfego.

A Figura 2.9 explicita o seguimento do tipo assentamento no funcionamento dos pavimentos intertravados, que é alcançado no apuramento mencionado na referência citada. “O Boletim Técnico da ICPI nº 4 (ICPI, 2002) recomenda a utilização do arranjo do tipo ‘espinha-de-peixe’ em áreas de tráfego veicular”.



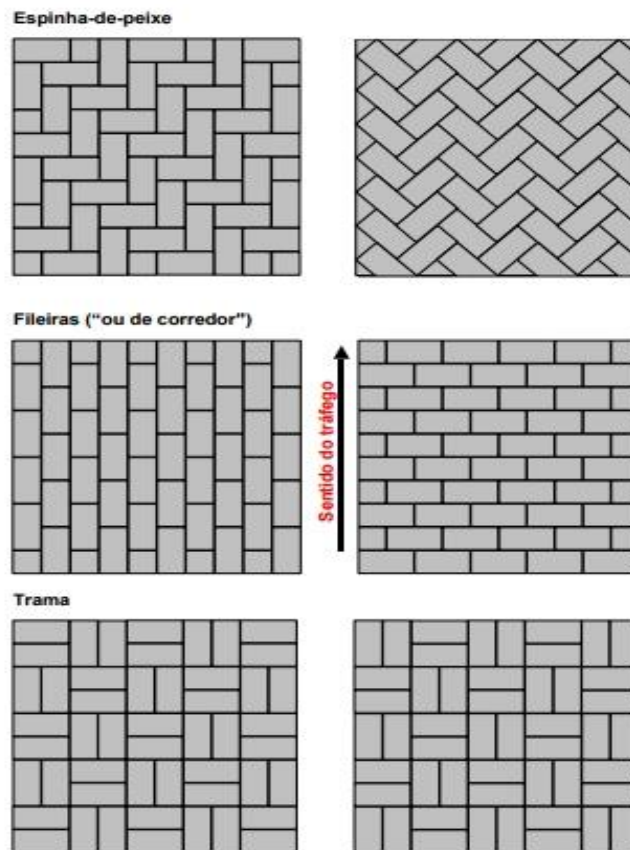


Figura 2.8 - Principais tipos de assentamentos das peças pré-moldadas de concreto (Hallack, 1998).

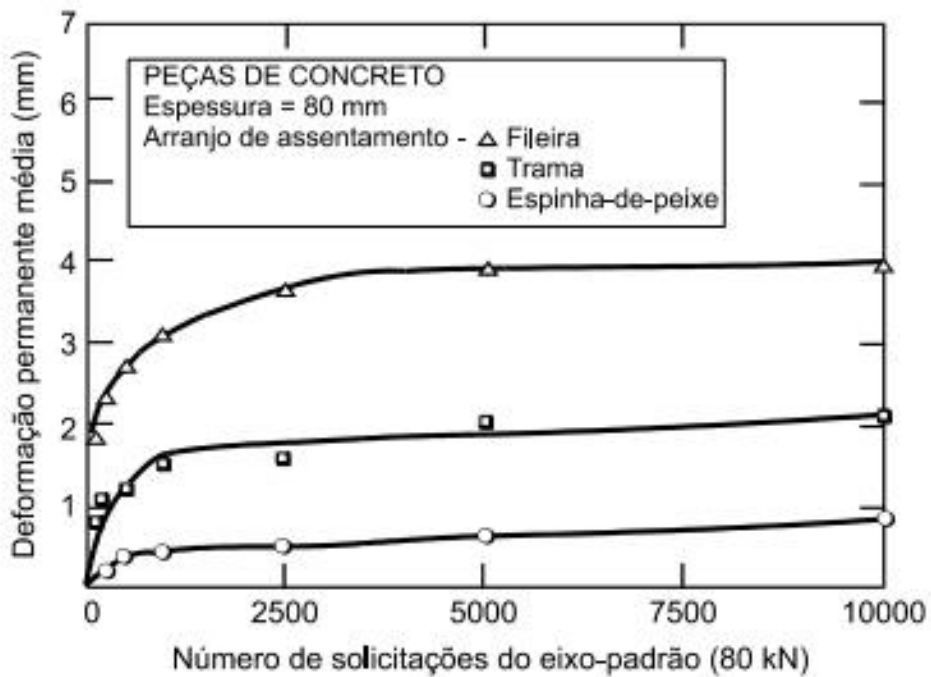


Figura 2.9 - Efeito do arranjo de assentamento das peças de concreto no desempenho do pavimento sob efeito do tráfego (Godinho, 2009).

#### 2.1.4.2 Forma

Na concepção de Godinho (2009), um pequeno número de ensaios ratifica que as peças pré-moldadas de concreto com lados segmentados comportam-se de forma mais adequada do que aquelas com lados retos ou suavemente curvados, favorecendo menores deformações permanentes na trilha de roda, bem como menores deformações horizontais (ondulações). Entretanto, não existe um formato padrão para as peças pré-moldadas de concreto e a utilização delas varia conforme o dimensionamento do pavimento, buscando sempre uma melhor distribuição dos esforços.

A respeito dos formatos das peças pré-moldadas de concreto, Godinho (2009) assegura que não efetuam relevância no desempenho e no mecanismo funcional dos pavimentos. Assim, conclui-se que o único preceito recomendável com relação à sua forma é o de que ela tolere o assentamento em combinação bidirecional. A Figura 2.10 denota os formatos típicos das peças pré-moldadas de concreto. Outro ponto importante a se destacar é que a espessura das peças possui pouca ou nenhuma influência no comportamento estrutural dos pavimentos.

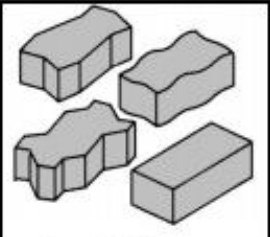
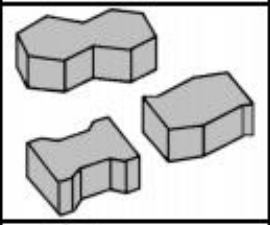
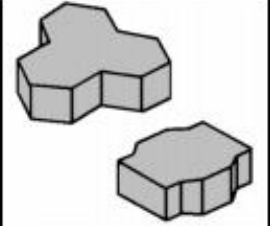
	A. Peças de concreto segmentadas ou retangulares, com relação comprimento / largura igual a dois (usualmente 200 mm de comprimento por 100 mm de largura), que entrelaçam entre si nos quatro lados, capazes de serem assentadas em fileiras ou em "espinha-de-peixe" e podem ser carregados facilmente com apenas uma mão.
	B. Peças de concreto com tamanhos e proporções similares aos da categoria A, mas que entrelaçam entre si somente em dois lados, e que só podem ser assentadas em fileiras. Podem ser carregados com apenas uma mão e genericamente têm o formato em "I".
	C. Peças de concreto com tamanhos maiores do que as anteriores, que pelo seu peso e tamanho não podem ser carregados com apenas uma mão, com formatos geométricos característicos (trapézios, hexágonos, triedros etc.), assentadas seguindo-se sempre um mesmo padrão, que nem sempre conforma fileiras facilmente identificáveis.

Figura 2.10 - Formatos típicos das peças pré-moldadas de concreto (Godinho, 2009).

### 2.1.4.3 Procedimento de implantação dos pavimentos intertravados

O procedimento de construção dos pavimentos de peças pré-moldadas de concreto é evidenciado na Figura 2.11. A abrangente metodologia de construção e de manutenção, assim como as especificações para o tipo de material utilizado podem ser encontradas em Shackel (1990). As peças de concreto podem ser assentadas manualmente ou mecanicamente sobre a camada de areia e compactadas, seguindo-se o espalhamento da areia para o preenchimento das juntas e uma outra demão de compactação até que as juntas estejam completamente preenchidas com a areia. Assim, é obtido o intertravamento das peças de modo desejável para um melhor desempenho do pavimento.

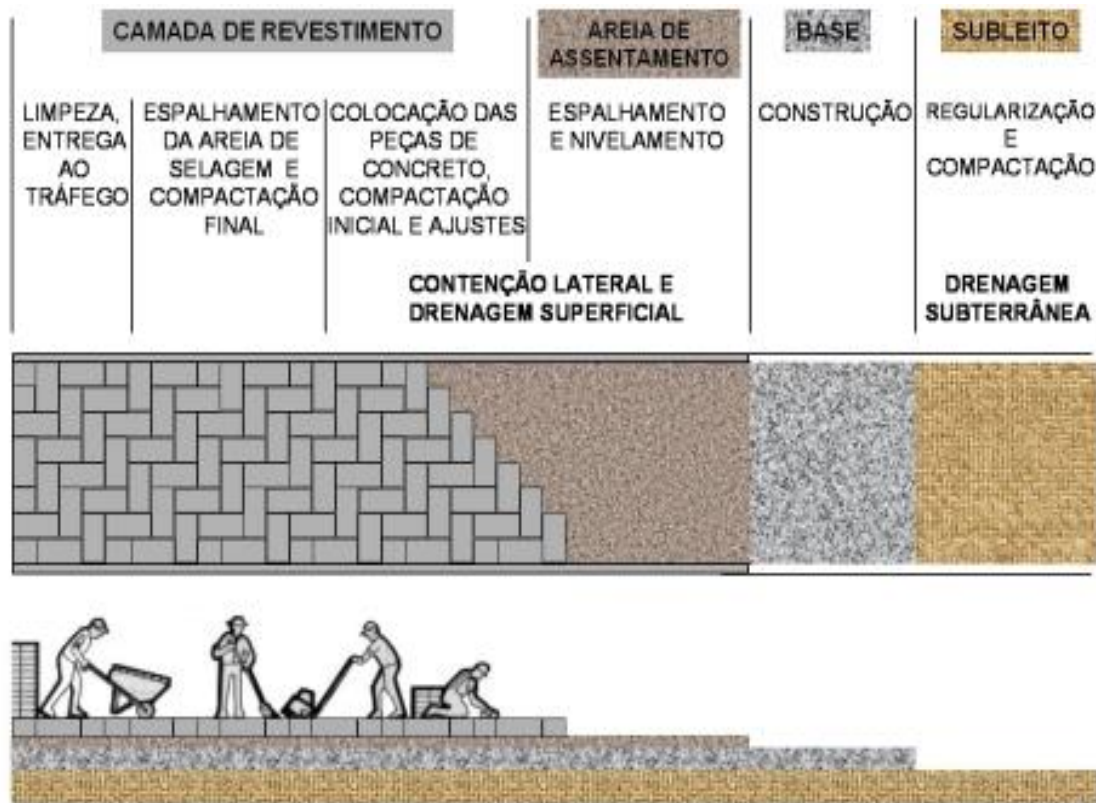


Figura 2.11 - Procedimento de construção (Godinho 2009).

O uso das peças pré-moldadas de concreto na pavimentação possui um amplo campo de aplicações, tais como calçadas, parques, praças, ruas, avenidas, estacionamentos, acostamentos e estradas, áreas de cargas, além de terminais e pátios, o qual é evidenciado na Figura 2.12. Porém, assim como todos os pavimentos, os pisos intertravados possuem limitações, como o efeito de vibrações nos veículos, a rejeição do uso como em canais

coletores de águas que geram correntes volumosas e por causa da produção de altos níveis de ruídos.



Figura 2.12 - Aplicações das peças pré-moldadas de concreto (Google Imagens).

Mediante esta apresentação das principais características, os pavers produzidos neste trabalho são de concreto sem a adição de cimento Portland, de modo que, para interpretar melhor a produção e a execução de ensaios sobre eles será relatado, primeiramente, no próximo item, sobre a produção, as características e as reações do concreto quando submetido a determinados ensaios de pavers produzidos com o cimento Portland. Após, será possível observar as diferenças existentes.

#### 2.1.4.4 Dimensionamento

O pavimento urbano com blocos intertravados de concreto de cimento Portland é uma alternativa ao pavimento flexível e apresenta vantagens, pois possui modelos com maior rigidez. Esse pavimento intertravado possui versão moderna e com aperfeiçoamentos dos antigos calçamentos.

De forma generalizada, o dimensionamento de um pavimento leva em consideração a escolha dos materiais a serem utilizados, ou seja, deve-se determinar a espessura da camada do local onde será implantado o pavimento. Para tanto, será necessário dimensionar o pavimento considerando os aspectos necessários para garantir que ele atenda às necessidades do local.

De acordo com Cruz (2003), o dimensionamento dos blocos de concreto intertravados tem se desenvolvido num contexto de tipos de aplicações há muitos anos. Neste sentido, os paver têm sido utilizados desde em vias para pedestre até em áreas que demandam concentrações de cargas estáticas, como portuários e aeroportuários. A esse respeito, Hallack (1998) afirma que existe uma dificuldade de dimensionamento dos blocos intertravados que é a determinação do valor do módulo de elasticidade do revestimento composto (bloco + colchão de areia).

Os métodos de dimensionamento de pavimentos intertravados, em sua maioria, se adaptam na mesma metodologia de cálculo para pavimentos flexíveis, na qual são consideradas camadas equivalentes. As escolas Americana e Britânica utilizam esta metodologia (Cruz, 2003). Na Figura 2.13 é apresentado o gráfico que permite a transformação do número previsto de solicitações de uma certa carga por eixo no número de solicitações equivalentes de uma carga padrão de 8,2 tf por eixo simples. O gráfico fornece o fator de equivalência que, multiplicado pelo número de solicitações diárias previstas para determinada carga, leva ao número equivalente de solicitações diárias de carga padrão. No caso de eixos tandem duplos ou triplos, considera-se a carga total como dividida por 2 ou 3 eixos simples, respectivamente (ABCP, 1998). A Figura 2.14 apresenta outro gráfico que fornece as espessuras necessárias de sub-base em função do valor de CBR do subleito e do número de solicitações do eixo padrão (N).

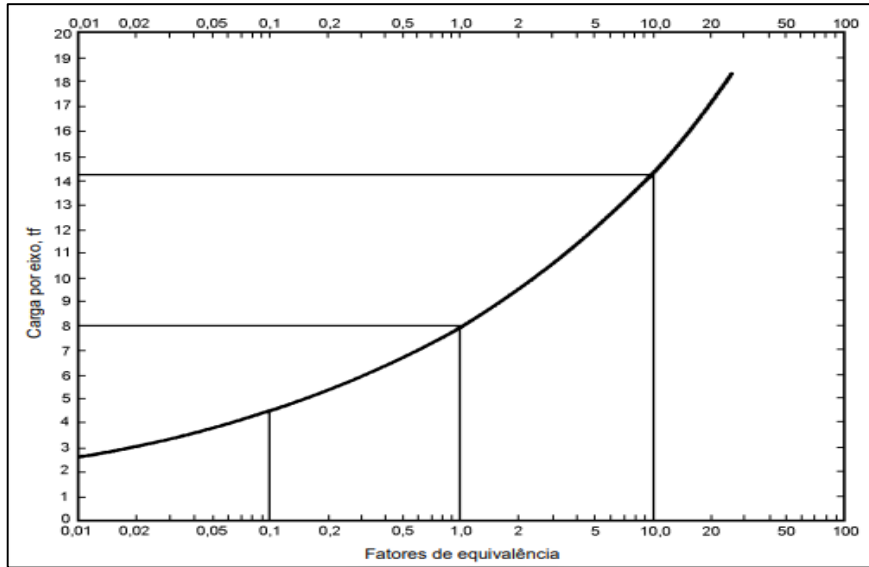


Figura 2.13 - Efeito relativo de diversas cargas por eixo simples (Carvalho, 1998).

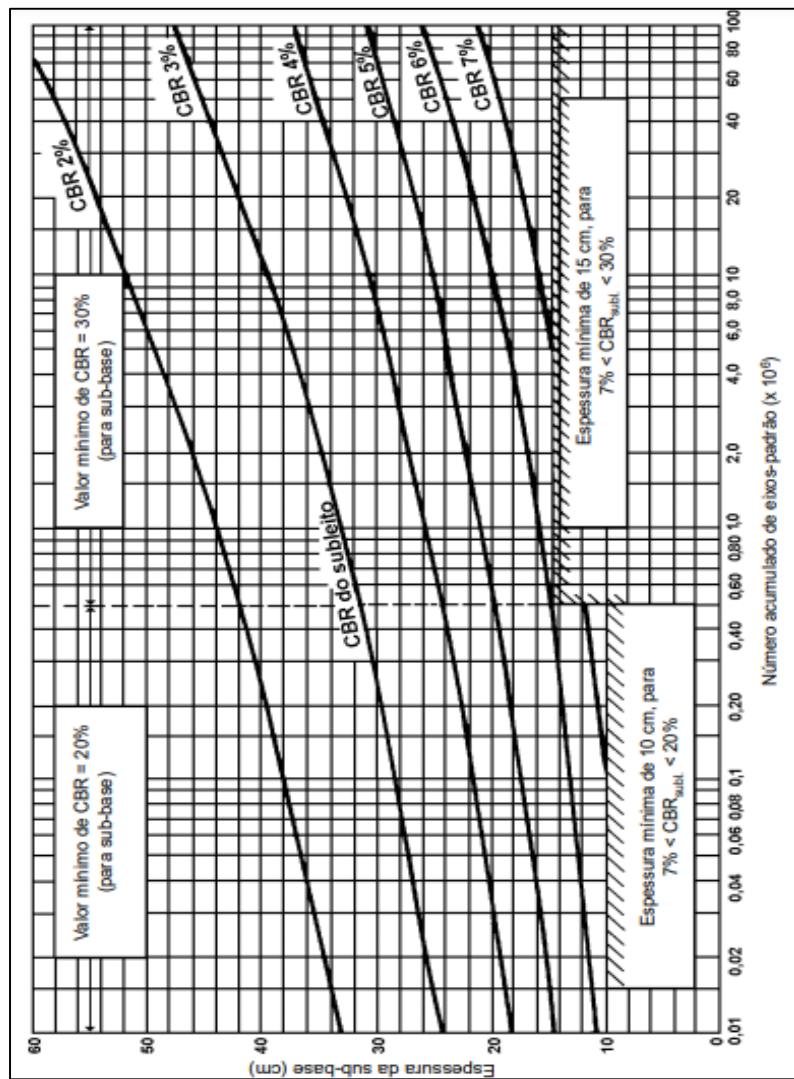


Figura 2.14 - Espessura necessária de sub-base (Carvalho, 1998).

A Figura 2.15, por sua vez, apresenta a espessura necessária de base de concreto rolado ou solo-cimento em função do número de solicitações do eixo padrão. Nesse âmbito, é importante observar que, quando o número de solicitações do eixo padrão (N) for inferior a  $1,5 \times 10^6$ , a camada de base não será necessária. No entanto, recomenda-se o emprego dessa camada com espessura mínima de 10 cm quando o número de solicitações (N) estiver compreendido entre  $1,5 \times 10^6$  e  $10^7$ .

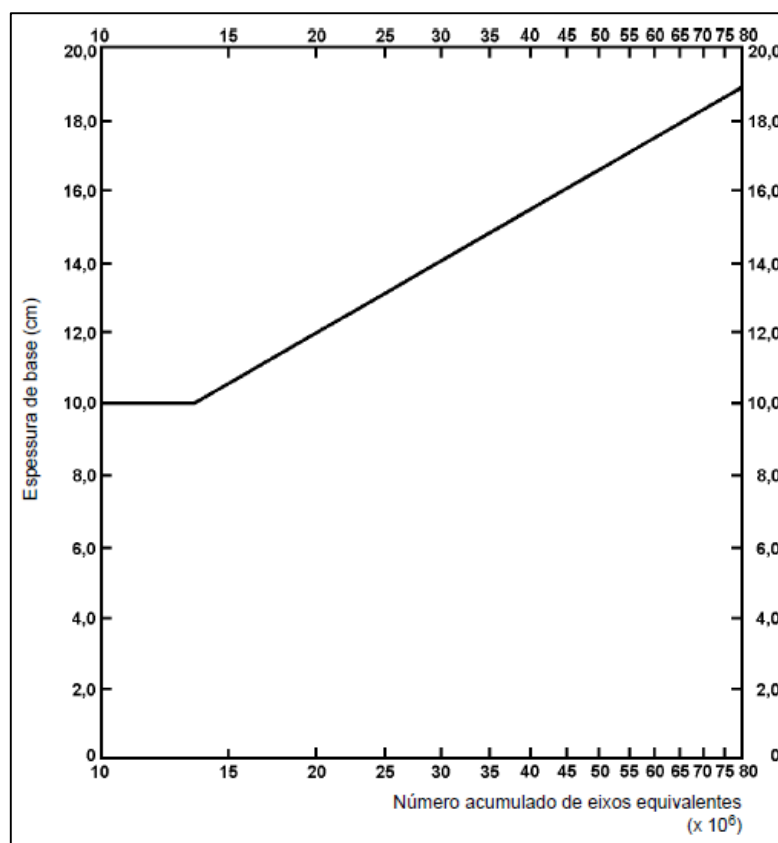


Figura 2.15 - Espessura necessária de base de concreto (Carvalho, 1998).

## 2.2 CONCRETO

O material mais largamente usado em construção civil é o concreto, normalmente feito por meio da mistura de cimento Portland com areia, pedra e água. Em 1963, nos Estados Unidos, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foram convertidas em 500 milhões de toneladas de concreto, o que equivaleu a cinco vezes o consumo de aço, em massa, no mesmo período, naquele país. Em muitos outros países, o consumo de concreto é 10 vezes maior que o do aço. O consumo mundial total de concreto, no ano de 1993, foi estimado

em três bilhões de toneladas, ou seja, 1t por ser humano vivo. Nesse cenário, é válido evidenciar que o homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser água (Resende, 2016).

Uma das razões para o uso do concreto em construções civis é que ele é, normalmente, o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro. Os principais ingredientes para execução do concreto, o cimento Portland e os agregados, são relativamente baratos e comumente disponíveis na maior parte do mundo. Apesar de em certas áreas geográficas o custo do concreto chegar a 80 dólares/tonelada, em outras, ele cai para 20 dólares/tonelada, o que corresponde apenas a 2 centavos de dólar/Kg (Mehta *et al.*, 2008).

Para Cruz (2003), no que se refere às especificações de resistências mecânicas e a interpretação dos resultados, não existe consenso sobre os métodos de ensaios utilizados, tipos de equipamentos, corpos de prova (peça inteira, cilindros, cubos serrados), condições de umidade da amostra a ser ensaiada (saturada com superfície seca, seca em ambiente natural, seca em estufa), idade de ensaio e número de corpos de prova que deve ter cada amostra. Para que os pavimentos tenham durabilidade, é necessário o controle tecnológico dos elementos de concreto para que a pavimentação esteja relacionada com a resistência à abrasão e à capacidade de suportar ciclos de gelo e degelo nos países de clima frio. Assim, as especificações internacionais de durabilidade são norteadas pelas condições climáticas, incluindo ou não resistência aos ciclos de gelo/degelo (Cruz, 2003).

A resistência é calculada de acordo com a ABNT NBR 9781: 2013 e assim é estimada a compressão dos elementos, que deve ser de 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha ou de 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão (Simieli *et al.*, 2007).

Existem muitos tipos de concreto, que variam conforme a forma de classificação adotada para o material e seus componentes. De acordo com a norma NBR 12655:2015 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o concreto pode ser classificado em três categorias, conforme sua massa específica no estado endurecido (Resende, 2013), quais sejam:



- Concreto normal: possui massa específica maior do que  $2.000 \text{ kg/m}^3$ , mas não excede  $2.800 \text{ kg/m}^3$ . Constituído normalmente de areia natural, pedra britada ou seixo rolado;
- Concreto leve: possui massa específica não menor que  $800 \text{ kg/m}^3$ , mas não excede  $2.000 \text{ kg/m}^3$ . Constitui-se de agregados naturais ou processados termicamente que possuem baixa densidade (agregados expandidos de argila, escória siderúrgica, vermiculita, ardósia, resíduos de esgoto sinterizado e outros); e
- Concreto pesado: massa específica maior que  $2.800 \text{ kg/m}^3$ . Constituído de agregados de alta densidade, como barita, magnetita, limonita e hematita.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a classificação do concreto também pode ser feita a partir de critérios de resistência à compressão (aos 28 dias), dividindo-se nas seguintes categorias:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

É muito importante que o concreto tenha uma boa resistência mecânica, que não seja expansivo e que nele ocorra o mínimo de absorção. Deve-se observar, também, o desgaste do concreto que pode ocorrer com o passar do tempo. Para uma avaliação das características do concreto são realizados alguns ensaios, os quais são citados a seguir.

### **2.2.1 Resistência à compressão**

O controle de qualidade do concreto requer a realização de uma série de ensaios para comprovar que o material entregue na obra está de acordo com parâmetros de aceitação. Desse modo, os ensaios de resistência do concreto são imprescindíveis para garantir a resistência à compressão e, por consequência, a qualidade da estrutura.

A resistência à compressão é a propriedade do concreto diretamente ligada à segurança e à estabilidade estrutural. Assim, ensaios de resistência à compressão são capaz de indicar eventuais variações da qualidade de um concreto, seja com relação à dosagem, seja quanto aos seus insumos. Desde o momento em que o concreto é preparado na concreteira até a aplicação na obra há uma série de fatores que podem colocar em risco a sua resistência,

assim como o seu desempenho. Entre eles, é possível destacar o atraso no caminhão-betoneira, quando ultrapassa os limites previstos em norma, as mudanças climáticas ou mesmo a adição excessiva de água na mistura em uma tentativa de assegurar maior trabalhabilidade. Decorre de circunstâncias como estas a importância da realização de testes laboratoriais para confirmar se a resistência à compressão do concreto fornecido é a mesma prevista em projeto. Ademais, tal controle de qualidade é fundamental para garantir a vida útil da estrutura, bem como a segurança dos funcionários da obra e de todas as outras pessoas, proprietárias ou não, que irão usufruir do empreendimento no futuro.

Nesse ínterim, cumpre deixar claro que erros na elaboração dos corpos de prova podem gerar resultados de resistência falsos. As normas preconizam que os moldes dos corpos de prova devem estar em local plano, preferencialmente coberto, à sombra e preparados com produto desmoldante e cera para calafetar as juntas, evitando assim a fuga de nata de cimento. Também constitui boa técnica umedecer o carrinho e os instrumentos (concha, soquete, pás etc.) que entrarão em contato com o concreto na moldagem dos corpos de prova. Desse modo, uma vez moldados os corpos de prova, eles devem ser armazenados em câmara úmida por um tempo determinado de acordo com o solicitado pelo contratante. Vencido este prazo, o corpo de prova é submetido ao nivelamento das superfícies para que encaixe na máquina para compressão - equipamento que exerce uma resistência gradual sobre o corpo de prova até atingir seu rompimento.

Os concretos são avaliados em função de sua trabalhabilidade, teor de ar incorporado, módulo de elasticidade e resistência à compressão. Esta resistência é determinada através de ensaios de compressão de corpos de prova moldados para essa finalidade. Entretanto, esse ensaio apresenta grande dispersão de resultados, o que pode estar relacionado a variáveis inerentes à geometria, dimensões, umidade e adensamento do corpo de prova, como também a planicidade e o paralelismo das bases. Variáveis relacionadas à execução do ensaio, como a velocidade de aplicação do carregamento, também podem contribuir para essa dispersão (Bezerra *et al.*, 2019).

Sobre esse assunto, Castro (2009) cita que a resistência à compressão do concreto pode ser obtida mediante ensaios em corpos de prova ou em testemunhos extraídos dos

elementos estruturais. A esse respeito, a Norma Brasileira ABNT NBR 7680:2015 recomenda extrações com diâmetros preferencialmente maiores que 100mm.

