



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL



INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA E DA
GRANULOMETRIA DA BRITA NA PERMEABILIDADE E NAS
RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À ABRASÃO DE
CONCRETOS PERMEÁVEIS

HUMBERTO RODRIGUES MARIANO

Goiânia
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

HUMBERTO RODRIGUES MARIANO

INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA E DA
GRANULOMETRIA DA BRITA NA PERMEABILIDADE E NAS
RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À ABRASÃO DE
CONCRETOS PERMEÁVEIS

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Civil da Escola
de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Goiás, para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Estruturas e
Materiais de Construção

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini
Figueiredo

Goiânia
2014



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	Humberto Rodrigues Mariano		
CPF:	377.217.121-49	E-mail:	Hrm025@gmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input type="checkbox"/> Sim	<input checked="" type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás		
Agência de fomento:		Sigla:	
País:		UF:	
CNPJ:			
Título:	Influência do Teor de Argamassa e da Granulometria da Brita na Permeabilidade e nas Resistências à Compressão e à Abrasão de Concretos Permeáveis		
Palavras-chave:	Concreto permeável, Pavimento permeável e Piso intertravado permeável		
Título em outra língua:	Content of the influence of mortar and particle size of Brita in permeability and the Resistance to Compression and Abrasion Permeable Concrete		
Palavras-chave em outra língua:	Permeable concrete, permeable pavement and permeable interlocking floor		
Área de concentração:	Estruturas e Materiais de Construção		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	10 de novembro de 2014		
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Civil		
Orientador(a):	Enio José Pazini Figueiredo		
CPF:	632.428.770-04	E-mail:	epazini@terra.com.br
Co-orientador(a):			
CPF:		E-mail:	

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização¹ total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinala as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

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

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: 02, 12, 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

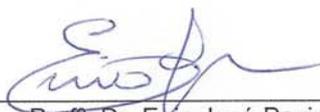
Rodrigues Mariano, Humberto Influência do Teor de Argamassa e da Granulometria da Brita na Permeabilidade e nas Resistências à Compressão e à Abrasão de Concretos Permeáveis [manuscrito] / Humberto Rodrigues Mariano. - 2014. xvii, 161 f.: il.
Orientador: Prof. Enio José Pazini Figueiredo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Goiânia, 2014. Bibliografia.
1. Concreto permeável. 2. Pavimento permeável. 3. Piso intertravado permeável. I. José Pazini Figueiredo, Enio, orient. II. Título.

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

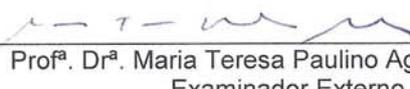
INFLUÊNCIA DO TEOR DE ARGAMASSA E DA
GRANULOMETRIA DA BRITA NA PERMEABILIDADE E NAS
RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À ABRASÃO DE
CONCRETOS PERMEÁVEIS

HUMBERTO RODRIGUES MARIANO

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do grau de Mestre, aprovada em 10/11/2014 pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:



Prof. Dr. Erió José Pazini Figueiredo – UFG
Presidente da Banca



Prof.ª. Dr.ª. Maria Teresa Paulino Aguilar - UFG
Examinador Externo



Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira - UFG
Examinador Interno

À minha esposa Cheila Mendes de Oliveira, pela paciência, companheirismo,
compreensão e apoio para a concretização dessa pesquisa.
A minha filha Lorraine Mendes Rodrigues pela sua importância em minha vida.
A minha Vó Marília de Dirceu Vieira (*in memoriam*), por nos estimular a ter caráter, não
desistir dos nossos objetivos, além de todo o conhecimento partilhado conosco ao
longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos concedeu a vida e nos deu inteligência para podermos cumprir com os nossos objetivos.

Ao professor Dr. Enio José Pazini Figueiredo pela orientação na elaboração e desenvolvimento do tema proposto, pela sua ajuda, mesmo quando muito ocupado, pelo seu incentivo, paciência no decorrer dos estudos e por tudo que fez para a concretização dessa pesquisa. Muito obrigado!

Aos estagiários e ao Sergio Azevedo responsável técnico pelo Laboratório de Materiais de Construção do IFG Campus Goiânia por toda colaboração e apoio durante os experimentos.

Aos meus pais Valdivina Rodrigues Mariano e Antonio Lazaro Mariano (in memoriam) pelos momentos de atenção, conforto, carinho e orientação durante a nossa vida.

A Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio na realização dos ensaios de abrasão, principalmente nas pessoas da professora Maria Teresa Paulino Aguiar e do técnico Ricardo, do Laboratório de Concreto.

A coordenadora da área de construção civil do IFG campus Goiânia professora Dra. Jussanã Milograna pelo apoio e confiança em nossa pesquisa.

As empresas Viapol, Sika e MC Bauchemie.

Aos amigos João Santana e Gilson Farias pela sua colaboração nesta pesquisa.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram nesta pesquisa.

Humberto Rodrigues Mariano

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	18
1.2 OBJETIVO GERAL.....	20
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	20
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	20
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 MATERIAIS PARA CONCRETO.....	22
2.1 AGREGADOS.....	22
2.1.1 Definição.....	22
2.1.2 Classificação.....	22
2.1.3 Agregados de RCD.....	31
2.2 CIMENTO.....	32
2.2.1 Definição.....	32
2.2.2 Matérias-primas do cimento.....	33
2.2.3 Processo de fabricação do cimento.....	33
2.2.4 Tipos e aplicações do cimento.....	36
2.2.5 Característica físicas.....	39
2.2.6 Características químicas.....	40
2.2.7 Fenômenos que ocorrem com o cimento Portland.....	41
2.3 ADITIVOS E ADIÇÕES.....	45
2.3.1 Definição.....	45
2.3.2 Tipos de aditivos.....	45
2.3.3 Aditivos especiais.....	48
2.3.4 Cálculo da dosagem do aditivo.....	48
2.3.5 Compatibilidade.....	49
2.3.8 Adições minerais.....	50
3 MICROESTRUTURA DO CONCRETO.....	53
3.1 DEFINIÇÃO.....	53

3.2	COMPLEXIBILIDADE.....	53
3.2.1	Microestrutura da fase agregado.....	54
3.2.2	Microestrutura da fase pasta de cimento hidratada.....	56
3.2.3	Vazios na pasta de cimento hidratada.....	60
3.2.4	Água na pasta de cimento hidratado.....	62
3.2.5	Relações microestrutura-propriedade na pasta de cimento hidratada.....	62
4	PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM PISO INTERTRAVADO..	64
4.1	INTRODUÇÃO.....	64
4.2.	REQUISITOS DO PROJETO.....	65
4.3	PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	65
4.3.1	Características das peças de concreto para pavimentação intertravada.....	65
4.4	IMPLANTAÇÃO DO PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM PISO INTERTRAVADO.....	66
4.4.1	Coefficiente de permeabilidade do solo.....	66
4.4.2	Camadas da pavimentação permeável com piso intertravado.....	66
5	CONCRETO PERMEÁVEL.....	72
5.1	INTRODUÇÃO.....	72
5.2	INSUMO PARA CONCRETO PERMEÁVEL.....	73
5.2.1	Aglomerantes e agregados.....	74
5.2.2	Aditivos.....	75
5.3	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	76
5.3.1	No estado fresco.....	76
5.3.2	No estado endurecido.....	76
6	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
6.1	INTRODUÇÃO.....	82
6.2	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	84
6.2.1	Variáveis independentes.....	84
6.2.2	Variáveis dependentes.....	86
6.2.3	Resumo dos ensaios realizados.....	87
6.3	PROCEDIMENTOS PRELIMINARES.....	89
6.4	MATERIAIS UTILIZADOS.....	90
6.4.1	Agregado miúdo natural.....	90
6.4.2	Agregado graúdo.....	90
6.4.3	Cimento Portland.....	90

6.4.4	Água potável.....	90
6.4.5	Aditivo e adição.....	90
6.5	PREPARO DAS AMOSTRAS DE AGREGADOS.....	91
6.6	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	91
6.6.1	Areia.....	91
6.6.2	Brita.....	94
6.6.3	Cimento.....	96
6.7	DOSAGEM DOS CONCRETOS ESTUDADOS.....	99
6.7.1	Método de dosagem.....	99
6.7.2	Premissas empregadas para as dosagens.....	99
6.7.3	Dosagem dos concretos.....	100
6.7.4	Trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone.....	105
6.8	ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO.....	106
6.8.1	Resistência à compressão.....	106
6.8.2	Coefficiente de permeabilidade.....	107
6.8.3	Determinação do desgaste por abrasão.....	109
7	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	112
7.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	112
7.1.1	Areia.....	112
7.1.2	Brita.....	117
7.1.3	Cimento.....	120
7.2	ESTADO FRESCO DO CONCRETO.....	122
7.2.1	Abatimento Tronco de Cone – <i>Slump Test</i>.....	122
7.3	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	123
7.3.1	Resistência à compressão.....	123
7.3.2	Coefficiente de permeabilidade.....	133
7.3.3	Desgaste por abrasão.....	139
8	CONCLUSÃO.....	150
8.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Composição do concreto (FREITAS JR., 2013).....	22
Figura 2.2	Tipos de agregados quanto à origem. Agregado natural (seixo rolado) (a) e agregado artificial (argila expandida) (b).....	23
Figura 2.3	Formatos dos grãos do agregado graúdo. Grãos alongados (a), grãos Lamelares (b), grãos normais (c) e grãos arredondados (d) (FREITAS JR., 2003).....	25
Figura 2.4	Determinação da umidade do agregado miúdo (OLIVEIRA, 2012).....	26
Figura 2.5	Inchamento devido à umidade no agregado miúdo.....	27
Figura 2.6	Peneirador mecânico.....	27
Figura 2.7	– Composição granulométrica (IBRACON,FARIA et.al,2007).....	30
Figura 2.8	– Representação convencional de curvas granulométricas.....	30
Figura 2.9	Progresso da retração e da expansão com a idade (GIONGO, 2007).....	43
Figura 2.10	– Relação entre a incorporação de ar e a resistência à compressão (FREITAS JR., 2013).....	47
Figura 3.1	Agregado espalhado em uma pasta de cimento (a). Microestrutura da pasta (b) (METHA e MONTEIRO, 2008).....	54
Figura 3.2	Seixo rolado apresenta superfície polida e pouco porosa.....	55
Figura 3.3	Argila expandida apresenta maior porosidade que o seixo Rolado e menor densidade.....	55
Figura 3.4	Características do agregado que interferem no comportamento do concreto (FREITAS JR., 2013).....	56
Figura 3.5	Esquema de uma pasta de cimento Portland bem hidratada (SOUZA, 2011)....	56
Figura 3.6	Cristais observados na pasta de cimento Portland hidratada (METHA e MONTEIRO, 2008).....	57
Figura 3.7	Estrutura do C-S-H (FURNAS, 2013).....	58
Figura 3.8	Morfologia típicas de cristalização de hidróxido de cálcio (28 dias de hidratação): dendrítica(a) e placas (b) (COSTA et al. 2009).....	58
Figura 3.9	Formação de cristais etringita e monossulfato hidratado (METHA e MONTEIRO, 1984).....	59
Figura 3.10	Grãos de clínquer não hidratados (FREITAS JR., 2013).....	60

Figura 3.11	Vazios capilares provocados pela água que sobra da relação a/c (HERVÉ NETO, 2008).....	61
Figura 3.12	Ar aprisionado durante a mistura na betoneira (FREITAS JR., 2013).....	61
Figura 3.13	Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratado (FELDMAN e SEREDA,1970).....	62
Figura 4.1	Camadas da implantação da pavimentação permeável (Cartilha ABCP, 2010).....	67
Figura 4.2	Tipos de placas para estruturas permeáveis. Placas de concreto poroso (a). Placas de concreto com juntas largas (b) e Placas de concreto com aberturas de drenagem (c) (SALES, 2008).....	68
Figura 4.3	Tipos de reservatórios. Reservatório nivelado (a). Reservatório com saída lateral utilizando tubos perfurados (b) (VIRGILIIS, 2009).....	68
Figura 4.4	Aplicações das mantas geotêxteis e geomembrana. Aplicação da manta geotêxtil em uma rodovia (a). Reservatório utilizando a geomembrana (b) (MPZ, 2013 e VIRGILIIS, 2009).....	70
Figura 5.1	Concreto permeável.....	73
Figura 5.2	Curvas granulométricas típicas de misturas do concreto permeável (BATEZINI, 2013).....	75
Figura 5.3	Tipos de concreto. Concreto permeável (a). Concreto convencional (b).....	76
Figura 5.4	Permeâmetro de carga variável para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável (NEITHALATH et al., 2003).....	78
Figura 5.5	Esquema para medição de coeficiente de permeabilidade in situ. Acione o cronômetro assim que a água atingir o pavimento (a). Durante o ensaio mantenha o nível de água uniforme de acordo com a marcação do cilindro (b). Pare o cronômetro quando toda a água foi infiltrada no pavimento (c) (MARCHIONI et al., 2013).....	80
Figura 5.6	Relação entre o índice de vazios e o valor do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável (BATEZINI, 2013).....	81
Figura 6.1	Resumo dos ensaios realizados.....	88
Figura 6.2	Planejamento das famílias de traços de concretos.....	89
Figura 6.3	Equipamento utilizado no ensaio de abrasão <i>Los Angeles</i>	96
Figura 6.4	Determinação da pasta consistência normal.....	97
Figura 6.5	Determinação dos tempos de pega por meio da agulha de Vicat.....	98

Figura 6.6	Prensa, da marca EMIC, utilizada na medida da resistência à compressão do cimento.....	98
Figura 6.7	Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	106
Figura 6.8	Ensaio de resistência à compressão – corpo de prova rompido.....	107
Figura 6.9	Permeâmetro de carga variável.....	108
Figura 6.10	Acoplagem da amostra no equipamento.....	108
Figura 6.11	Aferimento do tubo acima do CP.....	109
Figura 6.12	Tubo acima do CP sendo preenchido com água.....	109
Figura 6.13	– Equipamento utilizado no ensaio de desgaste por abrasão.....	110
Figura 6.14	– Corpos de provas utilizados no ensaio de desgaste por abrasão.....	111
Figura 6.15	– Corpo de prova acoplado ao equipamento de ensaio de desgaste por abrasão.....	111
Figura 7.1	Limites de utilização do agregado miúdo – NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	112
Figura 7.2	Curva de inchamento da areia.....	116
Figura 7.3	Limites de utilização do agregado graúdo – NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	118
Figura 7.4	Resistência à compressão do cimento.....	121
Figura 7.5	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% em 03 dias.....	124
Figura 7.6	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% em 07 dias.....	124
Figura 7.7	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% em 28 dias.....	125
Figura 7.8	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% em 03 dias.....	125
Figura 7.9	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% em 07 dias.....	126
Figura 7.10	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% em 28 dias.....	126
Figura 7.11	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% em 03 dias.....	127
Figura 7.12	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% em 07 dias.....	127
Figura 7.13	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% em 28 dias.....	128

Figura 7.14	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% em 03 dias.....	128
Figura 7.15	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% em 07 dias.....	129
Figura 7.16	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% em 28 dias.....	129
Figura 7.17	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% em 03 dias.....	130
Figura 7.18	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% em 07 dias.....	130
Figura 7.19	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% em 28 dias.....	131
Figura 7.20	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% em 03 dias.....	131
Figura 7.21	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% em 07 dias.....	131
Figura 7.22	Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% em 28 dias.....	132
Figura 7.23	– Resistência à compressão dos concretos estudados com 28 dias de idade.....	132
Figura 7.24	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 30%.....	135
Figura 7.25	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 33%.....	135
Figura 7.26	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 35%.....	136
Figura 7.27	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 40%.....	137
Figura 7.28	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 42%.....	137
Figura 7.29	Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 44%.....	138
Figura 7.30	– Valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade do concreto.....	139
Figura 7.31	Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 40%.....	143
Figura 7.32	Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 42%.....	143
Figura 7.33	Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 44%.....	144
Figura 7.34	Comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 para o teor de argamassa de 40%, 42% e 44% e a perda de massa do traço CRG.....	145

Figura 7.35	Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 40%.....	145
Figura 7.36	Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 42%.....	146
Figura 7.37	Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 44%.....	147
Figura 7.38	Comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 para o teor de argamassa de 40%, 42% e 44% e a perda de massa do traço CRG.....	148
Figura 7.39	Valores encontrados para o desgaste por abrasão para os teores de argamassa de 40%, 42% e 44% após 500 m de desgaste.....	149
Figura 7.40	Valores encontrados para o desgaste por abrasão para os teores de argamassa de 40%, 42% e 44% após 1000 m de desgaste.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação dos agregados massa específica aparente (OLIVEIRA, 2012).....	23
Tabela 2.2	Classificação das areias segundo o MF (OLIVEIRA, 2012).....	28
Tabela 2.3	Classificação do agregado graúdo (brita) segunda a NBR7211(ABNT, 2009)....	29
Tabela 2.4	Resistência à compressão de algumas rochas (FREITAS JR., 2013).....	29
Tabela 2.5	Limites máximos de substâncias nocivas (ABNT, 2003).....	31
Tabela 2.6	Características químicas de diferentes calcários (CIMENTO ITAMBÉ, 2013)....	33
Tabela 2.7	Características químicas de diferentes argilas (CIMENTO ITAMBÉ, 2013).....	34
Tabela 2.8	Parâmetros químicos para a composição do cimento nacional (MOREIRA, 2013).....	35
Tabela 2.9	Composição mineralógica da mistura cru.....	35
Tabela 2.10	Características dos cimentos Portland (ABCP, 2012).....	37
Tabela 2.11	Tipos de cimento Portland com seus limites físico-mecânicos (ABCP, 2012)....	40
Tabela 2.12	Diversos tipos de cimento Portland com seus limites químicos (ABCP, 2012)....	41
Tabela 2.13	Calores de hidratação dos compostos do cimento (ABCP, 2012).....	42
Tabela 2.14	Valores comuns de retração.....	43
Tabela 2.15	Problemas de incompatibilidade entre o aditivo e o concreto.....	50
Tabela 2.16	Subdivisões das adições minerais (METHA e MONTEIRO, 2008).....	51
Tabela 4.1	Resistência características à compressão.....	65
Tabela 4.2	Fator de multiplicativo ρ	65
Tabela 4.3	Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (PINTO, 2002).....	66
Tabela 5.1	Consumos e proporções típicas utilizadas nas misturas de concreto permeável (BATEZINI, 2013).....	74
Tabela 6.1	Tipos de granulometria do agregado graúdo utilizado nos traços estudados.....	83
Tabela 6.2	Idade do concreto para realização dos ensaios.....	84
Tabela 6.3	Componentes e abreviações.....	89
Tabela 6.4	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 30\%$	103

Tabela 6.5	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 33\%$	103
Tabela 6.6	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 35\%$	103
Tabela 6.7	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 40\%$	103
Tabela 6.8	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 42\%$	104
Tabela 6.9	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 44\%$	104
Tabela 6.10	Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 55\%$	104
Tabela 6.11	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 30\%$	104
Tabela 6.12	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 33\%$	104
Tabela 6.13	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 35\%$	105
Tabela 6.14	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 40\%$	105
Tabela 6.15	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 42\%$	105
Tabela 6.16	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 44\%$	105
Tabela 6.17	Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 55\%$	105
Tabela 7.1	Composição granulométrica do agregado miúdo.....	112
Tabela 7.2	Determinação da massa específica do agregado miúdo.....	114
Tabela 7.3	Massa unitária do agregado miúdo.....	114
Tabela 7.4	Resumo do ensaio de inchamento da areia.....	115
Tabela 7.5	Caracterização da areia.....	116
Tabela 7.6	Composição granulométrica da brita - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	117
Tabela 7.7	Massa específica do agregado graúdo.....	118
Tabela 7.8	Massa unitária do agregado graúdo.....	118
Tabela 7.9	Valores da abrasão de <i>Los Angeles</i> do agregado graúdo.....	119
Tabela 7.10	Resumo da caracterização da brita.....	119
Tabela 7.11	Pasta de consistência normal.....	120
Tabela 7.12	Resumo da caracterização do cimento.....	121
Tabela 7.13	Valores do abatimento de tronco de cone – <i>Slump Test</i>	122
Tabela 7.14	Resistência à compressão do concreto endurecido.....	123
Tabela 7.15	Tempos de percolação da água através do corpo de prova.....	134
Tabela 7.16	Resultados antes do início do ensaio desgaste por abrasão.....	140
Tabela 7.17	Resultados após 500 m de desgaste por abrasão.....	141
Tabela 7.18	Resultados após 1000 m de desgaste por abrasão.....	142
Tabela 7.19	Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% e 42%.....	144

Tabela 7.20	Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% com 500 m e 1000 m.....	146
Tabela 7.21	Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% e 42%.....	147

RESUMO

A urbanização acelerada no Brasil produz impactos significativos quanto à qualidade de vida. As chuvas têm sido um dos principais problemas enfrentados pelos gestores do meio ambiente devido à impermeabilização de grandes áreas nas cidades. Este trabalho tem como finalidade o desenvolvimento de um piso intertravado permeável que possa ser utilizado em diversos tipos de pavimentações, tais como em áreas externas de residências, praças, estacionamentos, vias de tráfego de pedestres e vias de tráfego de veículos leves. O estudo analisou a permeabilidade em concretos produzidos com rocha gnaisse com granulometria contínua nos diâmetros de (4,75; 6,3 e 9,5) mm e (4,75 e 6,3) mm e com granulometria uniforme de 6,3 mm e 9,5 mm com teor de argamassa variando em 30%, 33%, 35%, 40%, 42% e 44%. Resistência à compressão com teor de argamassa de 30%, 33%, 35%, 40%, 42%, 44% e 55% e resistência à abrasão com teor de argamassa de 40%, 42%, 44% e 55%. Após análise dos resultados dos ensaios, o concreto produzido com teor de argamassa de 42% e granulometria contínua de (4,75; 6,3 e 9,5) mm foi o que atendeu à resistência à abrasão baseado na norma NBR 12041, à resistência à compressão baseada na norma NBR 9781 e a permeabilidade de acordo com a norma ACI 522 R- 06 para piso intertravado com concreto permeável.

ABSTRACT

Rapid urbanization in Brazil produces significant impacts on the quality of life. Rains have been one of the main problems faced by managers of the environment due to the sealing of large areas in cities. This work aims to develop of permeable interlocking flooring that can be used in many types of flooring, such as in outdoor areas of homes, plazas, parking lots, roads and pedestrian routes traffic light vehicle traffic. The study examined the permeability of concrete made from gneiss rock with grain size remains in diameters (4.75, 6.3 and 9.5) mm and (4.75 and 6.3) mm and uniform particle size of 6.3 mm and 9.5 mm mortar with varying content of 30%, 33%, 35%, 40%, 42% and 44%. Compressive strength mortar with content of 30%, 33%, 35%, 40%, 42%, 44% and 55% and abrasion resistance with mortar content of 40%, 42%, 44% and 55%. After analyzing the results of the tests, the concrete produced with mortar content of 42% and continuous particle size of (4.75, 6.3 and 9.5) mm which was attended abrasion resistance based on NBR 12041, the compressive strength based on NBR 9781 and permeability according to standard ACI 522 to R 06 interlocked with permeable concrete floor.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das grandes cidades trás mais habitações, ruas e avenidas e isso faz que haja cada vez mais áreas impermeáveis. Os revestimentos impermeáveis são as principais razões da ocorrência do excesso de águas na superfície, pois diminui a área de escoamento das águas da chuva, provocando inundações. Uma das maneiras de diminuir esse problema é a utilização de pavimentos permeáveis, pois os mesmo possuem a capacidade de drenar a água e encaminhá-la, por infiltração as camadas inferiores de solo ou até mesmo para reservatórios.

O presente estudo objetiva a produção de piso intertravado permeável com resistência mecânica adequada para pavimentação de calçadas, praças, interior de residências e ruas com tráfego leve de automóveis. No Brasil, ainda é pouca a utilização de pavimentos intertravado permeáveis, pois ainda não existe norma específica para este tipo de pavimentação. Atualmente tem-se apenas uma cartilha da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002). O uso de pavimentos intertravado permeáveis minimiza o problema das enchentes e diminui seus impactos.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O desafio atual dos governantes é promover à sociedade qualidade de vida e desenvolvimento sustentável. Para isso, torna-se necessária a elaboração de planos de ação em conjunto com toda sociedade. Estes planos devem levar em consideração aspectos relacionados com o meio ambiente, transportes e saneamento.

Na parte do planejamento urbano é necessário tentar evitar danos ao meio ambiente. Às cidades brasileiras, principalmente às de grande porte, enfrentam um crescimento desordenado. O crescimento não é um fator negativo, mas negativos são os métodos que os homens aplicam para realizar este crescimento. Tem-se que pensar em mudança dos métodos construtivo, de maneira que se obtenha um equilíbrio entre construções e a tentativa de preservar o meio ambiente. A aceleração urbana é um dos grandes problemas enfrentado pelo homem, pois ela provoca a diminuição de áreas permeáveis.

Os gestores ainda não encontraram soluções eficazes que resolva o problema, como por exemplo, a criação de projetos de drenagem urbana que consiga lidar equilibradamente

com o fluxo das águas das chuvas. Criam leis, mas sem mecanismos de fiscalização para que as mesmas sejam cumpridas. Em Goiânia, por exemplo, é obrigatório deixar no mínimo 15 por cento de área de terreno permeável. Como não há fiscalização, os moradores acabam concretando todo o terreno. O Poder Público, geralmente age sobre o efeito e não sobre as causas do aumento da vazão gerada pela ampliação das superfícies impermeáveis. Hoje existe a necessidade de novas tecnologias que visem melhorar a infiltração da água. Uma das técnicas é o uso de pavimentos permeáveis que são capazes de reduzir o volume do escoamento superficial em comparação aos pavimentos convencionais, privilegiando a infiltração e a retenção da água no subsolo.

A atualidade exige que se busque uma harmonia entre o ambiente e o homem. Neste contexto surgem novas técnicas, novos métodos mais racionais e eficientes que tentam conservar e ampliar a interatividade entre o homem e o meio ambiente. O desenvolvimento urbano está diretamente relacionado com a impermeabilidade do solo. A concepção de edificações, de pavimentação de rodovias, entre outros, produz grandes áreas impermeáveis. O desafio é continuar com o desenvolvimento sem agredir o meio ambiente. Como continuar pavimentando sem causar variações de temperatura? Como continuar edificando sem desestabilizar o ciclo natural do ambiente? A vida é um caminhar e como construir um caminho que proporcione tranquilidade e qualidade de vida aos seres vivos sem danificar o meio ambiente?

A água, por exemplo, é um elemento indispensável aos seres vivos que sofre um grande impacto, na maioria das vezes negativo, com a determinação do homem em melhorar e proteger a sua vivência. A água está presente na maioria das atividades do ser humano, desde o abastecimento doméstico e público até no lazer e na geração de energia (MADELON, 2006). A escassez de água é um fato concreto enfrentado por diversas regiões do planeta. A pavimentação é um elemento que interfere diretamente na captação de água e na mudança climática a nível global. A pavimentação, independente do local, gera desenvolvimento social e econômico para a população. No entanto, gera, também, alteração das condições ambientais naturais causados pela sua instalação.

O estudo proposto busca soluções que atenuem algumas destas questões, uma alternativa compensatória. Na questão da pavimentação, pode exemplo, o resultado é a impermeabilidade do solo que impede o fluxo natural das águas e que gera, nas grandes cidades, problemas como alagamentos, inundações, o surgimento de erosões, entre outros. Segundo Metha e Monteiro (2008), o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, depois da água, e em volume, é o produto mais fabricado atualmente.

A produção de um concreto que permita a passagem da água e que apresente características de resistência à compressão e durabilidade semelhantes ao concreto convencional é uma forma de amenizar os problemas causados pela pavimentação. O concreto permeável seria mais um aliado aos sistemas de drenagens existentes, permitindo uma maior qualidade de vida com um mínimo de impacto no meio ambiente. O produto deste estudo pode ser destinado a pavimentação de propriedades particulares e de ruas urbanas. A intenção deste estudo é desenvolver um piso intertravado permeável e avaliar sua resistência mecânica, sua resistência à abrasão e o seu limite de permeabilidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um piso intertravado permeável com desempenho compatível com as normas da ABNT e ACI para utilização em pavimentações exteriores de residências, vias para pedestres, praças, estacionamentos e vias de tráfegos de veículos leves.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a resistência à abrasão (NBR 12041), à compressão (NBR 9781) e a permeabilidade à água (ACI 522) de peças de concreto permeável para uso em piso intertravado.

Estabelecer parâmetros de dosagens para concreto permeável usados em peças para piso intertravados.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente estudo caracterizou a resistência à compressão e à abrasão e a permeabilidade de peças intertravadas para pavimentação.

Não foram realizadas análises sobre ataque de fungos, de bactérias e outros fenômenos naturais, bem como análises de entupimentos dos vazios drenantes.

A pesquisa se limitou ao estudo de alguns traços de concreto, utilizando um tipo de cimento, um tipo de agregado miúdo, um tipo de agregado graúdo e de um tipo de aditivo superplastificante e sílica ativa.

1.5 ESTRUTURAS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em duas partes: uma parte teórica que faz uma revisão bibliográfica que inclui o capítulo atual e os Capítulos 2, 3 e 4; e uma parte experimental que inclui os Capítulos 5, 6 e 7.

No Capítulo 1 é apresentada a introdução sobre a urbanização acelerada no Brasil, os problemas causados por esse crescimento e a importância dos pavimentos permeáveis intertravados no auxílio da solução desses problemas. O objetivo geral de desenvolver um piso permeável e os objetivos específicos de analisar suas características são apresentados neste capítulo.

No Capítulo 2 é apresentado e discutido o conteúdo sobre concreto, enumerando as características físicas e químicas dos materiais usados na sua produção.

O Capítulo 3 apresenta a microestrutura do concreto.

No Capítulo 4 são mostrados os tipos e as características do pavimento de concreto permeável com piso intertravado, as formas de implantação e sua utilização.

O Capítulo 5 conceito, a forma de implantação e as características do concreto permeável.

O Capítulo 6 apresenta o programa experimental, compreendendo a metodologia empregada para obtenção dos resultados, tipos de ensaios adotados, a caracterização dos materiais utilizados, a dosagem dos concretos, bem como os ensaios e os métodos empregados para a obtenção dos resultados.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados e feitas às análises dos resultados obtidos durante o programa experimental.

O Capítulo 8 contém as conclusões da pesquisa e sugestões para a continuidade dos estudos.

2 MATERIAIS PARA CONCRETO

2.1 AGREGADOS

2.1.1 Definição

O agregado é um material granular, geralmente inerte, sem forma e volume definido que apresenta características adequadas para uso em construção. Exemplos de agregado são a areia, os seixos rolados, a vermiculita e a barita. As rochas de origem do agregado não devem possuir compostos que reajam com o cimento fresco ou endurecido, que sofram alterações com o contato com a água (aumente o volume com a umidade) e não deve apresentar incompatibilidade térmica entre seus grãos e a pasta endurecida.

O agregado, tecnicamente, exerce uma influência nas propriedades do concreto no estado fresco e no endurecido e nas características das argamassas. A utilização do agregado no concreto, por exemplo, reduz os custos, minimiza a retração, diminui o calor de hidratação, aumenta a resistência química e a resistência à abrasão. O agregado é responsável pela maior parte do volume do concreto. Observando a Figura 2.1 é possível verificar que, em volume, o agregado pode compor mais de 60% do concreto.

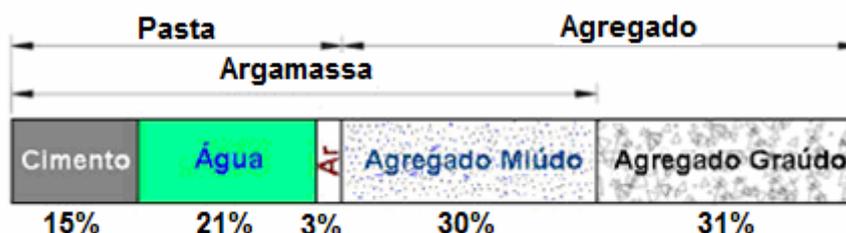


Figura 2.1 – Composição do concreto (FREITAS JR., 2013).

2.1.2 Classificação

a) Quanto à origem

Os agregados ditos naturais são os encontrados na natureza e não necessita de um aperfeiçoamento. Os agregados artificiais são os que necessitam de um processo de aperfeiçoamento aplicado pelo homem. São exemplos de agregados naturais as areias, pedregulhos e seixo rolados;

São exemplo de agregados artificiais as areias e pedras obtidas por moagem de fragmentos de rochas e a argila expandida. A Figura 2.2 apresenta exemplos de agregados, divididos quanto à origem. A classificação está relacionada a forma como o material é obtido.



Figura 2.2 – Tipos de agregados quanto à origem. Agregado natural (seixo rolado) (a) e agregado artificial (argila expandida) (b).

Os agregados naturais, com relação à origem geológica e conforme seus próprios depósitos, podem ser residuais, onde o depósito é próximo da rocha matriz e apresentam boa granulometria, porém muita impureza. Os agregados chamados de eólicos são os depósitos de material fino formados pela ação do vento e apresentam uma boa pureza e uma péssima granulometria. Os aluviais são os depósitos formados pela ação da água, tanto fluvial quanto marítima. Os agregados fluviais apresentam uma granulometria melhor que os marítimos.

b) Quanto à massa específica aparente

O agregado se divide em três tipos:

- Os leves, como a pedra pome, vermiculita e a argila expandida;
- Os normais (médios) como a areia, os seixos e a pedra britada; e
- Os pesados, como a barita, a magnetita e a limonita.

A Tabela 2.1 apresenta a classificação dos agregados conforme a massa específica aparente.

Tabela 2.1 – Classificação dos agregados de acordo com a massa específica aparente (ME) (OLIVEIRA, 2012).

Classificação	Peso (kg/m^3)
Leves	M.E. <1.000
Médios	$1.000 \leq \text{M.E.} \leq 2.000$
Pesados	M.E. >2.000

c) Quanto à textura superficial

Os agregados graúdos são classificados em textura lisa ou áspera que depende das características da rocha matriz e de exposição, posterior, à ação de atrito. Os agregados com superfície mais áspera apresenta uma maior aderência mecânica entre a pasta e o agregado.

d) Quanto à forma do grão

A análise da forma do agregado graúdo, como no caso do agregado miúdo, é importante devido a sua influência na qualidade do concreto. A determinação da dimensão máxima do agregado e as especificação de limites granulométricos influenciam na trabalhabilidade e no custo do concreto.

A forma e a textura do agregado interferem mais nas características do concreto em estado fresco do que no estado endurecido. Quanto a dimensões os agregados graúdo podem ser classificados em:

- Os agregados que apresentam grãos lamelares, com grande variações nas três dimensões, geram mais vazios entre os grãos e necessitam de uma quantidade maior de pasta para preenche-los e prejudicam a trabalhabilidade do concreto.
- Os agregados lamelares se subdividem em alongados (forma de agulha), discóides (quadráticos) e planos (forma de placa);
- Os agregados com grãos arredondados proporcionam vantagens com relação aos grãos lamelares. Geram economia com uso de pouco cimento na composição do concreto e melhora a trabalhabilidade.
- Os agregados normais são os que os grãos apresentam todas as dimensões com o mesma ordem de grandeza.
- Os agregados nomais se subdividem em angulosos e arredondados.

As seguintes relações entre as dimensões são empregadas para classificar os grãos do agregado graúdo, segundo suas formas.

- Quando o comprimento dividido pela espessura do grão e a largura dividido pela espessura são menores ou iguais a 2 mm tem-se grãos com formatos lamelares;
- Quando o comprimento dividido pela largura do grão e a largura dividido pela espessura são menores que 2 mm tem-se grãos com formatos normais e
- Quando o comprimento dividido pela largura do grão e a largura dividido pela espessura são maiores que 2 mm tem-se grãos com formatos alongados.

A Figura 2.3 apresenta exemplos de formatos dos grãos dos agregados graúdo.

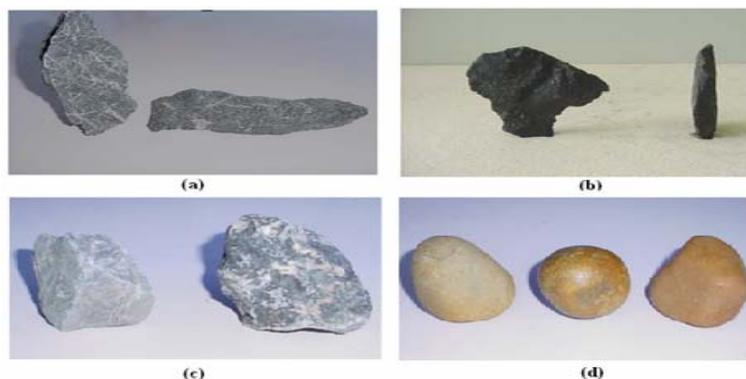


Figura 2.3 – Formatos dos grãos do agregado graúdo. Grãos alongados (a), grãos lamelares (b), grãos normais (c) e grãos arredondados (d) (FREITAS JR., 2013).

e) Quanto à dimensão de suas partículas

Agregado se divide em duas categorias:

- Agregado miúdo é considerado aquele que passa pela peneira de 4,75 mm. Normalmente a areia de origem natural ou o resultado do britamento de rochas estáveis são considerados como agregados miúdos. A expressão agregado miúdo está relacionado a partículas com dimensões variando de 75 μm a 4,75 mm.
- Agregado graúdo é considerado aquele que não passa pela peneira de 4,75 mm. O agregado graúdo é que possui partículas com dimensões que variam de 4,75 mm até 50 mm. Excepto em casos especiais.

e.1) Agregado miúdo

Conhecer as características do agregado é um fator importante para se obter uma dosagem de concreto adequada a sua aplicação e determinar as propriedades do concreto no estado fresco.

Agregado miúdo apresenta as seguintes características:

- Massa específica real onde os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos são desconsiderados.
- Massa específica aparente os vazios permeáveis ou impermeáveis contidos entre os grãos são considerados.
- Massa unitária inclui no volume apenas os vazios que fica entre os grãos. A massa unitária do agregado miúdo depende muito do uso ou não de recipiente, da sua umidade entre outros.

O agregado deve estar em estado seco e em um volume de pelo menos o dobro do volume do recipiente usado para o ensaio. A massa unitária pode ser calculada pela utilização da Equação 2.1.

$$\text{Massa unitária} = \mu = \frac{m_{r+a} - m_r}{V_r} \quad (2.1)$$

Onde:

μ = massa unitária do agregado no estado solto (kg/dm^3)

m_{r+a} = massa do recipiente + amostra (kg)

m_r = massa do recipiente (kg)

V_r = Volume do recipiente (dm^3)

Para dosagem do concreto é necessário apenas determinar a massa específica aparente e a massa unitária.

- A umidade e a absorção são características que interferem na massa unitária do agregado devido ao inchamento que altera o volume aparente do agregado. A umidade é a relação da massa de água que envolve a massa do agregado seco e a massa do agregado seco e absorção é o aumento do volume do agregado devido ao preenchimento de seus poros por água. A Figura 2.4 apresenta os tipos de umidade do agregado.

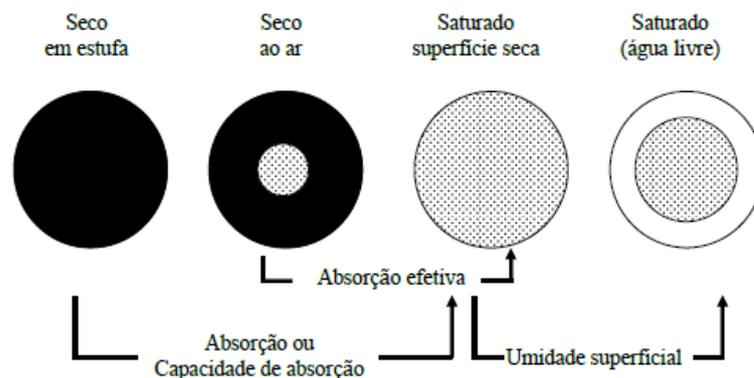


Figura 2.4 – Determinação da umidade do agregado miúdo (OLIVEIRA, 2012).

Conforme a Figura 2.4 mostra os agregados (da esquerda para direita) secos em estufa fica completamente seco, os secos ao ar livre apresentam uma superfície seca e o seu interior úmido, o saturado com superfície seca caracteriza-se pela superfície seca e os poros permeáveis saturados e o último indica a condição de agregado saturado onde tanto a superfície quanto os poros permeáveis apresentam-se saturados.

O cálculo do teor de umidade permite a correção da quantidade de água de uma argamassa ou de um concreto e da massa do agregado utilizado na mistura. A Figura 2.5 mostra o inchamento da areia causado pelo teor de umidade.

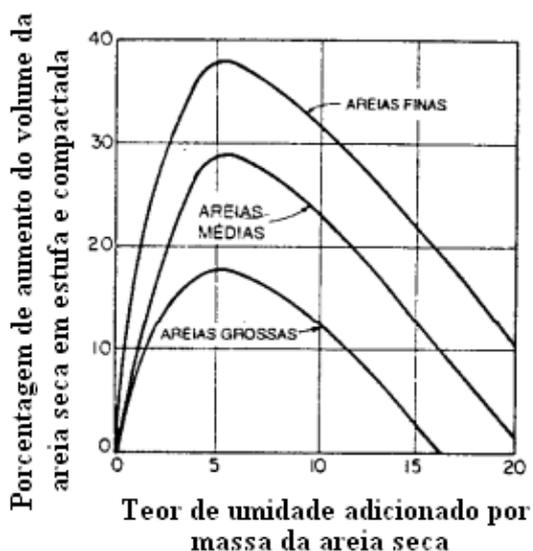


Figura 2.5 – Inchamento devido à umidade no agregado miúdo.

- A composição granulométrica do agregado é determinado por peneiramento. A Figura 2.6 mostra um peneirado mecânico composto por peneiras com aberturas de malha progressivamente menores.

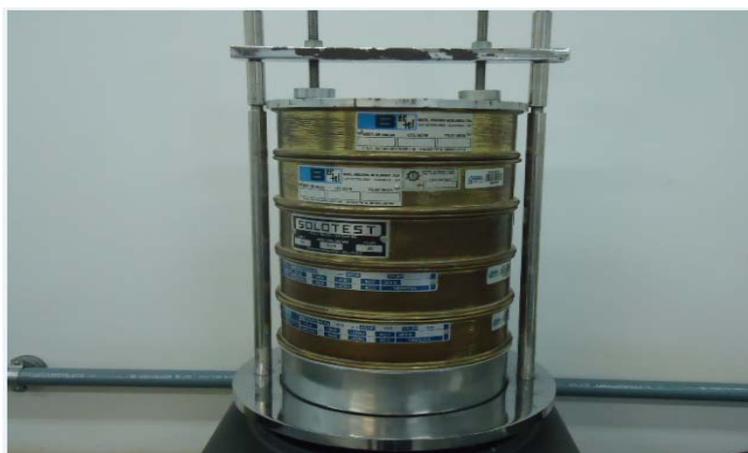


Figura 2.6 – Peneirador mecânico.

Com a análise granulométrica do agregado obtém-se a dimensão máxima característica (DMC) que é valor nominal da abertura da peneira em que o agregado fica retido em um volume menor ou igual a 5% em massa. E o módulo de finura (MF) que é a soma das

percentagens retidas em cada peneira da série normal dividido por 100. A Tabela 2.2 apresenta a classificação das areias com relação ao valor do seu MF.

Tabela 2.2 – Classificação das areias segundo o MF (OLIVEIRA, 2012).

Classificação da Areia	Valor do MF
Muito grossa	MF >3,9
Grossa	3,3 < MF < 3,9
Média	2,4 < MF < 3,3
Fina	2,0 < MF < 2,4
Muito Fina	2,0 < MF

- O agregado miúdo apresenta, também, impurezas como materiais pulverulentos (partículas de argila e silte), impurezas orgânicas (partículas de húmus) e outros compostos como gravetos, mica, sais entre outros.

Os materiais pulverulentos são partículas com dimensões menores que 75 µm que normalmente envolvem os grãos do agregado e quando não se separam dos grãos durante a mistura produzem uma redução da resistência pasta/agregado que é altamente prejudicial ao concreto. Os teores de material pulverulento do agregado miúdo não deve ultrapassar 3% para concreto exposto a desgaste superficial e menor ou igual a 5% para outras aplicações do concreto. O húmus (impureza orgânica) introduz uma acidez que neutraliza a água alcalina da argamassa e o mesmo envolve os grãos do agregado impedindo uma boa aderência entre o cimento e o agregado.

e.2) Agregado graúdo

São denominados agregados graúdo o material que fica retido na peneira de diâmetro de 4,8mm. O agregado graúdo é proveniente de rochas que são reduzidas de tamanho pela ação de triturador mecânico. As britas (agregado graúdo) são obtidos a partir de rochas de granito, basalto e gnaisse. As britas são classificadas conforme as dimensões de seus grãos. A Tabela 2.3 relaciona a classificação da brita.

Tabela 2.3 – Classificação do agregado graúdo (brita) segunda a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Descrição	Dimensão (mm)	Abertura da Peneira (mm)
Brita 0	9,5	4,8
Brita 1	19	9,5
Brita 2	25	19
Brita 3	50	25
Brita 4	75	50
Brita 5	100	76

A massa unitária do agregado graúdo (mesmo conceito do agregado miúdo) diferentemente da massa do agregado miúdo não sofre interferência da umidade que culmina no inchamento. Ocorre apenas uma elevação do peso e não do volume do agregado.

A massa unitária relaciona a massa de unidade de volume aparente do agregado em conjunto com os vazios entre os grãos. A massa específica está relacionado à partículas do agregado. O importante é determinar o espaço que as partículas ocupam e não o vazio que as partículas apresentam.

Como o agregado miúdo, o agregado graúdo com nível baixo de porosidade, também, não é um fator limitante a resistência e do módulo de elasticidade. Como o agregado, graúdo ou miúdo, compõe a maior parte do volume do concreto ele é fundamental da determinação do módulo de elasticidade do concreto. A Tabela 2.4 apresenta a resistência à compressão de algumas rochas que são fontes para a produção de agregado graúdo.

Tabela 2.4 – Resistência à compressão de algumas rochas (FREITAS JR., 2013).

Agregado	Resistência à compressão da rocha (MPa)
Rocha basáltica	105 a 235
Granito	85 a 275
Calcário	90 a 270
Cascalho	165 a 265

Como já foi mencionado o fato mais importante em que se é necessário especificar os limites granulométricos e a dimensão máxima do agregado é a sua influência na trabalhabilidade e no custo de produção do concreto.

O mais usual é que a dimensão máxima do agregado não deve ser maior que um quinto da dimensão mais estreita da forma utilizada para a produção da peça de concreto e não deve ser maior que três quartos da menor distância livre entre as armaduras de reforço (SIQUEIRA, 2008).

A Figura 2.7 apresenta a composição granulométrica (faixa de distribuição das dimensões das partículas) dos agregados e como pode influenciar na formação de vazios entre os grãos e, conseqüentemente, na demanda de pasta de cimento Portland.



Figura 2.7 – Composição granulométrica (IBRACON, FARIA et. al., 2007).

O concreto e a argamassa produzidos com agregados com granulometria contínua proporciona uma maior trabalhabilidade e um menor consumo de cimento, com granulometria descontínua proporciona uma maior resistência e um maior consumo de cimento e com granulometria uniforme apresenta um maior consumo de água (IBRACON, 2007).

Outro tipo de granulometria é a graduação densa ou bem graduada que apresenta distribuição contínua bem próxima à de densidade máxima. A Figura 2.8 mostra uma representação convencional de curvas granulométricas.

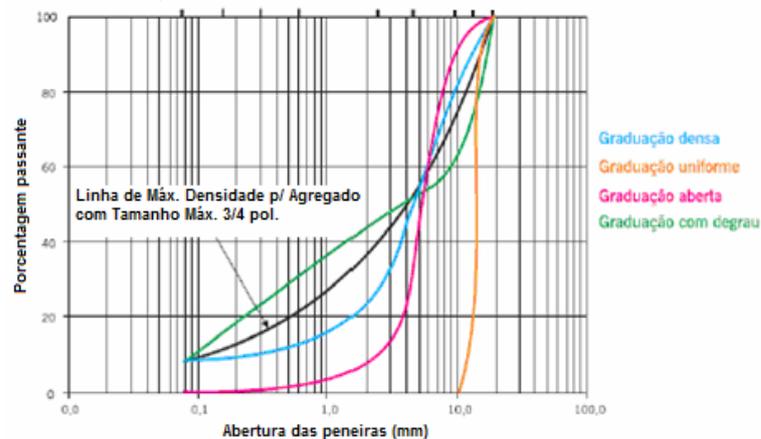


Figura 2.8 – Representação convencional de curvas granulométricas.

Os agregados graúdos também não devem apresentar impurezas, substâncias que produzam reações que modifiquem as características do concreto, tanto em estado fresco como em estado endurecido. Substâncias nocivas ou deletérias são partículas presentes nos agregados, em quantidades pequenas, mas que prejudicam a trabalhabilidade, a pega e o endurecimento e as características de durabilidade do concreto. As impurezas podem prejudicar a aderência do agregado com a pasta, podem diminuir a resistência do concreto e podem neutralizar as reações de endurecimento dos aglomerantes. A Tabela 2.5 relaciona os limites máximos de substâncias nocivas.

Tabela 2.5 – Limites máximos de substâncias nocivas (ABNT, 2003).

Substância	Método de ensaio	Porcentagem Máxima	
		Agregado miúdo	Agregado graúdo
Torrões de argila e materiais friáveis	Concreto aparente	3,0	1,0
	Concreto sujeito a desgaste	3,0	2,0
	Outros concretos	3,0	3,0
Materiais carbonosos ¹⁾	Concreto aparente	0,5	0,5
	Concreto não aparente	1,0	1,0
Material fino que passa na peneira 75µm	Concreto sujeito a desgaste superficial	3,0	1,0 ^{2) 3)}
	Concreto protegido de desgaste superficial	5,0	1,0 ^{2) 3)}

1) Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de quantificação dos materiais carbonosos.

2) Para o agregado total, o limite pode ser composto de até 6,5% desde que se comprove por apreciação petrográfica que os grãos não interferem nas propriedades do concreto.

3) Para agregados produzidos a partir de rochas com absorção de água inferior a 1% o limite pode ser de 2%.

4) Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura que a solução padrão, a diferença máxima entre os resultados de resistência à compressão previsto deve ser de 10%.

2.1.3 Agregados de concreto RCD

Agregados de resíduos da construção e demolição (RCD) podem ser empregados como agregado graúdo (NUNES, 2007) e miúdo na composição do concreto. No entanto, a presença de impurezas e sua heterogeneidade, limitam seu uso para concreto armado. Agregado graúdo de RCD, com a realização de estudos em laboratório e em campo, tem

apresentado em relação aos agregados graúdos convencionais resultados satisfatórios. Segundo Siqueira (2008) o concreto produzido com o agregado reciclado apresenta no mínimo 2/3 da resistência à compressão e do módulo de elasticidade e trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias com relação ao concreto com agregado natural.

Agregados reciclados têm contribuído para o problema de demanda, onde os agregados convencionais são escassos. O uso do RCD evita o acúmulo e diminui o custo de disposição dos entulhos de obra. A principal dificuldade no uso deste tipo de agregado é o custo no processo de produção. O custo da britagem do concreto armado é alto, devido a necessidade de separação do aço. Além disso é difícil a obtenção de uma granulometria contínua e realizar a separação de substâncias indesejáveis do RCD é efetuar um controle de qualidade sistemático. Conhecer as características do agregado é fundamental para se obter um concreto que proporcione uma boa trabalhabilidade e que atenda as necessidades da aplicação.

2.2 CIMENTO

2.2.1 Definição

Guia básico da ABCP (2012) define o cimento como um pó fino com propriedades ligantes que reage quimicamente ao contato da água. O cimento é um material usado, mundialmente, na construção civil. É um material pulverulento que promove a união das partículas dos agregados. O componente essencial do cimento é o clínquer que é um composto oriundo do calcário e da argila e de mais algumas adições, dependendo do tipo de cimento a ser fabricado. Depois de moído, o calcário é misturado com a argila em medidas apropriadas e calcinado em uma temperatura de 1.450 °C. Em seguida sofre um choque térmico. Ao final deste processo obtém-se um novo material denominado clínquer que é novamente moído e transformado em pó (ABCP, 2012).

Clínquer, por ser ativo, tem a particularidade de se transformar, quando em contato com a água, em uma pasta que ganha resistência com o tempo. Esta é a sua característica mais importante. As adições ao clínquer, normalmente, são para auxiliar no tempo de pega (gesso), para melhorar a resistência e a durabilidade (escória de alto-forno), para obtenção de uma maior impermeabilidade (materiais pozolânicos) e para melhorar trabalhabilidade (materiais carbonáticos) do concreto. O gesso é uma das adições primordiais e que não pode faltar no cimento, uma vez que viabiliza seu uso no que se refere ao tempo de endurecimento (ABCP, 2012).

2.2.2 Matérias-primas do cimento

a) Matérias-primas básicas

As materias-primas básicas do cimento são o calcário e a argila. O calcário é um material de fácil aquisição e que é composto por calcário calcítico e calcário magnesiano. A argila é constituída de silicato de alumínio hidratado e que em alguns casos o alumínio pode ser trocado, parcialmente, pelo ferro.

b) Matérias-primas auxiliares:

As materias-primas auxiliares são usadas como materiais corretivos que balanciam a mistura do cimento. Uma mistura básica de cimento deve ter cálcio, silício alumínio e ferro e pode-se, por exemplo, usar areia para corrigir a deficiência de óxido de silício, a bauxita para suprir a deficiência de alumínio e a hematita para suprir a deficiência do ferro.