### **2.2.2 Resistência à tração na flexão**

A resistência à tração é uma das mais importantes propriedades do concreto, ao passo em que normalmente se considera predominante em projetos estruturais a característica de o concreto resistir às tensões de compressão. Muitas estruturas são projetadas com base na resistência à tração na flexão (pavimentos, por exemplo). O conhecimento da resistência à tração permite estimar a carga para a qual ocorre a fissuração e, desse modo, prever a durabilidade do concreto. Outras características como aderência entre o concreto e a armadura, a contribuição do concreto para resistir ao cisalhamento, à torção, à retração e a contrações de temperatura estão relacionadas com a sua resistência à tração.

Segundo Kemel Zanella (2014), os fatores que fazem com que o concreto seja um material durável e resistente na sua utilização em pavimentos com tráfego intenso e cargas que geram grandes esforços na estrutura são as suas propriedades mecânicas. O autor completa, ainda, que os ensaios são importantes para obtenção de concreto para determinada especificação.

Para Mehta e Monteiro (2008), o aparecimento de fissuras em estruturas de concreto utilizado em pavimentação é proveniente das tensões de tração na flexão, devido aos esforços repetidos que podem ser maiores que a resistência à fadiga, assim causando a ruptura.

Analisar fenômenos que conferem resistência à tração na flexão é necessário para um bom dimensionamento de estruturas de concreto para pavimentação (Kemel Zanella, 2014).

Na Figura 2.16 são apresentados dois valores que devem ser considerados na resistência à tração na flexão, segundo a ACI (2004). Um valor está relacionado à carga de fissuração e o outro, à carga máxima a ser alcançada.

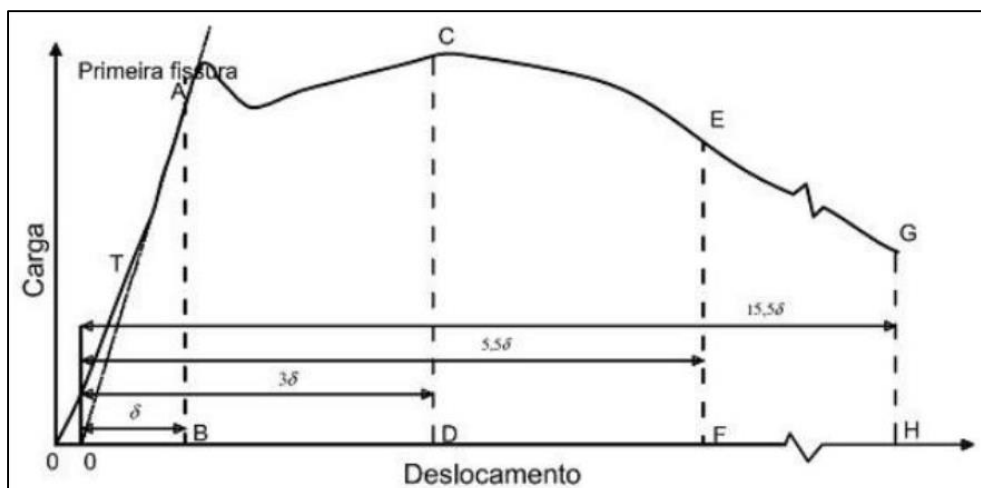


Figura 2.16 - Ponto A – carga de fissuração e Ponto C – carga máxima (ACI, 2004).

### 2.2.3 Expansibilidade

A indústria cimenteira é considerada uma das maiores consumidoras de recursos naturais e produtoras emissões de CO<sub>2</sub> do planeta. Por isso, há uma forte busca por alternativas para a redução das emissões no processo de produção dos diferentes tipos de cimento, sejam eles Portland ou não, a partir de cimentos com emissões baixas ou negligíveis de CO<sub>2</sub>. Porém, para que estes novos materiais sejam comercializados, faz-se importante que os mesmos apresentem ótimo desempenho frente à durabilidade, bem como, e especialmente, frente a problemas de expansibilidade, como, por exemplo, a Reação Álcali-Agregado (RAA), manifestação patológica que pode comprometer a vida útil de diversas estruturas (Dezen e Possan, 2015).

De acordo com Dezen e Possan (2015), que utilizaram resíduo de concreto em sua pesquisa, este não é um agente que piora as condições de expansibilidade do concreto por RAA. Nesse mesmo sentido, França (2018), que utilizou cinza de cavaco de eucalipto em seu trabalho, concluiu que a expansibilidade do seu material, inferior a 0,10%, não é significativa.

Sant’ana Filho (2013), em seu trabalho, procedeu à determinação da expansibilidade dos elementos a partir da análise da estabilidade dimensional para os elementos fabricados em concreto convencional e resíduos da barragem, após ciclos de molhagem e secagem. Assim, obteve resultados que concluem que os elementos de concreto confeccionados

com resíduo não apresentaram variação dimensional significativa (inchamento) após realização dos ensaios de expansibilidade. Por sua vez, Silva (2011) conclui que a expansibilidade realizada em elementos de concreto confeccionados com agregados de escória de aciaria não apresentou expansão significativa, mas sugere a realização de pesquisas que possam avaliar melhor a expansibilidade dos elementos de concreto para pavimentação relacionada às condições extremas de utilização de carregamento, temperatura e umidade.

#### **2.2.4 Absorção**

A absorção de água indica o nível de porosidade de uma peça. Quanto menor ela for, menor será a quantidade de água que a peça absorve e, conseqüentemente, maiores e melhores poderão ser a sua resistência mecânica e as suas características técnicas (Fioriti, 2007).

Costa (2017) afirma que a construção civil é responsável por um alto impacto ao meio ambiente, desde a extração da matéria prima até o descarte de resíduos sólidos da construção civil. Nesse panorama, surge a necessidade de se buscar alternativas a partir das quais seja possível minimizar este impacto, visando à reutilização dos materiais descartados. A esse respeito, a reciclagem surge como uma forma racional para combater o problema do descarte de material gerado na indústria, tornando-o novamente utilizável no setor da construção civil, em que há grande potencialidade de absorção desses resíduos.

A reciclagem pode ser entendida como sendo “arte” de se reaproveitar produtos ou materiais que resultaram de algum processo produtivo, tornando-os novamente úteis (Costa, 2006). Em uma pesquisa que utilizou resíduo de vidro e resíduo da construção civil (rcc) como agregado na confecção de blocos de concreto, determinou que a massa específica do paver foi baseada na norma NBR 9778:2009 - Argamassa e concretos endurecidos; Determinação da absorção de água por imersão; Índice de vazios e massa específica. Esta norma tem como objetivo prescrever o modo pelo qual deve ser executado o ensaio para determinação da absorção de água, através de imersão, do índice de vazios e da massa específica de argamassa e concreto endurecidos.

França (2018), que utilizou cinza de cavaco de eucalipto em sua pesquisa, constatou em seu material que traços com maior teor de cinza apresentaram maiores valores de absorção de água por causa da formação de aluminossilicato de cálcio hidratado, o que ocorreu devido à secagem necessária para o ensaio, desidratando-se. Esse processo provocou microfissuras na estrutura do C-A-S-H, o que levou à maior porosidade e, com isso, à maior absorção de água (Deventer *et al.*, 2015).

No ensaio de absorção de água dos blocos feitos por França (2018) foi constatado que a absorção decresce com o passar do tempo, o que se deve ao processo de geopolimerização que, com o decorrer do tempo e evolução das reações, vai refinando a estrutura de poros, tornando-os cada vez menores e menos interligados e assim dificultando a absorção de água (Collins e Sanjayan, 2010).

Segundo Provis (2012), a presença de cálcio está associada à redução do tamanho de poros e ao refinamento do diâmetro dos poros em materiais álcali ativados, uma vez que o cálcio favorece a reatividade do material, o que leva à formação de uma estrutura mais complexa, bem como à redução da permeabilidade, diminuindo a absorção.

A esse respeito, França (2018) afirma que outro parâmetro que pode ser obtido pelo ensaio de absorção de água é o índice de vazios. Este parâmetro está associado indiretamente com a porosidade do material e, por esse motivo, também pode ser relacionado com a resistência à compressão.

### **2.2.5 Abrasão profunda**

A resistência à abrasão de materiais é uma variável bastante importante quando pensamos no desenvolvimento de peças que trabalham em ambientes agressivos. Nesse contexto, materiais mal selecionados podem custar muito caro para as empresas, uma vez que ao longo dos anos é evidenciado um desperdício enorme de dinheiro causado pela seleção de materiais não apropriados para o ambiente de trabalho. Em muitos casos, na boa intenção de resolver o problema, materiais de alto valor são selecionados, mas com pouquíssima eficácia para esse problema. Talvez uma das grandes causas para esse fato seja o (ainda) pequeno número de engenheiros de materiais formados no nosso país.

É importante que se conheça claramente o conceito desse mecanismo de desgaste. O desgaste por abrasão ocorre quando o material é removido de uma superfície quando esta se encontra em movimento relativo com outra. Esse processo pode ser um desgaste por abrasão de dois corpos (quando a rugosidade gasta a superfície oposta) ou de três corpos (quando um terceiro corpo está entre as duas superfícies - uma partícula de areia entre um mancal e um eixo, por exemplo). O nível de resistência à abrasão de um material é comumente associado à sua dureza. Mas nem sempre esse entendimento é verdadeiro, pois a resistência à abrasão é o resultado de um conjunto de fatores como composição do material, tratamentos de superfícies aplicados, dureza, rugosidade superficial, entre outros.

Shackel (1990) alertava, há algumas décadas atrás, que a vida útil de pavimentos intertravados sofria desgaste da superfície independente da resistência dos elementos de concreto, considerando, pois, necessários ensaios específicos de resistência à abrasão como mais um critério para se apurar melhor a durabilidade dos pavimentos. O ensaio de desgaste por abrasão simula o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento (Bernucci *et al.*, 2008).

Silva (2014), por sua vez, cita em sua pesquisa que o ensaio de resistência à abrasão não é um ensaio obrigatório para as peças de concreto para pavimentação, sendo ele considerado facultativo pela ABNT NBR 9781:2013. A resistência à abrasão está relacionada ao volume de desgaste do concreto, ou seja, quanto menor o volume de desgaste, maior é a resistência à abrasão. Já Fioriti (2007), em sua pesquisa, realizou este ensaio segundo o descritivo da NBR 13.818 (1997): Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios - Determinação da resistência à abrasão profunda porque esta norma segue os mesmos parâmetros de normas internacionais e se baseia na perda de volume do corpo de prova ensaiado.

Sant'ana Filho (2013), por seu turno, utilizou o abrasômetro com roda de borracha para definir a resistência à abrasão em elementos de pavimentação intertravada executados com agregados, cimento e resíduos das barragens de minério de ferro, os quais apresentaram resistência à compressão acima de 50MPa. Os seus resultados de pesquisa demonstraram uma tendência à estabilização da perda por abrasão com o passar do tempo.

Por fim, também Santos (2014) usou em sua pesquisa um dispositivo de abrasão que consiste essencialmente em um disco rotativo de aço, uma caixa de armazenagem de material abrasivo, um funil de escoamento para saída do material abrasivo, um suporte para o corpo de prova e um contrapeso. No seu trabalho, o pesquisador analisou desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil, e observou em que as dosagens das peças de concreto que obtiveram as melhores resistências à abrasão profunda foram as que apresentaram resistências à compressão axial mais altas.

### **2.2.6 Investigação microestrutural**

A principal função de qualquer microscópio é tornar visível ao olho humano o que for muito pequeno para tal. A forma mais antiga e usual é a lupa, seguida do microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos é estabelecido pelos efeitos de difração devido ao comprimento de onda da radiação incidente. Os microscópios ópticos convencionais ficam, então, limitados a um aumento máximo de 2000 vezes já que, acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis. Para aumentar a resolução pode-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz visível como fonte de iluminação do objeto. Além disso, a profundidade de campo é inversamente proporcional aos aumentos, sendo necessário, então, um polimento perfeito da superfície a ser observada, o que às vezes é incompatível com a observação desejada (Kesrenbachk, 1994). Nesse ínterim, um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca.

De Bloglie mostrou, em 1925, o dualismo onda-partícula e, por conseguinte, que o comprimento de onda de um elétron é função de sua energia. A energia pode ser comunicada a uma nova partícula carregada por meio de um campo elétrico acelerador. Assim, sob uma voltagem suficientemente grande, por exemplo, 50 kV, elétrons de comprimento de onda extremamente curto ( $\lambda=0,005\text{Å}$ ) e, portanto, de poder de resolução potencialmente alto, como uma fonte de iluminação, podem ser produzidos. Além disto,



devido às suas cargas, os elétrons podem ser focalizados por campos eletrostáticos ou eletromagnéticos e, então, são capazes de formar imagens. Eles possuem, assim, as características essenciais necessárias a um microscópio de alta resolução.

Como resultado, tem-se que os aparelhos modernos permitem aumentos de 300.000 vezes ou mais para a maior parte de materiais sólidos, conservando a profundidade de campo compatível com a observação de superfícies rugosas. O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia.

Essa ferramenta é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas. Nesse contexto, valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (Nagatani *et al.*, 1987).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Além disso, essa ferramenta permite também o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

Pelo MEV é possível avaliar características importantes de um concreto, sobre sua confecção a partir de um aglomerante que é um material ligante, geralmente pulverulento, que promove a união entre os grãos dos agregados. Os aglomerantes são utilizados também na obtenção de pastas e argamassas, sendo o principal o cimento Portland. No concreto, emprega-se o cimento Portland, que reage com a água e endurece com o tempo, ganhando, depois de um determinado período, resistência.

### **2.3 AGLOMERANTES**

Em concordância com a NBR 11172 (ABNT, 1990), determina-se como aglomerante mineral um produto com componentes minerais, manifestando-se coberto ou cheio de pó, ou seja, pulverulento, com utilidade específica. Ao adicionar água, o aglomerante mineral forma uma pasta com propriedades aglutinantes, que ligam as partículas entre si, dando um agregado. Em uma subcategoria, os aglomerantes podem ser divididos em aéreos e hidráulicos.

Os aglomerantes aéreos são aqueles em que a massa endurece após reagir por hidratação ou por uma ação química do anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>). Após o endurecimento, sua resistência não se mostra satisfatória quando submetida à ação da água. Como exemplo desse tipo de aglomerante, temos o gesso e a cal aérea.

Já os aglomerantes hidráulicos são aqueles em que a massa possui o domínio de endurecimento apenas mediante a reação com a água. Após o seu endurecimento, resiste, de modo satisfatório, quando sua superfície se submete ao contato novamente da água. Como exemplo desse tipo de aglomerante, pode-se citar a cal hidráulica e o cimento Portland.

De acordo com Lara (2016), o cimento Portland constitui-se um cimento hidráulico fabricado pela pulverização de clínquer compostos principalmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos, uma sucinta quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e, inclusive, 5% de calcário como adição na moagem. O cimento é uma palavra que se originou do latim *caementu*, a qual designava uma espécie de pedra natural ou rochedo na velha Roma. A história de sua origem é remota, pois já no antigo Egito utilizava-se uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado para a produção de seus monumentos. De outro modo, na Roma e na Grécia antigas, as construções eram erguidas com o uso de uma massa obtida pela hidratação de cinzas vulcânicas.

Em 1756, o inglês John Smeaton desenvolveu um produto com satisfatória resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat produziu uma massa semelhante à de Smeaton, misturando componentes argilosos e calcários. E em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin, queimou pedras calcárias e argila, simultaneamente, transformando-as em um pó fino. A combinação não se dissolvia na

água e, após o contato com esta e secar, tornava-se tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções da época. A mistura foi denominada como cimento Portland, uma vez que sua composição, durável e sólida, bem como sua cor, se assemelhavam com as rochas da ilha britânica de Portland, como evidencia a Figura 2.17.



Figura 2.17 - Ilha de Portland (Google Imagens).

Desde então, o cimento Portland passou por fases de desenvolvimento, como em 1845, quando Isaac Charles Johnson, colaborador de Aspdin, elevou a temperatura da queima para 1400°C, moendo mais o clínquer após a queima, o que resultou em um cimento mais fino.

Para Gobbo 2009, vários tipos de materiais podem ser adicionados ao clínquer para formar o cimento Portland comercial, melhorando parte da propriedade do cimento ou reduzindo a quantidade de material utilizado, seja pelo menor custo de outro material, seja pelo simples consumo do cimento, que é um dos materiais cuja produção mais emite dióxido de carbono no mundo.

O sulfato de cálcio, os materiais carbonáticos, a escória de alto forno e as cinzas volantes são os principais materiais adicionados ao cimento Portland. Nos últimos anos, muitas

pesquisas foram realizadas para avaliação de outros materiais suplementares ao cimento (Ferreira, 2017).

Por sua vez, os materiais pozolânicos são materiais finamente moídos que, quando se adiciona água, reagem e formam compostos ligantes. A adição de materiais pozolânicos ao clínquer resulta no Cimento Portland composto tipo CP II-Z. Nesse quadro, a cinza volante é um dos principais materiais pozolânicos utilizados e é um subproduto da queima de carvão mineral em usinas termelétricas. A esse respeito, Ferreira (2017) lembra que as cinzas de resíduos vegetais, sílica ativa, e outros, também são materiais pozolânicos usados na indústria do cimento.

São variados os tipos de cimento comercializados, os quais possuem diferentes propriedades físicas e diversificadas quantidades de clínquer. No Brasil, o cimento comercializado se diferencia pela quantidade de clínquer, adições e por algumas propriedades físicas (Skalny *et al.*, 2002; Mehta e Monteiro, 2008; Battagin, 2011).

Todavia, para aplicações específicas, é preciso ter um bom conhecimento das propriedades dos materiais anidro e hidratado para a escolha do tipo de cimento, pois a finura da matéria afeta a sua reatividade com a água e a taxa de reação. Ademais, o cimento tem um processo de endurecimento que se estende por algumas semanas, em que a porosidade e a permeabilidade do material hidratado diminuem e ocorre o ganho de resistência mecânica (Mehta e Monteiro, 2008).

Nesse sentido, Ferreira (2017) apresenta em seu trabalho quatro técnicas utilizadas com o intuito de se avaliar as propriedades do cimento: 1 - análises de difração de raios X (aplicada para análise qualitativa e quantitativa de compostos cristalinos em materiais orgânicos e inorgânicos); 2 - termogravimetria/ termogravimetria derivada (técnica utilizada para estudar a base de cimento hidratado e realizar análises qualitativas e quantitativas de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio); 3 - microtomografia computadorizada; 4 - microscopia eletrônica de varredura (microtomografia e microscopias são técnicas de imagens para avaliar a porosidade, a homogeneidade e outras propriedades do material). Assim sendo, tem-se que o cimento Portland é um material de alto custo, que emite considerável quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera e sobre o qual os estudos mais contemporâneos demonstram haver alternativas ou possibilidade de

redução do consumo mundial. A esse respeito, as pesquisas sobre os materiais álcali-ativados, que se configuram saídas para esta questão, apontam que, muitas vezes, tais materiais são descartados na natureza e podem ser utilizados para substituir o cimento Portland.

## **2.4 MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS**

As soluções ativadoras são constituídas de metal alcalino e podem ser classificadas como de aluminatos, hidróxidos, silicatos, sulfatos, sais e aluminosilicatos. A ativação alcalina é composta das reações de destruição-condensação, que incluem a quebra das ligações da matéria-prima (unidades estruturais de estabilidade fraca), interação com as estruturas de coagulação e a criação de estruturas condensadas. Os produtos dessa reação (o principal deles é o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H)) dependem também do ativador e da matéria-prima e do sistema (Glukhovsky, 1980).

Segundo Torgal *et al.* (2008), o mecanismo da reação dos aglomerantes ativados alcalinamente ainda não é completamente compreendido, pois isto depende de características químicas e físicas da matéria-prima e dos ativadores alcalinos. A propósito da reação, Chang (2003) explica que a alteração do tempo de reação está ligada diretamente com a concentração de ativadores alcalinos, tanto no início quanto no fim. A ativação por álcalis, a ativação por sulfatos alcalinos e a ativação mista devem ser classificadas nos compostos químicos utilizados na fabricação de argamassas e concretos álcali-ativados.

Avançando um pouco mais nas pesquisas, Cheah *et al.* (2011) estudaram o comportamento mecânico e a microestrutura de compósitos a partir da hibridação de cinzas de madeira e cinzas volantes ativadas alcalinamente, curadas à temperatura ambiente. Os principais constituintes químicos das cinzas de madeira encontrados foram cálcio, potássio e magnésio, que representaram, respectivamente, 61%, 12%, 8,7% da composição total. Já as cinzas volantes apresentaram como principais constituintes o silício, alumínio, ferro e cálcio que, representaram, respectivamente, 43,2%, 17,6%, 13,7% e 11,3%. Na oportunidade, foram moldados quatro diferentes proporções de cinzas de madeira e cinzas volantes: 100:0, 70:30, 60:40 e 50:50. Foram observadas a formação

de fases cristalinas de Arcanite ( $K_2SO_4$ ), Calcita ( $CaCO_3$ ), Hidrotalcita ( $Mg_4Al_2OH_{12}CO_3(3H_2O)$ ), Quartzo ( $SiO_2$ ), Hidroxiapatita ( $Ca_4(PO_4)_3OH$ ), Mewinite ( $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ ), Merwinite ( $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ ), Portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), Periclase ( $MgO$ ) e Tobermonita ( $CaOSiO_2H_2O$ ) a partir da análise de difração por raios X. O melhor resultado de resistência à compressão da pasta foi de 18 MPa aos 28 dias de cura (Cheah *et al.*, 2015).

Mediante esse cenário, uma outra possibilidade de produção de material álcali-ativado se apresenta com o uso de cinza de termelétrica de biomassa. Entre as principais biomassas do Brasil destacam-se as cinzas de bagaço de cana, as cinzas de casca de arroz e as cinzas de cavaco de eucalipto. Ocupando grande destaque, com previsão de aumento de plantio no Brasil, está o eucalipto. Nesse âmbito, vale lembrar que o país é um dos maiores produtores de florestas plantadas do mundo. As florestas plantadas no Brasil se estendem, atualmente, em sua grande maioria composta de pinus e eucalipto, sendo sua produção destinada à indústria de papel e celulose, carvão vegetal, madeira serrada, produtos de madeira sólida e madeira processada.

O Brasil possui 9 milhões e 850 mil hectares de florestas plantadas. Segundo o levantamento Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2017, divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mais de 75% desse território é voltado à produção de eucalipto, cujas florestas são apelidadas de "desertos verdes" pela grande quantidade de água que consomem e devido ao estrago que causam ao solo.

A biomassa de eucalipto tem sido utilizada como fonte de combustível para as fábricas de papel e celulose no Brasil ao longo de todo o território. Recentemente, este processo migrou do uso da casca e resíduos de madeira e passou para a queima de troncos inteiros. Em um contexto mais amplo, a International Paper desenvolveu um domínio técnico sobre o manejo do cultivo de eucalipto, uma vez que este é a principal matéria prima para produção de polpa de celulose e para a produção de papel de imprimir e escrever. Segundo a empresa estadunidense, o eucalipto tem grande potencial para ser usado para geração de energia, pois é um combustível de origem renovável e seu crescimento tem uma velocidade acelerada em regiões de clima tropical, onde a colheita é feita com idade média de 6 anos.

Nesse sentido, considerando a análise sobre a produção de material álcali-ativado e a produção de cinzas, seu contexto e condições de ocorrência, sua utilização pode se apresentar como uma alternativa possível para o desenvolvimento de um novo produto. Este produto poderá ser útil para o desenvolvimento sustentável.

## **2.5 CINZAS A PARTIR DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

A cinza de cavaco de eucalipto (CCE) é um dos principais resíduos provenientes das termelétricas e um dos mais volumosos resíduos sólidos produzidos pelas indústrias nacionais. Essas indústrias produzem anualmente milhões de toneladas de CCE a partir do processo de geração de energia (Lara, 2016).

De acordo com Resende (2013), as cinzas ocupam lugar de destaque dentre os resíduos agroindustriais por resultarem de processos de geração de energia e secagem e apresentarem problemas de armazenamento e impacto ambiental. Em princípio, qualquer cinza vegetal predominantemente silicosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como adição. Resende (2013) afirma também que o uso de cinzas volantes como substituto parcial do cimento diminui a exsudação, facilita o bombeamento, retarda o início de pega e faz aumentar a trabalhabilidade do concreto fresco. Ainda de acordo com o autor, no concreto endurecido, o uso das cinzas reduz a resistência nas idades iniciais, mas pode levar a resistência nas idades finais a valores iguais ou superiores às do cimento Portland sem adição. Com uma cura úmida adequada, os concretos com cinzas volantes apresentam menor permeabilidade, aumentando a proteção das armaduras.

Segundo Lara (2016), é possível desenvolver um aglomerante de baixo carbono a partir da cinza de cavaco de eucalipto e da fuligem proveniente dos filtros das chaminés da produção de ferrosilício, chamada comercialmente de sílica ativa. O autor afirma que os aglomerantes compostos por diferentes proporções de CCE e sílica ativa apresentam, em algumas situações, propriedades avaliadas adequadas para o uso como aglomerante. Em algumas proporções, esses componentes apresentaram resistência à compressão similar ao cimento Portland, de alta resistência inicial.

Ainda a esse respeito, Resende (2013), que também utilizou cinza de cavaco de eucalipto em sua pesquisa, afirma se tratar de um material com granulometria heterogênea, a qual apresenta grande quantidade de carbono. Desse modo, demonstra que a CCE *in natura* apresenta atividade pozolânica com cimento e que as amostras processadas de CCE moída e requeimada apresentam atividade pozolânica moderada. Os resultados da sua pesquisa apresentaram, também, que o comportamento mecânico indica que as amostras de CCE *in natura* apresentaram um efeito de preenchimento de vazios.

Por sua vez, Geraldo (2016) utilizou em seu trabalho metacaulim e cinza de casca de arroz, afirmando que o fato de dispensar o emprego de cimento Portland, empregando em seu lugar o metacaulim, já torna o aglomerante álcali-ativado de interesse do ponto de vista ambiental, uma vez que a temperatura de calcinação do metacaulim é consideravelmente mais baixa quando comparada à do cimento Portland. Assim, tem-se que a incorporação de resíduos, como a cinza de casca de arroz e o lodo de ETA, somados ao não emprego de silicato de sódio comercial e de cura térmica, amplifica os benefícios ambientais associados ao produto.

Por seu turno, Saraiva (2017) utilizou cinza de bagaço de cana de açúcar processado em substituição ao cimento Portland, a partir do qual a viabilidade econômica, isto é, o custo do concreto com substituição deverá ser favorável, levando-se em conta o custo final da cinza processada (moagem ou requeima e moagem) em relação ao cimento, bem como o custo do transporte. Em seu estudo, Saraiva (2017) analisou também que a cinza de bagaço de cana de açúcar é um resíduo da indústria sem destinação nobre, sendo comumente desprezada em aterros e não agregando, portanto, valor econômico. A respeito dela, o autor ressalta, ainda, que a temperatura de tratamento térmico proposta no trabalho é cerca de 40% da temperatura de fabricação do cimento Portland. Ele pontua que a temperatura de queima em termelétricas e caldeiras não é controlada, mas que, entretanto, havendo interesse comercial, esta temperatura pode passar a ser ajustada com certa facilidade, o que pode eliminar o reprocessamento por queima. Outro aspecto importante é que a cinza *in natura* apresenta-se com granulometria e resistência mecânica inferiores ao calcário e ao clínquer de cimento Portland, sendo, pois, mais fácil sua moagem. Esses fatores provavelmente levarão a custos de queima e moagem inferiores aos custos envolvidos no processo de fabricação do cimento. Por fim, Saraiva (2017)



concluiu que a utilização de cinzas de bagaço de cana de açúcar em substituição ao cimento Portland é viável do ponto técnico, ambiental e econômico, contribuindo com a durabilidade dos compósitos desenvolvidos.