2.2.3 Processo de fabricação do cimento

a) Extração da materia-prima

No caso do calcário, a extração é feita através de detonadores e perfuratrizes e em seguida são divididos em blocos menores, cerca de 1 metro de diâmetro. Essa medida adotada para os blocos permite a sua passagem por britadores que reduzem suas dimensões para partículas com tamanho máximo 1 cm.

Em um área de extração do calcário é possível ter um veio de calcário limpo como, também, um veio em que o calcário tem mistura com argila. O calcário que apresenta grande quantidade de mistura (argila, magnésio, sílica e terra, entre outros) são aproveitados parcialmente sendo o restante considerado como material inservível. A Tabela 2.6 apresenta as características químicas de diferentes calcários.

Tabela 2.6 – Características químicas de diferentes calcários (CIMENTO ITAMBÉ, 2013).

Componentes	Calcário I	Calcário II	Calcário III
CaO	47,82	52,46	49,80
SiO ₂	6,00	3,76	6,75
Al ₂ O ₃	1,83	1,10	0,71
Fe ₂ O ₃	0,92	0,66	1,47
MgO	2,08	1,23	1,48
K ₂ O	0,40	0,18	0,10
Na ₂ O	0,06	0,22	0,12
SO ₃	0,37	0,01	1,10
P.F.	40,52	40,38	38,55

No caso da argila, a movimentação de terras permite sua extração. A argila também passa por britadores. Na Tabela 2.7 observa-se as características químicas de diferentes argilas.

Tabela 2.7 – Características químicas de diferentes argilas (CIMENTO ITAMBÉ, 2013).

Componentes	Argila I	Argila II	Argila III
SiO ₂	63,45	67,29	52,30
Al ₂ O ₃	16,70	8,97	24,70
Fe ₂ O ₃	8,81	4,28	8,20
CaO	0,35	7,27	4,40
K ₂ O	2,85	1,2	0,80
Na ₂ O	0,12	1,51	0,00
P.F.	545,35	7,19	10,40
Outros	2,01	2,29	0,00

b) Proporções dos aglomerantes hidráulicos

Para se obter as características do cimento é comum estabelecer proporções dos materiais que o compoem. A determinação das proporções depende essencialmente da composição química das matérias-primas e da composição que se deseja para o o aglomerante (MOREIRA, 2013). A relação entre as percentagens dos materiais argilosos e da cal é dada pela Equação 2.2 (Índice de hidraulicidade de Michaelis).

$$\frac{1}{r} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \therefore r = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO}} \quad (2.2)$$

Onde:

r = que é a relação entre as percentagens de materiais argilosos e percentagens de cal.

CaO = cal aerea

SiO_2 = sílica

Al_2O_3 = alumina

Fe_2O_3 = óxido de ferro

Para complementar a mistura crua do cimento, depois de muitos testes e ensaios, utiliza-se os índices de porporção da sílica e de alumina-ferro que são obtidos através das Equações 2.3 e 2.4, respectivamente

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.3)$$

$$MAF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.4)$$

Onde:

MS = mistura de sílica

MAF = mistura alumina-ferro

SiO_2 = sílica

Al_2O_3 = alumina

Fe_2O_3 = óxido de ferro

A Tabela 2.8 mostra os parâmetros utilizados na fabricação do cimento nacional recomendados pela ABCP.

Tabela 2.8 – Parâmetros químicos para a composição do cimento nacional (MOREIRA, 2013).

Método de Controle	Mínimo (%)	Máximo (%)
Índice Hidráulico	1,8	2,2
Índice de Sílica	1,7	3,1
Índice de Alumina-Ferro	1,2	3,2

Antes da formação da mistura cru, normalmente, faz-se uma análise química, caso necessário tanto do calcário quanto da argila, com a intenção de se suprir as deficiências de ambos, neste momento, quando necessário, utiliza-se as materias-primas auxiliares. A Tabela 2.9 apresenta a composição mineralógica da mistura cru.

Tabela 2.9 – Composição mineralógica da mistura cru.

MINERAIS	%				
	CALCÁRIO	ARGILA	AREIA	MINÉRIO DE FERRO	
Alumina (Al_2O_3)	1,50	15,75	5,02	0,40	
Sílica (SiO_2)	4,16	64,40	88,23	7,56	
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	0,90	8,92	1,30	83,13	
Cal livre (CaO)	51,29	0,70	0,63	2,09	
Manganês (MGO)	0,36	0,80	0,11	0,43	
Álcalis	Potássio (K_2O)	-	2,79	2,66	0,08
	^ Sódio (Na_2O)	-	0,06	0,37	0,06
Módulos de sílicio (MSi)	1,73	2,61	13,96	0,09	
Módulos de alumínio (MA)	1,66	1,77	3,86	0,004	

c) Adições

A escolha do tipo de cimento a ser empregado depende das características que se deseja do produto final. Cada tipo de cimento normalizado recebe adições em quantidades variáveis. Entre as adições que são comercialmente incorporadas ao produto final, tem-se o filler calcário, a cinza volante, a argila calcinada e a escória de alto forno.

Além das adições mencionadas, também existem a sílica ativa, o metacaolim e a cinza de casca de arroz, que são produtos encontrados no mercado para serem adicionados ao concreto, diretamente na betoneira. Em nível de pesquisa, tem-se a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SILVEIRA, 2010) e o pó de mármore e granito (BACARJI et al., 2013).

2.2.4 Tipos e aplicações do cimento

O mercado brasileiro oferece vários tipos de cimento Portland, diferentes em função de sua composição. O Guia da ABCP (2012) relaciona os seguintes tipos:

a) Mais utilizados:

- Cimento Portland comum;
- Cimento Portland composto;
- Cimento Portland de alto-forno;
- Cimento Portland pozolânico; e.
- Cimento Portland de alta resistência inicial;

b) Utilizados em menor escala:

- Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland branco;
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação e
- Cimento para poços petrolíferos.

Em outros países como os Estados Unidos, Rússia e Japão, é possível encontrar outros tipos de cimento como o cimento aluminoso, que produz um concreto de alta resistência inicial e de alta resistência à temperatura elevadas, e o cimento Portland de expansão controlada (MOREIRA, 2013). Pode-se mencionar também o cimento cirúrgico para tratamento dentário.

A Tabela 2.10 mostra uma série de características dos cimentos normalizados no Brasil.

Tabela 2.10 – Características dos cimentos Portland (ABCP, 2012).

Nome Técnico	Sigla	Classe	Identifi- cação	Norma Brasileira (NBR)	Composição (% massa)				
					Clínquer + gesso	E (1)	Z (2)	F (3)	
Cimento Portland comum	CPI	25 32 40	CPI-25 CPI-32 CPI-40	5732	100	-	-	-	
Cimento Portland comum c/ adição	CPI-S	25 32 40	CPI-S-25 CPI-S-32 CPI	5732	95 a 99	5 a 1	5 a 1	5 a 1	
C i m e n t o P o r t l a n d c o m p o s t o	Com escória (E)	CPII-E	25 32 40	CPII-E-25 CPII-E-32 CPII-E-40	11578	56 a 94	34 a 6	-	10 a 0
	Com pozo-lana (Z)	CPII-Z	25 32 40	CPII-Z-25 CPII-Z-32 CPII-Z-40	11578	76 a 94	-	14 a 6	10 a 0
	Com filler (F)	CPII-F	25 32 40	CPII-F-25 CPII-F-32 CPII-F-40	11578	90 a 94	-	-	10 a 6
Cimento Portland de alto-forno	CPIII	25 32 40	CPIII-25 CPIII-32 CPIII-40	5735	25 a 65	70 a 35	-	5 a 0	
Cimento Portland pozolânico	CPIV	25 32	CPIV-25 CPIV-32	5736	45 a 85	-	50 a 15	5 a 0	
Cimento Portland de alta resist. inicial	CPV	-	CPV-ARI	5733	95 a 100	-	-	5 a 0	
Cimento Portland resistente aos sulfatos	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS (4)		25 32 40	5737	Obedecem à composição dos tipos originais				
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC (5)		25 32 40	13116	Obedecem à composição dos tipos originais				
Cimento Portland Branco estrutural	CPB	25 32 40	CPB-25 CPB-32 CPB-40	12989	75 a 100	-	-	25 a 0	
Cimento Portland Branco não estrutural	CPB	-	CPB	12989	50 a 74	-	-	50 a 26	
Cimentos p/ poços petrolíferos	CPP	G	CPP-Classe G	9831	100	-	-	-	

O cimento Portland comum foi o primeiro cimento comercializado no Brasil com a nomenclatura de CP I e com a adição de apenas gesso para retardar a pega.

Segundo o Guia da ABCP (2012) o cimento Portland composto é o mais comum no mercado e é responsável por cerca de 75% da produção brasileira. O acréscimo de escórias granuladas de alto-forno e de materiais pozolânicos ao clínquer foi uma medida tomada para diminuir os gastos com energia no processo de fabricação do cimento. A utilização destes aditivos além de aumentar a impermeabilidade, a estabilidade, cura prolongada, endurecimento lento e a durabilidade do concreto eles diminuem o calor de hidratação, minimiza o custo do concreto, maior trabalhabilidade e apresentam uma resistência final superior ao que é determinado pela ABNT (ABCP, 2012).

A escória de alto forno é o material resultante do tratamento do minério de ferro em alto forno. Seu formato granulado é devido a mudança brusca de temperatura e sua maior composição é de silicatos e alumino-silicatos de cálcio (MOREIRA, 2013). A escória que apresenta um nível baixo de ferro e isentas de manganês é a escória adequada para fabricação do cimento. A escória de alto forno deve sofrer um choque térmico em água fria para desprendimento de uma parte do enxofre. Esse procedimento proporciona a escória características hidráulicas. O resfriamento lento leva a escória a outras características que não são desejáveis a fabricação do cimento (ocorre uma cristalização).

Conforme a ABNT NBR 5736 o teor de pozolana na massa total do cimento deve estar entre 10% e 40%. O cimento com estes valores de teor de pozolana apresenta uma resistência semelhantes aos demais cimentos do tipos 25 e 32. A pozolana é um material inerte que adquire características de aglomerante hidráulico quando em contato com o calcário. Pode ser material natural ou artificial.

A pozolana divide-se em:

Pozolanas naturais:

- Pozolanas ígneas oriundas de vulções;
- Pozolanas gaize um rocha sílico-argilosa encontrada na França.

Pozolanas artificiais:

- Resultado da calcinação da argila a uma temperatura de 500 °C.
- Cinza volante da queima de carvão mineral e
- Sílicas ativas.

O diferencial entre o cimento portland comum e o de alta resistência inicial está na dosagem do calcário e da argila e no tipo de moagem que é mais fina. Esse diferencial permite uma elevada resistência com maior velocidade (ABCP, 2012).

Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos, normalmente, destinados a compor concreto para construção de redes de esgotos ou industriais, água do mar entre outros.

Os cimentos Portland de baixo calor de hidratação são destinados a diminuir o calor que surge com a hidratação do cimento em grandes estruturas de concreto. Controlar o calor evita ao aparecimento de fissuras de origem térmicas. Conforme o Guia da ABCP (2012) (NBR 13116) são cimentos que em 3 dias de hidratação geram até 260J/g e em 7 dias de hidratação geram 300 J/g.

O cimento Portland branco apresenta a cor branca devido aos baixos teores de óxidos de ferro e manganês e aos diferentes processos em sua fabricação como o método de resfriamento e o de moagem. O cimento portland branco pode ser encontrado em duas classes: uma para aplicações estruturais que apresenta uma resistência similar as outras classes de cimento e um outro para aplicações como rejunte de azulejos e na fabricação de ladrilhos.

O cimento Portland para poços petrolíferos não apresenta composição diferente da composição do cimento portland comum. O que se preza neste cimento é que o mesmo preserve as propriedades reológicas necessárias as condições de pressões e temperaturas elevadas em grandes profundidades.

2.2.5 Características físicas

As características físicas do cimento Portland estão relacionadas com o grau de finura, o início de pega, o fim de pega, a expansibilidade e a resistência à compressão. A Tabela 2.11 mostra um resumo dos limites físicos-mecânicos do cimento Portland.

A finura do grão interfere na velocidade de reação de hidratação do cimento, pois quanto menor for o grão maiores são as reações de hidratação. Ela diminui a exsudação e aumenta a retração das pastas, uma vez que quanto mais fino for o grão maior será a demanda da água.

O início de pega indica quando a pasta começa a perder plasticidade e trabalhabilidade. O fim de pega indica o começo do endurecimento do concreto.

A expansibilidade esta relacionado a estabilidade de volume que o cimento apresenta depois de endurecido. O normal é apresentar uma expansibilidade relativamente pequena. O excesso de cal, magnésia e gesso causam a expansibilidade do cimento.

A resistência à compressão do cimento é medida através de ensaios utilizando corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm.

Tabela 2.11 – Tipos de cimento Portland com seus limites físico-mecânicos (ABCP, 2012).

Tipos de cimento Portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CPI	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
CPI S	32		≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	--	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	--
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPII E	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
CPII F	32		≥ 260	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	--	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	--
CPII Z	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPIII ⁽²⁾	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32	≤ 8,0	--	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	--	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
	40								≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	≥ 48,0 ⁽¹⁾
CPIV ⁽²⁾	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32	≤ 8,0	--	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	--	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
PC V ARI		≤ 6,0	≥ 280	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	--	--

(1) Ensaio facultativo.

(2) Outras características podem ser exigidas como calor de hidratação, inibição da expansão devida à relação álcali-agregado, resistência a meios agressivos, tempo máximo de início de pega

Segundo o Guia da ABCP (2012) as exigências quanto às características físico-mecânicas garantem o desempenho mecânico e reológico quando da aplicação em pastas, argamassas e concretos.

2.2.6 Características químicas

Neste item estão relacionados os limites máximos para perda ao fogo, resíduo insolúvel, óxido de magnésio (MgO) e trióxido de enxofre (SO₃). A Tabela 2.12 apresenta um resumo dos valores limites para as características químicas.

Tabela 2.12 – Diversos tipos de cimento Portland com seus limites químicos (ABCP, 2012).

Tipo de cimento Portland	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	CO₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0	--
CP I S	≤ 5,0	≤ 4,5			≤ 3,0	--
CP II E	≤ 2,5					--
CP II Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	--
CP II F	≤ 2,5					--
CP III	≤ 1,5	≤ 4,5	--	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾⁽³⁾	⁽⁴⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	--
CP V ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 ≤ 4,5 ⁽⁵⁾	≤ 3,0	--

(1) Ensaio facultativo.

(2) A atividade pozolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753, deve ser positiva.

(3) A atividade do material pozolânico, determinado conforme a NBR 5752, deve ser maior que 75%.

(4) O teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.

(5) O teor de SO₃ igual a 3,5% aplica-se quando C₃A≤8,0 e 4,5% quando C₃A≥8,0%.

LEGENDAS

MgO = Óxido de magnésio ;

SO₃ = Anidrido sulfúrico;

CO₂ = Gás carbônico (anidrido carbônico);

S = Enxofre em forma de sulfeto .

As exigências químicas, segundo o Guia da ABCP (2012), visam a limitar a quantidade de adições, a pré-hidratação e falhas no processo de fabricação.

2.2.7 Fenômenos que ocorrem com o cimento Portland

a) Hidratação

O cimento apresenta características de aglomerante quando entra em contato com a água. O material resultante da hidratação do cimento é que apresenta características ligantes. Conhecer as reações que ocorre durante a hidratação é importante, pois através do conhecimento da velocidade da reação é possível saber o tempo de pega e de endurecimento da mistura.

Este estudo relaciona dois mecanismos de hidratação do cimento:

- Hidratação por dissolução – este mecanismo é o predominante nas fases iniciais da hidratação do cimento. Os anidros são dissolvidos resultando em hidratos. Nesta fase inicial ocorre uma reestruturação dos materiais originais;

- Hidratação no estado sólido – é caracterizada pelas reações que se verifica na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrar em solução.

b) Calor de Hidratação

As reações que ocorrem na hidratação do cimento são reações exotérmicas que geram que quantidade razoável de calor. Em construções de grande porte o calor gerado é elevado e o tempo para sua dissipação é prolongado.

Podem surgir fissuras quando da contração do concreto em função de seu resfriamento. O controle desse fenômeno em algumas situações é necessário. Em situações em que, por exemplo, o clima é frio (inverno) o calor gerado promove a ativação para as reações de hidratação.

O nível de calor produzido nas reações depende da constituição do cimento e do seu grau de finura. A Tabela 2.13 apresenta os calores produzidos pela hidratação dos compostos do cimento em relação ao tempo (idade).

Tabela 2.13 – Calores de hidratação dos compostos do cimento (ABCP, 2012).

Compostos	Calores de hidratação a certa idade (cal / g)		
	3 dias	90 dias	13 anos
C₃S	58	104	122
C₂S	12	42	59
C₃A	212	311	324
C₄AF	69	98	102

c) Retração e expansão do cimento endurecido

Retração e expansão são as denominações utilizadas para as mudanças de volume que o cimento sofre no estado endurecido. A retração corresponde à diminuição do volume e a expansão está relacionada ao aumento do volume.

Giongo (2007) afirma que a retração é incrementada no período inicial e tende a um valor final constante. A Figura 2.9 mostra o desempenho da retração e da expansão do cimento com a idade.

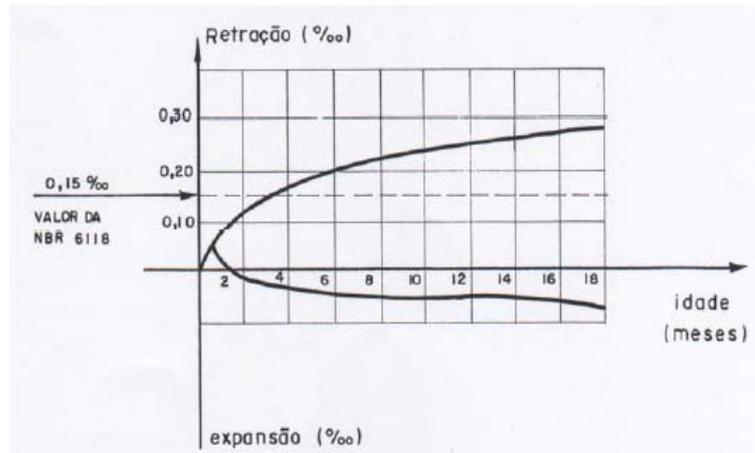


Figura 2.9 – Progresso da retração e da expansão com a idade (GIONGO, 2007).

Como explica Giongo (2007) com a idade a retração tende a um valor final constante. Para a expansão, elementos estruturais submersos, o gráfico mostra uma retração inicial que é suplantada pelas tensões do fluxo de água e gera a expansão.

É comum observar os seguintes valores de retração:

Tabela 2.14 – Valores comuns de retração.

Descrição	Valor da Retração (mm/m)
Pasta pura	1,5 a 2,0
Argamassa	0,6 a 1,5
Concreto	0,2 a 0,7

d) Fatores que influenciam a retração:

Normalmente são relacionados os seguintes fatores;

- Teor de C_3A no cimento, grau de finura do cimento, módulo de elasticidade do agregado, relação água/cimento, uso de retardadores e aceleradores de pega, tipo de agregado fino usado, tempo de cura, estado higrométrico do ar, idade do concreto e quantidade de armadura.

A análise da retração é de fundamental importância principalmente no cálculo das estruturas de concreto com variações de comprimento das peças.

e) Durabilidade do cimento endurecido

A durabilidade do cimento endurecido é consequência de reações da combinação hidratada de cal, sílica, alumina e óxido de ferro com outras substâncias. São reações que proporcionam o decréscimo da resistência do cimento e a dissolução de sua coesão.

A degradação do concreto pode ser causada pela:

- Ação da água pura ácida com pH igual ou inferior a 6,3.
- Ação de ácidos como o gás carbônico dissolvido na água da chuva que pode produzir o carbonato de cálcio (dependendo da concentração do anidrido carbônico); ácidos minerais fortes como o clorídrico, o sulfúrico que pode facilitar o aparecimento de sais de cálcio, alumínio e ferro; ácidos minerais fracos como o ácido carbônico que pode formar sais com a cal; Os ácidos orgânicos como o fórmico, acético e lático apresentam uma elevada influencia na ocorrência da lixiviação, ele formam sais de cálcio solúveis que provocam a dissolução do concreto.
- Ação dos sais como o de magnésio (sulfato, cloreto) que reagem dissolvendo o hidróxido de cálcio e formando uma pasta pouco coesa;
- Ações de óleos e de graxas são verificadas quando na composição dos mesmos existem ácidos livre que reagem e formam sais de cálcio.

Segundo Lapa (2008) a lixiviação também causa danos estéticos, o material lixiviado em contato com o CO₂ do ar produz uma crosta branca de carbonato de cálcio na superfície.

Algumas eflorescências (crosta) podem ser retiradas com a utilização de uma escova dura com ou sem água. O concreto bem dosado, bem compactado apresenta uma boa resistência à ocorrência de lixiviação. Existem algumas eflorescências que necessitam de um processo de remoção com a utilização de soluções diluídas de ácido. Lapa (2008) cita que este processo dever ser realizado em quatro etapas:

- Saturar a superfície de concreto com água pura evitando a absorção da solução ácida;
- Aplicar a solução em pequenas áreas, no máximo 0,5 m²;
- Depois de cinco minutos escovar a inflorescência com escova dura;
- E por último lavar o local tratado com água pura imediatamente;

A reação álcali-sílica surge da combinação dos álcalis do cimento com a sílica reativa dos agregados, gerando a formação de um gel expansivo ao redor dos agregados. A substância envolve o agregado com uma membrana semipermeável que permite o surgimento de pressões osmóticas. A quantidade de álcalis no cimento, a forma como é liberado do cimento, a relação K₂O/Na₂O, a granulometria do agregado, a dosagem do concreto e a reatividade do agregado intensificam a ocorrência da reação álcali-agregado. O uso da pozolana no cimento tem contribuído para o não aparecimento da membrana semipermeável, não permitindo que os álcalis fiquem concentrados na superfície.

2.3 ADITIVOS E ADIÇÕES

2.3.1 Definição

São substâncias somadas ao concreto com a finalidade de incrementar ou diminuir algumas características apresentadas pelo mesmo. A Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil (ABESC) define os aditivos como produtos químicos adicionados à mistura do concreto e/ou argamassa antes ou durante a mistura, com a função de melhorar as suas características tanto no estado fresco como no estado endurecido. A NBR 11768 acrescenta que a quantidade não deve ser superior a 5% da massa de material cimentícia.

2.3.2 Tipos de aditivos

Normalmente são classificados por sua função principal. A IBI classifica os aditivos como segue:

a) Aditivos de ação física

a.1) Redutor de água – plastificante

Reduz a água sem modificar a consistência do concreto em estado fresco; modifica a consistência do concreto sem reduzir a quantidade de água ou pode produzir uma redução da água juntamente com a modificação da consistência do concreto e subdivide em:

- Plastificante retardador;
- plastificante acelerador e
- Apenas plastificante.

São produzidos a partir de lignossulfonatos, ácidos hidróxi-carboxílicos ou polímeros hidroxilados (tensoativos orgânicos). Este tipo de aditivo reduz o coeficiente de atrito dinâmico entre a fase líquida e os materiais sólidos em suspensão e em conjunto com a característica tixotrópica do gel de cimento resulta em plasticidade. Substâncias tensoativas são responsáveis pela redução da tensão superficial da água aumentando a área de contato e o poder de penetração no gel do cimento. Essa reação, também, dispersa o agregado miúdo que aumenta a superfície do cimento em contato com a água proporcionando uma melhor hidratação.

São aplicados, normalmente para:

- Aumentar a resistência mecânica, impermeabilidade, durabilidade;
- Diminuir a retração, fissura e exsudação;
- Garantir a proteção e aderência da armadura;
- Melhor adensamento, bombeamento e aspecto no caso do concreto aparente e
- Diminui o consumo de aglomerante.

a.2) Alta redução de água – superplastificante tipo I

Apresenta as mesmas características do aditivo plastificante só que em um nível mais elevado. Proporciona uma elevada redução de água, eleva consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto. Também apresenta a mesma subdivisão do aditivo plastificante.

a.3) Alta redução de água – superplastificante tipo II

O aditivo superplastificante II eleva um pouco mais a redução de água e a modificação na consistência do concreto. Também apresenta a mesma subdivisão do aditivo plastificante.

a.4) Aditivo incorporador de Ar

Permite a incorporação de uma quantidade controlada e uniformemente distribuída de pequenas bolhas. São constituídos de elementos como ácido abiético, alquil-arilsulfonatos, sais de ácidos graxos, entre outros (tensoativos iônicos). A introdução de pequenas bolhas de ar aumenta a impermeabilidade do concreto pois formam alvéolos separados nos capilares formados pela evaporação da água. As pequenas bolhas fazem o papel do agregado fino que apresenta uma curva granulométrica contínua que cobre a zona da areia fina. Concreto aditivado com incorporador de ar resiste ao ataque dos sulfatos como o sulfato de magnésio contido na água do mar.

Alguns fatores que influenciam a quantidade do volume de ar incorporado são:

- Quantidade de finos na mistura;
- Proporção de água na mistura e
- Temperatura.

O volume de ar incorporado apresenta uma relação inversa a resistência à compressão, ou seja, maior o volume de ar incorporado menor a resistência à compressão. A Figura 2.10 apresenta o gráfico da relação entre o ar incorporado e a resistência à compressão do concreto.

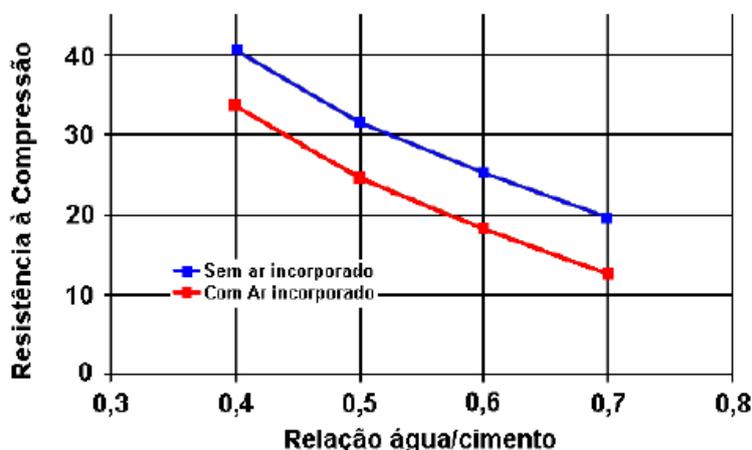


Figura 2.10 – Relação entre a incorporação de ar e a resistência à compressão (FREITAS JR., 2013).

b) Aditivos de ação química

b.1) Aditivo acelerador de pega

São produzidos a partir de cloreto de cálcio, silicato, carbonato de cálcio e aluminato, formiato de cálcio, trietanolamina, entre outros. Estes aditivos auxiliam na dissolução da cal e da sílica nos silicatos e da alumina nos aluminatos acelerando as reações iniciais de hidratação e endurecimento do concreto. Caso este aditivo seja a base de cloreto de cálcio, existem limitações de quantidade adicionada devido a possibilidade de desenvolvimento de corrosão da armadura. São utilizados quando:

- Existe a necessidade de utilizar o concreto em curto prazo;
- É necessário a obtenção de altas resistências nas idades iniciais;

c) Aditivos de ação físico-química

c.1) Aditivo retardador de pega

Desacelera as reações químicas que levam o concreto do estado fresco para o estado endurecido. Dificultam e bloqueiam temporariamente a dissolução de cal dos silicatos e aluminatos. Normalmente utilizados para:

- Maior tempo para manuseio do concreto;
- Evita trincas térmicas;
- Aumenta a resistência mecânica e
- Diminui a permeabilidade.

Em dosagens elevadas pode surgir no concreto fissuras, esfarelamento superficial, queda na resistência. O efeito do aditivo cresce geometricamente com o aumento da dosagem.

c.2) Aditivo impermeabilizante

São compostos de sais orgânicos que reagem com a cal livre do cimento, materiais hidrófugos e geis orgânicos e inorgânicos que aglutinam-se em contato com a água e reduz a seção dos capilares. Estes materiais podem ser utilizados juntos com a finalidade de obstruir e hidrofugar os poros da argamassa.

c.3) Expansores

É formado pela combinação de aluminatos ou sulfoaluminatos com plastificantes. Reagem liberando hidrogênio que forma bolhas e o plastificante mantém a resistência e facilita a introdução das argamassas em locais de difícil acesso.

2.3.4 Aditivos especiais

Segundo o Manual de Aditivo da IBI existem ainda os aditivos especiais que são:

- Modificadores de viscosidade;
- Inibidores de corrosão;
- Redutores de permeabilidade capilar;
- Retentores de água
- Aceleradores para concreto projetado
- Redutores para reação álcali-agregado
- Preparação de concreto extrusado e vibro-prensado;
- Controladores de hidratação e
- Redutores e compensadores de retração por secagem.

2.3.4 Cálculo da dosagem do aditivo

O cálculo pode ser feito em termos da massa ou volume do aditivo. Em termos da massa do aditivo o cálculo é feito sobre a massa total do aglomerante utilizado no concreto.

A dosagem do aditivo, em dosagem percentual sobre o peso do cimento (% s.p.c) é dado pela Equação 2.5

$$\text{Dosagem}(\%s.p.c) = \frac{\text{massa do aditivo(kg)} \times 100}{\text{massa do cimento(kg)}} \quad (2.5)$$

Para o cálculo da dosagem do aditivo em termos de volume é utilizada a Equação 2.6:

$$\text{Dosagem}(\%s.p.c) = \frac{[\text{massa específica (kg/l)}] \times [\text{volume do aditivo(l)}] \times 100}{\text{massa do cimento(kg)}} \quad (2.6)$$

2.3.5 Compatibilidade

Quando existe uma compatibilidade entre o aditivo e o concreto os resultados esperados são alcançados. Há situações em que é necessária aplicação de mais de um tipo de aditivo como por exemplo o concreto utilizado nas hidrelétricas em que se emprega aditivos retardadores/plastificantes em conjunto com incorporadores de ar.

Em alguns casos, mesmo que o aditivo esteja conforme as especificações, ocorrem alguns problemas (incompatibilidade) que são ocasionados pela interação entre o aditivo e os materiais que compõem o concreto. Nestes casos os resultados não são os esperados com a aplicação do aditivo. A incompatibilidade pode causar perda rápida de trabalhabilidade, aceleração ou retardo de pega excessivos, incorporação excessiva de ar, alteração no ganho de resistência mecânicas, entre outras. A Tabela 2.15 relaciona alguns dos problemas que podem ser encontrados no concreto fresco com a aplicação de aditivos.

Tabela 2.15 – Problemas de incompatibilidade entre o aditivo e o concreto.

	Menor redução de água que o esperado	Perda acelerada de abatimento	Menor tempo de pega que o esperado	Maior tempo de pega que o esperado	Excessiva incorporação de ar	Segregação
Variação na composição química do cimento						
Aumento da finura do cimento						
Variações das características dos agregados						
Variação na proporção dos agregados						
Materiais de elevada temperatura						
Aumento da temperatura ambiente						
Diminuição da temperatura ambiente						
Quantidade de insuficiente de aditivo						
Excesso de aditivo						

2.3.6 Adições minerais

São materiais silicosos moídos a pó que produzem algumas características desejadas no concreto (FREITAS JR., 2013). A Tabela 2.16 mostra como se subdividem as adições minerais.

Tabela 2.16 – Subdivisões das adições minerais (METHA e MONTEIRO, 2008).

Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa
	Metacaulim
	Cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio
	Argila calcinadas
	Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes	Calácio, pó de cálcio, pó de pedra

O diferencial entre aditivos e adições são as alterações que os aditivos provocam nas características do cimento enquanto que as adições somam ou substituem parcialmente o cimento.

a) Pozolânicas

Produz reações que fixam o hidróxido de cálcio. A cinza volantes de baixo teor de cálcio, pozolana natural, materiais vulcânicos, argilas calcinadas, entre outros, são exemplos de adições minerais pozolânicas. Sua utilização aumenta a impermeabilidade e melhora a durabilidade do concreto. Tipos:

- Pozolanas comuns: pozolona naturais e cinzas volantes;
- Pozolanas altamente reativas: sílica ativa e cinza de casca de arroz;

b) Cimentantes

Reação química resultante da hidratação de silicato com a água. A escória granulada de alto forno é um exemplo de adição mineral cimentante. Alguns materiais produzem reações tanto pozolânicas quanto cimentantes como é o caso das cinzas volantes com alto teor de cálcio (*fly ash*).

c) Inertes

Materiais carbonáticos, praticamente não produzem reações na mistura e o seu diâmetro é similar ou menor que o cimento. O filler é um exemplo de adição mineral inerte. O filler contribui com o fechamento da mistura, pois preenche os vazios entre os agregados graúdo e os agregados miúdo.

3 MICROESTRUTURA DO CONCRETO

3.1 DEFINIÇÃO

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes nos sólidos constituem a sua microestrutura. As características e propriedades dos materiais depende, significativamente, da microestrutura interna do mesmo. Este é um fato que torna necessário o conhecimento da microestrutura dos materiais. A alteração na microestrutura proporciona alteração na característica e na propriedade dos materiais.

3.2 COMPLEXIDADE

O concreto é um elemento que apresenta uma microestrutura muito complexa e heterogênea. Definir um modelo que consiga representar fielmente o seu comportamento ainda não é possível, mesmo que as relações microestrutura-propriedade seja o foco da ciência dos materiais. O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil e suas características, como a resistência, a elasticidade e a retração, entre outras, devem ser acompanhadas com atenção, afim de que a qualidade da edificação seja preservada.

Observando o concreto, a olho nu, verifica-se dois materiais distintos, o agregado espalhado em uma pasta de cimento como mostra a Figura 3.1a. Com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (Figura 3.1b) pode-se observar uma estrutura de pasta bem diferente, dependendo do grau de da hidratação.



Figura 3.1 – Agregado espalhado em uma pasta de cimento (a). Microestrutura da pasta (b) (METHA e MONTEIRO, 2008).

Mehta e Monteiro (2008) resumem as características singulares da microestrutura do concreto assim: uma zona de transição na interface pasta/agregado, que representa uma pequena região próxima às partículas de agregado graúdo, a qual é geralmente mais fraca; uma fase de agregado que apresenta caráter multifásico, onde se verificam vários minerais, microfissuras e espaços vazios em cada partícula do agregado; e a pasta de cimento cuja microestrutura se modifica com o tempo, com a umidade e com a temperatura ambiental.

A microestrutura do concreto é complexa e heterogênea, o que dificulta a formulação de modelo para representá-lo. Como sugerem Mehta e Monteiro (2008) uma forma de prever o comportamento do concreto é conhecer de forma ampla as características da microestrutura de cada componente.

3.2.1 Microestrutura da fase agregado

O agregado contribui com 80 a 90% do volume do concreto. Sua forma física influencia mais do que as suas características químicas na massa unitária, no módulo de elasticidade, condutibilidade térmica e na estabilidade dimensional do concreto. Ou seja, a formação química ou mineralógica das fases sólidas no agregado não é tão importante quanto as características físicas como o volume, o tamanho e a distribuição dos poros (METHA E MONTEIRO, 2008).

A porosidade do agregado interfere na absorção de água da pasta pois ele absorve a água e deixa a região de aderência do agregado com a pasta seca. Agregados naturais como a

areia e os seixos rolados tem superfície arredondadas, lisas e com pouca porosidade (FREITAS JR., 2013). As Figuras 3.2 e 3.3 mostram exemplos de agregados.



Figura 3.2 – Seixo rolado com superfície polida e pouco porosa.



Figura 3.3 – Argila expandida apresenta maior porosidade que o seixo rolado e menor densidade.

Outro fato que justifica a preocupação com a forma do agregado é que quanto mais alongada e achatada for a forma do agregado maior será a probabilidade do acúmulo de filme de água sob a partícula, o que enfraquece a zona de transição pasta-agregado. A rugosidade do agregado também deve ser observada uma vez que o nível de rugosidade do agregado aumenta a superfície específica e a aderência com a pasta, e além de modificar a trabalhabilidade do concreto. A Figura 3.4 apresenta um resumo das características do agregado que influenciam o comportamento do concreto.

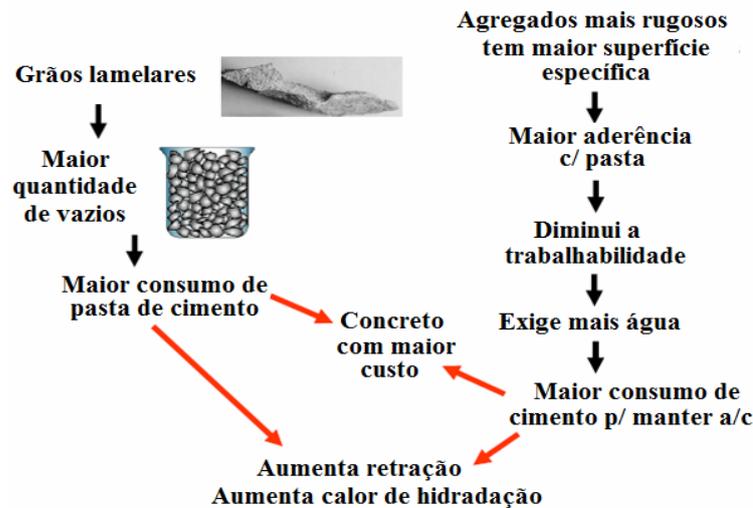


Figura 3.4 - Características do agregado que interferem no comportamento do concreto (FREITAS JR., 2013).

3.2.2 Microestrutura da fase pasta de cimento hidratada

A pasta de cimentos, segundo Metha e Monteiro (2008), é o resultado das reações químicas entre os compostos do clínquer com a água. Metha e Monteiro (2008) definem o clínquer como sendo um composto, heterogêneo, produzido por várias reações químicas entre o óxido de cálcio, a sílica, a alumina e o óxido de ferro quando expostos a altas temperaturas. A Figura 3.5 mostra um modelo de uma pasta de cimento bem hidratada.

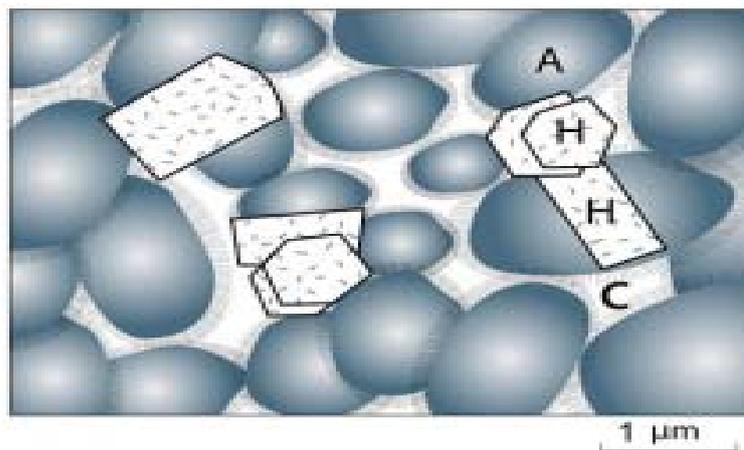


Figura 3.5 – Esquema de uma pasta de cimento Portland bem hidratada (SOUZA, 2011).

Na Figura 3.5 as regiões cinzas (A) são os aglomerados de partículas de C-S-H. Os espaços entre as mesmas, de cor branco, representam os vazios capilares (C) e os polígonos pontilhados (H) representam os cristais de hidróxido ou de sulfoaluminatos (SOUZA, 2011).

Freitas Jr. (2013) resume em três estágios a hidratação do cimento. No primeiro estágio o contato da água com os grãos de cimento aumenta a concentração de álcalis solúveis (Na^{2+} , K^{2+} e Ca^{2+}), SO_4^{2-} e íons OH^- , o que muda o pH para um intervalo entre 12 a 13. No segundo estágio, em poucos minutos, o álcalis, o SO_4^{2-} e íons OH^- reagem com os silicatos e aluminatos para formar gel de C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) e etringita que são cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Nesta fase o gel de C-S-H e a etringita cobrem os grãos de cimento não hidratado, retardando novas hidratações facilitando a trabalhabilidade do concreto. Neste momento o concreto deve ser lançado e assentado. No terceiro estágio a concentração de íons Ca^{2+} continua a aumentar, proporcionando uma lenta hidratação dos grãos de cimento envoltos pelo gel e pela etringita. Quando a concentração de Ca^{2+} chega ao seu ápice, juntamente com a precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a hidratação dos grãos de cimento ocorre com rapidez e produz-se mais gel de C-S-H e etringita. O que ocorre é que os cristais formados passam a substituir os espaços vazios deixados pela água e pelos grãos de cimento. A formação de gel de C-S-H e o intertravamento das partículas promovem a pega e o endurecimento do concreto.

A Figura 3.6 mostra alguns dos diversos cristais encontrados na pasta de cimento Portland hidratada.

Estruturas Fibrilares:
C-S-H

Estruturas Prismáticas:
C-H

Etringita: $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{32}$

Monossulfato: $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}.\text{H}_{18}$

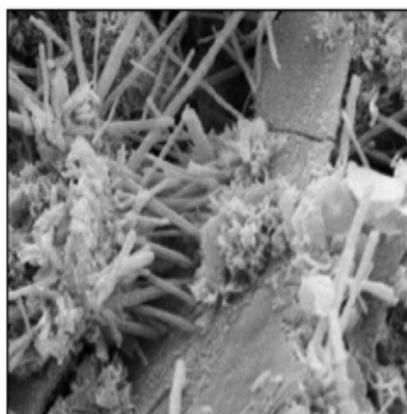


Figura 3.6 – Cristais observados na pasta de cimento Portland hidratada (METHA E MONTEIRO, 2008).

O gel de C-S-H é responsável por compor de 50 a 60% da fase sólida da pasta de cimento hidratada e para Souza (2011), configura a fase sólida mais representativa na determinação das propriedades da microestrutura. Na literatura não há um consenso. Alguns defendem que a matriz do C-S-H é homogênea por ser composta por dois tipos de C-S-H. Outros defendem que é heterogênea devido ao fato do material apresentar diferentes fases. Para Costa et al. (2009) os compostos hidratados de C-S-H constituem a fase ligante mais

importante da pasta cimentícia. Segundo Metha e Monteiro (2008) a estrutura interna do C-S-H ainda é indefinida, mas vários modelos têm sido propostos para explicar as propriedades dos materiais. A Figura 3.7 mostra a estrutura do C-S-H.

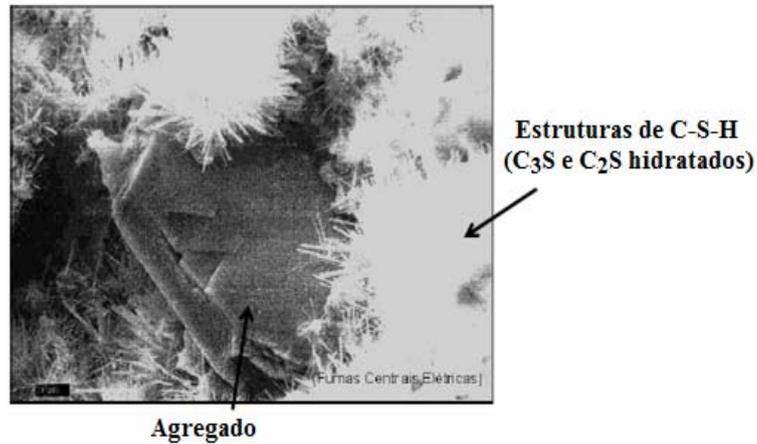


Figura 3.7 - Estrutura do C-S-H (FURNAS, 2013).

O hidróxido de cálcio (CH), chamado também de portlandita, contribui com 20 a 25% da fase sólida da pasta de cimento hidratada. Este material possui uma estrutura interna diferentemente do C-S-H. Apresenta cristais de grande tamanho e de formas hexagonais, porosos e de baixa resistência mecânica que depende do espaço disponibilizado, da temperatura, do grau de hidratação e das impurezas presentes no ambiente para definirem seus tamanhos. Em comparação com C-S-H, segundo Metha e Monteiro (2008), a potencial contribuição do CH à resistência da pasta é limitada devido à área superficial ser significativamente mais baixa. A Figura 3.8 mostra cristais de hidróxido de cálcio nas formas de dendrítica e em placas.

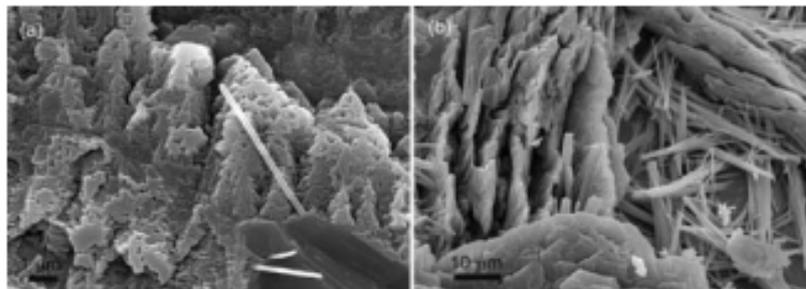


Figura 3.8 – Morfologia típicas de cristalização de hidróxido de cálcio com 28 dias de hidratação: (a) dendrítica e (b) em placas (COSTA et al. 2009).

O sulfoaluminato de cálcio complementa a parte sólida da pasta com uma porcentagem de 15 a 20%. São cristais em formato de agulhas (formação de trissulfoaluminato hidratado - Etringita) que se decompõem em monossulfato (cristais de placas hexagonais) apresentando um nível alto de porosidade com baixa resistência mecânica. Segundo Metha e Monteiro (2008) a presença do monossulfato hidratado torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfato. Figura 3.9 mostra cristais de etringita e monossulfato hidratado.

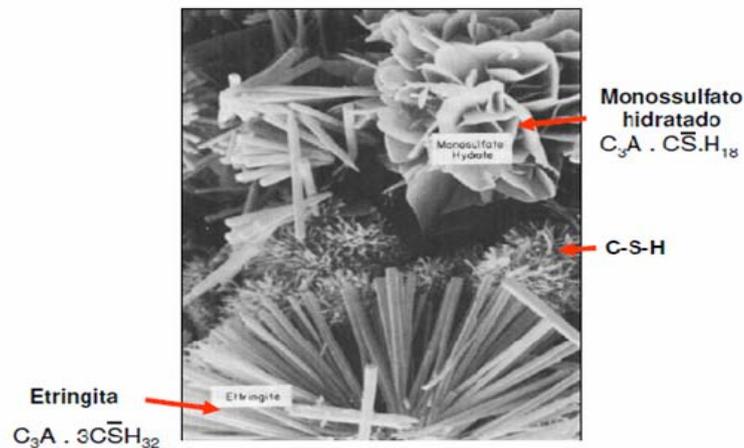


Figura 3.9 - Formação de cristais de etringita e de monossulfato hidratado (METHA e MONTEIRO, 1984).

O formato dos cristais da etringita tendem a acumular água, causando uma falsa pega e prejudicando a trabalhabilidade do concreto. Para terminar com a parte sólida da pasta tem-se os grãos de clínquer não hidratados. Mesmo depois de um grande período é possível encontrar grãos de clínquer na pasta. Para Metha e Monteiro (2008) este fenômeno ocorre devido ao limitado espaço disponível entre as partículas que o produto hidratado forma uma cobertura entorno dos grãos de clínquer em hidratação. Esta cobertura dificulta a hidratação total do grãos de clínquer, principalmente dos grãos maiores. Na Figura 3.10 é possível visualizar alguns grãos de clínquer não hidratados.

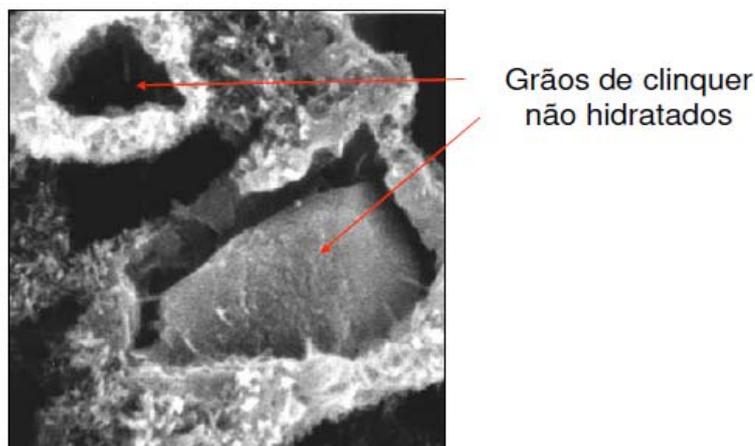


Figura 3.10 – Grãos de clínquer não hidratados (FREITAS JR., 2013).

3.2.3 Vazios na pasta de cimento hidratada

Metha e Monteiro (2008) simplificam assim a distribuição dos vazios encontrados na pasta de cimento: a porosidade da estrutura do gel de C-S-H, que não influenciam na resistência da pasta devido ao seu tamanho; os vazios capilares que representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da hidratação do cimento; e o ar incorporado que devido ao seu tamanho influenciam na resistência do concreto.

Os vazios observados na porosidade do gel de C-S-H não influenciam a resistência do concreto mas quando são ocupados com água (nas pontes de hidrogênio, por exemplo) e a água é removida destes vazios, ocorrendo o fenômeno de retração por secagem e fluência.

O tamanho dos vazios capilares dependem da distância entre as partículas do cimento e do grau de hidratação, ou seja, existe uma relação direta entre o tamanho dos vazios capilares e a relação água/cimento. De acordo com Metha e Monteiro (2008) em pastas bem hidratada com baixa relação água/cimento o tamanho dos vazios capilares podem variar de 10 a 50 μ m e em pastas bem hidratadas com alta relação água/cimento o tamanho dos vazios variam de 3 a 5 μ m. Em vazios maiores a saída de água causa retração e em vazios menores a saída da água proporciona uma maior retração. A Figura 3.11 mostra uma seção de concreto com vazios capilares.

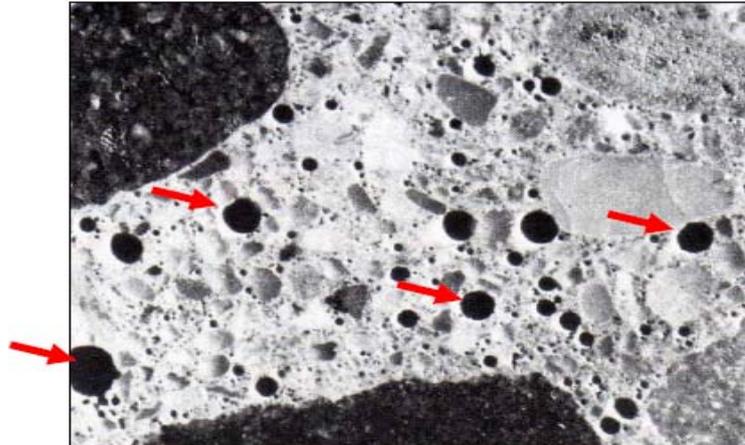


Figura 3.11 – Vazios capilares provocados pela água que sobra da relação a/c (HERVÉ NETO, 2008).

O ar incorporado, normalmente é formado quando ocorre a mistura do concreto com a água e pode, também, ser introduzido com o auxílio de aditivos. De acordo com Silva et. al. (2009) a introdução de ar na pasta cimentícia melhora a trabalhabilidade do concreto e das argamassas, possibilitando a redução da quantidade de água na mistura destes materiais, mas, em contra partida, caso não se reduza a relação a/c, as resistências mecânicas diminuem. Os vazios de ar aprisionado no momento da mistura pode chegar a 3mm e os induzidos por aditivos variam de 50 a 200 μ m (METHA e MONTEIRO, 2008). Na Figura 3.12 observam-se bolhas de ar aprisionadas em forma esférica e bem maior que os vazios capilares.

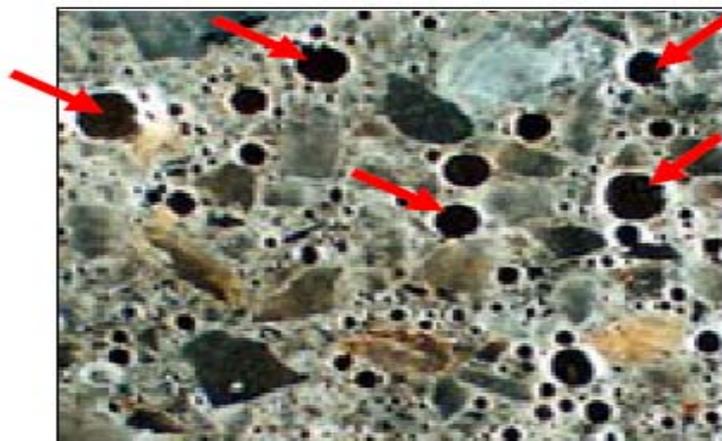


Figura 3.12 – Ar aprisionado durante a mistura do concreto (HERVÉ NETO, 2008).

3.2.4 Água na pasta de cimento hidratada

Metha e Monteiro (2008) classificam a água em relação a sua dificuldade ou facilidade de ser removida da pasta. A água acumulada nos vazios capilares maiores de $50\mu\text{m}$ é chamada de água livre. A remoção da água em vazios capilares menores que $50\mu\text{m}$ podem causar retração do sistema. A água adsorvida é encontrada próxima à superfície dos sólidos na pasta de cimento. Através de forças de atração as moléculas de água se aderem na superfície dos sólidos na pasta. A água interlamelar está relacionada ao acúmulo de água nos poros no gel C-S-H. A estrutura do gel C-S-H retrai significativamente quando a água interlamelar é retirada. A água quimicamente combinada é a água que compõe a microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento. A Figura 3.13 apresenta um modelo das formas que a água pode existir na pasta de cimento hidratado.