## **2.6 SÍLICA ATIVA**

A sílica ativa é um produto obtido através da produção do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras formas de silício geradas em grandes fornos de fusão. Também conhecida como sílica de fumo, sílica volatizada ou microsílica, é um material utilizado na indústria cimentícia com a finalidade de conferir melhor desempenho em concretos e argamassas.

De acordo com o Resende (2013), existem diferentes tipos de sílica ativa com relação à composição química, cor, distribuição granulometria e demais características. Tais particularidades são provenientes do tipo de liga produzida, tipo de forno, de composição química e de dosagem das matérias primas. Sua utilidade deve-se por sua alta reatividade, uma vez que sua estrutura é composta por grãos pequenos e partículas com caráter amorfo - não cristalino. Seu elemento é esférico, com um diâmetro demasiado menor que o do cimento. Dadas as características, as partículas da sílica ativa geram uma microestrutura mais densa e homogênea, conforme Resende (2013), reduzindo assim o volume de vazios e tornando o conjunto mais denso, como evidenciado na Figura 2.18.

Por apresentar uma fina distribuição granulométrica, a sílica ativa tende a consumir um volume considerável de água no concreto. De modo a retardar essa ação, utiliza-se de aditivos redutores de água para o aproveitamento desejado desse material altamente pozolânico (Resende, 2013). A porosidade e a permeabilidade do concreto são reduzidas quando há a adição de sílica ativa em proporções adequadas, assim aumentando também a resistência à compressão dos concretos. Isso ocorre porque as finas partículas da sílica ativa ocupam os vazios entre as partículas do cimento e do agregado, tornando o conjunto mais denso (Coutinho, 1997).

Em conjunto com o cimento, a sílica ativa atua aumentando a resistência mecânica e a compacidade da massa. No concreto fresco, a introdução desse elemento garante a

trabalhabilidade da mistura, ao passo em que, no concreto endurecido, a adição da sílica ativa a resistência aos agentes agressivos.



Figura 2.18 - Mecanismos de redução da exsudação na pasta de cimento pela adição de sílica ativa (Resende, 2013).

## **2.7 CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO (CCE) OU CINZA DE BIOMASSA DE EUCALIPTO (CBE)**

As cinzas são os resíduos gerados nas caldeiras de cogeração de energia com a combustão de biomassa. Consideradas ricas em elementos minerais, as cinzas da casca de eucalipto têm característica de alto teor de cálcio, potássio, magnésio e fósforo, além de baixos teores de nitrogênio. Nesse contexto, é interessante que as cinzas das cascas são mais ricas em nutrientes do que as da madeira. Outrossim, é necessário ressaltar que a composição química das cinzas é muito variável, impossibilitando, portanto, considerar um valor médio com pequenas variações para as concentrações dos elementos presentes nas cinzas.

Outra informação relevante é que a temperatura de combustão configura relação com a qualidade das cinzas. O valor ideal para a queima da madeira deve ser de 800°C a 900°C porque, após essa temperatura, uma maior quantidade de carbono é dissociada em óxidos

e também há maior volatilização de potássio, enxofre, cobre, boro, sódio e nitrogênio. Deve-se considerar, também, que a umidade está diretamente relacionada com qualidade da cinza e pode ocasionar uma combustão incompleta, perda de eficiência do combustível e aumento de cinza resultante, como as dimensões das partículas, contaminações e misturas de diferentes tipos de materiais (Foelkel, 2011).

Guerrero *et al.* (2005) e Guerrero *et al.* (2008), em seus estudos sobre cinzas de biomassa, avaliaram cinzas de eucalipto coletadas a partir da espécie *Eucalyptus Globulus Labill* na estação florestal localizada em Cedeira, na Espanha. A partir do eucalipto produziu-se a cinza e esta foi caracterizada em relação à composição química, análise térmica e microscopia eletrônica. Em relação à composição química, observou-se que o principal componente presente na cinza é o CaO (~56%), seguido do MgO (~14%) e do SiO<sub>2</sub> (~11%). Na análise térmica, os autores destacaram três picos principais: o primeiro para temperaturas menores que 100°C relativo à umidade da amostra; o segundo pico à presença de CO<sub>2</sub> derivado de grupos carbonila, hidroxila e oxigênio do tipo éter; e o terceiro relativo à presença de CO derivado de grupos carboxila e lactona. Em relação à microscopia, os pesquisadores notaram que, quanto maior a taxa de aquecimento da cinza, maiores são as modificações da morfologia original, uma vez que as cavidades internas são maiores e a porosidade também.

Sobre a utilização da cinza de cavacos de eucalipto, França (2018) afirma que é possível desenvolver um bloco compactado ativado alcalinamente utilizando-se este material junto ao rejeito de minério de ferro, desde que sejam respeitadas as exigências normativas. Em um ensaio, foi observado em seu estudo que a compressão pode destacar que a presença da cinza de cavaco de eucalipto e do rejeito de minério de ferro contribuiu para o aumento de resistência nos traços.

Resende (2013), por sua vez, afirma que a CCE apresenta características próximas de um cimento aluminoso e que as amostras de cinza *in natura* e moída possuem um percentual de perda ao fogo maior que as amostras de cinza requeimada devido à maior presença de carbono. Resende (2013) também cita em sua pesquisa que o resultado do ensaio do teor percentual de carbono fixo comprova que houve uma redução do teor de carbono quando se faz a requeima da amostra de cinza *in natura*. O percentual de cinzas em suas amostras

é diretamente proporcional ao percentual de perda ao fogo de cada amostra e o teor de material volátil das amostras apresenta uma alteração pequena. Nos resultados da análise granulométrica, o autor afirma que apenas as amostras de CCE moída atendem às exigências da NBR 12653 para classificação como material pozolânico. Na análise térmica, a CCE perde uma massa na temperatura a 50°C, provavelmente devido à perda d'água em sua superfície.

## **2.8 DEGRADAÇÃO E ADSORÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA PELOS MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS**

Segundo Silva (2019), a fotocatalise é um dos processos de oxidação avançada (POA), sendo definido pela IUPAC como a mudança na taxa de uma reação química ou seu início sob a ação de radiação ultravioleta, visível, ou infravermelha, na presença de um substrato fotocatalisador que absorva luz e esteja envolvido na transformação química dos pares de reação (Emeline *et al.*, 2011). Esse processo tem sido estudado desde que Fujishima e Honda (1972) reportaram a hidrólise da água por fotoeletrodos de TiO<sub>2</sub> nos anos 1970, seguidos por Wrighton *et al.* (1976), com dopagem de Sr no sistema de TiO<sub>2</sub>. Assim, um dos principais tópicos nos anos 1970-1980 era a conversão da energia de fótons para promover a hidrólise da água. Apesar desse método de produção de hidrogênio não ter se tornado um processo muito comum, o esforço de vários pesquisadores possibilitou o melhor entendimento do processo de fotocatalise. Nesse sentido, nas últimas três décadas, o número de pesquisas tem aumentado, porém, com foco em aplicações ambientais e desenvolvimento de aplicações autolimpantes (Uyguner-Demirel, Birben e Bekbolet, 2017).

As reações fotocatalíticas ocorrem por meio de transferência fotoinduzida de elétrons ou energia do íon metálico para o meio, ou vice-versa (Kudo, 2003). O processo fotocatalítico é um fenômeno de superfície altamente dependente do tamanho, forma e composição do fotocatalisador, sendo as principais características dos fotocatalisadores a morfologia adequada e a elevada área superficial, além de estabilidade e possibilidade de reutilização do material (Khan, Adil e Al-Mayouf, 2015).

Segundo Silva (2019), do ponto de vista de mecanismos de reação, é conveniente distinguir a fotocatalise em três casos. O primeiro é a formação de um catalisador termal a partir de reações fotoquímicas, que promove uma reação térmica, o que o torna simplesmente uma variação da catálise termal. No segundo caso, o catalisador é excitado e interage com o substrato, o qual sofre alteração para um produto e regenera o catalisador para sua forma original. Um exemplo desse mecanismo é a transferência de átomos de hidrogênio por parte de alcanos para cetonas. No terceiro caso, é formado um complexo instável entre o reagente e o catalisador, de forma que o complexo formado é uma espécie totalmente diferente, com sua própria banda de absorção. Nesse ínterim, as irradiações nessa banda promovem a reação e regeneram o catalisador. Esse terceiro mecanismo é, de longe, o mais estudado, pois é aquele que atua em semicondutores e seu mecanismo normalmente é discutido em termos da transferência do par elétron/lacuna para a molécula adsorvida (Ravelli, Protti e Albini, 2015).

É importante ressaltar que diversos autores concluíram que os semicondutores só absorvem fótons com comprimentos de onda ( $\lambda$ ) menores que o limite de absorção. Para os principais óxidos fotocatalisadores, como TiO<sub>2</sub>, ZnO, SnO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, somente a emissão de fótons com  $\lambda$  menor que 400nm é capaz de induzir as transições eletrônicas (Belver *et al.*, 2019; Herrmann e Pichat, 1980). Essa faixa do espectro luminoso abaixo de 400nm corresponde ao ultravioleta, o qual possui três subdivisões: 315<UVA<400nm, 280<UVB<315nm e 100<UVC<280nm. Cumpre ressaltar que um dos maiores desafios desse campo de pesquisa é a criação de materiais capazes de realizar fotocatalise em luz visível (>400nm), pois o UVC é filtrado pela camada de ozônio, assim como 90% do UV-B (Kollias, Ruvolo Jr e Sayre, 2011). Além de Silva (2019), pesquisadores como Wang *et al.* (2015) e Zhang *et al.* (2012) reportaram que os MAAs por eles produzidos foram capazes de diminuir a concentração de contaminantes orgânicos na água. Ambos os estudos realizaram ensaios com soluções aquosas do corante orgânico azul-de-metileno (AM) e atribuíram os resultados de degradação ao conjunto dos mecanismos de adsorção dos MAAs e fotocatalise por óxidos semicondutores. Estudos como os de Zhang e Liu (2013), Novais *et al.* (2018) e Novais *et al.* (2019) avaliaram essa mesma propriedade, porém, com precursores baseados em cinzas volantes, das quais obtiveram MAAs com taxas de degradação equivalentes àsquelas de MAAs baseados em escórias. Nos estudos referenciados nessa seção, os precursores continham, em média, apenas 1,5% de TiO<sub>2</sub> e,

mesmo assim, foram capazes de aumentar consideravelmente a degradação em relação a sistemas como os de Li, Wang e Zhu (2006), Liu *et al.* (2016), Maingi, Mbuvi e Mwangi (2017) e El Alouani *et al.*, (2018), os quais eram baseados somente no processo de adsorção.

Silva (2019) indica que estudos de degradação/remoção de corantes orgânicos se beneficiam da porosidade dos materiais álcali-ativados como mecanismo de adsorção. Como os materiais de teste são normalmente imersos em soluções aquosas do corante, naturalmente a solução preenche os poros abertos na estrutura. Alguns desses estudos têm interesse somente na adsorção como mecanismo de remoção de corantes, e, para isso, o material álcali-ativado normalmente é moído e adicionado às soluções com corantes orgânicos, enquanto a concentração da solução é monitorada através da coleta de amostras e análise por espectrofotometria (Alshaaer *et al.*, 2016; El Alouani *et al.*, 2018; Novais, Seabra e Labrincha, 2017). Nessa análise, baseada na lei de Beer-Lambert Law, é feita uma correlação direta e quantitativa entre os picos de absorbância e a concentração da solução, sendo o azul de metileno comumente escolhido para esse tipo de estudo porque apresenta picos característicos de absorbância para luz visível nos comprimentos ( $\lambda$ ) de 664nm e 614nm.

Na literatura existem relatos dos mesmos níveis de degradação de outros corantes orgânicos por fotocatalise de MAAs, como, por exemplo, o Violeta Metil 5BN (Zhang *et al.*, 2018), Índigo Carmim (Zhang *et al.*, 2015), Verde Malaquita (Kang *et al.*, 2015) e Vermelho Congo (Zhang *et al.*, 2013b). Esses resultados mostram um potencial para os MAAs serem aplicados como agentes descontaminantes, uma vez que conseguem reduzir consideravelmente a concentração de um corante orgânico em solução aquosa.

# CAPÍTULO 3

## ESTUDO EXPERIMENTAL

Para um melhor entendimento do estudo, abaixo é apresentado, na Figura 3.1, um fluxograma com o planejamento da pesquisa.

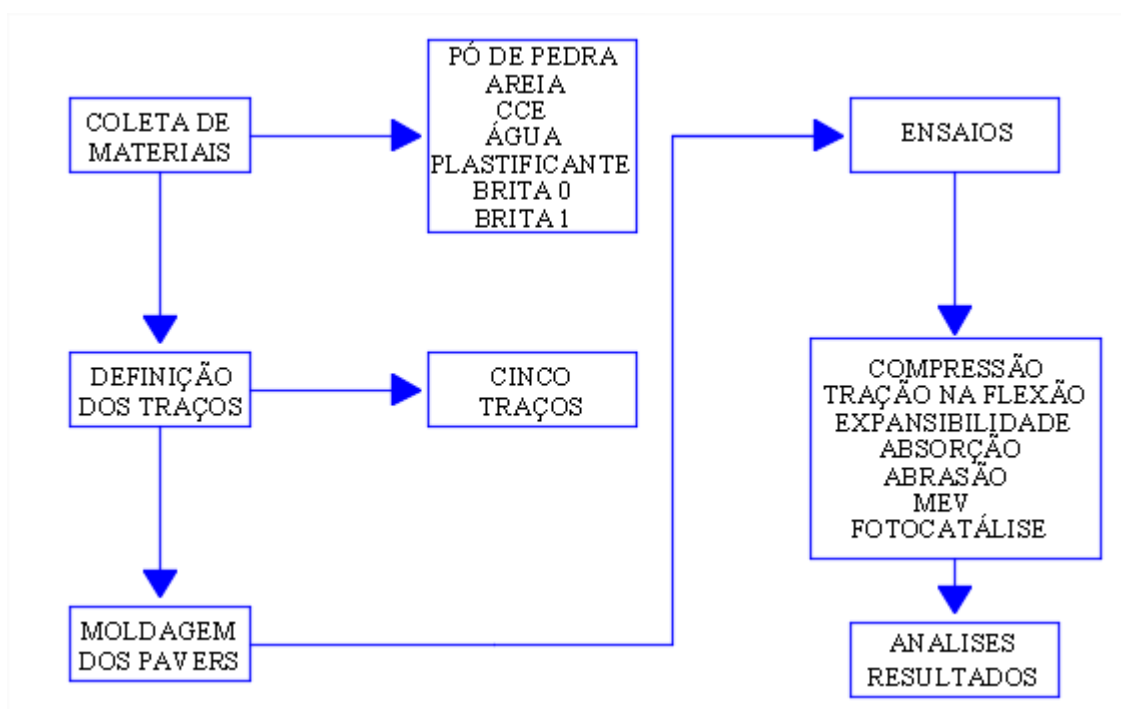


Figura 3.1 - Fluxograma para desenvolvimento da pesquisa.

### 3.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1.1 Água

A água potável utilizada foi a da região de Belo Horizonte, em específico a do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia de Transpores – DET, do CEFET-MG. A responsabilidade de abastecimento dessa água é da concessionária Companhia de Saneamento de Minas Gerais, COPASA-MG (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Água utilizada.

### **3.1.2 Agregado miúdo**

Define-se agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante de britagem de rochas estáveis. O agregado miúdo não deve conter grãos de um único tamanho.

Os agregados miúdos utilizados nesta pesquisa foram a areia de rio e o pó de pedra (Figura 3.3). Toda a areia e o pó de pedra utilizados para moldagem dos corpos de prova foram adquiridos do mesmo lote na empresa de concreto TOPMIX e foram mantidos em estufa para eliminação de umidade.





Figura 3.3 - Areia e pó de pedra.

### 3.1.3 Agregado graúdo

A brita 0 e a brita 1 foram utilizadas em alguns traços desta pesquisa (Figura 3.4). Estes materiais foram adquiridos na empresa de concreto TOPMIX.



Figura 3.4 - Brita 0 e brita 1.

### 3.1.4 Aditivo

Para que os blocos confeccionados nesta pesquisa apresentem algumas vantagens, utilizou-se o aditivo superplastificante sintético MC POWERFLOW 1180, da marca MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Aditivo

### 3.1.5 Hidróxido de sódio (NaOH)

Foi adotado, para este estudo, o ativador alcalino hidróxido de sódio na forma de micropérolas da fabricante SIGMA ALDRICH, por este ser comercializado no varejo e ter baixo custo. A massa molar fornecida pelo fabricante é 40,0 g/mol e a concentração mínima é de 99,0%. Na Tabela 3.1 são apresentadas as propriedades físicas e químicas do ativador alcalino adotado.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas e químicas do NaOH.

Estado físico	Micropérolas
Cor	Branco
Odor	Inodoro
Ph	14 em 50g/L 20°C
Ponto de fusão	323°C
Densidade relativa	2,13 g/cm <sup>3</sup> a 20°C
Solubilidade em água	1.090 g/L a 20°C

Fonte: Sigma Aldrich (2015).

### 3.1.6 Preparo da sílica ativa

Com o objetivo de obter redução da permeabilidade do concreto, bem como melhoria do desempenho mecânico do concreto e melhoria das condições de reforço de proteção contra corrosão, utilizou-se sílica ativa (Figura 3.6) para o presente estudo, a qual é comercializada pela Tecnosil Indústria e Comércio de Materiais de Construção Ltda.



Figura 3.6 - Sílica ativa

### 3.1.7 Preparo da cinza de cavaco de eucalipto (CCE) ou cinzas de biomassa de eucalipto (CBE)

A cinza de cavaco ou cinza de biomassa de eucalipto (Figura 3.7) utilizada neste trabalho foi coletada em indústria da região do Triângulo Mineiro de Minas Gerais. O eucalipto é transformado em cavaco para facilitar o armazenamento, controle de umidade, transporte e abastecimento da caldeira que, após a sua queima, o transforma em cinzas.

Nesse sentido, foram feitas a coleta e o transporte da cinza de cavaco de eucalipto, que ficou armazenado em bobonas plásticas de poliédricos impermeáveis à umidade, com capacidade de 50 litros. Posteriormente, foi realizada a moagem e o condicionamento em embalagens plásticas de 5 litros, livre de umidade.



Figura 3.7 - Cinza de cavaco de eucalipto (CCE) ou Cinza de biomassa de eucalipto (CBE).

### 3.2 MATERIAIS E PROPORÇÃO DAS MISTURAS

A seleção de materiais foi realizada para priorizar insumos ecológicos. Desse âmbito, as cinzas de biomassa de eucalipto (CBE) vêm de uma usina termelétrica, enquanto a sílica ativa (SA) é proveniente da fabricação de silício metálico da indústria. Ambos os subprodutos foram gerados em indústrias brasileiras.

Com o uso do moinho planetário de alto desempenho (Figura 3.8), a CBE *in natura* (Figura 3.9a) foi processada para desagregar o material e homogeneizar o tamanho do grão. A moagem da cinza foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do CEFET-MG.



Figura 3.8 - Moinho planetário.

Após o processo de trituração, o CBE apresentou uma aparência pulverulenta e cinza-escuro, semelhante ao cimento Portland (Figura 3.9b). A sílica ativa possui uma mistura homogênea, aspecto em pó e um tom de cor cinza claro. Por ser um material muito fino, a presença de aglomerados e partículas é facilmente percebida (Figura 3.9c).

As composições químicas da CBE e da SA foram determinadas por método de fusão com tetraborato de lítio e quantificação em fluorescência de raios-X dispersiva em energia Espectrômetro (XRD) Axios Panalytical Fast (Tabela 3.2). O CBE possui um alto teor de óxido de cálcio (44,71%) e uma alta perda na ignição (30,22%). Por seu turno, a SA possui um alto teor de óxido de silício (95,41%) e baixa perda de ignição (0,34%).

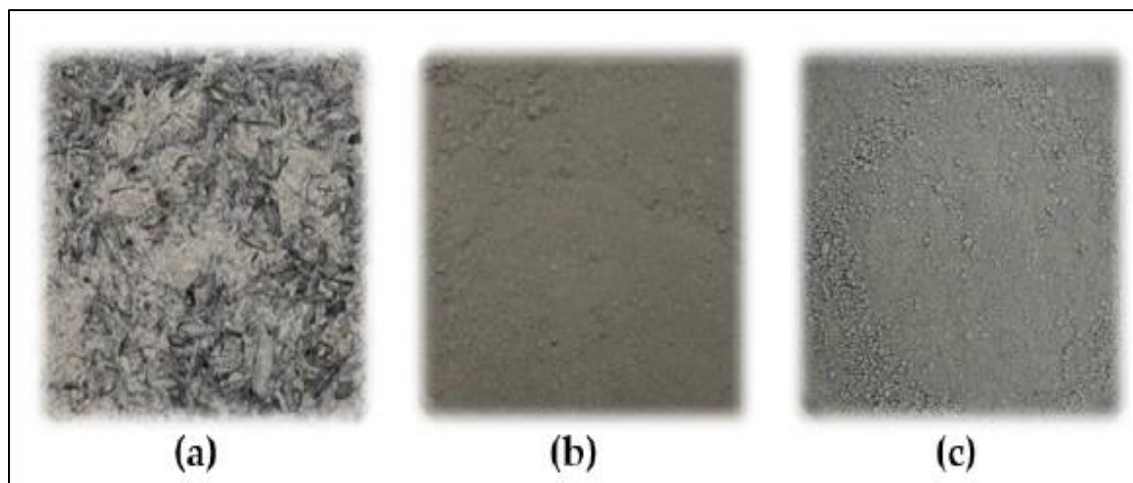


Figura 3.9 - Resíduos usados para substituir o cimento Portland: (a) cinza de biomassa de eucalipto (CBE) antes da moagem; (b) CBE após moagem; e (c) sílica ativa.

As fases cristalinas das cinzas e dos aglutinantes resultantes foram identificadas usando-se a difração de raios-X. Para tanto, foi utilizado um Shimadzu XRD-7000 (Kyoto, Japão), com tubo de raios-X de cobre operado a 40,0 kV e 30,0 mA, com uma varredura de  $0,020^\circ$   $2\theta$  por etapa, de  $5^\circ$  a  $80^\circ$  a 0,6 s/etapa. Para isso, pastas (sem agregados) das dosagens BBC06, BBC05 e AABC06 foram produzidas. Ademais, MATCH foi o *software* usado avaliar as fases cristalinas das pastas (versão 3.7.0.124) usando-se o método de difração do pó por meio do Crystallography Open Database (COD).

Tabela 3.2 - Composição química da CBE e sílica ativa (SA).

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	k <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	LOI <sup>a</sup>
<b>CBE</b>	44.71	1.23	7.03	2.37	5.59	4.12	2.97	1.46	0.28	30.22
<b>AS</b>	0.75	95.41	0.51	0.09	0,07	2.79	0	0	0	0.34

A CBE e o SF tiveram suas fases identificadas e apresentadas na Figura 3.10, e (a) e (b), respectivamente. Na CBE, picos de calcita (COD 9007689), cal (COD1011327), silvita (COD 9003130) e periclase (COD 9006456) foram identificados. Já na SA não foram identificados picos de fase cristalina.

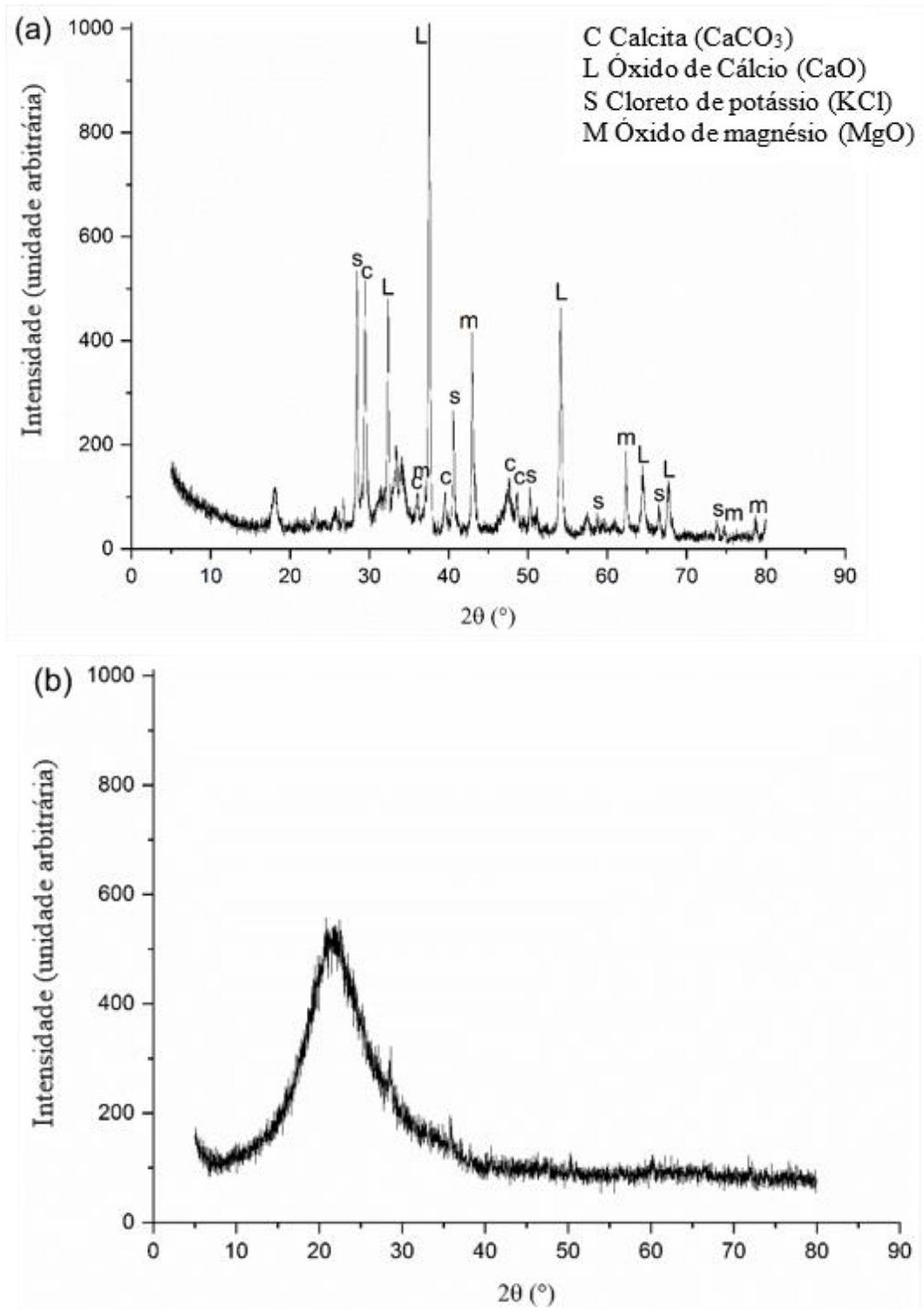
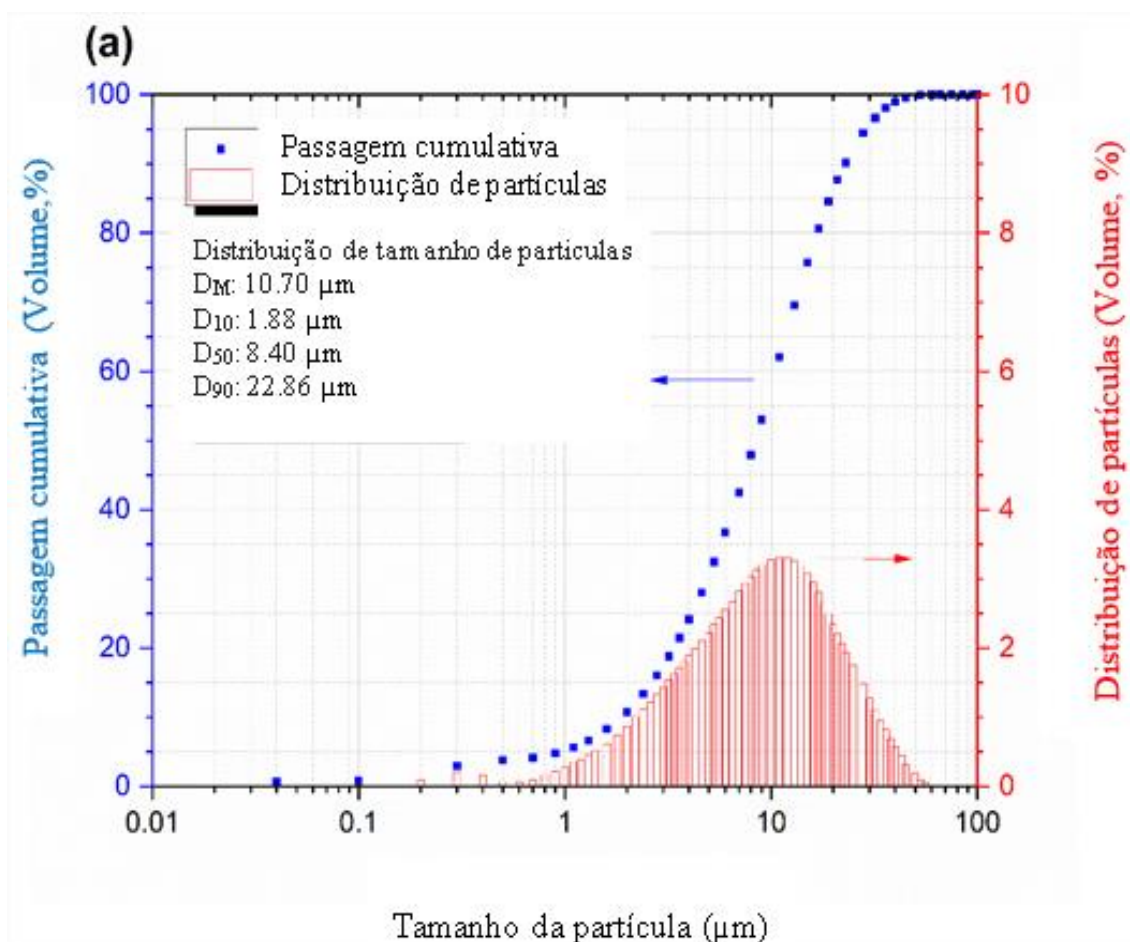


Figura 3.10 – XRD de: (a) CBE e (b) SF.