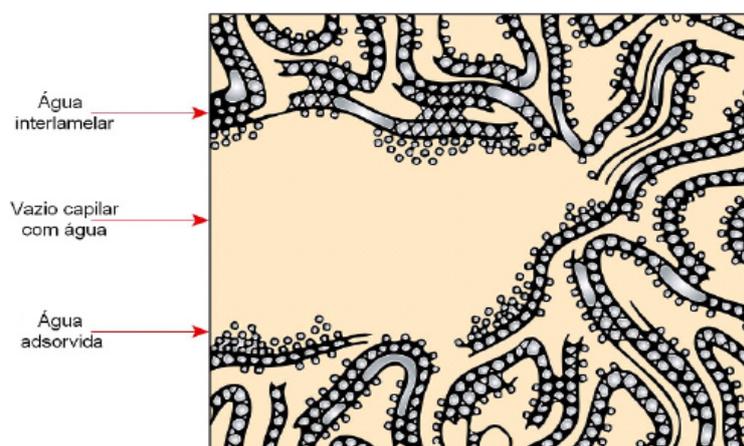


Figura 3.13 – Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratado (FELDMAN e SEREDA, 1970).

3.2.5 Relações entre a microestrutura e a propriedades na pasta de cimento hidratada

Na engenharia se pressupõe que o concreto apresente características de resistência, estabilidade e durabilidade compatíveis com o que foi projetado. Estas características dependem das propriedades da pasta de cimento hidratada. Metha e Monteiro (2008) afirmam que os pequenos cristais de C-S-H, sulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, que apresentam grandes áreas superficiais e com propriedades adesivas, são os principais responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. Estes cristais quando hidratados apresentam a característica de se aderir fortemente tanto entre si quanto com os grãos de clínquer e partículas de agregado miúdo e graúdo. A resistência apresenta uma relação inversa com nível de porosidade da pasta, ou seja, quanto menos poros grandes a

pasta de cimento hidratada apresenta maior será sua resistência. Quanto maior a quantidade de gel de C-S-H e menor a concentração de CH mais resistente é a pasta de cimento hidratada. Isso porque o hidróxido de cálcio apresenta uma baixa resistência quando comparado com o silicato de cálcio.

4 PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM PISO INTERTRAVADO

4.1 INTRODUÇÃO

Segundo Virgiliis (2009) a França foi à precursora da utilização da pavimentação permeável no final dos anos 40. Só nos anos 70 o Japão, os Estados Unidos, a Suécia e a própria França passaram a estudar o uso desta estrutura e aplicá-la em pequena escala.

A pavimentação drenante apresenta também a vantagem de filtrar a água da chuva, de resíduos sólidos, reduzindo a contaminação do solo, reduz o ruído de tráfego de veículos, a resistência a derrapagem melhora, redução de custos com a redução dos condutos e bocas de lobo e valor estético. Conforme a cartilha da Associação Brasileira do Concreto Portland - ABCP a pavimentação utilizando material permeável apresenta uma infiltração de água ainda melhor que áreas urbanas não pavimentadas, pois nas mesmas, normalmente, o solo é compacto o que dificulta a infiltração da água.

Além de minimizar a ocorrência das enchentes podemos citar outras vantagens da utilização da pavimentação drenante como a infiltração que abastece os lençóis freáticos, o armazenamento da água (pluvial) para sua utilização em outras atividades, a redução da fusão das águas residuais com as de superfície e redução de investimento em sistemas de drenagem.

Este tipo de pavimentação também apresenta algumas desvantagens, o pavimento de concreto poroso é sensível à compactação e entupimento da superfície. A manutenção não é simples, não é possível fazer a limpeza dos espaços vazios da superfície com apenas um varrimento ou com lavagem sob pressão. O ideal é substituir a camada de placa de concreto poroso em média a cada oito anos. Em países em que o inverno é rigoroso, o concreto poroso, geralmente, possui uma temperatura menor que o concreto convencional e que no inverno tende a formação de gelo. Este fato pode tornar indesejável sua instalação em áreas de estacionamento (JAMES E VON, 2003).

Com desenvolvimento de novas tecnologias e a aplicação de materiais mais adequados os pavimentos permeáveis mostram um melhor desempenho hidráulico e uma estrutura mais duradoura e confiável.

A pavimentação permeável não deve ser implantada em áreas que possuem o risco de vazamentos, segundo Silveira (2003) está é uma ressalva que deve ser observada, pois existe maior possibilidade de contaminação do lençol freático.

Um material usado em pavimentação permeável é o concreto poroso. O concreto poroso é produzido com agregado graúdo e com pouco ou sem agregado fino o que gera vazios utilizados no escoamento da água.

4.2 REQUISITOS DO PROJETO

O dimensionamento é realizado conforme o tráfego, onde serão levadas em conta as cargas aplicadas no mesmo. O sistema de fundação do pavimento é definido de acordo com o tipo do solo. Para a implantação das camadas é necessário especificar suas espessuras, determinar o grau de compactação, verificar a declividade do terreno e os materiais a serem utilizados.

Para o dimensionamento e especificação do piso intertravado são observadas às características das peças de concreto quanto a resistência à compressão, à abrasão e aos agentes agressivos. A paginação do assentamento é executada conforme a estética desejada. O sistema de contenção para o projeto deve atender as condições necessárias para o intertravamento das peças.

4.3 PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece os requisitos e os métodos de ensaio para produção de peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos automotores e áreas de armazenamento de produtos. A determinação da resistência características à compressão deve atender as especificações mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resistência característica à compressão.

Solicitação	Resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestre, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículo especial e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

4.3.1 Características das peças de concreto para pavimentação intertravada

A resistência à compressão (em MPa) é obtida através da divisão da carga de ruptura (em N) pela área de carregamento (em mm²), o resultado deve ser multiplicado pelo fator “ ρ ” (Tabela 4.2) em função da altura da peça.

Tabela 4.2 – Fator de multiplicativo ρ .

Espessura nominal da peça (mm)	ρ
60	0,95
80	1,00
100	1,05

4.4 IMPLANTAÇÃO DO PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM PISO INTERTRAVADO

Os requisitos para execução do piso intertravado é determinado pela norma NBR 15953. Pavimentação composta por camadas seguida por uma camada de revestimento composta por peças de concreto sobreposta em uma camada de assentamento e com as juntas preenchidas com material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é garantido pela contenção.

4.4.1 Coeficiente de permeabilidade do solo

Quando da instalação da pavimentação permeável alguns dados devem ser conhecidos para garantir a sua viabilidade. Dados como o coeficiente de permeabilidade do solo que é utilizado para dimensionar a camada de base do pavimento permeável. O coeficiente de permeabilidade é determinado através de ensaios descritos na norma NBR 13292 para solos granulares à carga constantes e na norma NBR 14545 para solos argilosos à carga variável. A Tabela 4.3 apresenta alguns valores típicos de coeficientes de permeabilidade de solos.

Tabela 4.3 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (PINTO, 2002).

Tipos de Solo	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

4.4.2 Camadas da pavimentação permeável com piso intertravado

Para atender corretamente a sua função de pavimentação permeável alguns critérios, de instalação, devem ser seguidos. Dados e especificações devem ser observados em cada

camada para correta instalação da pavimentação permeável. Observe a Figura 4.1 que mostra as camadas, com maior detalhe, da pavimentação permeável.

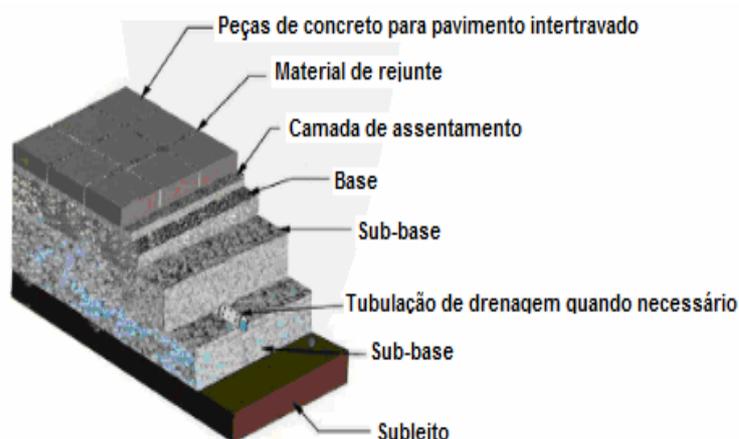


Figura 4.1 - Camadas da implantação da pavimentação permeável (Cartilha ABCP, 2010)

A primeira camada, como mostra a Figura 4.1, é constituída das placas de concreto, também chamada de revestimento. Esta camada pode apresentar três formas diferentes: em uma a placa de concreto poroso possui uma estrutura aberta que permite infiltração da água em toda a sua superfície, outra em que se usam juntas bem largas na instalação das placas de concreto convencional e a terceira e última é caracterizada por placas de concreto com aberturas de drenagem. A escolha do tipo de placa está diretamente relacionada com o local de aplicação da pavimentação permeável. A Figura 4.2 mostra os três tipos de placas, atualmente, utilizadas em pavimentação permeável.

O revestimento normalmente é mais caro, ele é mais resistente, pois distribui os esforços recebidos para as camadas inferiores e deve ter características como aparência e acessibilidade (VIRGILIIS, 2009).

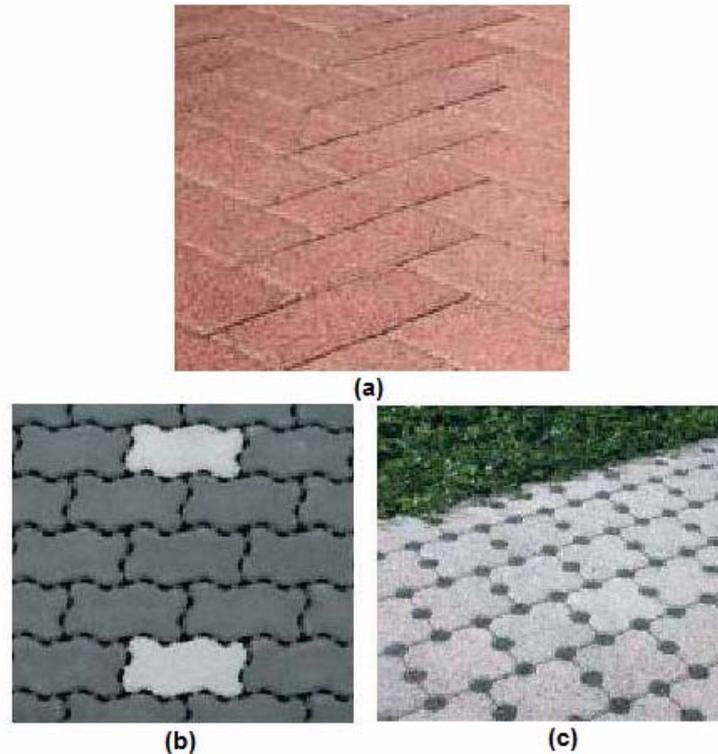


Figura 4.2 - Tipos de placas para estruturas permeáveis. Placas de concreto poroso (a). Placas de concreto com juntas largas (b) e Placas de concreto com aberturas de drenagem (c) (SALES, 2008).

O dimensionamento das camadas para instalação da pavimentação permeável deve começar com a camada de subleito. Esta camada é que receberá todo fluxo de água coletado nas camadas superiores. Segundo Sales (2008) conhecer a permeabilidade do subleito é que torna possível um dimensionamento capaz de atender as necessidades de escoamento da águas na área pavimentada. Quando o coeficiente de permeabilidade da camada de subleito é baixo a água coletada nas camadas superiores deve ser armazenada e encaminhada para solos mais permeáveis ou para sistemas de drenagens artificiais. Pode, também, conduzir a água em um primeiro instante para um reservatório e depois é conduzida e eliminada tranquilamente. Estes reservatórios podem ser chamados de camada ou colchão drenante (VIRGILIIS, 2009).

A Figura 4.3 mostra alguns tipos de reservatórios utilizados.



Figura 4.3 – Tipos de reservatórios. Reservatório nivelado (a). Reservatório com saída lateral utilizando tubos perfurados (b) (VIRGILIIS, 2009).

Requisitos mínimos para implantação do subleito:

- Índice de Suporte Califórnia (CBR) $\geq 2\%$;
- Expansão volumétrica $\leq 2\%$;
- Livre de plantas e raízes;
- Lençol freático abaixo de 1,5 m;
- Caimento mínimo 2% e
- Reforço caso necessário executado conforme NBR 12752.

Nas camadas de base e sub-base além da preocupação com a permeabilidade deve-se acrescentar a questão da capacidade de rolamento. Estas camadas devem ser preparadas para receber a água e suportar cargas como em vias de pedestre, vias para veículos, entre outros. A camada de base incrementa a espessura da estrutura do pavimento e se encarrega de distribuir o carregamento sobre o subleito, a instalação da camada de sub-base é utilizada para aumentar a espessura da estrutura ou para armazenar água (VIRGILIIS, 2009). Para Febestral (2013) o concreto poroso proporciona uma boa combinação entre a capacidade de rolamento e a permeabilidade. O controle da porosidade do concreto com o controle dos níveis de permeabilidade oferece a vantagem da capacidade de rolamento continuar intacta mesmo quando a estrutura encontra-se em estado saturado.

Requisitos mínimos para implantação da base e sub-base:

- Utilizar brita lavada com abrasão *Los Angeles* menor de 40;
- Índice de Suporte Califórnia (CBR) pelo menos 80%;
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios deve ser no mínimo 32%;

A interface entre o subleito e as camadas de base e sub-base pode ser feita de duas maneiras, dependendo da função da pavimentação: quando o objetivo é garantir a infiltração da água e assegurar a não colmatação da estrutura, a interface de ser feita com a implantação de mantas geotêxteis adequadas e quando o objetivo é reter a água, no caso de um reservatório, a interface deve ser executada com o auxílio de geomembranas ou lençóis plásticos de espessura adequada.

As mantas geotêxteis são mantas não-tecidas de filamentos de polipropileno que não impedem a passagem da água. Elas funcionam como um filtro que impedem que partículas de uma camada passem para outra sem interferir no fluxo da água. Segundo Virgiliis (2009) em algumas situações ela pode aumentar a resistência às tensões de deformação. As geomembranas são feitas de plástico resistente e que tem a função de impermeabilizar a

região em que são aplicadas. A Figura 4.4 mostra a aplicação das mantas geotêxteis e da geomembrana.

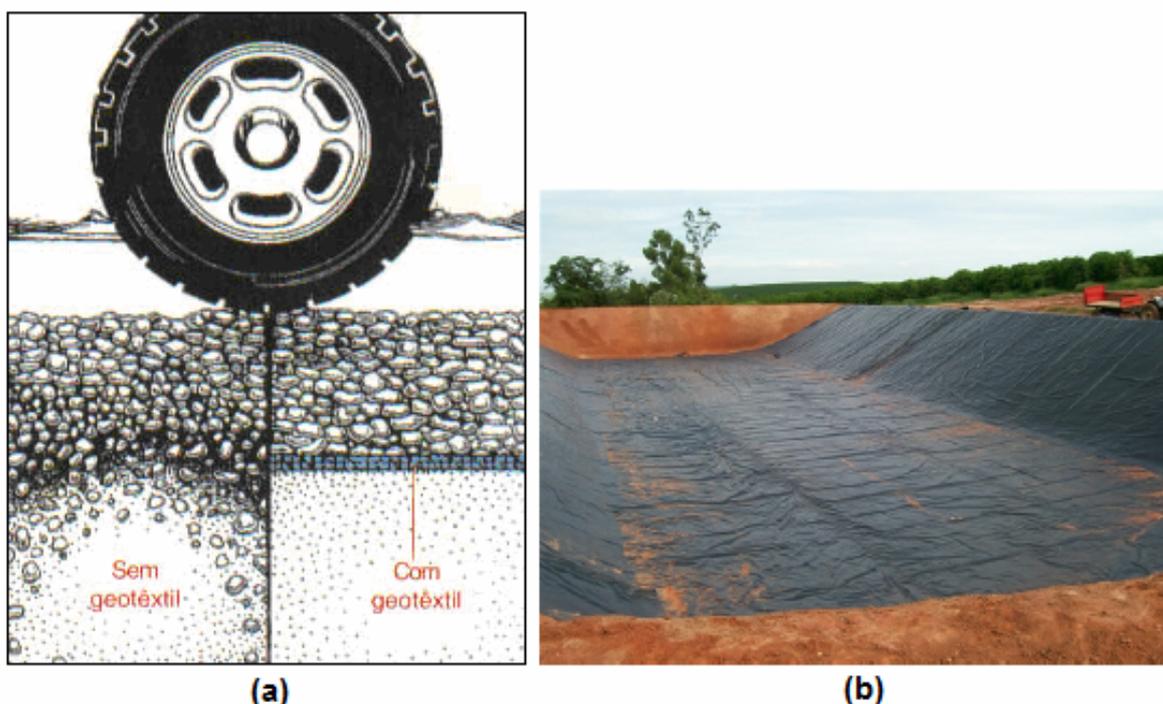


Figura 4.4 – Aplicações das mantas geotêxteis e geomembrana. Aplicação da manta geotêxtil em uma rodovia (a). Reservatório utilizando a geomembrana (b) (MPZ, 2013 e VIRGILIIS, 2009).

Na camada de assentamento deve-se ter uma permeabilidade semelhante a da camada de placas de concreto poroso. Para não ocorrer depressões a instalação da camada deve ser de modo que a mesma não seja carregada pela água. O agregado da camada de assentamento deve possuir dimensões que garantam uma superfície uniforme para o assentamento das peças e um travamento com a camada de base (ABCP, 2012).

Para o rejunte utiliza-se o mesmo agregado da camada de assentamento ou mais fino para preencher melhor as juntas. O material do rejunte dependerá da espessura das juntas entre as peças.

Alem das camadas apresentadas na Figura 4.1 Virgiliis (2009) cita a sobrecamada que é aplicada sobre a camada de revestimento, mais utilizada em rodovias tornando-as mais seguras, sem o efeito da aquaplanagem.

A cartilha da ABCP faz um resumo das observações com relação à implantação da pavimentação permeável:

- A pavimentação deve possuir uma inclinação de no mínimo 1% e no máximo 5% para um bom escoamento da água e nas áreas no entorno a declividade não deve ultrapassar 20%;
- Dados de tráfego no local de implantação;
- A camada de assentamento deve apresentar uma espessura entre 30 e 50 mm e
- Para a camada de base é necessários dados como o tipo de solo, a capacidade de suporte e o coeficiente de permeabilidade.

Todas as observações citadas pela Cartilha a ABCP obedecem ao padrão das Normas Técnicas Brasileiras.

Ainda na implantação da pavimentação permeável deve-se observar o dimensionamento mecânico que se refere à carga em que o pavimento será submetido e o dimensionamento hidráulico que está relacionado ao volume de água que será armazenado. Para viabilizar o dimensionamento hidráulico existem ensaios que permitem obter o coeficiente de permeabilidade do solo. Os ensaios realizados em laboratório são passíveis de controle, mas quando da retirada da amostra sempre ocorre alguma perturbação que pode alterar o seu resultado. Segundo Sales (2008) os ensaios em campo apresentam uma maior representatividade, mas ao mesmo tempo para sua realização é necessário o uso de equipamentos pesados e complicados que resulta em ensaios muito lentos e de alto custo.

5 CONCRETO PERMEÁVEL

5.1 INTRODUÇÃO

O concreto permeável no Brasil ainda pode ser considerado como uma tecnologia recente. No Japão, EUA e Europa o concreto permeável é uma realidade, contando com normas que contribuem para seu desenvolvimento. Batezini (2013) cita as técnicas “*Best Management Practices (BMPs)*” desenvolvidas pela *Environmental Protection Agency (EPA)* como um controle hidrológico alternativo que não é muito usado no Brasil e que consegue amenizar a mudança dos problemas da nascente do rio para a jusante.

Criada nos Estados Unidos da América, a EPA elabora projeto para controle de águas pluviais em escala de bacia e faz uso de estruturas físicas para obtenção de reservatórios, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis para condução equilibrada da água, compensando, assim, os efeitos da urbanização descontrolada (BATEZINI, 2013).

A EPA também é responsável pela criação da certificação *US Green Building Council Leadership in Energy and Environmental Design – LEED*, que valoriza o projeto em que o pavimento permeável é utilizado. Esta certificação é baseada na sustentabilidade, na análise das características de projetos que auxiliam na redução do aquecimento terrestre e que utilizam materiais recicláveis e materiais da região na composição do concreto permeável.

A utilização da pavimentação permeável é uma ação que beneficia o meio ambiente e ainda incrementa a qualidade de vida do homem. Pelo lado econômico, o pavimento permeável, também apresenta vantagens com a redução da construção de sistemas de drenagem de águas pluviais. A prática do concreto permeável permite uma infiltração de até 80% do volume de escoamento anual, e pode filtrar até 65% de partículas que não são dissolvidas e até 95% dos sedimentos no escoamento (EPA).

Um material usado em pavimentação permeável é o concreto permeável. O concreto permeável é produzido com agregado graúdo, água e com pouco ou sem agregado fino o que gera vazios que promovem o escoamento da água. Segundo Batezini (2013) existe a possibilidade de várias combinações, inclusive com aditivos, que proporciona ao concreto um melhor desempenho, maior durabilidade, maior resistência e melhor trabalhabilidade em relação ao concreto permeável convencional. A Figura 5.1 mostra um exemplo de concreto permeável.



Figura 5.1 – Concreto permeável.

As partículas sólidas filtradas e a incrustação de partículas de areia ou solo colaboram com o declínio do índice de permeabilidade do concreto. A condição de entupimento pode ser amenizada com a aplicação de manutenções com intervalo, máximo, de seis meses. Um exemplo de manutenção citada por Batezini (2013) é a limpeza a vácuo que pode recuperar até 90% da permeabilidade do concreto.

5.2 INSUMOS PARA CONCRETO PERMEÁVEL

Apresenta um alto índice de vazios interligados que permite a passagem da água. O concreto permeável é composto por cimento Portland, agregado grosso aberto de graduação uniforme, pouca ou nenhuma quantidade de agregado fino, água e aditivos. Com implantação adequada e manutenções periódicas, incluindo a aspiração da superfície, o concreto poroso pode apresentar uma vida útil mínima de 20 anos.

Conforme Batezini (2013) o concreto permeável pode ser classificado com base em sua resistência mecânica. Assim tem-se um concreto de baixa resistência e alto nível de porosidade utilizado normalmente em aplicações não estruturais. O concreto com alta resistência mecânica e baixa permeabilidade que é empregado em aplicações estruturais, também chamado de concreto permeável estrutural.

A água e os aditivos, na composição do concreto, devem ser controlados com rigorosidade de maneira a se obter uma pasta que envolva as partículas dos agregados com uma camada espessa. Segundo a cartilha da ABCP (2012) quando o concreto poroso é usado em peças pré-moldadas, de acordo com suas dimensões, têm-se duas classificações uma como peça de concreto para pavimentação intertravada e outra como placas de concreto.

Os insumos usados no concreto permeável são os mesmos utilizados para produção do concreto convencional. O que produz os vazios no concreto permeável é a pouca ou nenhuma utilização do agregado miúdo. A quantidade de agregado miúdo depende do tipo de concreto que se deseja. O que se observa é que existe uma relação inversa entre a quantidade de agregado miúdo e o nível de porosidade do concreto. Uma quantidade maior de agregado miúdo na mistura do concreto proporciona uma quantidade menor de poros e uma menor permeabilidade. A Tabela 5.1 mostra algumas proporções de materiais e faixas de consumo típicas nas misturas do concreto permeável.

Tabela 5.1 – Consumos e proporções típicas utilizadas nas misturas de concreto permeável (BATEZINI, 2013).

Materiais	Consumo/Proporção
Ligante Hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado Graúdo (kg/m ³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

5.2.1 Aglomerantes e agregados

Os aglomerantes são os materiais, geralmente pulverulentos, que fomentam a união entre os agregados. O aglomerante mais utilizado é o cimento Portland. Batezini (2013) inclui na lista de aglomerantes materiais suplementares como a cinza volante, escória granulada de alto forno moída e a sílica ativa que além de promover a ligação interfere nas características mecânicas e de durabilidade da mistura final.

A quantidade de cimento utilizado no concreto permeável é a capaz para ligar os agregados sem reduzir a porosidade interligada. Para Sales (2008) esta quantidade proporciona uma porosidade residual elevada e apresenta características de resistência à compressão aceitáveis pelas normas técnicas.

A porosidade do concreto é assegurada pelo uso de agregado graúdo cuidadosamente selecionado sem material fino que preencha os espaços entre os mesmos. Segundo Virgiliis (2009) pode-se usar como agregado materiais como cascalho, pedregulho, pedra britada, resíduo de demolição (RDC), material reciclado de blocos de concreto ou granito em decomposição, desde que a gradação uniforme resulte num volume de vazios de 30 a 40%.

O agregado graúdo deve apresentar uma graduação uniforme (diâmetro único) e que não deve ultrapassar o valor de 19 mm. O que se observa na literatura é um número grande de recomendações sobre o tamanho máximo do grão do agregado graúdo. Quanto maior o diâmetro do agregado graúdo maior será a sua rugosidade do concreto.

Na Figura 5.2 observam-se as curvas granulométricas típicas empregadas na produção do concreto permeável.

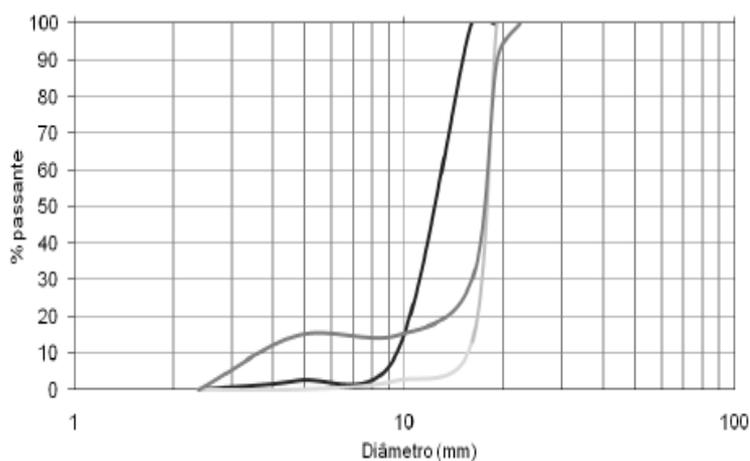


Figura 5.2 – Curvas granulométricas típicas de misturas do concreto permeável (BATEZINI, 2013).

A relação água-cimento deve ser mantida em um valor entre 0,27 a 0,34. O valor desta relação depende do tipo e da quantidade de aditivos utilizados no concreto. O concreto deve apresentar um brilho de umidade sem ficar liquefeito (BATEZINI, 2013).