O tamanho médio de partícula e a distribuição de tamanho de partícula de CBE e de SA obtidos por difração a laser estão muito próximos (Figura 3.11). Embora a SA se apresente com um aspecto um pouco mais grosseiro, as imagens MEV mostram que ela ainda é muito mais fina que o CBE (Figura 3.12b,c). CBE, antes do processamento de moagem, apresenta partículas, algumas das quais são massivas, enquanto outras são ocas. Também é possível observar poros, estruturas e fibras com combustão incompleta (Figura 3.12a). Nesse sentido, esse material apresenta partículas significativamente menores e mais fragmentadas após o processamento de moagem, embora ainda seja possível observar partículas esféricas (Figura 3.12b). De outro modo, inversamente a SA se apresenta mais fina, mas suas partículas são aglomeradas, o que levou ao tamanho apresentado (Figura 3.12c).





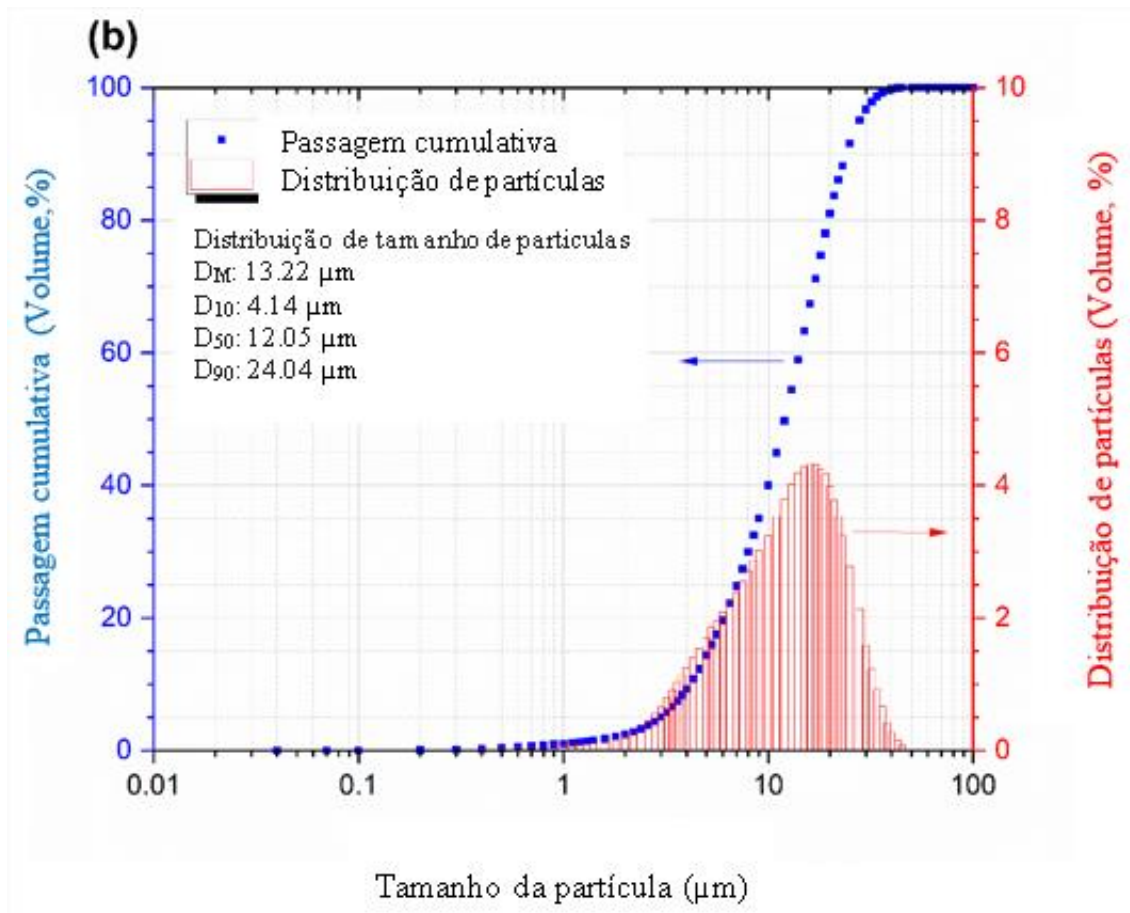
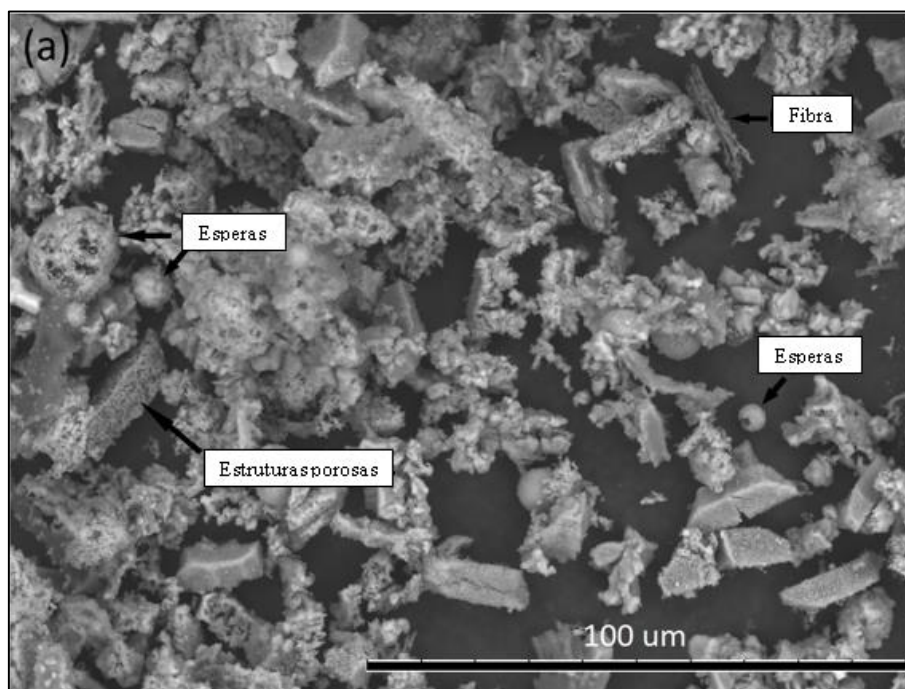


Figura 3.11 - Curva de distribuição do tamanho de partícula com um histograma para (a) CBE e (b) SA.



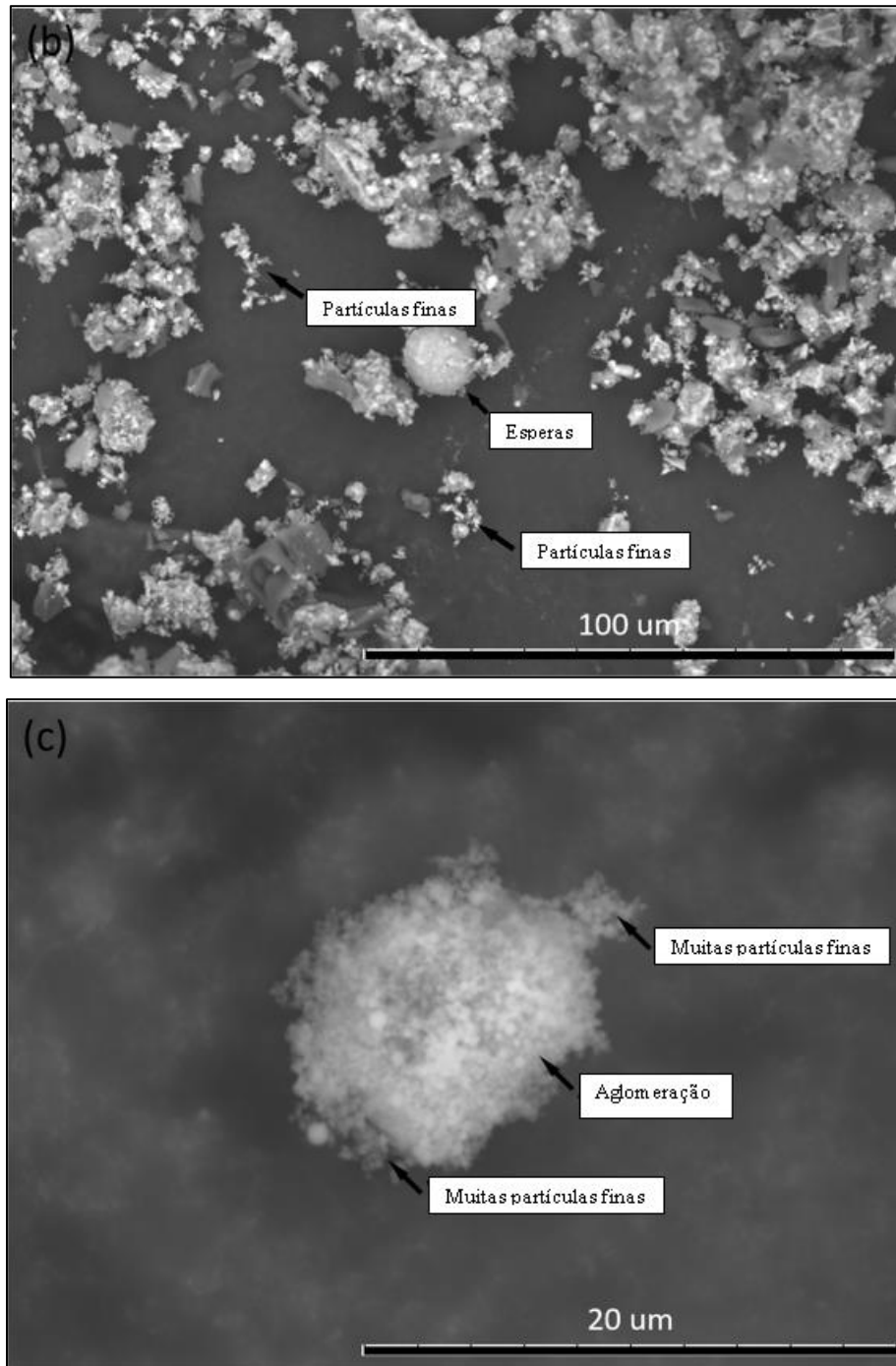


Figura 3.12 - Imagens obtidas por MEV: (a) CBE como recebidas, (b) CBE terrestre e (c) SA.

Neste estudo foram utilizados como agregados a areia fina (Figura 3.13a), o pó de pedra (Figura 3.13b) e o cascalho artificial com duas granulometrias diferentes (Figura 3.13c, d). A trabalhabilidade do concreto foi corrigida com o uso de um aditivo superplastificante (Figura 3.13f). A água foi fornecida pelo sistema de abastecimento local (Figura 3.13e).

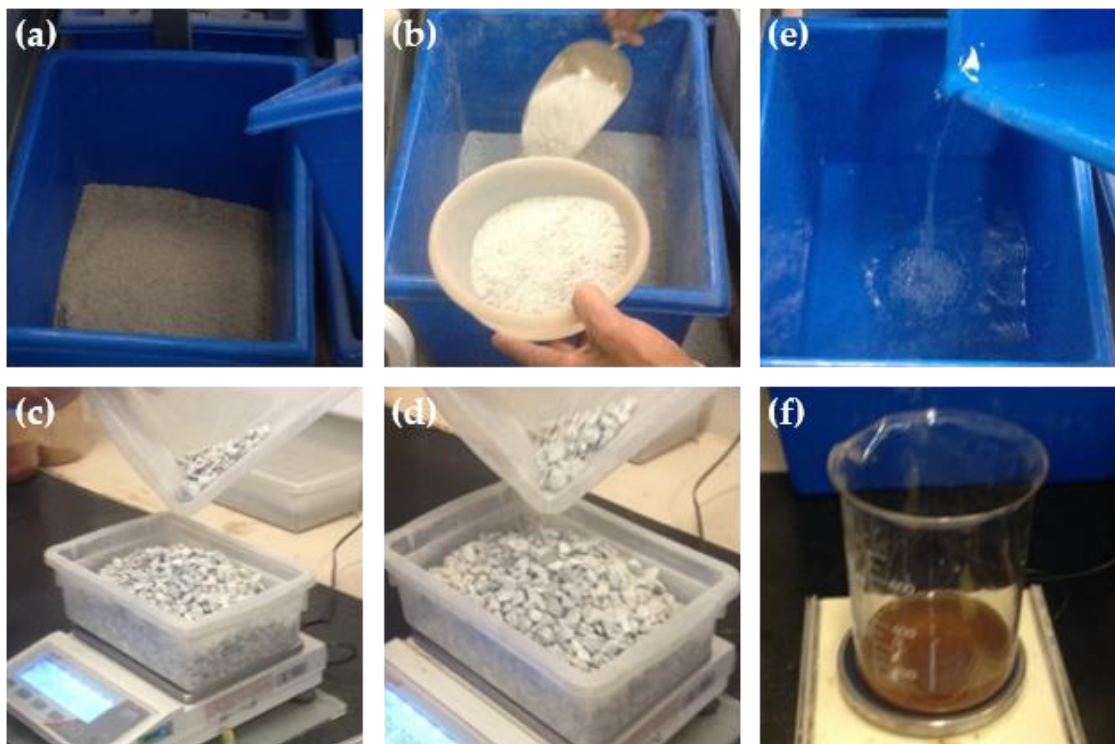


Figura 3.13 – Materiais utilizados no concreto de baixo carbono: **(a)** areia fina, **(b)** pó de pedra, **(c)** e **(d)** agregado grosso com dimensões de 4,8 a 9,5 mm e 9,5 a 19,5 mm, respectivamente, **(e)** água e **(f)** aditivo superplastificante.

Para fornecer o máximo de resultados possível para um aglutinante alternativo com base na combinação de CBE e SA (chamado sistema binário CBE-SA) e para expandir a contribuição do presente trabalho, duas abordagens foram realizadas: a primeira diz respeito ao uso de aglutinante com a substituição total de cimento Portland. Nesse caso, foram utilizadas proporções iguais de CBE-SA e a mistura foi feita usando-se água, a qual gerou um aglutinante binário com 100% de resíduos. Na segunda abordagem, o hidróxido de sódio foi a solução usada em vez de água para formar um aglutinante alcalino, mantendo proporções iguais de CBE-AS. Portanto, a solução alcalina atua como ativador e o sistema CBE-AS atua como precursor.

A dosagem do concreto de baixo carbono foi eminentemente experimental. Foram definidas cinco misturas, identificadas na Tabela 3.3, com três misturas de concreto com ligante sem ativação alcalina e duas outras com um aglutinante com ativação alcalina. Os materiais foram dosados para obter uma homogeneidade com vistas a fornecer o desempenho necessário para a fabricação de blocos de pavimentação. A tradicional

dosagem de concreto com cimento Portland fornecida por Mehta e Monteiro (2013) e Neville (2012) serviu de base para definir as proporções com aglutinantes alternativos.

Assim, as variáveis abordadas neste estudo correspondem à influência de dois fatores: (i) adota-se uma solução ativadora e (ii) relações água / pasta ( $w / b$ ) ou solução / pasta ( $s / b$ ). A primeira mistura (BBC-WCA: concreto aglutinante binário - sem agregado grosso) foi definida sem agregado grosso para avaliar a demanda de água. Em seguida, duas outras misturas foram definidas por meio do sistema CBE-AS e água (BBC06: concreto aglutinante binário com  $w / b = 0,6$  e BBC05: concreto aglutinante binário com  $w / b = 0,5$ ). Nas duas últimas misturas, a água foi substituída por solução de hidróxido de sódio com uma concentração de 3 mol / L. Então para a produção de aglutinante alcalino (AABC06: concreto aglutinante alcalino com  $s / b = 0,6$  e AABC07: concreto aglutinante alcalino ativado com  $s / b = 0,7$ ). Embora a dosagem tenha sido experimental, a agregados foram escolhidos para compatibilizar as dimensões das partículas no concreto. Assim, dois tipos de agregados finos (areia e pó de pedra) e agregados grossos com dois tamanhos de partículas diferentes foram usados. Nesse ínterim, vale lembrar que os agregados com tamanhos diferentes se complementam e proporcionam melhor partícula ao concreto (De Larrard, 1999).

No contexto de materiais álcali-ativados, as propriedades do precursor e do ativador influenciam diretamente a estrutura e o comportamento da matriz de ligação (Provis, 2018). A composição química de resíduos indicam que a mistura CBE-SA funciona como um sistema misto de precursores de alto cálcio, com o CBE representando uma fonte de cálcio, enquanto a SA fornece os silicatos. A mistura dos dois resíduos foi projetada para equilibrar a disponibilidade de cálcio e silicatos. Em geral, o processo de ativação de álcalis de misturas com alto teor de cálcio é heterogêneo e compreende, entre outros mecanismos, a dissolução de partículas, a nucleação e o crescimento em fase sólida (Provis e Bernal, 2014)

Por sua vez, as características de resíduos, como composição química e granulometria fina, traduzidas em termos de área superficial, isto é, morfologia de partículas, agem sinergicamente, favorecendo os mecanismos de superfície e interface, e promovem condições para reações de ativação alcalina. Nesse contexto, alguns trabalhos recentes

abordaram o uso de cinzas de biomassa como precursores de MAA e obtiveram resultados favoráveis (Font *et al.*, 2017).

Por seu turno, os ativadores funcionam como um alcalino para promover reações de ativação alcalina (Juenger *et al.*, 2011). Dessa forma, para esta investigação, optou-se por usar hidróxido de sódio aquoso em sua solução que é comumente usada como ativador da MAA. Nesse cenário, é válido lembrar que os ativadores à base de hidróxido de sódio possuem uma excelente unidade química com precursores de cálcio elevados, bem como eficiência na ativação de reações e baixa viscosidade das soluções, além da disponibilidade para obtenção (Provis, 2009). Apesar da pertinente literatura indicando concentrações a partir de 5 M (Provis, 2014), no presente estudo a concentração de solução ativadora foi definida em 3 M - número que está de acordo com pesquisas anteriores (Huiskes *et al.*, 2016; Keulen *et al.*, 2018), cujos resultados consistentes foram obtidos para baixas concentrações molares.

Tabela 3.3 - Projeto de proporção de materiais.

Mistura	Proporção (%)									
	CBE	Sílica Ativa	Areia	Pó de pedra	Agregado grosso (4,8 - 9,5 mm)	Agregado grosso (9,5 - 19,5 mm)	Água	Solução de NaOH	Aditivo superplastificante	Água / pasta (w / b) ou solução / pasta (s / b)
BBC-WCA	13,1	13,1	26,2	26,2	-	-	21,0	-	0,26	0,8
BBC06	8,9	8,9	17,8	17,8	17,8	17,8	10,7	-	0,36	0,6
BBC05	9,1	9,1	18,1	18,1	18,1	18,1	9,1	-	0,36	0,5
AABC06	8,9	8,9	17,8	17,8	17,8	17,8	-	10,7	0,36	0,6
AABC07	8,7	8,7	17,5	17,5	17,5	17,5	-	12,2	0,36	0,7

A consistência do concreto fresco pode estar relacionada à trabalhabilidade e foi usada como critério para definir as proporções w / b e s / b. Para tanto, o teste de queda foi escolhido para medir a consistência. A Figura 3.14 mostra os valores do teste de slump para cada mistura.

Ao definir a mistura da BBC-WCA, a queda foi acentuada, isto é, a relação p / b = 0,8 pode ser reduzida. Assim, optamos pela razão w / b = 0,6 (BBC06), seguida pela relação

$p / b = 0,5$  (BBC05). No estudo, o concreto ativado com álcalis foi inicialmente dosado com  $s / b = 0,6$ . No entanto, a queda foi praticamente nula, o que levou a um aumento no fator  $s / b$ . Isso indica maior demanda por água devido às reações relevantes à alcali-ativação. Desse modo, esta metodologia teve como objetivo avaliar um ponto ótimo de  $p / b$  ou  $s / b$  para que a quantidade de água ou solução fosse ideal para reações de endurecimento do concreto.

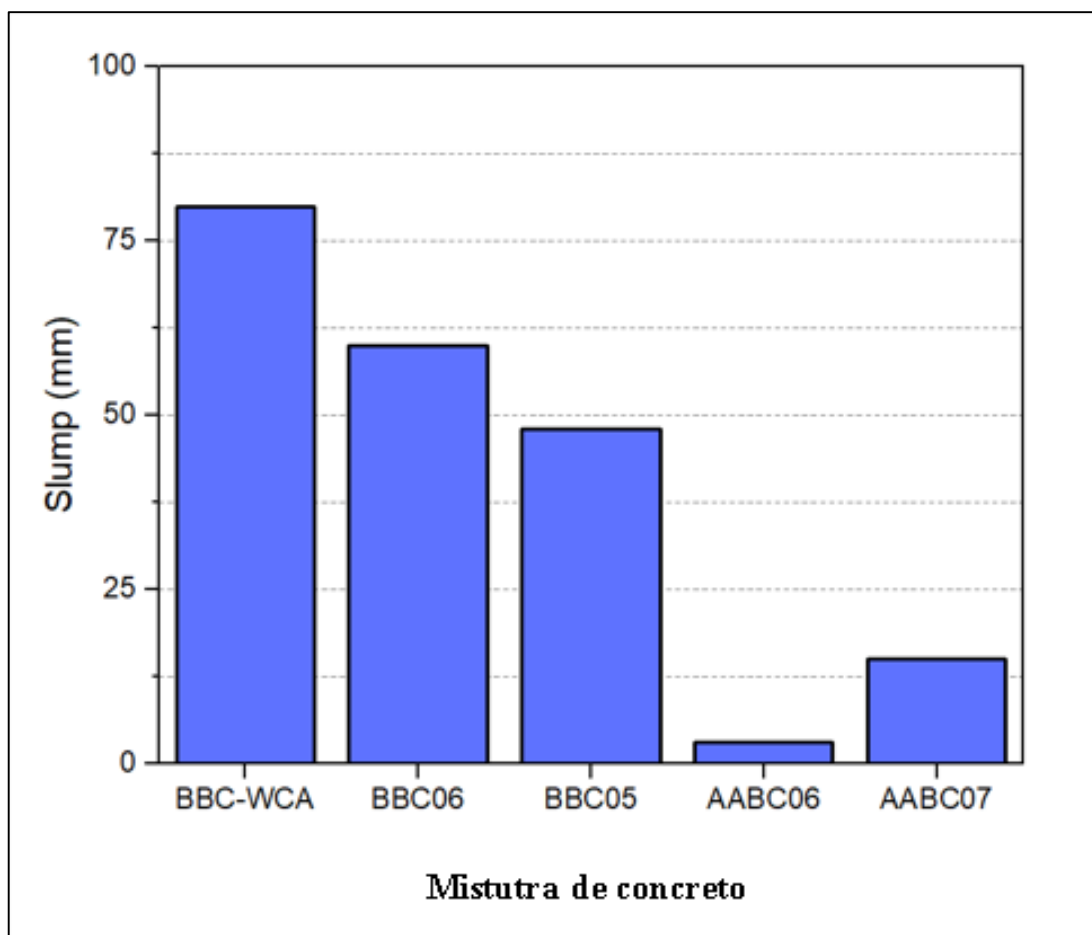


Figura 3.14 - Consistência no estado fresco para cada mistura de concreto medida pelo do teste de slump.

### 3.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Os materiais foram misturados usando-se um misturador mecânico para concreto (Figura 3.15-(1)). Nesse processo, inicialmente, o misturador foi umedecido com água para que não houvesse aderência do material e captura de umidade e o aditivo superplastificante foi diluído na fração aquosa para melhor distribuição ao longo do volume de material.

Em seguida, metade do volume de água com superplastificante foi adicionada, juntamente com os agregados. O misturador foi ligado por 30 segundos para pré-mistura. Em seguida, os outros materiais (agregados finos e resíduos de CBE-SA) e a água restante com superplastificante foram acrescentados. A mistura foi realizada até o concreto obter uma aparência uniforme. No caso da produção de concreto com ligante alcalino ativado, o processo executivo seguiu os mesmos passos, mas, em vez de água, foi utilizada a solução de hidróxido de sódio.

Após a conclusão da mistura, o concreto foi submetido ao teste de *slump* (Figura 3.15- (2)) para que fosse possível avaliar a consistência e a trabalhabilidade. A moldagem dos blocos (Figura 3.15- (3)) foi realizada utilizando-se formas plásticas com dimensões de 25 cm, 12,5 cm e 8 cm. Durante a moldagem, foi realizado o adensamento manual do concreto, com duas camadas sobrepostas. Ainda, foi necessário terminar a superfície com a ajuda de uma espátula (Figura 3.15- (4)) para nivelar as faces do bloco e promover uma boa distribuição para que o estresse fosse realizado corretamente durante os testes mecânicos. Após 24 horas de endurecimento sob umidade e temperatura controladas, os blocos foram desmoldados e apresentaram uma boa aparência no seu acabamento, com uma superfície lisa (Figura 3.15- (5)). Logo após a desmoldagem, os blocos foram inseridos em água para submersão e cura por 28 dias (Figura 3.15- (6)). O processo completo de mistura, moldagem e cura foi realizado a uma temperatura de 24° (+ou-2°) C e umidade relativa de 60% (+ou-5%).

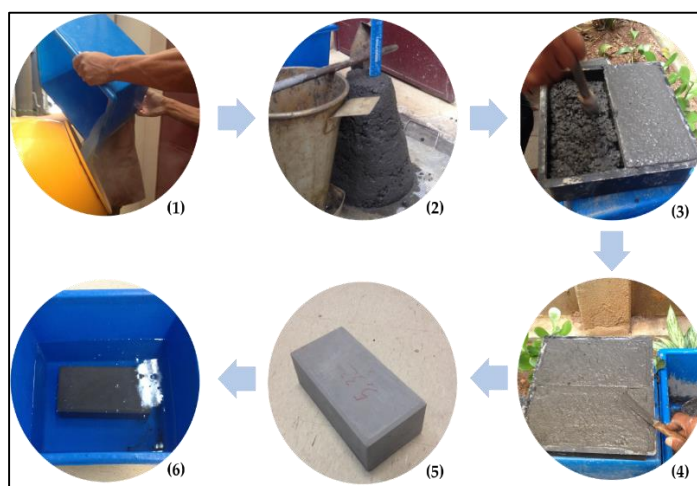


Figura 3.15 - Etapas de produção para blocos de concreto: (1) mistura de materiais, (2) teste de slump, (3) moldagem e espessamento, (4) acabamento de superfície, (5) blocos após desmoldagem e (6) cura submersa em água.

### 3.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A avaliação de desempenho de concretos de baixo carbono foi realizada, após 28 dias de cura, utilizando-se as seguintes abordagens: (i) comportamento mecânico, (ii) absorção de água, massa e porosidade, (iii) variação dimensional, (iv) resistência à abrasão, (v) investigação microestrutural, e (vi) potencial de degradação orgânica do corante.

O comportamento mecânico foi avaliado aos 28 dias para todas as misturas, por meio do ensaio de compressão dos blocos de pavimentação. O ensaio foi realizado em equipamento universal, com aplicação de carga controlada e medição a partir de célula de carga com capacidade para 300 kN. As cargas máximas foram medidas e as tensões de compressão calculadas em função da área de aplicação dos esforços. Dessa forma, foram obtidos os valores de resistência à compressão para os blocos de concreto mensurados em MPa. Ademais, foram utilizados quatro corpos de prova de cada traço e os valores médios calculados, juntamente com os respectivos desvios-padrão.

Em termos de propriedades físicas, foram avaliadas a absorção de água (WA), a porosidade (PR), a massa específica seca ( $\rho_{dry}$ ) e a massa específica úmida ( $\rho_{wet}$ ). Todas as propriedades foram analisadas por meio do ensaio de absorção de água. Nesse ensaio, a massa dos blocos foi avaliada em diferentes situações: após a cura de 28 dias, os blocos foram retirados da imersão em água, a superfície foi seca e a primeira pesagem foi realizada, obtendo a massa saturada ( $M_{sat}$ ). Em seguida, o peso submerso dos blocos foi avaliado com uso de balança hidrostática, assim resultando na massa submersa ( $M_{sub}$ ). Por fim, os blocos foram colocados em estufa pelo período de 24 horas até a constância de massa à temperatura de 105 °C e, então, foi obtida a massa seca ( $M_{dry}$ ).

Também é preciso esclarecer que a estabilidade dimensional dos blocos foi avaliada utilizando-se o ensaio de expansibilidade, no qual os blocos de concreto foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem, e obtidas as dimensões entre os terços médios da maior face. Durante o processo de secagem, os blocos foram colocados em estufa à temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. Após retirar da estufa, os blocos de concreto foram deixados ao ar até estabilização com a temperatura ambiente. A molhagem foi realizada por imersão completa em água por um período de 24 horas.



Em seguida, os blocos foram retirados da imersão e a superfície foi seca com auxílio de um pano. A medição da distância entre os terços médios foi realizada tanto após a secagem, como após a molhagem, sempre à temperatura ambiente.

O cálculo das propriedades físicas foi realizado por meio das equações 1, 2, 3, e 4, sendo  $\rho_w = 1,00 \text{ g/cm}^3$  a densidade da água:

$$\text{WA (\%)} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{PR (\%)} = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho_{dry} (\text{g/cm}^3) = \frac{M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}} \times \rho_w \quad (3)$$

$$\rho_{wet} (\text{g/cm}^3) = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_{sub}} \times \rho_w \quad (4)$$

Por sua vez, a resistência ao desgaste foi avaliada por meio do ensaio de abrasão profunda, a qual simula condições de tráfego sobre os blocos de concreto e avalia o desgaste superficial por atrito. Nesse ensaio, o bloco de concreto é inserido em um equipamento com suporte giratório, no qual se utiliza a areia como material abrasivo. O bloco é comprimido contra o suporte, o que promove desgaste contínuo. O ensaio durou 2 horas, com velocidade angular ajustada em 15 rotações por minuto, correspondente a um trajeto de 1130 metros.

Ao seu turno, a investigação microestrutural foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Hitashi, modelo TM3000. O equipamento possui baixo vácuo e detector de elétrons retroespalhados. As imagens foram realizadas com tensão de 15 kV. Para a realização das imagens foram extraídos pequenos fragmentos dos blocos com o auxílio da máquina de corte. As amostras foram levadas ao microscópio sem preparo adicional e fixadas com fita de carbono de alta condutividade.

No âmbito dessas observações e análises, uma propriedade de grande importância para novos aglutinantes seria a capacidade de degradar matéria orgânica, bem como degradar corantes orgânicos nas águas residuais ou até para produzir fachadas autolimpantes (De La Rosa *et al.*, 2017). Assim, para a avaliação do potencial de degradação da matéria orgânica (poluentes), foi usado um composto de azul de metileno (AM) (Larbi *et al.*, 2017). De outro modo, o potencial de degradação da matéria orgânica por amostras de concreto ecológico foi realizado com e sem a incidência de luz ultravioleta (UV), sendo que as amostras de argamassa de cubo (serrados dos pavimentos ecológicos) ficaram expostas em 200 mL de solução de água destilada com 20 mg/L de AM. A massa média das amostras era de 47,85 g (+ou-1,72 g).

A degradação do AM foi avaliada sob duas condições de iluminação para as mesmas amostras, com as primeiras 24 horas de degradação em um quarto escuro (sem luz). No final deste primeiro ciclo, porém, a solução de AM foi substituída por uma nova solução com a mesma concentração inicial e as amostras foram colocadas por mais 24 horas em uma câmara com 390 mm x 600 mm x 400 mm nas suas dimensões interna e duas lâmpadas G15T8 UV-C 15 W operadas a 55 V, com 450 mm de comprimento e 254 nm UV-C, com emissão e potência UV igual a 49 uW / cm<sup>2</sup> a 1 m. Uma alíquota de 10 mL de solução foi coletada no início do teste e, depois, às 2, 4, 8 e 24 horas de cada ciclo. As medidas de absorvância foram realizadas de 250 a 850 nm em um espectrofotômetro Lambda 1050 UV / Vis. A curva de calibração foi construída com concentrações de 1,25, 2,50, 5,00, 10,00 e 20,00 mg/L, e foi utilizado o pico de 664 nm para quantificação.

Na Figura 3.16 é possível observar as curvas de adsorção UV-vis das soluções AM (Poluente) com concentrações de 1,25, 2,50, 5,00, 10,00 e 20,00 mg/L. A existência de dois diferentes picos de absorvância em comprimentos de onda iguais a 292 nm e 664 nm também pode ser apreciada. Para avaliar a concentração das soluções AM coletadas durante os testes, uma curva de calibração foi criada a partir da absorvância no comprimento da onda 664 nm das soluções nas diferentes concentrações (Figura 3.17).

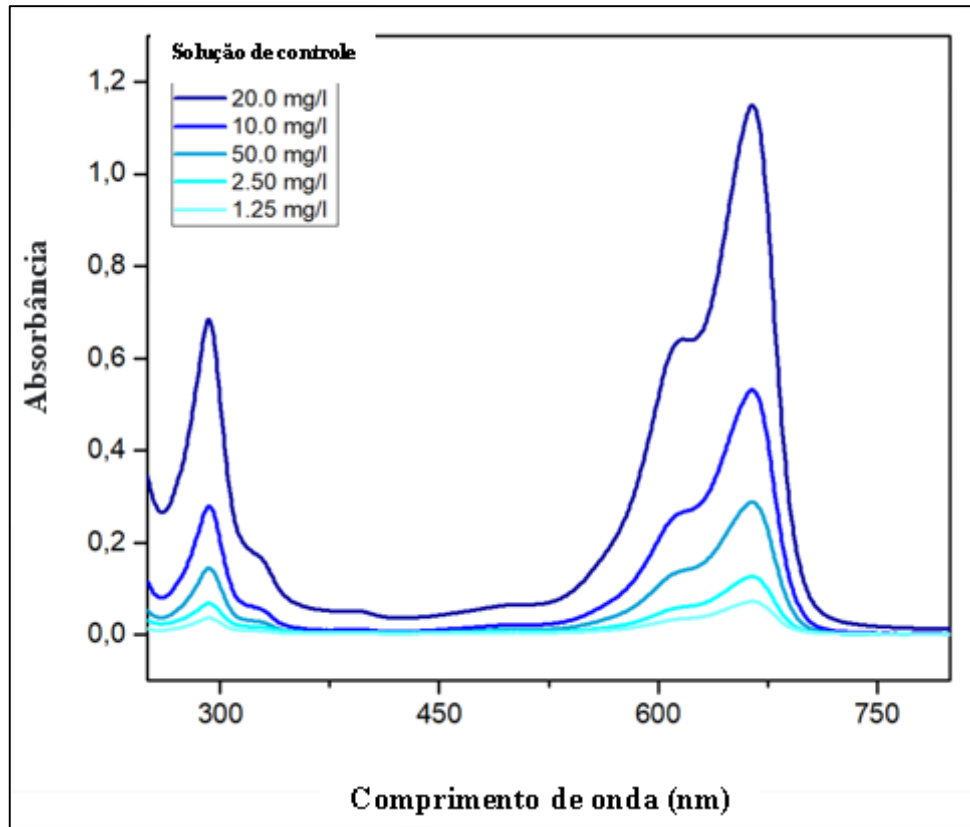


Figura 3.16 – Comprimento de onda X absorvância

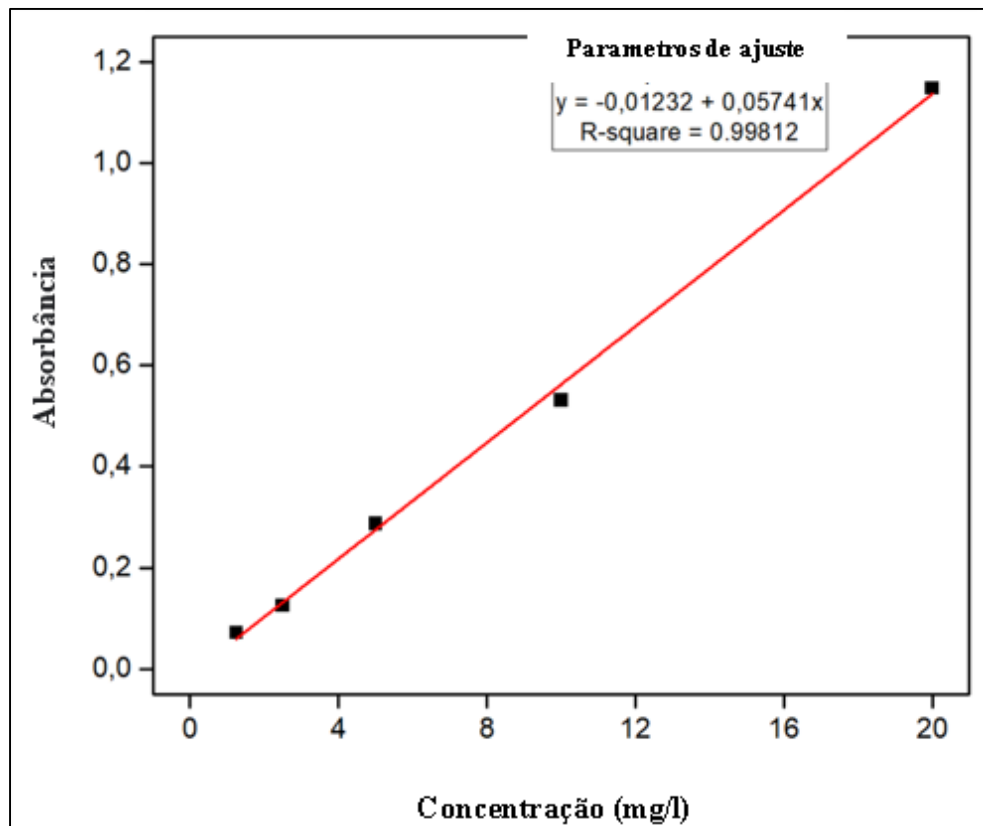


Figura 3.17 - Calibração curva de absorvância X concentração.

Em ambas as etapas, um recipiente de controle contendo apenas a solução AM foi adicionado à câmara de UV para avaliar a degradação do corante sem a influência do material catalisador. Assim, se a concentração das soluções AM com as amostras dos blocos de pavimentação ecológicos expostos aos raios UV por 24 horas for menor do que a concentração de AM das soluções com as amostras da pavimentação ecológica, os blocos sem exposição aos UV após 24 horas indicam uma possível propriedade de autolimpeza sob ação UV.

# CAPÍTULO 4

---

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os pavers foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão (Figura 4.1). Foram separados para este ensaio os quatro pavers de cada traço, conforme citado anteriormente. A norma NBR 9781, por exemplo, pontua a resistência à compressão como único parâmetro de desempenho mecânico das peças pré-moldadas de concreto, assumindo que todas as outras características estão diretamente relacionadas com essa capacidade estrutural de receber esforços de compressão. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do CEFET-MG.



Figura 4.1 - Ensaio de resistência à compressão.

Em termos de comportamento mecânico, observa-se que todas as misturas atingiram níveis representativos de resistência à compressão (Figura 4.2). A menor resistência foi alcançada pela mistura BBC-WCA (11,97 MPa), enquanto a mais alta foi alcançada pela mistura BBC05 (32,28 MPa). As outras misturas BBC06, AABC06 e AABC07 resultaram em resistência intermediária de 22,41 MPa, 23,39 MPa e 18,77 MPa, respectivamente. Em geral, os valores estão alinhados com outros estudos (Robayo-Salazar *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2013) e as misturas BBC05, BBC06 e AABC06 atendem às recomendações da norma ASTM C902-15 (2016) para blocos de pavimentação para uso interno e externo, ambos com resistência à compressão mínima de 20,70 MPa. Esse comportamento mostra que houve ganho significativo de endurecimento e resistência aos 28 dias. Para todas as misturas, o sistema de resíduos CBE-SA funcionava como material de ligação e cimentação, com uma matriz densa que aglutinou as partículas agregadas. Em misturas com ligante binário e substituição a 100% (BBC-WAC, BBC-06 e BBC05) solubilizam a água do sistema CBE-SA e as reações entre os componentes resultam na formação de produtos sólidos. Portanto, o sistema CBE-SA funcionou como uma alternativa de ligante hidráulico em substituição total ao cimento Portland. Por outro lado, ao usar cálcio e solução de hidróxido, ocorrem reações de hidrólise alcalina e a formação de um sistema de hidrato. Nesse caso, o sistema CBE-SA funciona como precursor, enquanto a solução alcalina funciona como ativadora, formando concreto com ligante álcali-ativado.

Nesse contexto, apesar do ganho de resistência, houve uma diferença significativa entre todas as misturas avaliadas. A baixa resistência do concreto com aglomerado binário e sem agregados grossos (BBC-WCA) pode ser explicada pela ausência destes últimos e pelo fator de aglomeração da água (w/b). Os agregados grossos atuam na distribuição de tensões sobre o volume de material e agem como uma barreira contra a propagação de microfissuras (Wu e Tang, 2019). Portanto, a ausência de agregados grossos causou uma queda na resistência.

Por seu turno, a relação água/ligante (w/b) teve um papel influente no comportamento mecânico. Como mencionado no tópico “Estudo Experimental”, a mistura BBC-WCA foi uma referência para ajustar o valor w/b com a finalidade de avaliar a demanda de água pelos resíduos. Por esse motivo, foi escolhido um valor mais alto (w/b = 0,8) quando

comparado a outras dosagens comuns na literatura (Mehta e Monteiro, 2013). A água usada na mistura do concreto e os componentes fluidizam o sistema e promovem o deslizamento entre as partículas, resultando em trabalhabilidade. Se houver mais água, o sistema se torna mais fluido e a trabalhabilidade aumenta, o que foi observado pela queda de resistência mais significativa da mistura BBC-WCA, exposta na Figura 3.14. Entretanto, o excesso de água aumenta a rede de poros do material e, conseqüentemente, a queda de resistência. Assim, havia uma quantidade excessiva de água que proporcionava uma menor resistência.

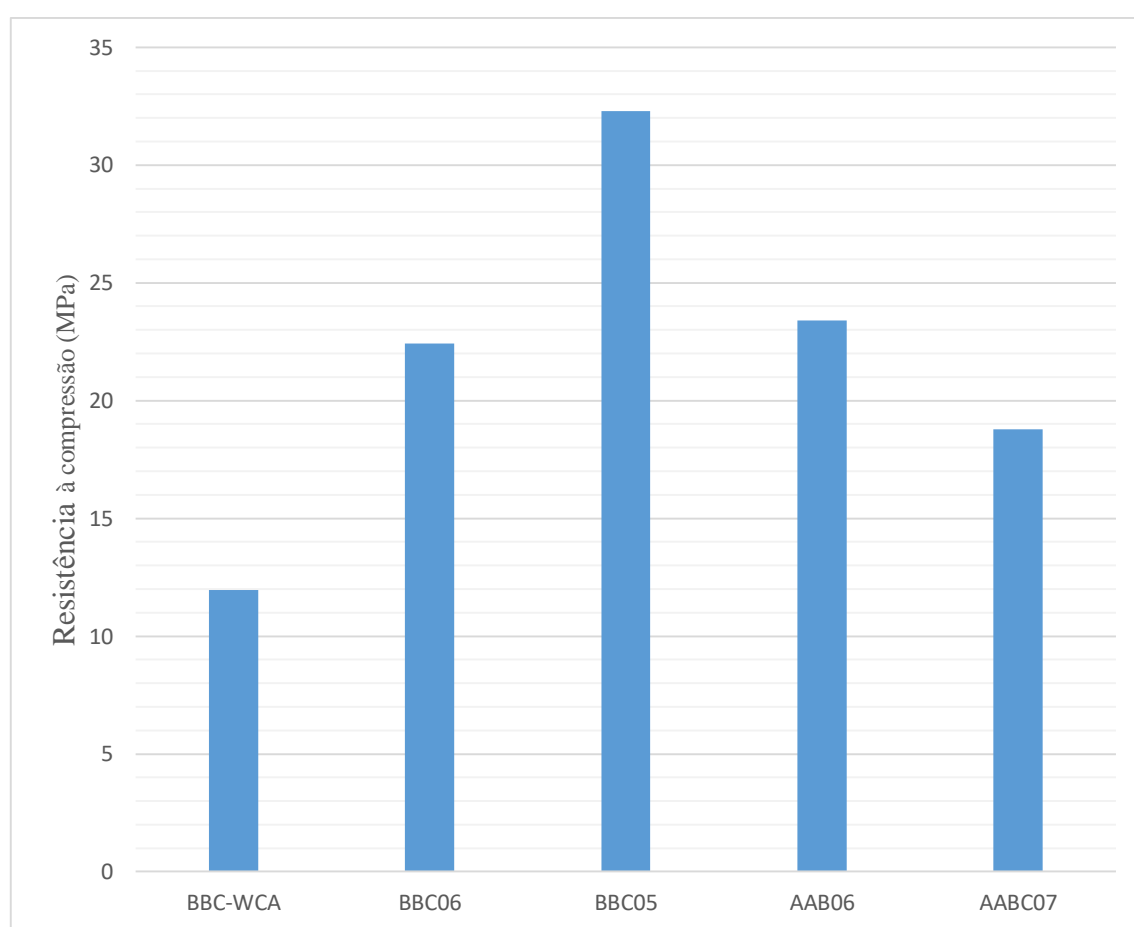


Figura 4.2 - Resistência à compressão para cada mistura de concreto.

As outras quatro misturas avaliadas possuem agregados grosseiros do mesmo tipo, o que promove a distribuição correta de tensões e remove o efeito associado à ausência de agregados grossos. Portanto, há um ganho de resistência significativa quando comparadas à mistura BBC-WCA. As variáveis em análise foram: (i) a influência da ativação de álcalis e (ii) a água / ligante ou solução / ligante relação. À primeira vista, a ativação

alcalina gerou resultados menos significativos em termos de compressão força. No entanto, a quantidade de água usada na mistura também deve ser avaliada para ter um conjunto de condições que viabilizem essas comparações. As misturas BBC06 e AABC06 têm o mesmo teor de água em função do aglutinante ( $w/b = 0,6$  e  $s/b = 0,6$ ) e obtiveram resultados compatíveis, considerando os respectivos desvios-padrão. Portanto, os processos de endurecimento desenvolvidos pelas duas misturas foram eficazes para endurecer a pasta e ganhar resistência, seja pela hidratação de compostos hidráulicos (BBC: concreto ligante binário) ou por reações de ativação alcalina (AABC: ligante ativado por álcalis).

Contudo, a trabalhabilidade das misturas foi bastante diferente, como já mostrado na Figura 3.14. A queda da mistura BBC06 foi igual a 60mm, enquanto que, para a mistura AABC06, se mostrou insignificante. Esse comportamento suspeito entre resistência à compressão e trabalhabilidade pode ser atribuído às reações de ativação alcalina (Bondar *et al.*, 2018). Ao misturar o sistema CBE-SA com a solução de hidróxido de sódio, o ativador e o precursor entram em contato, e a ativação logo se inicia (Provis *et al.*, 2015). Nesse ínterim, as pastas aglutinantes ativadas alcalinamente atuam como cola, o que evita o deslizamento entre partículas e implica baixa trabalhabilidade.

Em concreto com ligante binário sem ativação de álcalis, a adesão entre as partículas no estado fresco é menor, favorecendo a trabalhabilidade. O resultado da mistura BBC05 ( $w/b = 0,5$ ) foi 44% maior em comparação com a mistura BBC06, mostrando compatibilidade entre a quantidade de água disponível no sistema e a demanda de água por reações e formação de produtos sólidos. O equilíbrio entre disponibilidade e consumo de água promove a densificação da matriz e um consequente aumento da resistência (Sata *et al.*, 2012). Portanto, o melhor ponto da relação água/aglutinante é próximo de 0,5. No experimento, a trabalhabilidade da mistura BBC05 diminuiu 20% em contraste com a mistura BBC06 (Figura 3.14), mas permaneceu adequada para a fundição e o espessamento corretos nos moldes. Todavia, o mesmo comportamento não ocorreu com a mistura contendo o aglutinante álcali-ativado. Dada a queda insignificante, era necessário aumentar a relação solução/aglutinante para promover a trabalhabilidade. A queda da mistura AABC07 com  $s/b = 0,7$  foi cinco vezes maior que a da mistura AABC06, ao passo em que a resistência à compressão foi 12% menor. Portanto, a maior



demanda por água é evidente em misturas com um aglutinante ativado por álcalis para viabilizar reações de ativação alcalina.

#### **4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

A mesma metodologia do ensaio de compressão foi utilizada na realização do ensaio de resistência à tração na flexão, ou seja, foram preparados para este experimento quatro pavers de cada traço (Figura 4.3).

Em conformidade com o ensaio de resistência à compressão, observa-se na Figura 4.4 que os resultados de resistência à tração na flexão foram coerentes quando se percebe que o paver que obteve melhor resultado no ensaio de compressão também foi aquele que obteve melhor resultado no ensaio de tração. Essa coerência ocorreu para todos os cinco traços.

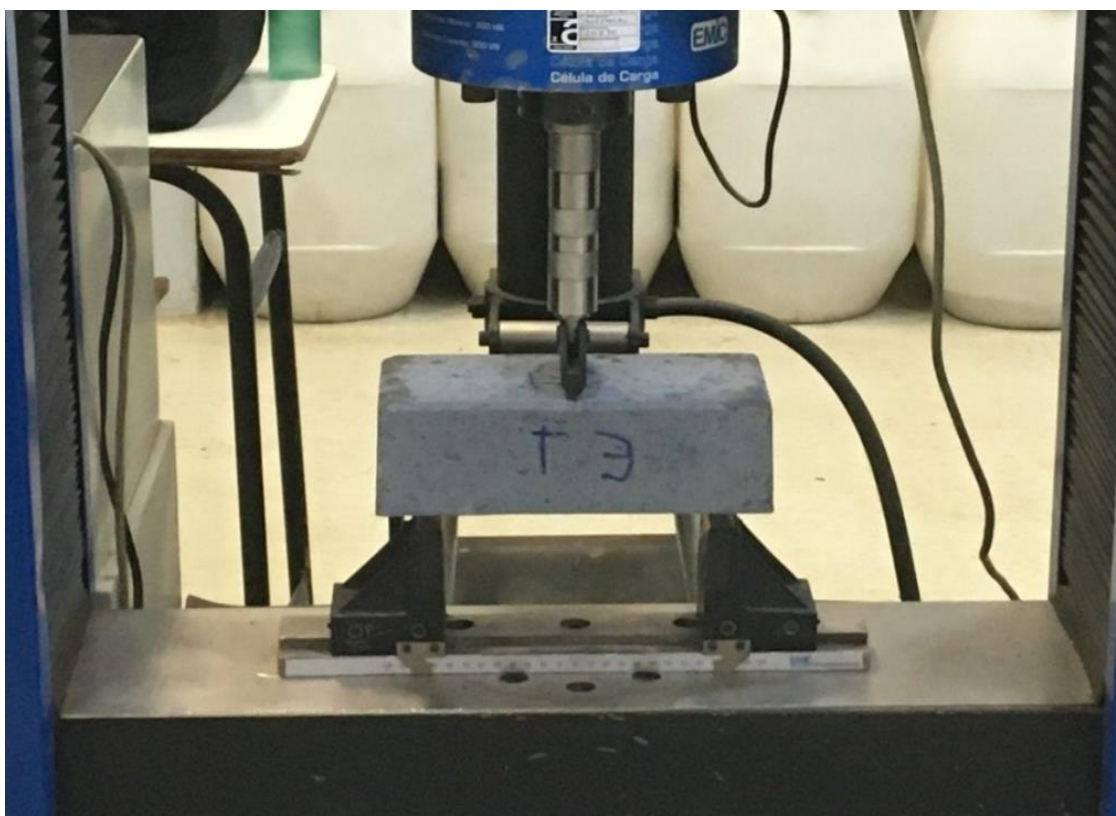


Figura 4.3 – Ensaio à tração na flexão.