5.2.2 Aditivos

Os aditivos são introduzidos com o objetivo de aumentar a resistência de agregação das partículas e substituir o uso da água. A introdução dos aditivos melhora a microestrutura e a tensões máximas suportáveis pelo material (SALES, 2008). Estudos realizados em laboratório comprovaram que aditivos a base de polímeros apresentam melhores características que os aditivos convencionais. O uso de aditivos com base de polímeros apresentou um acréscimo de vida à fadiga e uma perda menor de agregados em misturas porosas quando exposto a abrasão e erosão (VIRGILIIS, 2009).

Normalmente são utilizados aditivos redutores de água e retardadores de pega, uma vez que nos concretos o tempo de pega é bem curto. Os aditivos plastificantes e

superplastificantes agem como um dispersor das partículas do cimento impedindo que haja uma aglomeração das partículas e diminui a tensão superficial da água da mistura. O uso do aditivo superplastificantes proporciona um valor baixo para relação água/cimento, resultando em maiores resistências e menos capilaridades, ocorrência que não é bom para o concreto permeável.

5.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL

5.3.1 No estado fresco

Com o valor baixo da relação água-cimento o concreto permeável apresenta uma alta consistência e, como consequência, uma baixa trabalhabilidade em comparação ao concreto convencional. O concreto permeável apresenta, normalmente, um *slump* abaixo de 20 mm (ACI, 2006). A massa unitária é cerca de 70% da massa unitária do concreto convencional e a massa específica varia de 1.300 a 2.000 kg/m³ (BATEZINI, 2013).

O tempo de pega é pequeno o que ocasiona um melhor tempo útil de trabalho. Batezini (2013) menciona que após o acréscimo da água o tempo de trabalho é em torno de uma hora. Nos casos em que se faz o uso de aditivos retardadores esse tempo aumenta para em média uma hora e meia.

5.3.2 No estado endurecido

O concreto permeável, devido aos materiais usados, apresenta uma superfície mais rugosa com um coeficiente de atrito elevado. Observe na Figura 5.3 a diferença visual entre o concreto convencional e o permeável.

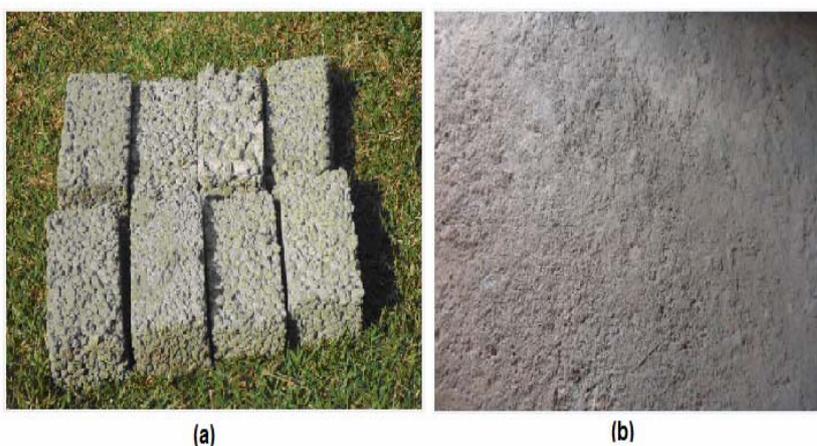


Figura 5.3 – Tipos de concreto. Concreto permeável (a). Concreto convencional (b).

O índice de vazios do concreto permeável depende da proporção relativa de cada material utilizado na mistura, o que também interfere diretamente nas características de resistência mecânica do concreto. É típico dizer que os materiais que apresentam um índice de vazio inferior a 15% são materiais de baixa porosidade e os que apresentam um índice superior a 30% são considerados de alta porosidade.

a) Propriedades mecânicas do concreto permeável

Ao contrário da permeabilidade, a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios do mesmo. A resistência à compressão apresentada pelo concreto permeável é inferior quando comparado ao concreto convencional. Sales (2008) atribui esta inferioridade a falta de agregado miúdo no concreto. O concreto permeável apresenta características irregulares o que, normalmente, dificulta os ensaios de módulo de elasticidade de resistência à tração e torna comuns os estudos de desempenho e comportamento com relação à compressão (BATEZINI, 2013).

b) Medição do coeficiente de permeabilidade

Para que o pavimento permeável desempenhe sua função corretamente a porosidade do concreto deve permitir uma velocidade de infiltração de água e esta velocidade é medida quando se caracteriza o coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.

A medição do coeficiente de permeabilidade do concreto é feita conforme a norma ACI – 522R-06 (2006). As recomendações da ABCP e da ABESC são baseadas na norma do ACI. Normalmente esta caracterização é feita previamente à execução do pavimento.

Marchioni & Silva et al. (2011) cita as seguintes etapas para a caracterização do coeficiente de permeabilidade conforme procedimentos do ACI:

- 1 - Utilização de um permeâmetro (equipamento que mede permeabilidade) de carga variável (conforme Figura 5.4), onde a amostra de concreto poroso é posicionada.

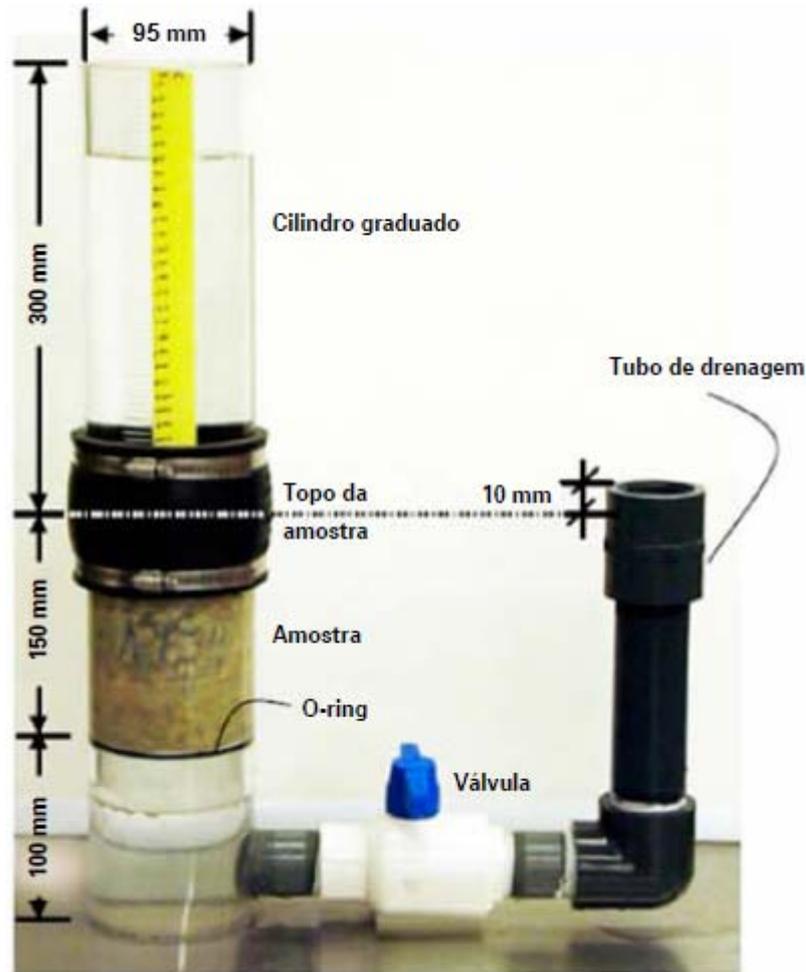


Figura 5.4 - Permeâmetro de carga variável para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável (NEITHALATH et al., 2003)

2 - Após a instalação, o circuito é aberto permitindo-se a passagem de água através da amostra de concreto permeável até o dreno, saturando-a e garantindo a retirada do ar.

3 - Em seguida, o circuito é fechado através da válvula, mantendo-se o nível de água entre a superfície da amostra e o dreno do permeâmetro. Aplica-se uma coluna de água de 290 mm e a válvula é novamente aberta registrando-se o tempo para a coluna d'água descer até 70 mm da superfície da amostra. O procedimento é repetido três vezes para cada corpo de prova e considera-se o tempo médio. O coeficiente de permeabilidade é determinado de acordo com a Lei de Darcy, utilizando a Equação 5.1.

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log\left(\frac{h_i}{h_f}\right) \quad (5.1)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade

A₁ = área da sessão da amostra; mm²

A₂ = área da sessão interna do tubo; mm²

L = comprimento da amostra; mm

t = tempo; s

h_i = altura inicial (290 mm)

h_f = altura final (70 mm)

A norma ACI 522R-06 (2006) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de permeabilidade (K) de $1,40 \times 10^{-3}$ m/s. Valores inferiores a esta referência apresentam permeabilidade muito baixa, dificultando a infiltração de água e reduzindo a vida útil do pavimento. Para Marchioni & Silva et al. (2011) o valor de $K \geq 1,40 \times 10^{-3}$ m/s proporciona um fator de segurança que garante o funcionamento hidráulico por toda vida útil do pavimento, levando em conta que o concreto poroso irá se colmatar ao longo do tempo.

Medição do coeficiente de permeabilidade IN SITU pelo método da ASTM

Para a caracterização do coeficiente de permeabilidade de pavimentos permeáveis já executados utilizam-se o método de ensaio baseado na ASTM C 1701 (2009) – *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Previous Concrete*, ou método de ensaio *IN SITU*.

Marchioni & Silva et al. (2011) cita as seguintes etapas do método:

1. Utilização de um cilindro com diâmetro interno de 30 cm e altura mínima de 20 cm que deve ser posicionado na superfície do pavimento permeável (conforma Figura 5.5).
2. As laterais do cilindro são vedadas com massa de calafetar de modo a evitar perda de água. O método pode ser utilizado para todos os tipos de pavimentos permeáveis já executados.

3. Inicialmente o pavimento é pré-molhado com 3,6 l de água. Se o tempo da pré-molhagem for inferior a 30 s, utiliza-se 18 l de água no ensaio, ou novamente 3,6 L no ensaio, se o tempo de pré-molhagem for superior a 30 s.
4. Tanto na pré-molhagem como durante o ensaio o volume de água deve ser adicionado ao cilindro, mantendo-se um fluxo constante, para tanto, deve-se manter a altura de água dentro do cilindro entre 10 mm e 15 mm.
5. O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Lei de Darcy, segundo Equação 5.2.

$$I = \frac{KM}{D^2t} \quad (5.2)$$

Onde:

I = coeficiente de infiltração (mm/h);

M = massa de água infiltrada (kg);

D = diâmetro interno do cilindro (mm);

t = intervalo de tempo entre adição da água e seu desaparecimento da superfície;

K = constante: 4.583.666.000.

O método também pode ser utilizado para aprovação do pavimento após sua execução e no monitoramento ao longo da utilização do pavimento, podendo ser utilizado para definir a necessidade de limpeza e manutenção:

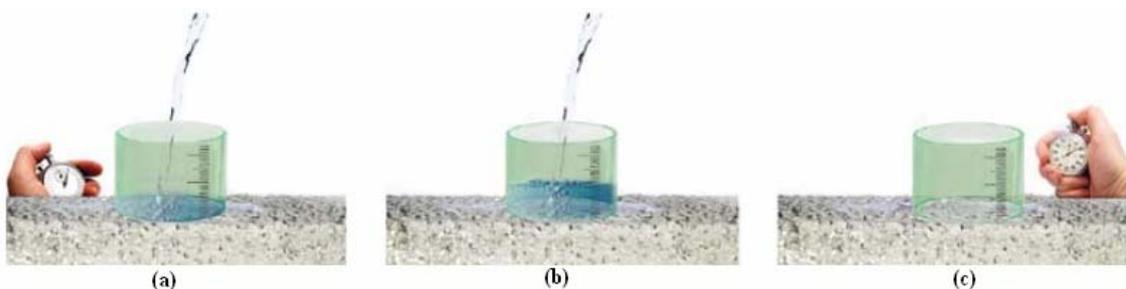


Figura 5.5 - Esquema para medição de coeficiente de permeabilidade *in situ*. Acione o cronômetro assim que a água atingir o pavimento (a). Durante o ensaio mantenha o nível de água uniforme de acordo com a marcação do cilindro (b). Pare o cronômetro quando toda a água foi infiltrada no pavimento (c) (MARCHIONI et al., 2013).

Como pode ser observado na Figura 5.6 o índice de vazios e a condutividade hidráulica do concreto permeável apresentam uma relação direta, ou seja, quanto maior o índice de vazios maior será o valor do coeficiente de permeabilidade do concreto.

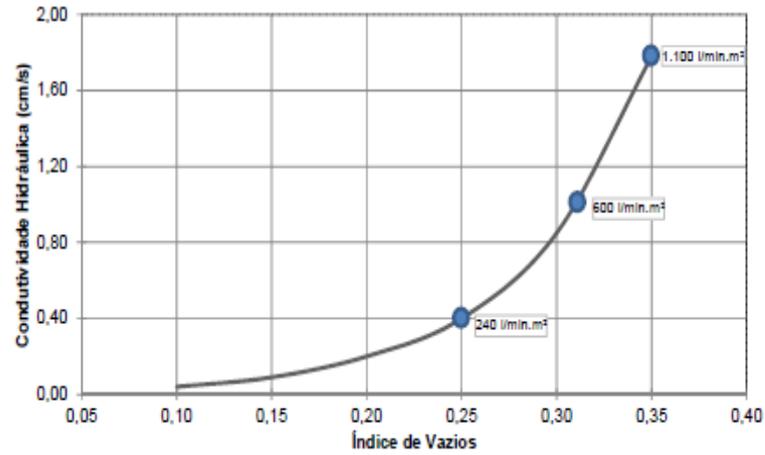


Figura 5.6 – Relação entre o índice de vazios e o valor do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável (BATEZINI, 2013).

6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 INTRODUÇÃO

A realização dos ensaios de resistência à compressão e à abrasão, desta dissertação, foi orientada pelas normas técnicas da ABNT e o ensaio de permeabilidade pela norma da ACI, para peças de pavimento intertravado nas dimensões de 200x100x80 mm. No estado fresco foi avaliado o abatimento de cone. No concreto endurecido foram avaliadas as resistências à compressão, a permeabilidade à água e à abrasão. O agregado graúdo entrou nos traços com granulometria contínua e uniforme, conforme mostra a Tabela 6.1. O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente da cidade de Faina - GO. O cimento Portland empregado foi o CII Z 32 RS.

Assim, o programa de pesquisa foi realizado com base em 7 (sete) diferentes teores de argamassa, 1 (um) tipo de rocha, 4 (quatro) granulometrias, aditivo superplastificante a base de policarboxilatos e adição de sílica ativa. O método de dosagem utilizado foi o IPT/EPUSP (HELENE & TERZIAN, 1992).

Tabela 6.1 – Tipos de granulometria do agregado graúdo utilizado nos traços estudados.

Traço (1:5)			
	Teor da Argamassa (%)	Tamanhos da Granulometria (mm)	Percentagens dos Tamanhos na composição do agregado graúdo usado no traço (%)
Granulometria Contínua	30	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40
		4,75 e 6,3	50 e 50
	33	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40
		4,75 e 6,3	50 e 50
	35	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40
		4,75 e 6,3	50 e 50
	40	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40
		4,75 e 6,3	50 e 50
	42	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40
		4,75 e 6,3	50 e 50
44	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40	
	4,75 e 6,3	50 e 50	
55	4,75; 6,3 e 9,5	20; 40 e 40	
Granulometria Uniforme	30	6,3	100
		9,5	100
	33	6,3	100
		9,5	100
	35	6,3	100
		9,5	100
	40	6,3	100
		9,5	100
	42	6,3	100
		9,5	100
44	6,3	100	
	9,5	100	

A caracterização do agregado miúdo foi feita seguindo os procedimentos normativos da NBR 7211 (ABNT, 2009), relativos à granulometria da NBR NM 248 (ABNT, 2003), aos torrões de argila e aos materiais friáveis da NBR NM 7218 (ABNT, 2010), ao material pulverulento da NBR NM 46 (ABNT, 2003), às impurezas orgânicas da NBR NM 49 (ABNT, 2001), à massa específica e à massa unitária da NBR NM 52 (ABNT, 2009) e ao inchamento da NBR NM 6467 (ABNT, 2006). A caracterização do agregado graúdo foi feita seguindo os procedimentos normativos da NBR 7211 (ABNT, 2009), relativos à granulometria da NBR NM 43 (ABNT, 2003), à massa específica e à massa unitária da NBR NM 53 (ABNT, 2009) e à abrasão *Los Angeles* da NBR NM 51 (ABNT, 2001).

A caracterização do cimento foi feita seguindo os procedimentos normativos da NBR 11579 (ABNT, 2013), relativos ao índice de finura da NBR NM 11579 (ABNT, 2012); à pasta de consistência normal da NBR NM 43 (ABNT, 2003); aos tempos de pega da NBR 65 (ABNT, 2003) e à resistência à compressão da NBR NM 7215 (ABNT, 1997). No concreto no estado fresco foram realizadas as avaliações de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) e no concreto endurecido foram os ensaios de resistência à compressão, de permeabilidade e de resistência à abrasão. Deve-se ressaltar que a seleção dos materiais utilizados realizados nesta pesquisa deu-se, principalmente, pela disponibilidade dos mesmos na região.

6.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

As variáveis independentes e dependentes do concreto referente às metodologias do programa experimental seguem descritos nos itens 6.2.1 e 6.2.2, respectivamente.

6.2.1 Variáveis independentes (fixas)

Foram consideradas como variáveis independentes (fixas) desta pesquisa a idade dos ensaios, o método de dosagem, o tipo de corpo de prova, o abatimento do tronco de cone (*slump*), o tipo de cura, o tipo de rocha, o tipo de cimento, granulometria do agregado graúdo, o tipo de agregado miúdo, e a relação água/cimento (0,35 e 0,5 para concreto de referência), o teor de argamassa e o traço.

a) Idade dos ensaios

As idades para a realização dos ensaios foram estabelecidas e fixadas em função da necessidade específica de cada ensaio. Procurou-se adotar idades de ensaio comumente utilizadas na análise de comportamento de concreto. A Tabela 6.2 apresenta a idade do concreto em que foi realizado o ensaio.

Tabela 6.2 – Idade do concreto para realização dos ensaios.

Ensaio Realizado	Idade (dias)
Resistência à compressão	28
Permeabilidade	28
Resistência à abrasão	56

b) Método de dosagem

Para a dosagem do concreto permeável, empregou-se o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), pois é um método de dosagem de fácil desenvolvimento e execução e totalmente experimental.

c) Tipo de corpo de prova

Foram empregados corpos de provas prismáticos com dimensões 20x10x8 cm para os ensaios de resistência à compressão, cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura 15 cm para os ensaios de permeabilidade e cúbicos de dimensões de 6,0x6,0x4,5 cm para os ensaios de resistência à abrasão.

d) Abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)

A trabalhabilidade pode ser entendida, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima de homogeneidade, incluindo-se no significado do termo manipular, operações como lançamento, adensamento e acabamento do concreto.

No presente trabalho, optou-se pela produção de concretos com diferentes teores de argamassa, porém, manteve-se a relação a/c nas famílias dos concretos. Tal procedimento permitiu a obtenção de informações pertinentes ao abatimento, à trabalhabilidade e permeabilidade em função das diferentes teores de argamassa.

e) Tipo de cura

Foi utilizada a condição de 28 (vinte e oito) dias para ensaios de resistência à compressão e 56 (cinquenta e seis) dias para ensaios de resistência à abrasão.

f) Tipos de rocha

Foi utilizada a rocha gnaisse devido à facilidade de obtenção na região e também por sua reconhecida qualidade como agregado para o concreto.

g) Tipos de cimento

O cimento empregado na pesquisa foi CII Z 32 RS por ser um cimento muito utilizado na região.

h) Granulometria do agregado graúdo

Para o agregado graúdo foram estabelecidas as granulometrias contínuas (4,75; 6,3 e 9,5) mm e (4,75 e 6,3) mm e as granulometrias uniformes de 6,3 mm e 9,5 mm.

i) tipo do agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de fácil obtenção na região.

j) Relação água/cimento

Foi estabelecida a relação a/c de 0,35 para os 25 (vinte e cinco) traços estudados e 0,50 para o traço de referência, em todos os casos, a dosagem foi realizada em função disso.

l) Teor de argamassa

Foram estabelecidos os teores de argamassa de 30%, 33%, 35%, 40%, 42% e 44% e para cada teor de argamassa foi produzido 2 corpos de prova com granulometrias contínuas de (4,75; 6,3 e 9,5) mm e (4,75 e 6,3) mm e 2 corpos de prova com granulometrias uniformes de 6,3 mm e 9,5 mm. Para o traço de referência foi utilizado 55% de teor de argamassa.

m) Traço

Foi estabelecido o traço 1;5 (1: m) sendo $m = a + b$, onde $a = \text{areia}$ e $b = \text{brita}$, para os 25 (vinte e cinco) traços estudados e, em todos os casos, a dosagem foi realizada em função disso e do $slump < 20$ mm, exceto o $slump$ do concreto de referência .

6.2.2 Variáveis dependentes

Foram consideradas como variáveis dependentes desta pesquisa, a resistência à compressão, a permeabilidade e a resistência à abrasão.

a) Resistência à compressão

A resistência à compressão foi obtida segundo as diretrizes das normas NBR 5739 (ABNT, 1994) e NBR 9781 (ABNT, 2013). Foram usados corpos de prova prismáticos nas dimensões de 200x100x80 mm. Nos sólidos existe uma relação inversa fundamental entre porosidade (fração do volume de vazios) e resistência mecânica. Os agregados naturais, por serem normalmente densos e resistentes, permitem que a porosidade da pasta de cimento endurecida e as características da zona de transição entre matriz (pasta) e o agregado graúdo determinem a resistência dos concretos usuais (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No entanto, segundo Helene, (1993), qualquer modificação na uniformidade, na natureza e no proporcionalmente dos materiais poderá levar a uma variação na resistência, pois esta é uma propriedade muito sensível, sendo, portanto, a propriedade do concreto que melhor o qualifica.

b) Permeabilidade.

A permeabilidade foi medida em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura 15 cm. A permeabilidade do concreto foi medida nos corpos de prova provenientes dos 24 (vinte e quatro) traços de dosagem de concreto. O procedimento de medida da permeabilidade foi o preconizado pela norma ACI 522 R (2006).

c) Resistência à Abrasão

A resistência à abrasão dos concretos foi baseada no método da norma NBR 12042 (ABNT, 2012) com algumas adaptações como a utilização de placas metálicas para dar sustentação ao corpo de prova quando acoplado a máquina de abrasão. Foram produzidas placas de concreto de dimensões 50x50x4,5 cm que posteriormente foram divididas em corpos de prova com dimensão de 6,0x6,0x4,5 cm. Para regularizar a superfície foi realizado um capeamento com graut.

O ensaio de abrasão tem grande importância na avaliação do desgaste superficial dos pisos de vias de tráfego de automóveis, vias de pedestre e outros, sobretudo em áreas de manobra e aceleração/frenagem, tais como em estacionamentos e pátios industriais. Desgaste demasiado é indesejado do ponto de vista estético, de segurança, produtividade e de conforto. A resistência ao desgaste superficial tem relação direta com a resistência à compressão do concreto e dos agregados utilizados, em especial na camada superficial. Dessa forma, optou-se por realizar este ensaio para verificar e comparar a influência da utilização de concretos com diferentes teores de argamassa e agregado graúdo com diferentes granulometrias sobre a resistência à abrasão.

6.2.3 Resumo dos ensaios realizados

A Figura 6.1 mostra o fluxograma de planejamento geral dos ensaios de caracterização realizados nos agregado miúdo e graúdo, bem como o planejamento dos ensaios realizados no concreto em estado fresco e endurecido.

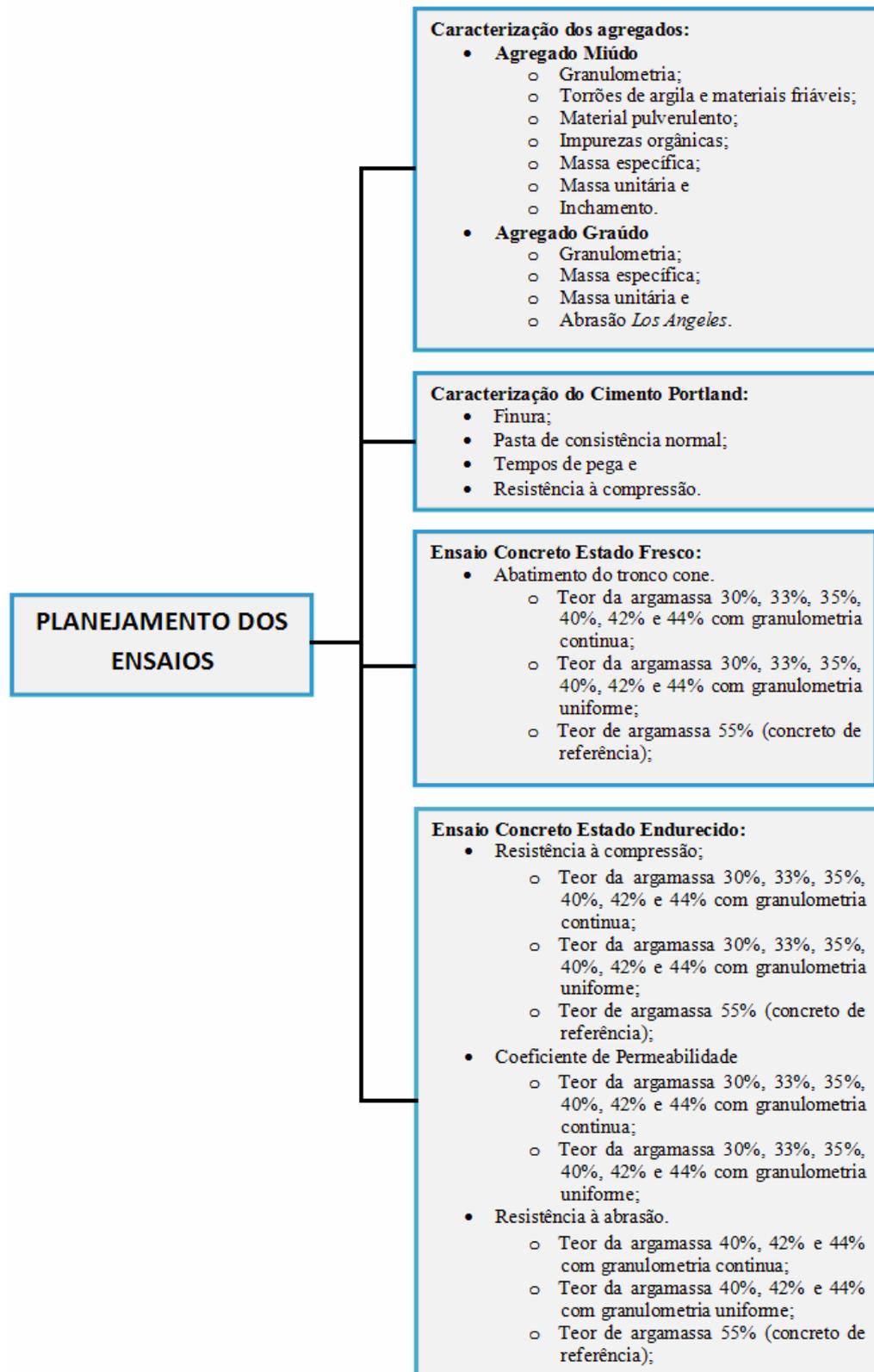


Figura 6.1 – Resumo dos ensaios realizados.