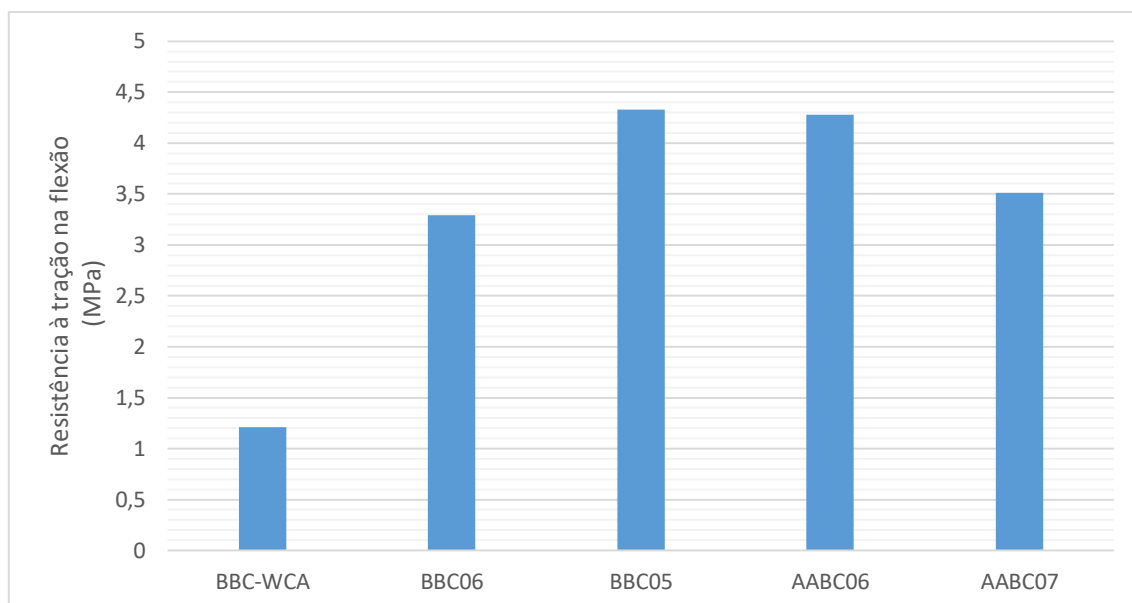


Figura 4.4 - Resistência à tração na flexão para cada mistura de concreto

A menor resistência foi alcançada pela mistura BBC-WCA (1,21 MPa), enquanto a mais alta se deu pela mistura BBC05 (4,33 MPa). As outras misturas BBC06, AABC06 e AABC07 resultaram em resistência intermediária de 3,29 MPa, 4,28 MPa e 3,51 MPa, respectivamente.

De acordo com Farias *et al.* (2003), quando se trata de resistência à compressão, cujos valores são altos em relação aos valores de resistência à tração, variações em dois resultados de ensaios na ordem de, por exemplo, 0,5 MPa, são consideradas pequenas no universo de valores. No entanto, quando se analisa a tração do concreto, para a qual os valores da resistência são baixos, uma variação de resultados de 0,5 MPa é muito grande. Dessa forma, por menor que seja a influência dos diversos fatores no ensaio de tração, ela pode promover impactos significativos nos valores finais dessa resistência.

### 4.3 PICOS DE CRISTALINIDADE

As pastas produzidas a partir de misturas BBC06, BBC05 e AABC06 sem agregados finos e grossos mostraram a existência de picos de cristalinidade (Figura 4.5). Alguns picos de cristalinidade vêm de matérias-primas, como calcita (COD 9007689) e periclase (COD 9006456), mas, no experimento em questão não foram identificados picos de cal nas BBC06 e BBC05 que receberam água, bem como não foram identificados picos

crystalinos de Portlandita. Isso indica que a Calcita (CaO), quando reagida com água, não formou Portlandita (Ca (OH) 2), e que provavelmente deu origem a géis de silicato de cálcio através da reação com a sílica amorfa presente no SA. Todavia, picos de cristalinidade de aragonita (COD 9016147) foram identificadas nas pastas BBC06 e BBC05 produzidas com água e sem um ativador. Nesse contexto, vale ressaltar que a aragonita está relacionada à carbonatação da fase amorfa C-S-H (Bernal et al., 2012).

Nas amostras produzidas, picos da calcita em torno de  $2\theta = 23^\circ$  e aragonita em torno de  $2\theta = 28^\circ$  e  $2\theta = 37^\circ$  não foram observados mistura AABC06. Este resultado indica que a adição de solução ativadora promove consumo característico da fase da calcita e preserva as fases C-S-H formadas, evitando a carbonatação. Em geral, a matriz aglutinante, em ambos os casos (com e sem solução ativadora), possui principalmente produtos com fases amorfas.

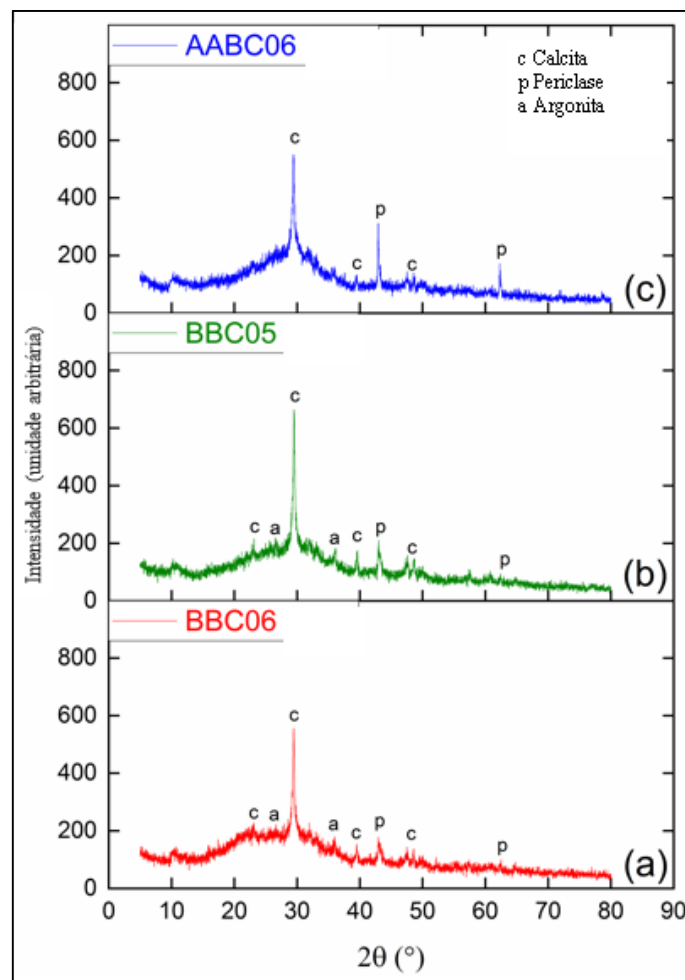


Figura 4.5 – XRD da (a) pasta BBC06, (b) pasta BBC05, e (c) pasta AABC06

#### 4.4 DENSIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE

O ensaio foi elaborado segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009). Os corpos de prova permaneceram submersos na mistura de cura por 21 dias (Figura 4.6). Após o prazo, os mesmos tiveram a superfície seca e foram pesados, obtendo-se, assim, a massa saturada. Logo após, em balança hidrostática, os corpos de prova foram pesados sob a condição de imersão, sendo aferida, então, a massa submersa. Após este processo, as amostras foram colocadas em estufas à temperatura de 105°C até a constância de massa, sendo determinada, portanto, a massa seca. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.



Figura 4.6 - Ensaio de absorção de água (peso imerso).

Os resultados para densidade seca e densidade saturada são mostrados na Figura 4.7. Em geral, houve uma tendência semelhante para amostras secas e saturadas, sendo que a mistura BBC-WCA obteve a menor densidade, tanto seca como saturada (seca = 1,56 g / cm<sup>3</sup> e úmida = 1,89 g / cm<sup>3</sup>).

Nesse âmbito, percebe-se que a diferença entre a densidade seca e a saturada é maior que as outras amostras, o que indica a maior porosidade do material. À medida que os poros acessíveis à água são preenchidos, a densidade aumenta consideravelmente. Este achado está alinhado com os resultados de porosidade e absorção de água, que podem ser observados na Figura 4.8. Os maiores resultados estão relacionados ao BBC05 (pdry =

2,29 g/cm<sup>3</sup>; pwet = 2,44 g/m<sup>3</sup>) e AABC07 (pdry = 2,31 g/cm<sup>3</sup>; pwe = 2,46 g / cm<sup>3</sup>). As misturas BBC06 e AABC06 obtiveram densidades intermediárias. Exceto para a mistura AABC07, os resultados observados estão alinhados com os obtidos no ensaio de resistência à compressão - isto é, quanto maior a resistência à compressão, maior a densidade (Nguyen *et al.*, 2013).

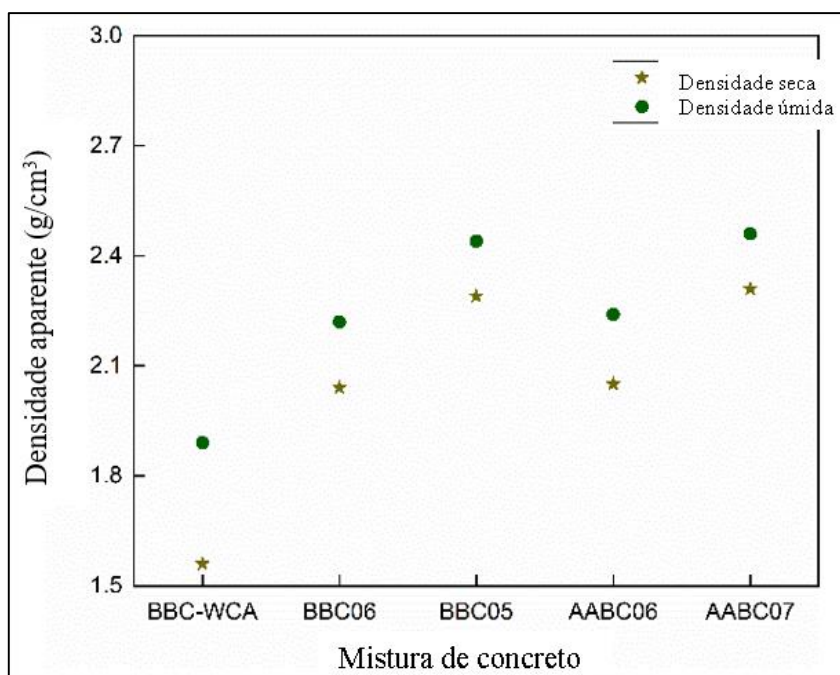


Figura 4.7 - Densidade seca e densidade saturada para cada mistura de concreto.

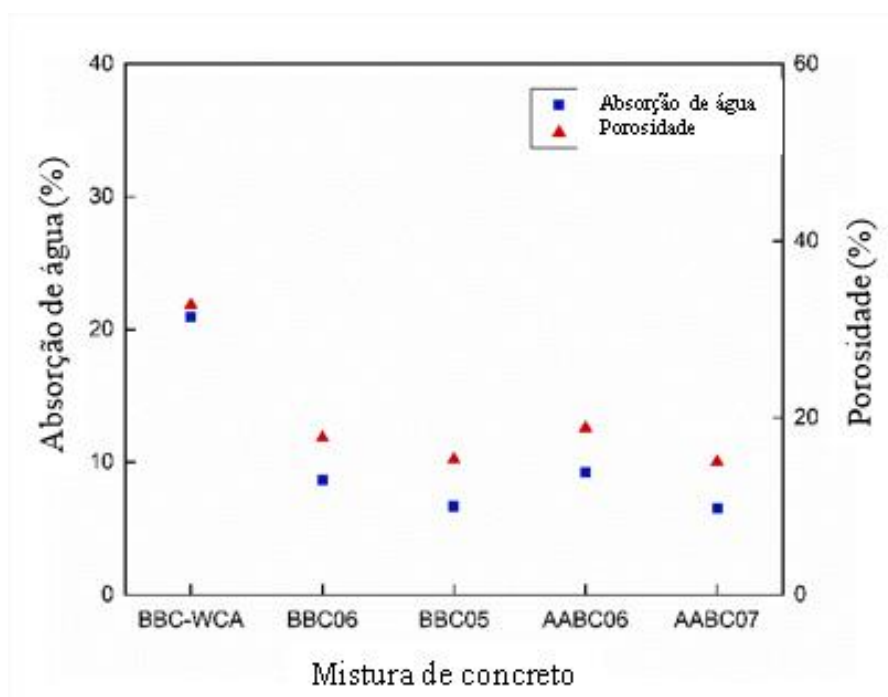


Figura 4.8 - Absorção de água e porosidade para cada mistura de concreto.

A Figura 4.8 resume os resultados da absorção e porosidade da água. A mistura BBC-WAC resultou nos mais altos valores de absorção e porosidade da água, cerca de duas vezes o valor das outras (WA = 20,97% e PR = 32,77%). Os menores valores foram alcançados pelo BBC05 (WA = 6,67% e PR = 15,28%) e pelo AABC07 (WA = 6,50% e PR = 15,02%). As amostras BBC06 e AABC06 obtiveram valores intermediários, porém, esses valores foram próximos dos dois últimos mencionados anteriormente. Os valores obtidos estão de acordo com a norma ASTM C902-15 (2016), exceto para a mistura BBC-WCA.

Apesar de medindo diferentes propriedades físicas, a absorção e a porosidade da água resultaram em tendências. Esse fato se refere à natureza das propriedades relacionadas aos poros permeáveis do material (Neville, 2012). Portanto, quanto menor a absorção de água, menor a porosidade. Da mesma forma, ambos os resultados encontrados seguiram a variação nas densidades seca e saturada - isto é, quanto menor a absorção de água e a porosidade, maior a densidade.

De outra via, exceto para a mistura AABC07, a absorção de água e a porosidade estão correlacionadas com resistência. Nesse contexto, menos absorção de água e menos porosidade implicam uma maior quantidade de material sólido na mistura e menor porosidade, o que contribui para uma melhor coesão dos constituintes do concreto e uma densidade matricial mais alta (Omran *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019).

Por fim, o comportamento da AABC foi diferente e diverge daquele comumente usado em materiais cimentícios. Sugere-se que esse comportamento seja atribuído às reações de ativação alcalina, que promovem a densificação da matriz, com a formação de uma maior quantidade de poros fechados, fazendo-a permanecer inacessível à água.

#### **4.5 EXPANSIBILIDADE**

A determinação da expansibilidade dos blocos foi realizada a partir da análise da estabilidade dimensional para as peças fabricadas, segundo os ciclos de molhagem e de secagem. Para tanto, selecionou-se, inicialmente, um bloco de cada traço e mediu-se no primeiro dia o seu comprimento e a largura com paquímetro. Posteriormente, os blocos

foram colocados em estufa à temperatura de 105°C por um período de 24 horas. Após esse tempo, os blocos foram retirados da estufa, momento em que aguardou-se a sua estabilização com a temperatura ambiente para se determinar, novamente, a medida entre os terços exteriores de referência. Depois, os blocos foram colocados em um tanque sob a condição de submersão novamente por um período de 24 horas e então foram coletadas as suas medidas ao término desse processo. Após 7 e 28 dias, as medidas foram determinadas mais uma vez (Silva, 2011; França *et al.*, 2018). As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram corpos de provas dentro da estufa e imersos em água.



Figura 4.9 - Paver na estufa.



Figura 4.10 - Paver imerso.

Os resultados da expansibilidade estão listados na Figura 4.11. A mistura BBC-WCA resultou em uma variação linear mais significativa: em torno de 0,9%. Já a mistura BBC05 obteve a menor expansibilidade (0,4%), enquanto que, para as demais misturas, os resultados foram intermediários, em torno de 0,8% e 0,7%. Em geral, não houve expansão significativa, indicando que os blocos de pavimentação têm boa tolerância de variação após ciclos de umedecimento e secagem (Da Silva *et al.*, 2016). Para as BBC, a expansibilidade foi coerente em relação aos resultados de resistência à compressão ou seja, logo, quanto maior a resistência, menor a capacidade de expansão.

A densificação da matriz do aglutinante pode explicar esse comportamento. Portanto, uma menor capacidade de expansão corresponde a uma maior coesão entre os constituintes do concreto, bem como maior resistência, menor porosidade, menor absorção de água e maior densidade. Os AABC, por sua vez, apresentaram comportamento inverso, isso é, a capacidade de expansão seguiu diretamente a resistência. Por fim, constatou-se que os produtos gerados pela ativação de álcalis, embora mais densos e menos porosos, são menos resistentes, portanto houve uma redução na capacidade de expansão.

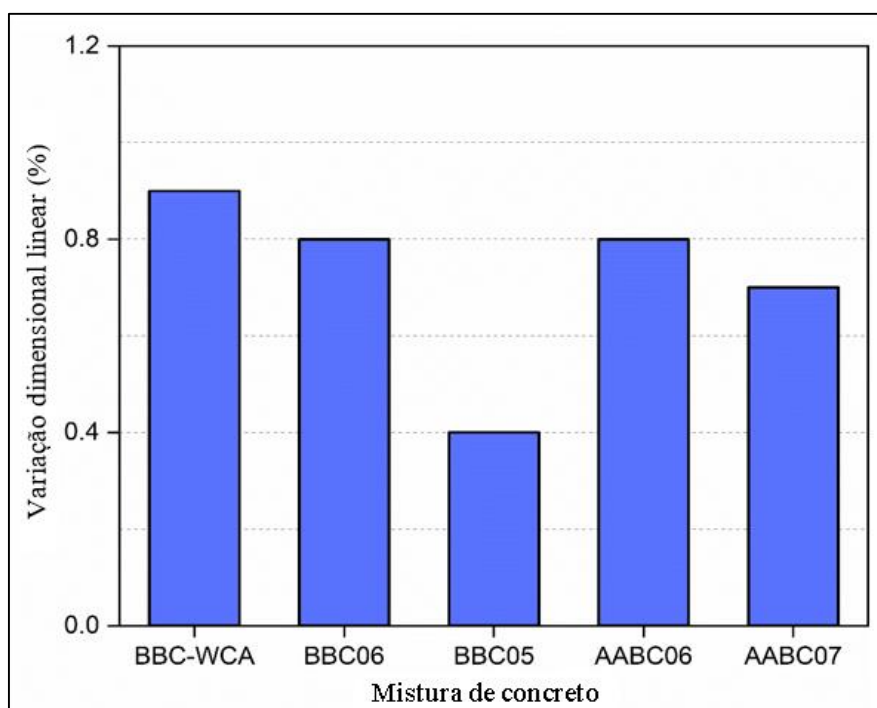


Figura 4.11 - Variação dimensional linear dos blocos de pavimentação produzidos com cada mistura de concreto.



## 4.6 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Neste trabalho foi utilizado o abrasômetro tipo roda de borracha por permitir que se utilize um corpo de prova de cada traço moldado. Utilizou-se, também, uma balança de precisão para medição direta da perda de massa.

Aparelhagem e material utilizados:

- Abrasômetro tipo roda de borracha, equipado com caixa de redução, regulador de velocidade e sistema de contagem de voltas, conforme Figura 4.12;
- Balança de precisão (Figura 4.13);
- Cinco corpos de prova (pavers que não possuem cimento) sendo um de cada traço moldado;
- Abrasivo - areia (granalha de alumina comercial) com granulometria 100 (Figura 4.14);
- Peso de 3,23kg, de forma a se obter a mesma pressão sobre o CP em  $\text{kg}/\text{Cm}^2$  - (referência ao trabalho de Sant'ana Filho (2013) e Aguilar (2016)).



Figura 4.12 - Abrasômetro com roda de borracha.



Figura 4.13 - Balança.



Figura 4.14 – Areia de granulometria 100.

Os resultados do teste de abrasão profunda são demonstrados na Figura 4.15. Em geral, os resultados contrastam com os obtidos nas demais propriedades avaliadas. A mistura BBC05 obteve os resultados mais significativos na perda de massa (2,07%), apesar de corresponder à maior resistência, maior densidade e presença de poros reduzidos. A perda

de peso da mistura BBC-WCA foi de cerca de 1,90%, ao passo em que BBC06 e as misturas AABC06 resultam em perdas de massa equivalentes, 1,39% e 1,31%, respectivamente. A menor perda de massa foi atribuída à mistura AAB07, que possui alta densidade e baixa porosidade em comparação com o universo das amostras em análise, embora a sua resistência à compressão não foi tão alta. Portanto, a resistência ao desgaste da superfície de atrito está mais relacionada à estrutura do material, superfície, condições e proporções matriciais (Ghafoori e Sukandar, 1995). As reações de ativação alcalina resultaram em produtos sólidos que são mais resistentes ao desgaste, dependendo do teor de água, além de intensificar a adesão entre agregados e pasta aglutinante (Ahmari e Zhang, 2012).

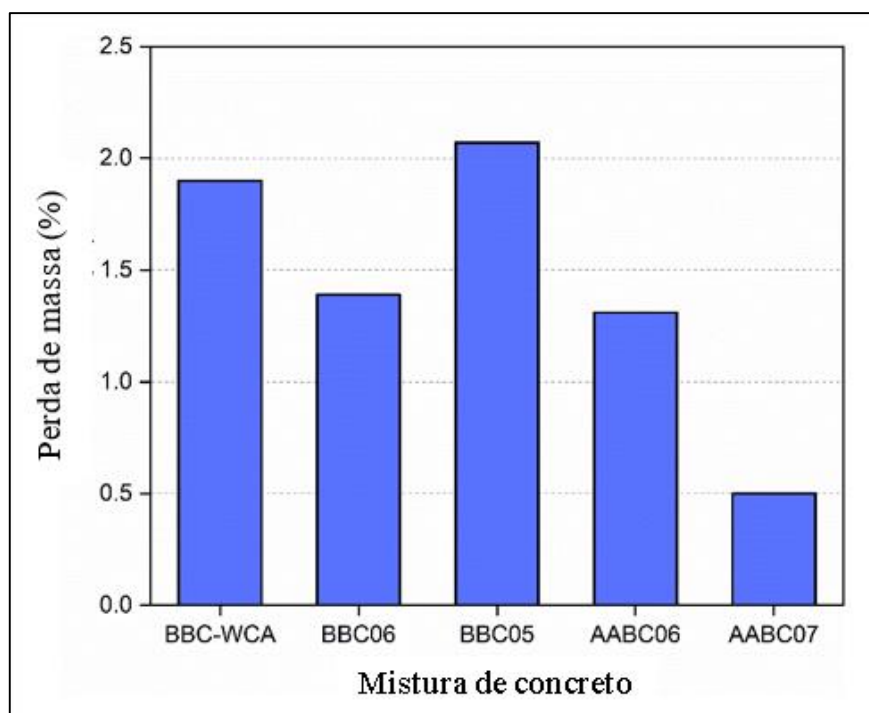


Figura 4.15 - Perda de massa após o teste de abrasão profunda para cada mistura.

#### 4.7 POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

As concentrações relativas da solução de azul metileno em função do tempo de exposição às amostras de pasta aglutinante CBE-SA, no escuro e sob luz UV, estão listadas nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente. A Figura 4.18 mostra as curvas de absorvância para cada mistura, nas referidas condições. Cada curva de absorvância corresponde a uma concentração, que foi calculada usando a calibração pela equação definida e apresentada

no tópicos **Materiais e Métodos**. A concentração da referência na solução foi definida como  $C_0$ , enquanto a solução analisada após o contato com o material foi denominada  $C$ .

A relação  $C/C_0$  identifica a concentração relativa e as propriedades de autolimpeza estão intimamente relacionadas à capacidade do material de funcionar como um local ativo para a degradação da matéria orgânica.

Em geral, houve uma tendência semelhante de degradação da matéria orgânica para todas as amostras analisadas, tanto no escuro quanto sob luz UV. No escuro, uma maior dispersão dos resultados pode ser vista em 4 horas e, especialmente, em 24 horas. As maiores concentrações foram obtidas pelas amostras em contato com a mistura AABC06 e a menor referente à mistura BBC06. Sob luz UV, as concentrações variam dentro de 8 h de exposição, mas convergem para um ponto comum dentro de 24 horas. As maiores concentrações estão relacionadas à mistura AABC06 e a mais baixa está relacionada à mistura AABC07.

As concentrações relativas podem ser divididas em três intervalos, de acordo com as misturas, tanto para luz escura quanto sob luz UV. O primeiro diz respeito às misturas BBC06 e AABC07, que resultaram nas menores concentrações e, conseqüentemente, uma degradação mais significativa do azul de metileno. No segundo intervalo estão o BBC05 e as misturas BBC-WCA, que resultaram em concentrações intermediárias. A mistura AABC06, sozinha, integra o terceiro intervalo, no qual houve as maiores concentrações e a menor degradação de corante orgânico.

Nesse experimento, ambos os ligantes estudados (ligante binário, e ligante álcali-ativado) foram capazes de reduzir a concentração de azul de metileno presente nas soluções, tanto no escuro quanto sob luz UV. Este resultado pode ser explicado por três fenômenos: (i) adsorção, (ii) lixiviação e (iii) degradação por fotocatalise. Ocorre que a rede de poros da pasta aglutinante funcionava como um local para a adsorção de azul de metileno. Assim, o corante migrou da solução para a superfície da rede de poros do ligante, permanecendo adsorvido e diminuindo a concentração da solução. Em conjunção com adsorção, algumas fases sólidas presentes no sistema CBE-SA lixiviaram a solução, aumentando a porosidade e a área superficial, que intensificaram a adsorção do azul de metileno.

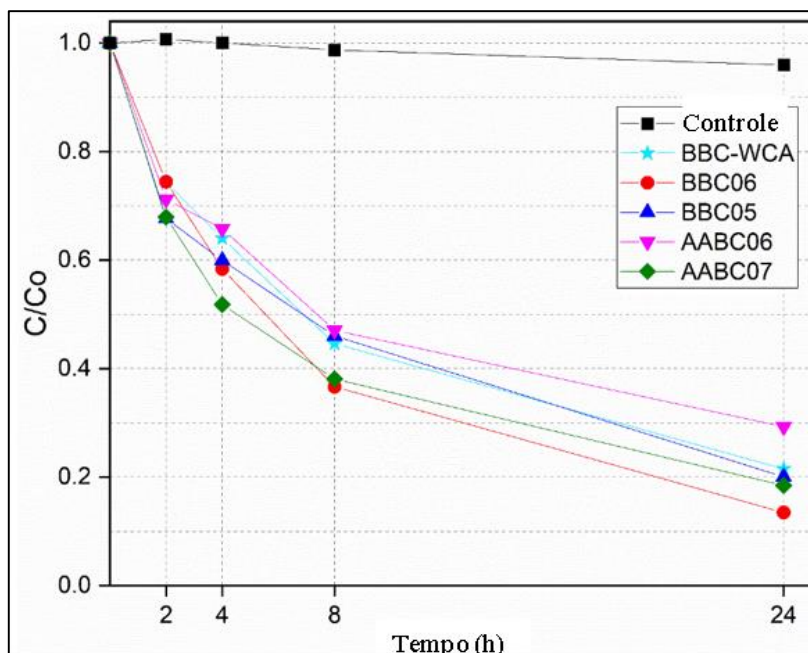


Figura 4.16 - Concentração de corante x tempo no escuro.