Para o melhor entendimento dos tipos de concretos estudados, é apresentada na Tabela 6.3 a nomenclatura e os componentes dos traços criados na presente dissertação. A Figura 6.2

mostra o fluxograma de planejamento das famílias de traços de concretos que foram produzidas para realização dos ensaios.

Tabela 6.3 – Componentes e abreviações.

Característica da Amostra	Identificação da Amostra
Concreto permeável com gnaiss granulometria contínua: 4,75 mm, (20%), 6,3 mm (40%) e 9,5 mm (40%)	CPGC1
Concreto permeável com gnaiss granulometria contínua: 4,75 mm (50%) e 6,3 mm (50%)	CPGC2
Concreto permeável com gnaiss granulometria uniforme: 6,3 mm	CPGU1
Concreto permeável com gnaiss granulometria uniforme: 9,5 mm	CPGU2
Concreto referencia com gnaiss granulometria contínua: 4,75 mm, (20%), 6,3 mm (40%) e 9,5 mm (40%)	CRG

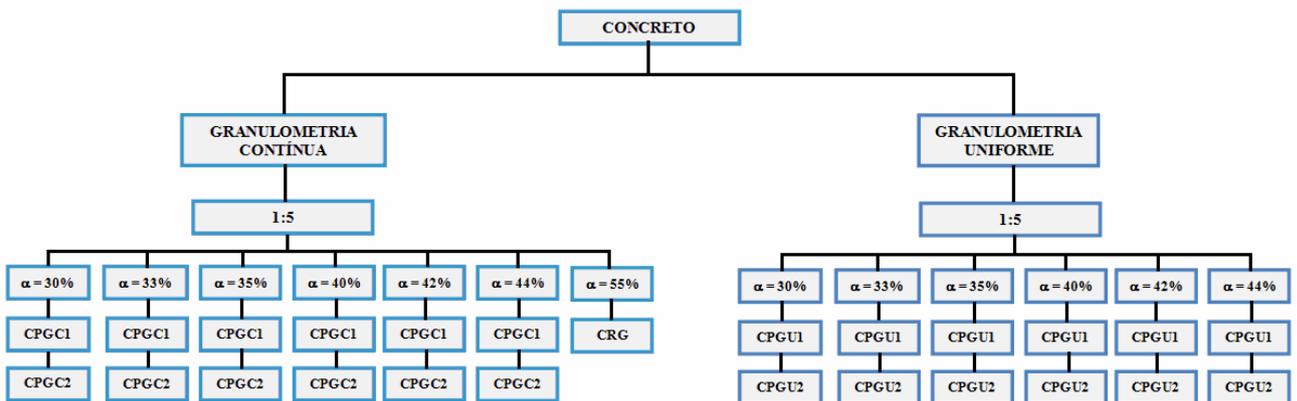


Figura 6.2 - Planejamento das famílias de traços de concretos.

6.3 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES:

Planejamento das etapas necessárias para execução dos ensaios com o objetivo de atender a pesquisa. A primeira ação foi à obtenção da matéria prima para a execução dos ensaios. Nesta fase algumas empresas foram contactadas. A resposta foi satisfatória, pois várias empresas contribuíram com esta pesquisa. Mesmo com a colaboração das empresas, alguns materiais tiveram que ser adquiridos no mercado local. Na aquisição dos materiais, o intento era que fossem da região goiana. O local escolhido para o armazenamento do material foi o Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG).

Neste momento foi verificado também o funcionamento dos equipamentos e o estado de conservação das ferramentas necessárias para a realização dos ensaios. Com os materiais em mãos, devido ao uso do laboratório por vários cursos, foi necessária sua identificação. Anotando-se o nome do material, nome do pesquisador, data da chegada e origem.

6.4 MATERIAIS UTILIZADOS

6.4.1 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia natural lavada proveniente do Rio do Peixe, localizada no município de Faina – GO. A escolha deste material foi devido à sua boa qualidade e a sua fácil aquisição no mercado local. A caracterização física da areia utilizada foi realizada no laboratório de MACO do IFG. Os resultados da caracterização física da areia podem ser observados na Tabela 7.3. O primeiro procedimento foi secar a areia e armazená-la em tambores metálicos de 200 l.

6.4.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de rocha gnaissé proveniente de Nova Veneza fornecido pela pedreira Britagran. A brita foi armazenada em tambor metálico de 200l.

6.4.3 Cimento Portland

O cimento utilizado nos concretos de todo o programa experimental foi o Cimento Portland CII – RS, Classe 32, devido a sua grande utilização na região metropolitana de Goiânia e por estar de acordo com a NBR EB 2.138 (ABNT, 1991).

6.4.4 Água potável

Água potável proveniente da rede de abastecimento público – SANEAGO.

6.4.5 Aditivo e adição

Nos traços foram utilizados aditivos superplastificante a base de policarboxilatos, adição de sílica ativa e o desmoldante empregado foram de origem vegetal.

6.5 PREPARO DAS AMOSTRAS DE AGREGADOS

Para os ensaios de caracterização, os agregados foram submetidos a um processo de preparação que envolveu secagem dos grãos ao ar livre, depois em estufa a $100\pm 5^\circ\text{C}$, por 24 horas, e homogeneização por meio de sucessivos quarteamentos, para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

A NBR NM 27 (ABNT, 2001) preconiza o método que se deve seguir para redução das quantidades originais dos agregados em quantidades menores, suficientes e necessárias para a realização dos ensaios de caracterização, sem que a amostra reduzida perca a sua representatividade em relação ao material original.

6.6 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

6.6.1 Areia

a) Granulometria

O procedimento adotado para a determinação da composição granulométrica da areia foi o descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Com esse ensaio foi possível determinar a classificação das partículas da amostra pelos seus tamanhos e medir as frações correspondentes de cada tamanho. A composição granulométrica da areia é apresentada na Tabela 7.1 do Item 7.1.1. De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) têm-se duas séries de peneiras: série normal e série intermediária. Foi utilizado um peneirador mecânico acoplado com peneiras metálicas.

b) Torrões de argila e materiais friáveis

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 7218 (ABNT, 2010). Os resultados referentes ao material argiloso e friável para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.2.

c) Material pulverulento

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003). Os resultados referentes ao material pulverulento para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.3.

d) Impurezas orgânicas

A determinação das impurezas orgânicas normalmente é utilizada para agregados miúdos. No presente estudo, esse ensaio foi realizado conforme o método preconizado pela NBR NM 49 (ABNT, 2001). Os resultados referentes às impurezas orgânicas para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.4.

e) Massa específica

Massa específica pode ser definida como sendo a massa do agregado por unidade de volume, excluindo os vazios internos do mesmo. A massa específica do agregado é necessária para os cálculos das quantidades de materiais em algumas metodologias de dosagem de concreto e, quando de posse do traço unitário em massa, é útil no cálculo do consumo de materiais por volume de concreto. As Equações 6.1, 6.2 e 6.3 são utilizadas para o cálculo da massa específica. O ensaio para determinação da massa específica dos agregados miúdos natural seguiu as recomendações da NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Os resultados referentes ao ensaio da massa específica para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.5.

$$d_1 = \frac{M_3}{(V_f - V_a)} \quad (6.1)$$

$$d_2 = \frac{M_s}{(V_f - V_a)} \quad (6.2)$$

$$d_3 = \frac{M_3}{\left[(V_f - V_a) - \frac{(M_s - M_3)}{\rho_a} \right]} \quad (6.3)$$

Onde:

d_1 = massa específica do agregado seco;

d_2 = massa específica do agregado saturado com superfície seca;

d_3 = massa específica do agregado;

M_3 = massa do agregado seco;

M_s = massa do agregado saturado com superfície seca;

ρ_a = peso específico da água;

V_f = volume do frasco;

V_a = volume da água;

f) Massa unitária

A massa unitária apresenta uma grande influencia na determinação de traços de concreto produzidos em canteiros de obra, onde a dosagem é procedida com medidas dos materiais em volume. A Equação 6.4 é utilizada para o cálculo da massa específica.

A norma da NBR NM 7251 (ABNT, 1982) prevê a determinação da massa unitária. A massa unitária de um agregado é a relação entre massa e o seu volume, com todos os espaços vazios existentes entre os grãos. Neste ensaio foi determinada a massa unitária de um agregado em seu estado solto. Para isso o agregado foi lançado de uma altura de cinco centímetros, sem comprimí-lo, para o interior de uma forma metálica paralelepípedica de 15x31,7x31,7 cm até preenchê-la. Este experimento foi realizado duas vezes. Quanto maior a quantidade de vezes que o experimento for realizado, mais confiável será sua medida de sua massa unitária. Os resultados referentes ao ensaio da massa unitária para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.6.

$$M_u = \frac{M_a}{(V_r)} \quad (6.4)$$

Onde:

M_u = massa unitária;

M_a = massa do agregado;

V_r = volume do recipiente;

g) Inchamento

Conforme Bauer (1987) dá-se o nome de inchamento do agregado miúdo ao aumento de volume que sofre esse agregado seco ao absorver água. Este aumento é produzido pela separação entre os grãos do agregado miúdo devido à película de água que se forma em torno do grão. Um importante conceito que está estritamente ligado ao inchamento do agregado miúdo é o teor de umidade. A partir dele é possível calcular a quantidade de água que os mesmos transportam para o concreto, alterando substancialmente a relação água/cimento, o

que ocasiona o decréscimo da resistência mecânica do concreto. O ensaio para a determinação do inchamento de agregado miúdo foi realizado, tendo como parâmetro a NBR 6467 (ABNT, 2009). Os resultados referentes ao ensaio de inchamento para a areia natural serão apresentados no Item 7.1.1.7.

6.6.2 Brita

a) Granulometria

O procedimento adotado para a determinação da composição granulométrica da brita foi o descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Com esse ensaio foi possível determinar a classificação das partículas da amostra pelos seus tamanhos e medir as frações correspondentes de cada tamanho. A composição granulométrica da brita é apresentada na Tabela 7.4 do Item 7.1.2.1. De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) têm-se duas séries de peneiras: série normal e série intermediária. Foi utilizado um peneirador mecânico acoplado com peneiras metálicas.

b) Massa específica

A norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) define massa específica como sendo a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. A massa específica varia de acordo com o tipo de agregado. Para se calcular o valor da massa específica de cada amostra, deve-se considerar a teoria de Arquimedes, que relaciona os conceitos de massa e volume que pode ser observada na Equação 6.5. O procedimento foi realizado duas vezes, calculando-se a sua média. Quanto maior a quantidade de vezes que o experimento for realizado, mais confiável será sua medida.

$$M_e = \frac{M_s}{(M_{sa} - M_{su})} \quad (6.5)$$

Onde:

M_e = massa específica;

M_s = massa seca;

M_{sa} = massa saturada;

M_{su} = massa submersa;

Os resultados referentes ao ensaio da massa específica para a brita serão apresentados no Item 7.1.1.4.

c) Determinação da massa unitária

A norma da NBR NM 45 (ABNT, 2006) prevê a determinação da massa unitária. A massa unitária de um agregado é a relação entre massa e o seu volume, com todos os espaços vazios existentes entre os grãos. Neste ensaio foi determinada a massa unitária de um agregado em seu estado solto. Para isso o agregado foi lançado de uma altura de cinco centímetros, sem comprimí-lo para o interior de uma forma metálica paralelepípedica de 15x31,7x31,7 cm até preenchê-la. Este experimento foi realizado duas vezes. Quanto maior a quantidade de vezes que o experimento for realizado, mais confiável será sua medida de sua massa unitária. A Equação 6.6 é utilizada para o cálculo da massa específica.

A massa unitária apresenta uma grande influencia na determinação de traços de concreto produzidos em canteiros de obra, onde a dosagem é procedida com medidas dos materiais em volume. Os resultados referentes ao ensaio da massa unitária para a brita são apresentados no Item 7.1.1.5.

$$M_u = \frac{M_a}{(V_r)} \quad (6.6)$$

Onde:

M_u = massa unitária;

M_a = massa do agregado;

V_r = volume do recipiente;

d) Abrasão *Los Angeles*

De acordo com NBR NM 51 (ABNT, 2001), utilizou-se a graduação “B” da “Tabela 2” na determinação da quantidade de material necessário ao ensaio de Abrasão *Los Angeles*, pois os ensaios de composição granulométrica do agregado graúdo determinaram uma dimensão máxima característica das partículas igual a 12,5 mm (pedra ou brita n.º 0), o que serviu de parâmetro para a escolha da graduação “B”, anteriormente citada. A massa da amostra ensaiada foi de 5000,0 gramas do material retido nas peneiras de 9,5 mm, 6,3 mm, mista (9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm) na proporção de 40%, 40 % e 20 % e mista (6,3 mm e 4,75 mm) na proporção de 50%, 50 %. Posteriormente, estas granulométricas do material

foram lavadas em água corrente e secadas em estufa, separadamente, numa temperatura de 107,5 °C, com tolerância de variação de 2,5 °C, para mais ou para menos. Após a secagem, aferiu-se a massa do material. Em seguida, introduziu-se a amostra dentro do tambor da máquina *Los Angeles*. A carga abrasiva foi definida de acordo com a “Tabela 1” da referida Norma, em função da graduação “B” escolhida. Assim, determinou-se a carga abrasiva (4.584,0 ± 25 gramas), a qual equivaleu ao total de 11 esferas de aço. A massa de cada esfera correspondeu a um valor compreendido no intervalo de 390,0 a 445,0 gramas. Após 500 rotações do tambor, numa velocidade de rotação de 30 a 33 rpm, retirou-se o material, o qual passou por um sistema de peneiras. Na Figura 6.3 pode-se observar o equipamento utilizado no ensaio de abrasão *Los Angeles*. Os resultados referentes ao ensaio de abrasão *Los Angeles* para a brita serão apresentados no Item 7.1.1.6.



Figura 6.3 – Equipamento utilizado no ensaio de abrasão *Los Angeles*.

6.6.3 Cimento

a) Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)

O índice de finura do cimento é o grau da porcentagem de grãos menores que passam pela peneira nº 200. Significa que quanto mais fino estiver o cimento, mais rápida será a sua reação com a água e, por consequência, a sua resistência mecânica depois de pronto será maior. A norma NBR 11.579 (ABNT, 2013) define a determinação da finura do cimento Portland. Os resultados obtidos na determinação da finura do cimento serão apresentados no Item 7.1.3.1.

b) Determinação da pasta de consistência normal

Determinar a porcentagem de água necessária à obtenção da pasta normal de cimento é de extrema importância. A quantidade de água para formar a pasta de cimento está diretamente ligada ao tempo de pega e a variação da resistência à compressão do cimento. A pasta de cimento é a simples mistura de uma quantidade de aglomerante, neste caso o cimento, e uma determinada quantidade de água. Conforme a norma NM 43 (ABNT, 2003), a pasta de consistência normal é a pasta na qual a sonda de Tetmajer penetra uma distância de (6 ± 1) mm da placa base. Os procedimentos realizados em laboratório para obtenção da pasta de consistência normal são descritos na NM 43 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos na determinação da pasta de consistência normal do cimento serão apresentados no Item 7.1.3.2. A Figura 6.4 apresenta o aparelho de Vicat que determina a pasta de consistência normal.

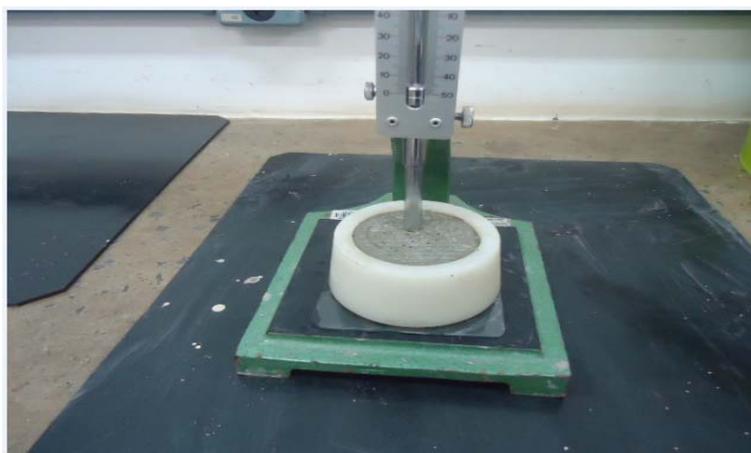


Figura 6.4 – Determinação da pasta de consistência normal.

c) Determinação do tempo de pega

Na pasta de consistência normal, que foi descrita no Item 6.6.3.2, são verificados os tempos de início e fim da pega. O tempo de início de pega é definido quando a agulha de Vicat penetra na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base. O tempo final de pega é definido como o momento em que a pasta permite que a agulha de Vicat penetre apenas 0,5 mm. Os procedimentos de ensaio para a obtenção dos tempos de início e fim de pega são definidos pela NM 65 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos na determinação do tempo de pega do cimento são apresentados no Item 7.1.3.3. A Figura 6.5 mostra o equipamento Vicat utilizado na determinação dos tempos de pega.



Figura 6.5 – Determinação dos tempos de pega por meio da agulha de Vicat.

d) Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão do cimento é obtida em CP Ø5,0x10 cm com a cura imersa em água como determina a norma NBR 7215 (ABNT, 1997). Este ensaio tem a finalidade de verificar se o cimento utilizado está dentro do padrão estabelecido pela norma. Os resultados obtidos na determinação da resistência à compressão do cimento serão apresentados no Item 7.1.3.4. A Figura 6.6 mostra o equipamento utilizado nos ensaios de resistência à compressão do cimento.



Figura 6.6 – Prensa, da marca EMIC, utilizada na medida da resistência à compressão do cimento.

6.7 DOSAGEM DOS CONCRETOS ESTUDADOS

6.7.1 Método de dosagem

Os concretos foram dosados conforme o *Método IPT/EPUSP*. Este método para dosagem de concretos estruturais permite expressar a partir de um sistema de eixos ortogonais, similares ao sistema de eixos cartesianos, do 1.º ao 4.º quadrante, no sentido horário: a curva ou “Lei de Abrams”, a curva (reta) do abatimento (“Lei de Lyse”), o consumo de cimento em função da proporção “cimento: agregados secos” (Quadrante de Molinari) e o quadrante de consumo de cimento em função da resistência à compressão, respectivamente.

6.7.2 Premissas empregadas para as dosagens

Para cada uma das amostras de concretos, a relação entre a água e o cimento (a/c) foi mantida em 0,35, tendo como base os parâmetros apresentados na ACI, 522R 06. Para o concreto de referência, adotou-se a relação a/c igual a 0,50, uma vez que os ensaios pilotos mostraram que para atingir 35 MPa, com os materiais empregados na presente dissertação, esta era a relação a/c necessária.

O teor de argamassa, tendo-se o traço de 1:5 (cimento: agregados secos totais), foi variado. Os teores de argamassa foram de 30%, 33%, 35%, 40%, 42% e 44%, os quais foram adotados em função de ensaios prévios realizados em laboratórios (traço piloto) para obtenção de concreto permeável. O teor de argamassa de 55%, para o concreto de referência, foi adotado na produção do concreto com resistência à compressão de 35 MPa e com superfície bem acabada. O valor do *Slump*, para todos os traços de concreto permeável, deveria ser abaixo de 20 mm de acordo com a recomendação da ACI 522R-06, exceto o concreto de referência que deveria apresentar um *Slump* de 100 ± 20 mm (valores estabelecidos para concreto convencional). Sob estas condições foram produzidos vários tipos de concretos. Em relação aos tamanhos dos agregados, o ACI 211 3R-02 recomenda diâmetros entre 9,5 mm a 2,4 mm. As porcentagens da granulometria da brita de (20%, 40% e 40%), (50% e 50%) e (100%) foram baseadas em traços pilotos ensaiados previamente no laboratório. A quantidade e o tipo de adição e aditivos também foram determinados através de ensaios pilotos no laboratório, com o intuito de obter as características desejadas. A sílica ativa entrou como adição ao Cimento Portland. Nas dosagens realizadas a sílica ativa não fez parte do teor de argamassa.

6.7.3 Dosagem dos concretos

Na dosagem experimental dos concretos aplicaram-se diferentes porcentagens de agregado miúdo e graúdo de maneira que o concreto se tornasse permeável. Neste estudo optou-se por um concreto, como citado anteriormente, com um tipo de rocha, com diferentes teores de argamassas e com diferentes granulometria.

Para teor de argamassa igual a 30%:

Traço 1:5

$\alpha = \% \text{ teor de arg amassa}$

$a = \text{areia}$

$p = \text{pedra(brita)}$

$m = p + a$

$$\alpha = \frac{\text{cimento} + \text{areia}}{\text{cimento} + \text{areia} + \text{brita}} \Rightarrow \alpha = \frac{1 + a}{1 + a + p} \quad (6.7)$$

$$0,3 = \frac{1 + a}{1 + 5} \Rightarrow a = 0,8 \quad e \quad p = 4,2$$

Traço 1:0,8:4,2

Para 30kg de brita tem-se um traço com 7,14kg de cimento e 5,71kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 28,56g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 428,4g

35% de água \Rightarrow 2,5kg

Para teor de argamassa igual a 33%:

$$0,33 = \frac{1 + a}{1 + 5} \Rightarrow a = 0,98 \quad e \quad p = 4,02$$

Traço 1:0,98:4,02

Para 30kg de brita tem-se um traço com 7,46kg de cimento e 7,31kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 29,84g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 447,6g

35% de água \Rightarrow 2,61kg

Para teor de argamassa igual a 35%:

$$0,35 = \frac{1+a}{1+5} \Rightarrow a = 1,1 \quad e \quad p = 3,9$$

Traço 1:1,1:3,9

Para 30kg de brita tem-se um traço com 7,69kg de cimento e 8,46kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 30,76g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 461,40g

35% de água \Rightarrow 2,69kg

Para teor de argamassa igual a 40%:

$$0,4 = \frac{1+a}{1+5} \Rightarrow a = 1,4 \quad e \quad p = 3,6$$

Traço 1:1,4:3,6

Para 30kg de brita tem-se um traço com 8,34kg de cimento e 11,68kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 33,36g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 500,40g

35% de água \Rightarrow 2,92kg

Para teor de argamassa igual a 42%:

$$0,42 = \frac{1+a}{1+5} \Rightarrow a = 1,52 \quad e \quad p = 3,48$$

Traço 1:1,52:3,48

Para 30kg de brita tem-se um traço com 8,62kg de cimento e 13,10kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 34,48g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 517,2g

35% de água \Rightarrow 3,02kg

Para teor de argamassa igual a 44%:

$$0,44 = \frac{1+a}{1+5} \Rightarrow a = 1,64 \quad e \quad p = 3,36$$

Traço 1:1,64:3,36

Para 30kg de brita tem-se um traço com 8,93kg de cimento e 14,64kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 35,72g

6% de adição (sílica ativa) em relação ao peso do cimento \Rightarrow 535,80g

35% de água \Rightarrow 3,12kg

Para teor de argamassa igual a 55%:

$$0,55 = \frac{1+a}{1+5} \Rightarrow a = 2,30 \quad e \quad p = 2,70$$

Traço 1:2,30:2,70

Para 30kg de brita tem-se um traço com 11,12kg de cimento e 25,56kg de areia.

0,4% de aditivo em relação ao peso do cimento \Rightarrow 44,48g

0,5% de água \Rightarrow 5,56kg

As Tabelas de 6.4 até 6.10 apresentam um resumo dos traços unitários em massa utilizados para produção do concreto. As Tabelas 6.11 a 6.17 apresentam as quantidades, em massa, dos componentes de cada concreto produzido.

Tabela 6.4 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 30\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	0,8	4,2	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	0,8	4,2	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	0,8	4,2	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	0,8	4,2	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.5 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 33\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	0,98	4,02	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	0,98	4,02	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	0,98	4,02	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	0,98	4,02	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.6 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 35\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	1,1	3,9	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	1,1	3,9	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	1,1	3,9	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	1,1	3,9	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.7 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 40\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	1,4	3,6	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	1,4	3,6	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	1,4	3,6	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	1,4	3,6	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.8 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 42\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	1,52	3,48	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	1,52	3,48	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	1,52	3,48	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	1,52	3,48	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.9 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 44\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	1,64	3,36	0,35	0,4	6,0
6,3 e 4,75	5	1	1,64	3,36	0,35	0,4	6,0
9,5	5	1	1,64	3,36	0,35	0,4	6,0
6,3	5	1	1,64	3,36	0,35	0,4	6,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.10 – Traço unitário em massa do concreto com $\alpha = 55\%$.

Granulometria (mm)	m	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo Superplastificante*	Adição Sílica Ativa*
9,5; 6,3 e 4,75	5	1	2,30	2,70	0,50	0,4	0,0

*% em relação à massa do cimento.

Tabela 6.11 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 30\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	7,14	5,71	30,00	2,50	28,56	428,40
6,3 e 4,75	7,14	5,71	30,00	2,50	28,56	428,40
9,5	7,14	5,71	30,00	2,50	28,56	428,40
6,3	7,14	5,71	30,00	2,50	28,56	428,40

Tabela 6.12 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 33\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	7,46	7,31	30,00	2,61	29,84	447,60
6,3 e 4,75	7,46	7,31	30,00	2,61	29,84	447,60
9,5	7,46	7,31	30,00	2,61	29,84	447,60
6,3	7,46	7,31	30,00	2,61	29,84	447,60

Tabela 6.13 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 35\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	7,69	8,46	30,00	2,69	30,76	461,40
6,3 e 4,75	7,69	8,46	30,00	2,69	30,76	461,40
9,5	7,69	8,46	30,00	2,69	30,76	461,40
6,3	7,69	8,46	30,00	2,69	30,76	461,40

Tabela 6.14 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 40\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	8,34	11,68	30,00	2,92	33,30	500,40
6,3 e 4,75	8,34	11,68	30,00	2,92	33,30	500,40
9,5	8,34	11,68	30,00	2,92	33,30	500,40
6,3	8,34	11,68	30,00	2,92	33,30	500,40

Tabela 6.15 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 42\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	8,62	13,10	30,00	3,02	34,48	517,20
6,3 e 4,75	8,62	13,10	30,00	3,02	34,48	517,20
9,5	8,62	13,10	30,00	3,02	34,48	517,20
6,3	8,62	13,10	30,00	3,02	34,48	517,20

Tabela 6.16 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 44\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	8,93	14,64	30,00	3,12	35,72	535,80
6,3 e 4,75	8,93	14,64	30,00	3,12	35,72	535,80
9,5	8,93	14,64	30,00	3,12	35,72	535,80
6,3	8,93	14,64	30,00	3,12	35,72	535,80

Tabela 6.17 – Quantidade de materiais empregados na produção do concreto com $\alpha = 55\%$.