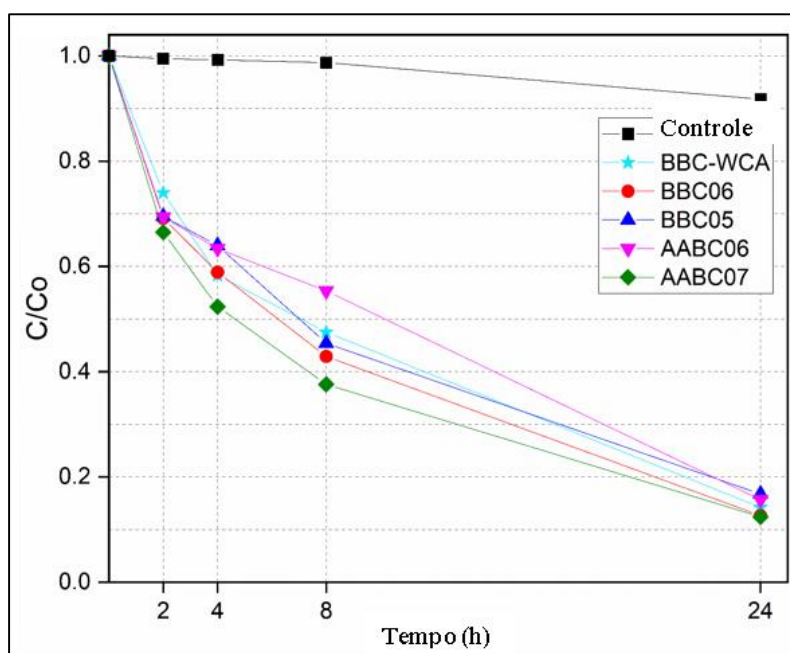


Figura 4.17 - Concentração de corante x tempo sob luz UV.

Por outro lado, amostras submetidas à radiação ultravioleta mostraram uma degradação mais significativa do azul de metileno, especialmente em 24 horas, em contraste com as amostras no escuro, o que indica atividade fotocatalítica, além de adsorção e lixiviação. Além disso, a convergência nos valores de concentração sob luz UV em 24 h mostrou que o tipo de mistura não é muito influente, isto é, todas as misturas obtidas significativamente resultam em degradação do corante.

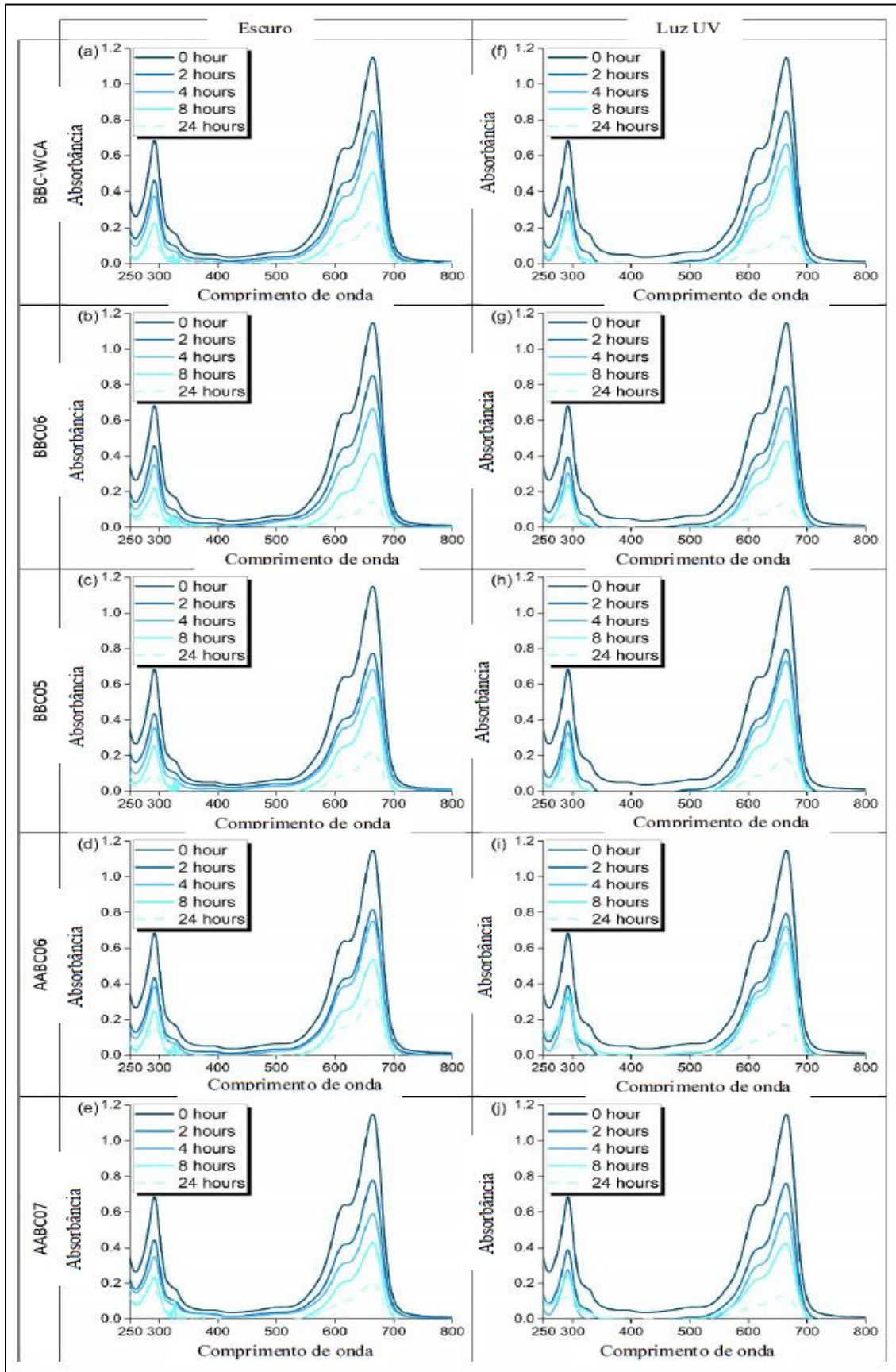


Figura 4.18 - Curvas de absorvância para cada mistura (a-e) no escuro e (f-j) sob luz UV

## 4.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos. A utilização de microscopia eletrônica varredura vai depender do objetivo de cada observação. A possibilidade de caracterização da microestrutura pode ser realizada em uma escala de dimensões variando de alguns milímetros a frações micrométrica e tem sido uma ferramenta de trabalho utilizada pelos pesquisadores em várias áreas de concentração, uma vez que ela abrange um conjunto de técnicas que possibilitam a caracterização. Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo.

Nas pesquisas envolvendo materiais de concretos, alguns parâmetros devem ser obedecidos para a obtenção de bons resultados das análises microestruturais. Para ter uma relação diretamente na qualidade das análises, foi feita com uma cautela a preparação das amostras. Foram aplicados o mesmo tratamento em todas as amostras para a aplicação no MEV.

Ainda na preparação das amostras, esta foi executada em ambiente apropriadamente limpo. E teve o cuidado para que as amostras tivessem dimensões que comportem o manuseio seguro nos procedimentos adequados ao MEV.

As Figuras 4.19 e 4.20 representam imagens obtidas por MEV para amostras de concreto de ligante binário e ligante ativado alcalinamente, respectivamente. A Figura 4.19A mostra a superfície de uma amostra BBC-WCA. Nela, foram identificados agregados (pó de pedra) da ordem de 0,2 mm (detalhe 1) com aspecto angular, superfície bem acabada e lisa, imersa em uma matriz cimentícia (detalhe 2) e com aparência áspera. Observamos também a presença de poros (detalhe 3) e fases mais densas na matriz (detalhe 4), identificadas pela cor mais clara. Como as imagens foram obtidas usando-se um detector de elétrons retroespalhado, o mais denso material corresponde aos tons mais claros e o material menos denso corresponde aos tons mais escuros, segundo a indicação de Scrivener *et al.* (2018).

A Figura 4.19B mostra uma ampliação da figura anterior, onde é possível notar o agregado (detalhe 5), a matriz do ligante (detalhe 6) e a zona de transição interfacial (ZTI, detalhe 7). O aspecto áspero/poroso identifica uma matriz menos coesa, que corrobora os resultados de resistência, porosidade e densidade.

Por sua vez, a Figura 4.19C apresenta uma amostra do BBC06, onde há agregados fraturados (detalhe 8) e microfissuras (detalhe 9) causadas pelo mecanismo da extração da amostra. No entanto, a matriz cimentícia (detalhe 10) tem uma aparência muito mais densa e coesa em comparação com a linha BBC-WCA, confirmando os resultados de maior resistência, menor densidade e menor porosidade. Poros (detalhe 11), regiões com material mais denso (detalhe 12) e regiões com menos densidade de material (detalhe 13).

A Figura 4.19D,E, por seu turno, corresponde à ampliação da Figura 4.19C nos pontos indicados, onde é possível observar uma estrutura fragmentada (detalhe 14), inicialmente de coesão material, coberto por partículas lamelares soltas. É provável que as partículas se soltem na coesão do material e preencheu os espaços ao seu redor.

A Figura 4.19F representa a menor ampliação estudada, onde a matriz cimentícia é fragmentada em porções maiores no centro (detalhe 15), enquanto na parte inferior, canto direito, a matriz rachou e fracionou em pedaços menores, seguindo uma tendência vertical (detalhe 16). Mais à direita e à esquerda, a matriz permanece intacta (detalhes 17).

As imagens MEV para o ligante álcali-ativado (Figura 4.20) são peculiares e mostraram significantes diferenças com o concreto da pasta binária. A diferença acentuada refere-se à presença de distintas fases, que são observadas em toda a extensão da matriz álcali-ativada (Figura 4.20A, B, E). Essas fases são identificadas por tons mais claros e mais escuros, associados à densidade da fase formada com as reações de ativação alcalina. Usando essa metodologia, quatro fases podem ser visualmente identificadas, conforme indicado pelos detalhes 1, 2, 3 e 4, que também podem ser vistos na Figura 4.20B, a qual é uma ampliação da figura anterior.

A fase mais leve (detalhe 1) e, conseqüentemente, a fase mais densa, possuem uma textura coesa e parecem ter estruturas lamelares na superfície. A fase intermediária, em termos



de densidade e intensidade de contraste, se apresenta muito semelhante à fase mais densa; no entanto, parece ser mais coesa. Já a fase mais escura e menos densa (detalhe 3) mostra uma estrutura menos coesa com componentes de contorno convexos. Também foi identificada outra região (detalhe 4) que se configurou muito menos coesa do que as outras, parecendo ter material granular aderido à superfície.

Além disso, em na Figura 4.20B também é possível notar a presença de agregados (carga) da ordem de 100  $\mu\text{m}$  (detalhe 5). A Figura 4.20C identifica outra região do concreto aglutinante álcali-ativado, e nela é possível observar uma fase contínua (detalhe 6) com um aspecto mais grosso. O detalhe 7 identifica um agregado de ordem de 200  $\mu\text{m}$ , que certamente é um material de enchimento originário do pó de pedra. A fase mais escura e menos densa (detalhe 8) parece ser menos coesa e se assemelha à fase de detalhe 3. Por seu turno, a Figura 4.20D mostra uma ampliação da Figura 4.20C na região da fase mais escura para investigar melhor essa área. No início, essas fases apresentaram pouca coesão, demonstrando a presença de partículas menores aderidas às maiores e espaços vazios.

Uma fase semelhante também está presente no concreto do ligante binário, no entanto, há menor ocorrência. Possivelmente, esta fase mais escura e menos densa é uma fase mineral ou vegetal restante da CBE que não reagiu durante o processo de ativação alcalina. A Figura 4.20E mostra outra região do AABC, onde cinco fases são identificadas (detalhes 9, 10, 11, 12 e 13): a primeira (detalhe 9) representa uma estrutura contínua, mas desordenada, com aspecto grosseiro; a segunda (detalhe 10) fornece o mesmo contraste que a primeira fase (embora tenha ordenado estruturas lamelares); a fase do detalhe 11 também resulta em tons mais claros e possui uma estrutura mais coesa, o que justifica seu contraste e que pode ser associado a uma densidade mais alta em comparação com as outras fases; a fase mais escura (detalhe 12) aparece, mais uma vez, pontualmente.

A Figura 4.20F mostra a interação entre agregado e matriz, onde é possível observar um agregado (detalhe 13) imerso na matriz do ligante ativado alcalinamente (detalhe 14), enquanto que, na interface entre as fases, nota-se em destaque a ZTI (detalhe 15).

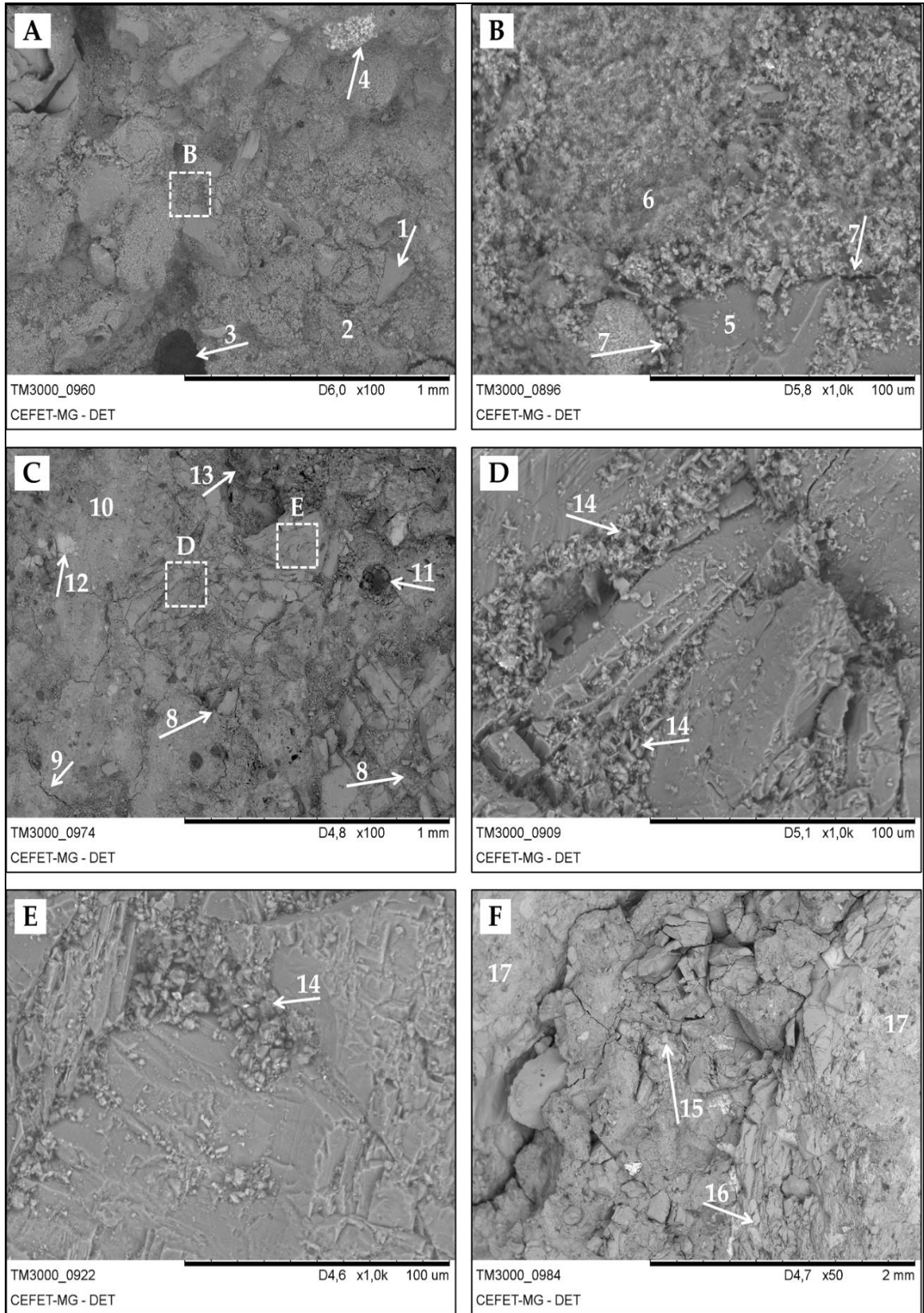


Figura 4.19 - Imagens SEM de concreto de ligante binário. (A) BBC-WCA-100X; (B) BBC-WCA-1000X; (C) BBC06-100X; (D) BBC06-1000X-1; (E) BBC06-1000X-2; (F) BBC06-50X;

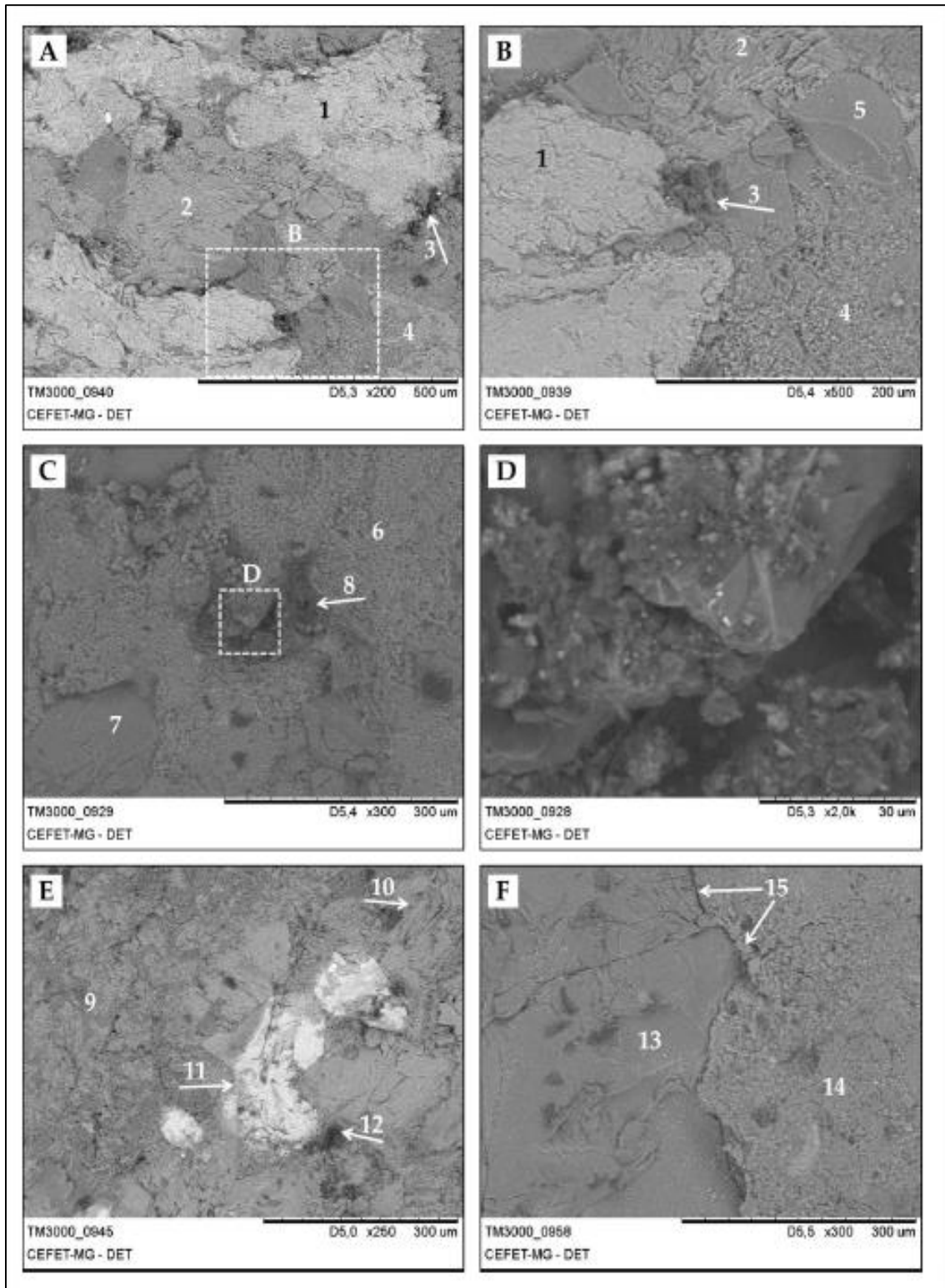


Figura 4.20 - Imagens MEV de concreto aglutinante alcalino (A) AABC-06-200X; (B) AABC-06-500X; (C) AABC-06-300X; (D) AABC-06-2000X; (E) AABC-06-250X; (F) AABC-06-250X.

#### 4.9 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Os pavimentos de blocos intertravados de concreto para vias urbanas são dimensionados por métodos recomendados pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Os métodos utilizam gráficos de leitura direta, que fornecem as espessuras das camadas que compõem o pavimento de blocos intertravados. A escolha do método de dimensionamento do pavimento de uma via será determinada em função do número “N” de solicitações do eixo simples padrão.

Para o dimensionamento dos blocos de CBE e SA foram levados em consideração os pavimentos que serão submetidos ao tráfego médio. Para essa metodologia foram utilizadas características de uma via que tenha:

- Tráfego muito leve e leve com “N” típico até  $10^5$  solicitações do eixo simples padrão, por não necessitar de utilização da camada de base, gerando, portanto, estruturas esbeltas e economicamente mais viáveis; e
- Tráfego meio pesado a pesado com “N” típico superior a  $1,5 \times 10^6$  em função do emprego de bases cimentadas.

Na Tabela 4.1 estão indicadas as espessuras necessárias de sub-base em função do valor de CBR do subleito e do número “N” de solicitações. A Tabela 4.2, por sua vez, apresenta a espessura e resistência dos blocos de revestimento.

Com base nas informações apresentadas, realizou-se um dimensionamento com os blocos intertravados que possuem CBE e SA sem adição de cimento Portland simulando uma via a ser pavimentada, classificada como via de tráfego leve ( $N = 10^5$ ). Os estudos geotécnicos indicaram valor de  $CBR_p = 5,0\%$ . Portanto, haverá a necessidade de adoção de camada de sub-base com CBR maior ou igual a 20%. Os resultados obtidos foram:

- Espessura sub-base: 18 cm;
- Não é necessária a camada de base, pois o N é inferior a  $1,5 \times 10^6$ ;
- A camada de assentamento de areia compacta fica com 5 cm;
- A camada dos blocos intertravados fica com 6,0cm;
- Estimativa: 10 anos.

Tabela 4.1: Classificação das vias e parâmetros de tráfego (Prefeitura São Paulo, 2004)

FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VIDA DE PROJETO ANOS	VOLUME INICIAL NA FAIXA MAIS CARREGADA		EQUIVALENTE POR VEÍCULO	N CARACTERÍSTICO
			VEICULO LEVE	CAMINHÃO E ÔNIBUS		
Via local residencial com passagem	Leve	10	100 a 400	4 a 20	1,50	$10^5$
Via coletora secundária	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	$5 \times 10^5$
Via coletora principal	Meio Pesado	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	$2 \times 10^6$
Via arterial	Pesado	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	$2 \times 10^7$
Via arterial principal expressa	Muito Pesado	12	>10000	1001 a 2000	5,90	$5 \times 10^7$
Faixa Exclusiva de ônibus	Volume Médio	12	--	< 500		$10^7$
	Volume Elevado	12	--	> 500		$5 \times 10^7$

Tabela 4.2: Espessura e resistência dos blocos de revestimento

(Prefeitura São Paulo, 2004)

TRÁFEGO	ESPESSURA REVESTIMENTO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES
$N < 5 \times 10^5$	6,0 cm	35 MPa
$5 \times 10^5 < n < 10^7$	8,0 cm	35 a 50 MPa
$N > 10^7$	10,0 cm	50 MPa

# CAPÍTULO 5

---

## CONCLUSÕES

Este trabalho realizou um estudo abrangente sobre o concreto de baixo carbono com base em aglomerado de resíduos industriais para produzir blocos de pavimentação ecológicos. Dados os resultados alcançados, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

1. Todas as misturas atingiram resultados significativas, identificando a cimentação e a ligação com capacidade do sistema de resíduos CBE-SA. A maior resistência foi alcançada pela mistura BBC06, na qual o teor de água foi otimizado. Assim, a demanda e a disponibilidade eram compatíveis com a água para a formação de produtos sólidos. O traço BBC-WCA está relacionado a uma resistência menor.
2. As misturas com ligante binário sem ativação alcalina mostraram trabalhabilidade significativa, diferentemente das misturas com o aglutinante ativado por álcalis, as quais apresentaram pouca trabalhabilidade.
3. A investigação da estrutura das pastas aglutinantes por meio de DRX identificou picos de cristais, fases de calcita e periclase, relacionadas à matéria-prima, bem como aragonita, resultante da carbonatação em C-S-H. Não foram identificados picos de cal e Portlandita, correspondendo à reação entre cal da CBE e sílica amorfa da SA.
4. A densidade seca tendia a ser semelhante à densidade saturada. Misturas com maior densidade são aquelas com uma matriz aglutinante mais densa, e um número maior de produtos sólidos foi formado durante o ganho de resistência.
5. O preenchimento de espaços entre grãos agregados foi eficaz tanto para a BBC quanto para a AABC. No experimento otimizado, os vazios foram preenchidos com produtos sólidos resultantes do endurecimento do sistema CBE-SA.

6. A expansibilidade é mais acentuada na AABC, indicando que os produtos formados por as reações de ativação alcalina são mais suscetíveis à variação dimensional linear na presença de água. A amostra BBC05 resultou nos menores valores de expansibilidade.

7. A BBC é mais vulnerável ao desgaste da superfície em comparação com a AABC. A resistência à abrasão é mais relacionada ao aglutinante utilizado do que a resistência à compressão.

8. O potencial fotocatalítico foi confirmado pela degradação de compostos orgânicos mais pronunciados em matéria sob luz UV. Além da fotocatalise, a adsorção também ocorre na rede de poros da pasta de ligação e lixiviação de fase do sistema CBE-SA.

9. As imagens MEV contribuíram para avaliar aspectos como morfologia, superfície e partícula como arranjo presente nas misturas no nível microestrutural.

10. Os blocos de pavimentação produzidos com a dosagem BBC05 apresentaram os requisitos mínimos solicitados pelas normas para blocos de pavimentação produzidos a partir de concreto de cimento Portland. Os aspectos positivos são o uso total de resíduos para produzir o aglutinante e o não uso de ativadores alcalinos.

Assim, o potencial de utilização do sistema de resíduos CBE-SA como um aglutinante de baixo carbono na produção ecológica de blocos de pavimentação é evidente. Além de alcançar um desempenho adequado em termos de resistência, a absorção de água, porosidade, expansibilidade e desgaste, o novo material avaliado colabora para mitigar impactos no meio ambiente e para impulsionar o desenvolvimento sustentável.

## SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

---

Sugere-se para trabalhos futuros e complementares:

- Avaliar a influência do comportamento mecânico do compósito produzido com CBE em outras proporções para substituição total do cimento;
- Avaliar custos financeiros no processamento das cinzas;
- Avaliar o comportamento em longo prazo das resistências de compressão;
- Analisar, esmiuçadamente, a relação do desgaste no ensaio de abrasão no paver que obteve maior resistência à compressão.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. História do cimento Portland, <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>, acessado em 25/01/2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11172: Aglomerante de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 12655 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956: Sílica ativa para uso com Cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificações. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680 - Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781 - Peça de concreto para pavimentação - Especificação, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.207: Terminologia e classificação de Pavimentação. Rio de Janeiro. 1982.

AGUILAR, G. S. DE. Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente: contribuição para o estudo de viabilidade técnica - 2016.

AHMARI, S.; ZHANG, L. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Constr. Build. Mater.* 2012, 29, 323–331.

ALANAZI, H.; YANG, M.; ZHANG, D.; GAO, Z. Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar. *Cement and Concrete Composites.* v. 65, p. 75-82, 2016.

AL-MANSOUR; CHOW; FEO; PENNA; LAU Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability* 2019, 11, 5145.

ALSHAAER, M. et al. Development of functional geopolymers for water purification, and construction purposes. *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 20, p. S85-S92, 1 set. 2016.

ANDRADE, J.B.; BRAGANÇA, L. Analysis of the Impacts of Economic and Social Indicators to Sustainability Assessment. In Proceedings of the International Conference Sustainability of Constructions—Towards a Better Built Environment, Kansas City, MO, USA, 23–25 March 2011; pp. 163–168.

APRIANTI, S.E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production—a review part II. *J. Clean. Prod.* 2017, 142, 4178–4194.

ASHBY, M. F. *Materials and Sustainable Development*. Ed. Elsevier, 2012. 312p.

AL-MANSOUR, A.; CHOW, C.L.; FEO, L.; PENNA, R.; LAU, D. Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability* 2019, 11, 5145.

ASTM C902-15. Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

BATTAGIN, A.F. Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. *Concreto – Ciência e Tecnologia*. 1 ed, São Paulo, IBRACON, 2011.

BATISTA, R.P.; TRINDADE, A.C.C.; BORGES, P.H.R.; DE SILVA, F.A. Silica Fume as Precursor in the Development of Sustainable and High-Performance MK-Based Alkali-Activated Materials Reinforced With Short PVA Fibers *Front. Mater.* 2019, 6, 1–15.

BANERJEE, S.; TYAGI, A.K. *Functional Materials: Preparation, Processing and Applications*, 1st ed.; Elsevier: London, UK, 2012.

BELVER, C. et al. Semiconductor Photocatalysis for Water Purification. In: *Nanoscale Materials in Water Purification*. [s.l.] Elsevier, 2019.

BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L. Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives. *J. Am. Ceram. Soc.* 2014, 97, 997–1008.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M.I. Novel modifications in a conventional clinker making process for sustainable cement production. *J. Clean. Prod.* 2019, 221, 389–397.

BERNUCCI, LiediBariani *et al.* Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. 3 ed. 504 p. Reimp. Rio de Janeiro: Abeda, 2008.

BERRA, M.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A.E. Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 2015, 76, 286–296.

BEZERRA, A.C.; FRANÇA, S.; MAGALHÃES, L.F.; CARVALHO, M.C. Alkaline activation of high-calcium ash and iron ore tailings and their recycling potential in building materials. *Ambiente Construído* 2019, 19, 99–112.

BEZERRA, A.C.; SARAIVA, S.L.; LARA, L.F.; CASTRO, L.W.; GOMES, R.C.; RODRIGUES, C.D.; FERREIRA, M.C.; AGUILAR, M.T. Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. *Matéria* 2017, 22.

BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L.; BRICE, D.G.; KILCULLEN, A.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J.S. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. *Cem. Concr. Res.* 2012, 42, 1317–1326.

BLÖSCHL, G.; HALL, J.; VIGLIONE, A.; PERDIGÃO, R.A.P.; PARAJKA, J.; MERZ, B.; LUN, D.; ARHEIMER, B.; ARONICA, G.T.; BILIBASHI, A.; ET AL. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 2019, 573, 108–111.

BONDAR, D.; MA, Q.; SOUTSOS, M.; BASHEER, M.; PROVIS, J.L.; NANUKUTTAN, S. Alkali activated slag concretes designed for a desired slump, strength and chloride diffusivity. *Constr. Build. Mater.* 2018, 190, 191–199.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 26, 379–388.

CAETANO L., DUARTE JR, L. A. Estudo Comparativo da Queima de Óleo B.P.F. e de Lenha em Caldeiras - Estudo de Caso; Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP-São Paulo – 2004

CARMO, R.; JÚLIO, E. New Trends for Reinforced Concrete Structures: Some Results of Exploratory Studies. *Infrastructures* 2017, 2, 17.

CARVALHO, MARCOS D.; Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto 9ET-27). Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1998.

CASTALDELLI, V.; AKASAKI, J.; MELGES, J.; TASHIMA, L.; BORRACHERO, M.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials. *Materials*. v. 6, p. 3108-3127, 2013.

CASTRO, E.; Estudo da Resistência à Compressão do Concreto Por Meio de Testemunhos de Pequeno Diâmetro e Esclerometria. 2009, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil.

CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. Tecnologia das Edificações. São Paulo, Ed PINI, 1988.

CHANG, J. J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete research* 33, pp. 1005-1011, 2003.

CHEAH, C.B. E M. RAMLI. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, p. 669-685, 2011.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. Capillary shape: influence on water transport within unsaturated alkali activated slag concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 22, n. 3, p. 260-266, 2010.

COOK, D.J.; PAMA, R.P.; PAUL, B.K. Rice husk Ash-Lime-Cement Mixes for use in Masonry Units. *Building and Environment*. v.12, p. 281-288, 1977.

COPPOLA, L.; CO\_ETTI, D.; CROTTI, E. Plain and Ultrafine Fly Ashes Mortars for Environmentally Friendly Construction Materials. *Sustainability* 2018, 10, 874.

CORDEIRO, G.; TOLEDO, R.; TAVARES, L.; FAIRBAIRN, E. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 39, p. 110-115, 2009.

COSTA, JUZELIA S.; ARRUDA, LARYSSA P. C. Blocos para vedação de concreto e peças para pavimentação, utilizando resíduo de vidro e resíduo da construção civil (rcc) como agregado, 2017, Cuiabá, 5º Encontro em Engenharia da Edificações e Ambiental.

COSTA, JUZÉLIA SANTOS DA ; MARTINS, C. A. ; BALDO, JOÃO BAPTISTA. Análise da absorção de água por imersão em um concreto com reciclado da indústria cerâmica. 2006, Blumenau, Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2006.

COUTINHO, A. S. *Fabrico e Propriedades do Betão*. Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 401 p. 1997.

CRUZ, LUIZ OTÁVIO MAIA. *Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento*. 281f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

DALAWAI, S.P.; ALY, M.A.S.; LATTHE, S.S.; XING, R.; SUTAR, R.S.; NAGAPPAN, S.; HA, C.-S.; SADASIVUNI, K.K.; LIU, S. Recent Advances in durability of superhydrophobic self-cleaning technology: A critical review. *Prog. Org. Coat.* 2020, 138

DA SILVA, M.J.; DE SOUZA, B.P.; MENDES, J.C.; BRIGOLINI, G.J.S.; DA SILVA, S.N.; PEIXOTO, R.A.F. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. *ACI Mater. J.* 2016, 113.

DAVIDOVITS J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Thermal Analysis and Calorimetry*. v. 37, p. 1633-1656, 1991.

DE LARRARD, F. *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*; E&FN SPON: London, UK, 1999; ISBN 0-419-23500-0.

DEVENTER, J. S. V. et al. Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 4, n. 2, p. 116-128, 2015. ISSN 2165-0373.

DESAI, J.B.; DIGHE, R.S. Effect of rice hull ash cement on the compressive strength of concrete, *Strength of Building Materials*. v. 52, p. 215-216, 1978.

DEL BOSQUE, I.F.S.; MEDINA, J.M.; FRÍAS, M.; DE ROJAS, M.I.S.; MEDINA, C. Use of biomass-fired power plant bottom ash as an addition in new blended cements: Effect on the structure of the C-S-H gel formed during hydration. *Constr. Build. Mater.* 2019, 228, 117081.

DE LA ROSA, J.M.; MILLER, A.Z.; POZO-ANTONIO, J.S.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J.A.; JIMÉNEZ-MORILLO, N.T.; DIONISIO, A. Assessing the effects of UVA photocatalysis on soot-coated TiO<sub>2</sub>-containing mortars. *Sci. Total Environ.* 2017, 605–606, 147–157.

DEZEN, Bianca G. S.; POSSAN, Edna.; *Influência do agregado reciclado de resíduo de construção e demolição na reação álcali-agregado*. 2015. ILATIT — Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

DYBEL, P.; FURTAK, K. Influence of silica fume content on the quality of bond conditions in high-performance concrete specimens. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2017, 17, 795–805.

EL ALOUANI, M. *et al.* Removal of Cationic Dye - Methylene Blue - from Aqueous Solution by Adsorption on Fly Ash - based Geopolymer. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, v. 9, n. 1, p. 32-46, 1 jan. 2018.

EMELINE, A. V. *et al.* Glossary of terms used in photocatalysis and radiation catalysis (IUPAC Recommendations 2011). *Pure and Applied Chemistry*, v. 83, n. 4, p. 931-1014, 2011.

FARIAS, L. A. *et al.* Tração Direta do Concreto: Uma Revisão Bibliográfica. IBRACON, Vitória, 2003

FARINHA, C.B.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Influence of forest biomass bottom ashes on the fresh, water and mechanical behaviour of cement-based mortars. *Resour. Conserv. Recycl.* 2019, 149, 750–759

FIORITI, C. F. *et al.* PAVERS de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus. Universidade do Estado de São Paulo. Disponível em: Acesso em: 13 jan. 2010.

FIORITI, C.F. Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo. 202f. Tese (Doutorado) - Escola de engenharia de São Carlos, universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIORITI, Cesar Fabiano; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge Luís. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. Associação Nacional de tecnologia do ambiente construído. 2007. 54f. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3753/2106>. Acesso em: 05 fev. 2018.

FISCHER, J.M.; AMEKUDZI, A. Quality of Life, Sustainable Civil Infrastructure, and Sustainable Development: Strategically Expanding Choice. *J. Urban Plan. Dev.* 2011, 137, 39–48



FOELKEL, C.; Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto – Parte 05: Resíduos Minerais. In: Eucalyptus Online Book & Newsletter. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 173p. 2011

FONT, A.; SORIANO, L.; DE MORAES PINHEIRO, S.M.; TASHIMA, M.M.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash. *J. Clean. Prod.* 2020, 243, 118568.

FRANÇA, S.; Blocos Álcali Ativados De Resíduos Industriais Compactados, Belo Horizonte, 2018.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, v. 238, n. 5358, p. 37–38, jul. 1972.

GAFFIN, S.R.; ROSENZWEIG, C.; KONG, A.Y.Y. Adapting to climate change through urban green infrastructure. *Nat. Clim. Chang.* 2012, 2, 704.

G1 MINAS Com Volta da Chuva, Defesa Civil de Belo Horizonte Emite Alerta de Risco Geológico. Available online: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/02/05/chove-em-bh-nesta-quarta-feira-e-defesacivil-emite-alerta-de-risco-geologico.ghtml> (accessed on 6 February 2020).

GERALDO, RODRIGO HENRIQUE. Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz / Campinas, SP : [s.n.], 2016.

GHAFOORI, N.; SUKANDAR, B.M. Abrasion Resistance of Concrete Block Pavers. *Mater. J.* 1995, 92, 25–36.

GLUKHOVSKY, V. D.; ROSTOVSKAJA, G. S.; RUMYNA, G. V. High strength slag-alkaline cements. 7th International Congress Chemical Cement, Vol.3, Paris, Theme 5, p.164 – 168, 1980.

GODINHO, DALTER PACHECO. Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica durabilidade e sustentabilidade. 2009, 158f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2009.

GOBBO, L. DE A. Aplicação da difração de raios-X e metodos de Rietveld no estudo de cimento Portland. 2009, Universidade de São Paulo.

HALLACK, A. Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Elementos Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais. 1998. 116f. Dissertação (mestrado) - Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

HE, Z.; ZHU, X.; WANG, J.; MU, M.; WANG, Y. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from OPC and recycled cement production. *Constr. Build. Mater.* 2019, 211, 965–973.

HERRMANN, J.-M.; PICHAT, P. Heterogeneous photocatalysis. Oxidation of halide ions by oxygen in ultraviolet irradiated aqueous suspension of titanium dioxide. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, v. 76, p. 1138, 1980.

HUISKES, D.M.A.; KEULEN, A.; YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H. Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. *Mater. Des.* 2016.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. v. 1, p. 194-216, 2012.

JIMÉNEZ, V.; MARTINEZ, L.; GARCÍA, P.; TIBURCIO, C.; NAVA, J. Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. v. 40, p. 691-701, 2013.

JIMENEZ-RELINQUE, E.; RODRIGUEZ-GARCIA, J.R.; CASTILLO, A.; CASTELLOTE, M. Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious

materials: Type of binder, roughness and microstructure. *Cem. Concr. Res.* 2015, 71, 124–131

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; DA SILVA, M.G. Cinzas e Aglomerantes Alternativos. In: FREIRE, W. J.; LUDOVICO, A. *Tecnologia e materiais alternativos de construção*. Ed. UNICAMP, 2003, p.145-190.

JOHNSON, K.A.; WING, O.E.J.; BATES, P.D.; FARGIONE, J.; KROEGER, T.; LARSON, W.D.; SAMPSON, C.C.; SMITH, A.M. A benefit–cost analysis of floodplain land acquisition for US flood damage reduction. *Nat. Sustain.* 2020, 3, 56–62.

JUENGER, M.; WINNEFELD, J.; PROVIS, J.; IDEKER. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. v. 41, p. 1232-1243, 2011.

KANG, L. et al. Alkali-Activated Steel Slag-Based Mesoporous Material as a New Photocatalyst for Degradation of Dye from Wastewater. *Integrated Ferroelectrics*, v. 162, n. 1, p. 8–17, 2015.

KEMEL ZANELLA, A.; *Análise das Propriedades Mecânicas de Concretos para Pavimentação Empregando diferentes Processos de Curas*. 2014. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil.

KESRENBACHK, H.J.; BOTA FILHO W.J. *Microscopia eletrônica transmissão e varredura*. São Paulo: ABM, 1994.

KEULEN, A.; YU, Q.L.; ZHANG, S.; GRÜNEWALD, S. Effect of admixture on the pore structure refinement and enhanced performance of alkali-activated fly ash-slag concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 162, 27–36.

KHAJEHEI, S.; AHMADALIPOUR, A.; SHAO, W.; MORADKHANI, H. A Place-based Assessment of Flash Flood Hazard and Vulnerability in the Contiguous United States. *Sci. Rep.* 2020, 10, 448.

KHAN, M. M.; ADIL, S. F.; AL-MAYOUF, A. Metal Oxides as Photocatalysts.pdf. Journal of Saudi Chemical Society, v. 19, p. 462-464, 2015.

KOLLIAS, N.; RUVOLO JR, E.; SAYRE, R. M. The Value of the Ratio of UVA to UVB in Sunlight. Photochemistry and Photobiology, v. 87, n. 6, p. 1474-1475, 1 nov. 2011.

KNAPTON, J. The design of concrete block roads. Londres: CCA, 1976

KUDO, A. Photocatalysis. Applied Catalysis B: Environmental, v. 46, n. 4, p. 703, 15 dez. 2003.

LARA, L. F. S. Aglomerante de baixo carbono a partir da cinza de cavaco de eucalipto e sílica ativa. 2016. (Dissertação). Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte.

LARBI, T.; AMARA, M.A.; OUNI, B.; AMLOUK, M. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye under UV- sunlight irradiation by cesium doped chromium oxide thin films. Mater. Res. Bull. 2017, 95, 152–162.

LEE, C.-L.; HUANG, R.; LIN, W.-T.; WENG, T.-L. Establishment of the durability indices for cement-based composite containing supplementary cementitious materials. Mater. Des. 2012, 37, 28–39.

LETÉLIER, V.; ORTEGA, J.; TARELA, E.; MUÑOZ, P.; HENRÍQUEZ-JARA, B.; MORICONI, G. Mechanical Performance of Eco-Friendly Concretes with Volcanic Powder and Recycled Concrete Aggregates. Sustainability 2018, 10, 3036.

LI, L.; WANG, S.; ZHU, Z. Geopolymeric adsorbents from fly ash for dye removal from aqueous solution. Journal of Colloid and Interface Science, v. 300, n. 1, p. 52–59, 1 ago. 2006.

LIU, Y. et al. A facile method for preparation of floatable and permeable fly ash based geopolymer block. Materials Letters, v. 185, p. 370–373, 15 dez. 2016.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R.D. Supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 2011, 41, 1244–1256.

LUO, P.; MU, D.; XUE, H.; NGO-DUC, T.; DANG-DINH, K.; TAKARA, K.; NOVER, D.; SCHLADOW, G. Flood inundation assessment for the Hanoi Central Area, Vietnam under historical and extreme rainfall conditions. *Sci. Rep.* 2018, 8, 12623.

MAINGI, F. M.; MBUVI, H. M.; MWANGI, H. Adsorption Kinetics and Isotherms of Methylene Blue by Geopolymers Derived from Common Clay and Rice Husk. *Physical Chemistry*, v. 7, n. 4, p. 87–97, 2017.

MALHOTRA, V.M. Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag. In: *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in concrete technology*. Volume 1, Canadá, 1996.

MARQUES, G. L. O. Terminologia e Classificação dos Pavimentos. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana - Módulo I. Juiz de Fora, 2002

MEDINA, J.M. “Mecânica dos Pavimentos” Ed. UFRJ, Rio de Janeiro –RJ, 1997.

MEDINA, J.M.; DEL BOSQUE, I.F.S.; FRÍAS, M.; DE ROJAS, M.I.S.; MEDINA, C. Durability of new blended cements additioned with recycled biomass bottom ASH from electric power plants. *Constr. Build. Mater.* 2019, 225, 429–440.

METHA, P.K. Proprieties of blended cements made from rice husk ash. *Journal of The American Concrete Institute*. v.74, p. 440-442, 1977.

MEHTA, P.KUMAR; MONTEIRO, PAULO J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. Concrete Microstructure, Properties and Materials, 4th ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2013; ISBN 978-0-07-179787-0.

METHA, P.M.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propiedades e Materiais. São Paulo, 2ª. ed., 2014, 751p.

MONTEIRO, P.J.M.; MILLER, S.A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. Nat. Mater. 2017, 16, 698–699.

NAGATANI, T.; Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and inlens system. Scanning Microsc., v.11, p.901-909, 1987.

NEVILLE, A.M. Properties of Concrete, 5th ed.; Prentice Hall: Harlow, UK, 2012

NIDHEESH, P.V.; KUMAR, M.S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. J. Clean. Prod. 2019, 231, 856–871.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; LELEYTER, L.; BARAUD, F.; Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. Constr. Build. Mater. 2013.

NOVAIS, R. M. et al. Biomass fly ash geopolymer monoliths for effective methylene blue removal from wastewaters. Journal of Cleaner Production, v. 171, p. 783–794, 10 jan. 2018.

NOVAIS, R. M. et al. Synthesis of porous biomass fly ash-based geopolymer spheres for efficient removal of methylene blue from wastewaters. Journal of Cleaner Production, v. 207, p. 350–362, 10 jan. 2019.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; PINZÓN, L.; ORDÓNEZ, L. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. v. 77, p. 321-325, 2002.

OMRAN, A.; SOLIMAN, N.; XIE, A.; DAVIDENKO, T.; TAGNIT-HAMOU, A. Field trials with concrete incorporating biomass-fly ash. *Constr. Build. Mater.* 2018, 186, 660–669.

PARIS, J.M.; ROESSLER, J.G.; FERRARO, C.C.; DEFORD, H.D.; TOWNSEND, T.G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *J. Clean. Prod.* 2016, 121, 1–18.

PAVLÍKOVÁ, M.; ZEMANOVÁ, L.; ZÁLESKÁ, M.; POKORNÝ, J.; LOJKA, M.; JANKOVSKÝ, O.; PAVLÍK, Z. Ternary Blended Binder for Production of a Novel Type of Lightweight Repair Mortar. *Materials* 2019, 12, 996.

PENNARASI, G.; SOUMYA, S.; GUNASEKARAN, K. Study for the relevance of coconut shell aggregate concrete paver blocks. *Mater. Today Proc.* 2019, 14, 368–378.

PREFEITURA DE SÃO PAULO - Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto - Instrução de Projetos - 2004

PROVIS, J.L. *Activating Solution Chemistry for Geopolymers*. Cambridge, UK, 2009; pp. 50–71. ISBN 978-1-84569-449-4.

PROVIS, J.L.; BERNAL, S.A. *Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials*. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2014, 44, 299–327.

PROVIS, J.L. Alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.* 2018, 114, 40–48.

ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA-ARCILA, J.M.; DE GUTIÉRRES, R. M. Eco-efficient álcali-ativated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building material. *J. Clean., Prod.* 2017.

RODRIGUES, F.A.; JOEKES, I. Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. *Environ. Chem. Lett.* 2011, 9, 151–166.

RAVELLI, D.; PROTTI, S.; ALBINI, A. Energy and molecules from

photochemical/photocatalytic reactions. An overview. *Molecules*, v. 20, n. 1, p. 1527-1542, 2015.

RESENDE, D.S. Estudo do efeito da incorporação de cinza de cavaco de Eucalipto como material cimentício suplementar. 2013, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Tese, doutorado em Engenharia de Materiais.

SIKKEMA, J.K.; ONG, S.K.; ALLEMAN, J.E. Photocatalytic concrete pavements: Laboratory investigation of no oxidation rate under varied environmental conditions. *Constr. Build. Mater.* 2015, 100, 305–314.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials; CRC Press: Boca Raton, United States, 2018; ISBN 978-1-4987-3867-5.

SHEHAB, H.K.; EISA, A.S.; WAHBA, A.M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Constr. Build. Mater.* 2016, 126, 560–565.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. Sulfate Attack on Concrete, 1 ed., E & FN Spon, London, 2002.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cem.Concr. Res.* 2019, 124, 105799.

SANTANA, H. A. Filosofia dos Calçamentos na Pavimentação Urbana. In: Anaisda 4ª Reunião de Pavimentação Urbana. Maceió, AL, 1993.

SANT'ANA FILHO, JOAQUIM NERY DE. Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados - 2013, Belo Horizonte, MG



SANTOS, VÂNIA REGINA FERREIRA. Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção Civil – RCC e fibras de aço. 117f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. 2014.

SARAIVA, S.L.C. Estudo Das Reações Álcali-Agregado E Das Propriedades Mecânicas De Compósitos Cimentícios Com Cinzas De Bagaço De Cana-De-Açúcar. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Tese, doutorado em Geotecnia, 2017.

SATA, V.; TANGPAGASIT, J.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. Cem. Concr. Compos. 2012.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials; CRC Press: Boca Raton, United States, 2018.

SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. Cem. Concr. Res. 2018, 114, 2–26.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2018.

SHEHAB, H.K.; EISA, A.S.; WAHBA, A.M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. Constr. Build. Mater. 2016.

SHEN, W.; ZHANG, C.; LI, Q.; ZHANG, W.; CAO, L.; YE, J. Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. J. Clean. Prod. 2015.

SILVA, MATEUS JUSTINO. Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria. Belo Horizonte, MG 2011.

SILVA, THIAGO HENRIQUE.; Potencial descontaminante de materiais álcali-ativados a partir de sistema misto de estéril de mineração de rochas fosfáticas e cinza volante de alto carbono, 2019.

SIMIÉLI, D. et al. Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. *Exacta*. v.5, n.2, p.231-41, jul./dez. 2007.

SOLAK, A.; TENZA-ABRIL, A.; SAVAL, J.; GARCÍA-VERA, V. Effects of Multiple Supplementary Cementitious Materials on Workability and Segregation Resistance of Lightweight Aggregate Concrete. *Sustainability* 2018, 10, 4304.

SHACKEL, B. Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement. New York and London: Elsevier, 1990.

SMARZEWSKI, P. Influence of silica fume on mechanical and fracture properties of high performance concrete. *Procedia Struct. Integr.* 2019, 17, 5–12.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO. Resultados Preliminares, 2015. <http://www.snic.org.br>, acessado em 05/09/2018

TASHIMA, M.M.; AKASAKI, J.L.; MELGES, J.L.P.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V. Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. *Fuel* 2013, 108, 833–839.

THOMAS, B.S. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018.

THOMAS, C.; ROSALES, J.; POLANCO, J.A.; AGRELA, F. STEEL SLAGS. In *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*; de Brito, J., Agrela, F., Eds.; Woodhead

Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2019.

TORGAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID, Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. *Construction and Building Materials* Vol. 22, pp. 154-161, 2008.

UNITED NATIONS. TRANSFORMING OUR WORLD. The 2030 Agenda for Sustainable Development; United Nations: New York, NY, USA, 2015.

UYGUNER-DEMIREL, C. S.; BIRBEN, N. C.; BEKBOLET, M. Elucidation of background organic matter matrix effect on photocatalytic treatment of contaminants using TiO<sub>2</sub>: A review. *Catalysis Today*, v. 284, p. 202-214, 15 abr. 2017.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P.; BRICE, D. G. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*. v. 1, p. 145-155, 2010.

VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C.G. An overview of the composition and application of biomass ash: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 2013, 105, 19–39.

VIEIRA, C. M.F; BORLINI, M. C.; MONTEIRO, S. N. Use of eucalyptus firewood ash into clayey ceramic. *Materials Science Fórum*. v. 661, p. 860-865, 2010.

WANG, X.; CHIN, C.; XIA, J. Material Characterization for Sustainable Concrete Paving Blocks. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1197.

WRIGHTON, M. S. et al.; Strontium titanate photoelectrodes. Efficient photoassisted electrolysis of water at zero applied potential. *Journal of the American Chemical Society*, v. 98, n. 10, p. 2774–2779, 1976.

WU, B.; TANG, K.; Modelling on crack propagation behaviours at concrete matrix-aggregate interface. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2019, 42, 1803–1814.

ZHANG M.H., MALHOTRA, V.M.; Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete; *Cement and Concrete Research*; Volume 25, Issue 8, Pages 1713-1725. December 1995.

ZHANG, Y. J. et al. A facile and low-cost synthesis of granulated blast furnace slag-based cementitious material coupled with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for treatment of dye wastewater. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 138-139, p. 9-16, 17 jul. 2013b.

ZHANG, Y. J. et al. Synthesis of a novel alkali-activated magnesium slag-based nanostructural composite and its photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, v. 331, p. 399-406, 15 mar. 2015.

ZHANG, Y. J. et al. Green transforming metallurgical residue into alkali-activated silicomanganese slag-based cementitious material as photocatalyst. *Materials*, v. 11, n. 9, p. 1-10, 2018.

ZHANG, Y.; LIU, L. Fly ash-based geopolymer as a novel photocatalyst for degradation of dye from wastewater. *Particuology*, v. 11, n. 3, p. 353–358, 2013.

ZHOU, D.; WANG, R.; TYRER, M.; WONG, H.; CHEESEMAN, C. Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material. *J. Clean. Prod.* 2017, 168, 1180–1192.

## DECLARAÇÃO DE INEXISTÊNCIA DE PLÁGIO

Eu *André Henrique Campos Teixeira*, declaro que, a tese com título "CONCRETO DE BAIXO CARBONO À BASE DE CIMENTO BINÁRIO DE CINZA DE BIOMASSA E SÍLICA ATIVA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS ECOLÓGICOS DE PAVIMENTAÇÃO", com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas, que este trabalho foi escrito por mim e, portanto, não contém plágio, tal como definidos pela legislação de direitos autorais em vigor no Brasil, Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Eu estou consciente que a utilização de material de terceiros incluindo uso de paráfrase sem a devida indicação das fontes será considerado plágio, e estarei sujeito a processo administrativo e outras sanções legais.

Ouro Preto, dezembro de 2021



André Henrique Campos Teixeira  
CPF: 040.207.336-35