Granulometria (mm)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	água (kg)	Aditivo (g)	Adição (g)
9,5; 6,3 e 4,75	11,12	25,56	30,00	5,56	44,48	0,0

6.7.4 Trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone

O método utilizado para verificação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi o ensaio do abatimento de troco de cone (*Slump Test*). O ensaio foi realizado conforme a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Para a mistura dos traços de concreto foi utilizada uma betoneira comum de 200 litros. O tempo total para mistura de cada traço, após iniciadas as

rotações da betoneira, foi de aproximadamente 6 (seis) minutos, contados a partir da entrada do primeiro material na betoneira até o momento da remoção do concreto de dentro da betoneira para medidas de consistência (abatimento pelo *Slump Test*). A Figura 6.7 apresenta o momento em que se mede o *Slump*. Os resultados obtidos deste ensaio serão apresentados e analisados no Item 7.2.1.



Figura 6.7 – Ensaio de abatimento de tronco de cone.

6.8 ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO:

6.8.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Na Figura 6.8 pode-se observar que o corpo-de-prova (peça intertravada) encontra-se posicionada na prensa para a verificação da resistência à compressão. É possível, também, observar uma rachadura no corpo-de-prova, causada pelo aumento da pressão aplicada pela prensa. Os resultados obtidos e a discussão relativa à resistência à compressão estão contidos no Item 7.3.1.



Figura 6.8 – Ensaio de resistência à compressão – corpo de prova rompido.

6.8.2 Coeficiente de permeabilidade:

O ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade foi realizado conforme o procedimento proposto pela norma ACI 522 R – 06 (ACI, 06) do *American Concrete Institute* e como foi mencionado anteriormente, o coeficiente de permeabilidade indica a velocidade em que a água infiltra no concreto permeável e é calculado através da Equação 6.2 da *Lei de Darcy*.

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (6.2)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade em m/s;

A_1 = área de seção da amostra em m²;

A_2 = área do tubo em m²;

L = comprimento da amostra em m;

t = tempo em s;

h_i = altura inicial (indicado 0,29 m);

h_f = altura final (indicado 0,07 m);

Este procedimento faz uso de um equipamento chamado permeâmetro de carga variável que permite a inserção de uma amostra no interior do equipamento. A Figura 6.9 mostra o referido equipamento.



Figura 6.9 – Permeâmetro de carga variável.

Para iniciar o ensaio o CP é colocado na entrada do equipamento. Em seguida a válvula é fechada e o equipamento é preenchido com água para saturar o CP. Para retirar o ar do equipamento, a válvula é aberta e é adicionado água até que a mesma fique nivelada com o CP do lado oposto do equipamento (saída). O CP de concreto é cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 15 cm. Na Figura 6.10 observa-se a colocação do CP de concreto no equipamento.



Figura 6.10 – Acoplagem da amostra no equipamento.

Acima do CP é acoplado um tubo com altura de 30 cm com aferimento em 0,29 e 0,07 m. Confirmado que o CP está saturado e o equipamento sem ar a válvula central é fechada e o tubo acima do CP é completado com água até o aferimento de 0,29 m.

Em seguida a válvula central é aberta e marca-se o tempo que a água leva do marco 0,29m até o marco 0,07m. A norma determina que o procedimento de tomada de tempo deva ser repetido três vezes para cada amostra, considerando-se um tempo médio entre os três

valores. Na Figura 6.11 observa-se a colocação das marcas (0,29 m e 0,07 m) no tubo acima da amostra e na Figura 6.12 mostra o tubo acima da amostra sendo preenchido com água.



Figura 6.11 – Aferimento do tubo acima do CP.



Figura 6.12 – Tubo acima do CP sendo preenchido com água.

O tempo medido é utilizado na Equação 6.2 da *Lei de Darcy* para o cálculo do coeficiente de permeabilidade K da amostra. Conforme a norma ACI 522R (2006) pavimentos com nível satisfatório de permeabilidade devem apresentar um coeficiente de permeabilidade $K \geq 1,40 \times 10^{-3}$ m/s. Os resultados obtidos na determinação do coeficiente de permeabilidade são apresentados no Item 7.3.2.

6.8.3 Determinação do desgaste por abrasão

Conforme a norma NBR 12042 (ABNT, 2012) o desgaste por abrasão é a desagregação superficial de partículas de um determinado material submetido a forças de

atrimento. O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado com base na norma NBR 12042 (ABNT, 2012). Nesta análise foi incluído um corpo-de-prova com traço de referência (CRG) para possibilitar uma comparação. O corpo-de-prova com traço CRG, utilizado no ensaio de abrasão, foi produzido com teor de argamassa de 55%.

A análise do desgaste por abrasão foi realizado em corpo-de-prova com teor de argamassa de 40%, 42% e 44%, que foram os que apresentaram características adequadas, tanto para resistência à compressão para o nível de permeabilidade. Todos os CPs foram recapeados em ± 5 mm com a finalidade de regularizar a superfície e em seguida foram colocados nas formas metálicas do equipamento de ensaio de desgaste por abrasão de forma nivelada. As formas metálicas com os CPs foram fixadas no equipamento para 10 voltas iniciais com o intuito de lixar, nivelar e padronizar a planicidade das faces a fim de evitar erros do ensaio. O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado em três fases. Na primeira fase, medem-se as alturas das quatro faces do CP e pesa-se o CP, obtendo-se assim os valores iniciais de referência. Em uma segunda fase os CPs entram em atrito com a areia em um percurso circular, até completar 500 m, onde os mesmos são pesados e medidas as alturas residuais das quatro faces, obtendo-se assim valores com o primeiro nível de desgaste. Na terceira e última fase os CPs percorrem mais 500 m, totalizando 1000 m, e novamente os mesmos são pesados e medidas as alturas residuais das quatro faces. As Figuras 6.13, 6.14 e 6.15 mostram o equipamento e os corpos de provas utilizados no ensaio de desgaste por abrasão.



Figura 6.13 – Equipamento utilizado no ensaio de desgaste por abrasão.



Figura 6.14 – Corpos de provas utilizados no ensaio de desgaste por abrasão.



Figura 6.15 – Corpo de prova acoplado ao equipamento de ensaio de desgaste por abrasão.

O desgaste por abrasão dos CPs de concreto permeável foi comparado com o desgaste por abrasão do CP de referência (CRG). Os resultados obtidos na determinação da resistência à por abrasão são apresentados e discutidos no Item 7.3.3.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos na metodologia experimental. Trata-se da avaliação das caracterizações do agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e do cimento. Os concretos no estado fresco foram avaliados pelo *Slump Test* e no estado endurecido foram avaliadas as resistências à compressão com teores de argamassa de 30%, 33%, 35%, 40%, 42%, 44% e 55% (concreto referência), a permeabilidade à água com teores de argamassa de 30%, 33%, 35%, 40%, 42% e 44% e à abrasão com teores de argamassa de 40%, 42%, 44% e 55% (concreto referência).

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

7.1.1 Areia

a) Granulometria

A Tabela 7.1 apresenta os resultados da composição granulométrica da areia natural utilizada na pesquisa.

Tabela 7.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	1º Determinação			2º Determinação			% Acumulada Média
	Massa Inicial	500		Massa Inicial	500		
		Massa (g)	% Retida		% Acum.	Massa (g)	
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,75	4,8	1,0	1,0	4,9	1,0	1,0	1,0
2,36	41,68	8,3	9,3	41,86	8,4	9,4	5,3
1,18	95,15	19,0	28,3	95,54	19,1	28,5	28,4
0,6	111,22	22,2	50,6	110,92	22,2	50,6	50,6
0,3	157,66	31,5	82,1	157,33	31,5	82,1	82,1
0,15	72,87	14,6	96,7	72,79	14,6	96,7	96,7
Fundo	16,61	3,3	100	16,66	3,3	100,0	100,0
Total	500	100	268	500	100	268	268
Módulo de Finura	2,68			2,68			2,68
Mod. Finura Média (MF)			2,68	Dimensão Máxima Características (DMC)			4,75
Diferença nas peneiras entre duas determinações < 4%		OK	Diferença das massas inicial e final < 0,3%		OK	Ensaio Aprovado	

A Figura 7.1 mostra os limites da zona de utilização do agregado miúdo encontrados no ensaio.

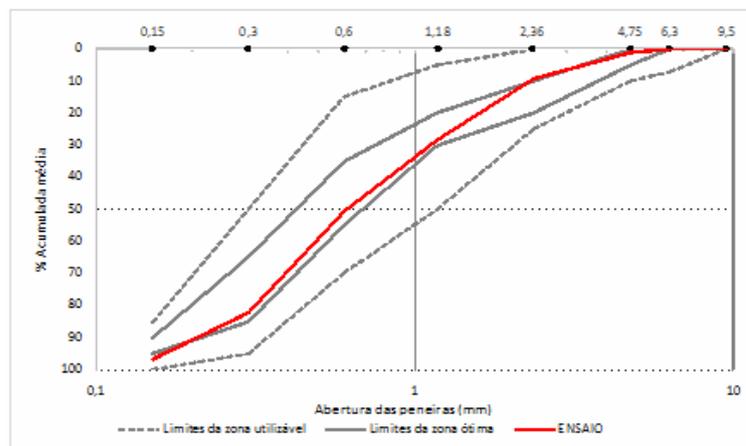


Figura 7.1 – Limites de utilização do agregado miúdo – NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Pôde-se observar pela Tabela 7.1, que o agregado miúdo apresentou Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 4,75 mm, o que corresponde à porcentagem acumulada da peneira de série normal menor ou igual a 5%. O Módulo de Finura (MF) foi igual a 2,68. Esses parâmetros foram utilizados para a classificação dos agregados e também nas dosagens experimentais de concreto. Ao analisar os resultados encontrados na curva granulométrica, conforme Figura 7.1, verificou-se que a curva encontra-se, segundo especifica a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), dentro dos limites ótimos de utilização. Observou-se, também, que pouco menos de 3,33% do material ensaiado passou pela na peneira 0,15mm. Portanto, a análise não apresenta excesso de finos.

b) Torrões de argila e materiais friáveis

O nível de argila e material friável encontrado na areia natural está bem abaixo do que determina a norma. A porcentagem encontrada foi de 0,62%, enquanto a norma NBR 7218 (ABNT, 2010) determina um máximo de 1,5%.

c) Material pulverulento

Observou-se que a quantidade de material pulverulento para a areia natural ensaiada foi 1,1%, enquanto a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003) que determina um máximo de 12%.

d) Impurezas orgânicas

Neste ensaio, a norma determina que a solução obtida deva ser mais clara do que a solução-padrão. A coloração obtida foi mais clara que a solução padrão para areia. No que se refere a estes parâmetros, o valor obtido atende aos limites estabelecidos pela norma NBR NM 49 (ABNT, 2001).

e) Massa específica

A norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) prescreve o método de determinação da massa específica do agregado miúdo, ou seja, dos grãos que passam na peneira de 4,75 mm, por meio de picnômetro, através da realização de pelo menos dois ensaios. O valor obtido foi de 2,67g/cm³. A Tabela 7.2 mostra a determinação da massa específica.

Tabela 7.2 – Determinação da massa específica do agregado miúdo.

Etapa 1 : Obtenção de Massas								
Determinação	Volume frasco	Massas (g)			Cápsulas			Massa Agreg.
		M _s	M ₁	M ₂	N. da Cápsula	M _{c1}	M _{c2}	M ₃
1ª	508,28	500	788,9	1105,8	12	60,14	178,40	493,27
					3	63,55	438,56	
2ª	525,05	500	772,9	1104,1	44	60,40	428,60	493,25
					1'6	56,43	181,48	
Etapa 2 : Cálculos (Determinação das massas específicas)								
	Volume (cm ³)	massa específicas (kg/dm ³)			Aceitação			
Determ.	V _a	d ₁	d ₂	d ₃	ACEITO			
1ª	316,9	2,58	2,61	2,67				
2ª	331,2	2,57	2,6	2,66				
Média		2,58	2,61	2,67				

f) Massa unitária

A Tabela 7.3 mostra os valores da massa unitária obtida de duas amostras da areia e o volume do recipiente.

Tabela 7.3 – Massa unitária do agregado miúdo.

Massas (Kg)	Volume do recipiente (cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
01	22,61	1,50
02	22,60	1,50
Media		1,50

Para a massa unitária o valor obtido foi de 1,50 g/cm³. Para este tipo de agregado o resultado ficou conforme dentro dos valores estabelecidos pela norma.

g) Inchamento

Na Tabela 7.4 observam-se os valores obtidos no ensaio de inchamento da areia. A Figura 7.2 apresenta a curva de inchamento da areia utilizada.

Tabela 7.4 – Resumo do ensaio de inchamento da areia.

Umidade Teórica (%)	0%	0,5%	1%	2%	3%	4%	5%	7%	9%	12%
Cáps. Ident.	1,00	12,00	25,00	60,00	68,00	71,00	106,00	268,00	286,00	302,00
M_c (g)	0,00	60,56	60,18	60,63	63,64	55,22	62,69	49,10	65,36	55,38
$M_c+M_{ag}+M_{H_2O}$ (g)	99,07	295,20	294,82	422,98	195,10	304,60	300,94	318,80	345,06	328,96
M_c+M_{ag} (g)	99,00	293,40	291,81	415,20	191,20	295,06	289,86	301,70	323,26	300,31
h_{ensalo} (%)	0,00%	0,77%	1,30%	2,19%	3,06%	3,98%	4,88%	6,77%	8,45%	11,70%
$M_{areia}+M_{recip.}$ (kg)	22,00	11,56	11,14	10,12	9,70	9,60	9,48	9,41	9,42	9,46
M_{areia} (kg)	22,77	21,15	19,34	18,38	17,61	17,48	17,20	17,52	18,16	19,31
D (kg/dm ³)	1,51	1,40	1,28	1,22	1,17	1,16	1,14	1,16	1,21	1,28
D_0/D_h	1,00	1,08	1,18	1,24	1,29	1,30	1,32	1,30	1,25	1,18
$1+h_{ensalo}$	1,00	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,07	1,08	1,12
$(D_0/D_h)(1+h_{ensalo}) = V_h/V_0$	1,00	1,08	1,19	1,27	1,33	1,35	1,39	1,39	1,36	1,32
$I=[(V_h/V_0)-1](\%)$	0,00	0,08	0,19	0,27	0,33	0,35	0,39	0,39	0,36	0,32

Onde:

M_c – massa da cápsula, dada em g;

M_{ag} – massa do agregado, dada em g;

M_{H_2O} – massa da água, dada em g;

h_{ensalo} – teor de umidade do agregado, dado em percentagem;

M_{areia} – massa da areia, dada em g;

$M_{recipiente}$ – massa do recipiente, dada em g;

D – massa unitária, dada em g/cm³;

D_0 – massa unitária inicial, dada em g/cm³;

D_h – massa unitária com um determinado teor de umidade, dada em g/cm³;

V_h – volume do agregado com determinado teor de umidade, dada em cm³;

V_0 – volume do agregado inicial, dado em cm³.

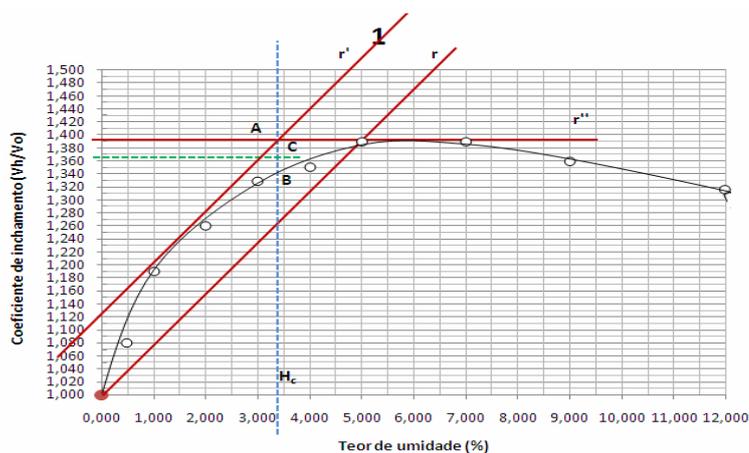


Figura 7.2 – Curva de inchamento da areia.

Na curva de inchamento apresentada na Figura 7.2 pode-se observar que o coeficiente de inchamento foi 1,36 e a umidade crítica foi de 3,4%.

h) Resumo das caracterizações

A Tabela 7.5 apresenta um resumo dos dados obtidos nos ensaios realizados para caracterização da areia. Observou-se que os resultados foram satisfatórios em relação aos critérios e limites estabelecidos pelas normas.

Tabela 7.5 – Caracterização da areia.

Caracterização	Norma	Unidade	Limites da Norma	Resultado
Torrões de argila e materiais friáveis	NBR 7218 (ABNT, 2010)	%	1,50	0,62
Material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	%	12,00	1,10
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Cor	Mais clara que a solução padrão	Mais clara
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	g/cm ³		2,67
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	g/cm ³		1,50
Tamanho Máximo	NBR NM 248 (ABNT, 2003)			4,75
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)			2,68
Coeficiente Inchamento	NBR 6467 (ABNT, 2009)			1,36
Umidade Crítica	NBR 6467 (ABNT, 2009)	%		3,40

7.1.2 Brita

a) Granulometria

A Tabela 7.6 apresenta os resultados da composição granulométrica da brita utilizada na pesquisa. O agregado graúdo utilizado é oriundo de rocha gnaiss de boa qualidade.

Tabela 7.6 – Composição granulométrica da brita - NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Peneiras (mm)	1ª Determinação			2ª Determinação			% Acumulada Média
	Massa inicial massa(g)	5000		Massa inicial (g)	5000		
		%Retida	%Acum.		%Retida	%Acum.	
75	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
63	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
50	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
37,5	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
31,5	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
25	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
19	0	0,0%	0,0%	0	0,0%	0,0%	0,0%
12,5	70	1,4%	1,4%	71	1,4%	1,4%	1,4%
9,5	530	10,6%	12,0%	531	10,6%	12,0%	12,0%
6,3	2319	46,4%	58,4%	2320	46,4%	58,4%	58,4%
4,75	772	15,4%	73,8%	770	15,4%	73,8%	73,8%
2,36	1302	26,0%	99,9%	1300	26,0%	99,8%	99,9%
1,18	0	0,0%	99,9%	0	0,0%	99,8%	99,9%
0,6	0	0,0%	99,9%	0	0,0%	99,8%	99,9%
0,3		0,0%	99,9%	0	0,0%	99,8%	99,9%
0,15		0,0%	99,9%	0	0,0%	99,8%	99,9%
Fundo	7	0,1%	100,0%	8	0,2%	100,0%	100,0%
Total	5000	100%	744,9%	5000	100,0%	744,9%	744,9%
Mod.Finura		5,85			5,85		5,85
Módulo de Finura Médio (MF)			5,85	Dimensão Máxima Característica (DMC)			12,5
Diferença nas peneiras entre duas determ. <4%		OK	Diferença das massas inicial e final < 0,3%		OK	Aprovação do ensaio	
							ENSAIO APROVADO

Ao analisar os resultados encontrados na curva granulométrica, conforme Figura 7.3, verificou-se que a curva encontra-se dentro dos limites zona de utilização, referentes à brita zero (B0). A Figura 7.3 mostra os limites da zona de utilização do agregado graúdo encontrados no ensaio.

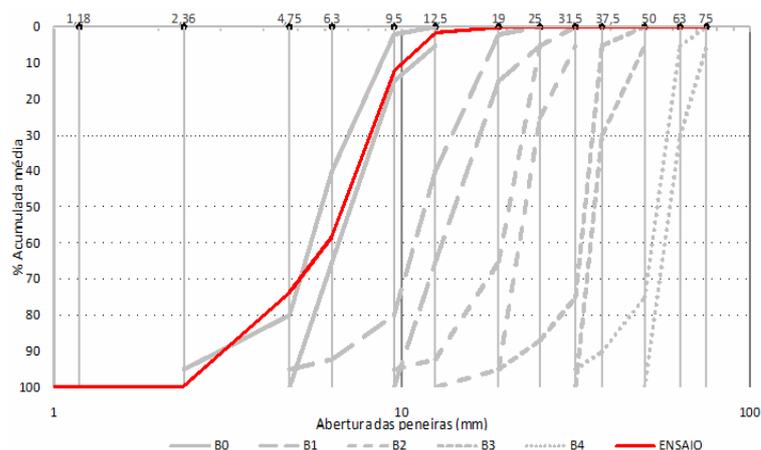


Figura 7.3 – Limites de utilização do agregado graúdo – NBR NM 248 (ABNT, 2003).

b) Massa específica

A Tabela 7.7 apresenta os valores encontrados para massa específica das diferentes granulométricas utilizadas nas amostras.

Tabela 7.7 – Massa específica do agregado graúdo.

Granulometria (mm)	Massa específica (g/cm ³)
4,75; 6,3 e 9,5	2,67
4,75 e 6,3	2,67
6,3	2,67
9,5	2,67

Conforme se observa na Tabela 7.7, apesar das diferentes granulometria, a massa específica do agregado graúdo manteve-se em 2,67 g/cm³.

c) Massa unitária

A Tabela 7.8 apresenta os valores encontrados para massa unitária das diferentes granulométricas utilizadas nas amostras.

Tabela 7.8 – Massa unitária do agregado graúdo.

Granulometria (mm)	Massa específica (g/cm ³)
4,75; 6,3 e 9,5	1,45
4,75 e 6,3	1,45
6,3	1,45
9,5	1,45

Conforme se observa na Tabela 7.8 a massa unitária do agregado graúdo é de 1,45 g/cm³, mesmo com granulometria diferentes.

d) Abrasão *Los Angeles*

Na Tabela 7.9 observam-se os desgastes, em porcentagem, encontrados no ensaio de abrasão *Los Angeles* para as diferentes granulometria utilizadas.

Tabela 7.9 – Valores da abrasão *Los Angeles* do agregado graúdo.

Granulometria (mm)	%
4,75; 6,3 e 9,5	24,41
4,75 e 6,3	26,83
6,3	23,72
9,5	30,03

Conforme determina a NBR NM 51 (ABNT, 2001) o desgaste do material não pode ser superior a 40%. Portanto, os valores apresentados na Tabela 7.9 indicam que o agregado graúdo atende ao requisito da norma.

e) Resumo das caracterizações da brita

A Tabela 7.10 apresenta um resumo dos dados obtidos nos ensaios realizados para caracterização da brita. Observou-se que os resultados foram satisfatórios em relação aos critérios e limites estabelecidos pelas normas.

Tabela 7.10 – Resumo da caracterização da brita.

Caracterização	Norma	Unidade	Limites da Norma	Resultado
Módulo de finura médio (MF)				5,85
Dimensão máxima característica (DMC)				12,5
Massa específica	NBR 52 (ABNT, 2009)	g/cm ³		2,67
Massa unitária	NBR 45 (ABNT, 2006)	g/cm ³		1,45
Abrasão <i>Los Angeles</i> (tabela de graduação “B” da norma vigente)				
Granulometria 4,75; 6,3 e 9,5	NBR 51 (ABNT, 2001)	%	≤40	24,41
Granulometria 4,75 e 6,3	NBR 51 (ABNT, 2001)	%	≤40	26,83
Granulometria 6,3	NBR 51 (ABNT, 2001)	%	≤40	23,72
Granulometria 9,5	NBR 51 (ABNT, 2001)	%	≤40	30,03

7.1.3 Cimento

a) Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200)

O índice de finura do cimento encontrado no ensaio foi de 1,08%.

b) Determinação da pasta de consistência normal

A Tabela 7.11 mostra os valores medidos no aparelho Vicat.

Tabela 7.11 – Pasta de consistência normal.

N° de tentativas	Quantidade de água (ml)	Porcentagem de água (%)	Distância da placa de base (mm)
1	155	31,0	1
2	150	30,0	4
3	148	29,6	6

O que se observa na Tabela 7.11 é que as duas primeiras tentativas não atende a norma vigente que estipula a distância da placa de base em 6 mm com uma variação de ± 1 mm. A quantidade de água aplicada na terceira tentativa é que atende as determinações da norma vigente.

c) Determinação do tempo de pega

O tempo de pega do cimento teve início 2 h e 23 minutos após a mistura com a água. O equipamento Vicat penetrou 4 mm na pasta. O tempo final de pega ocorreu 3 h e 37 minutos após a mistura com a água. Neste momento o equipamento Vicat não penetrou na pasta.

d) Determinação da resistência à compressão

A Figura 7.4 apresenta o gráfico com os valores encontrados para resistência à compressão do cimento.

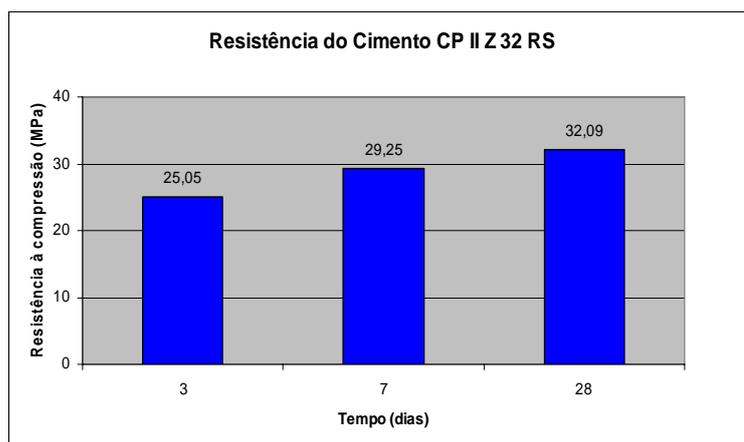


Figura 7.4 – Resistência à compressão do cimento.

O valor encontrado, em 28 dias, para a resistência à compressão do cimento está de acordo com a norma vigente, pois é superior a 32 MPa.

e) Resumo das caracterizações do cimento

A Tabela 7.12 apresenta um resumo dos dados obtidos nos ensaios realizados para caracterização da brita. Observou-se que os resultados foram satisfatórios em relação aos critérios e limites estabelecidos pelas normas.

Tabela 7.12 – Resumo da caracterização do cimento.

Caracterização	Norma	Unidade	Limites da Norma	Resultado
Finura por meio da peneira 75 μ m (nº.200)	NBR 11.578 (ABNT, 2013)	%	$\leq 12,00$	1,08
Pasta de consistência normal (distância da placa base)		mm	$\pm 6,00$	6,00
Tempo de pega inicial	NBR 11.578 (ABNT, 2013)	Horas	$\geq 1,00$	2,23
Tempo de pega final	NBR 11.578 (ABNT, 2013)	Horas	$\leq 10,00$	3,37
Resistência à compressão em 28 dias	NBR 11.578 (ABNT, 2013)	MPa	$\geq 32,00$	32,09

7.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

7.2.1 Abatimento do tronco de cone – *Slump Test*

Para cada mistura ensaiada, foi realizado um ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*), cujos valores são apresentados na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Valores do abatimento de tronco de cone – *Slump Test*.

Teor de Argamassa (%)	m	Granulometria	Relação a/c	Abatimento (mm)
30	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
33	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
35	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
40	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
42	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
44	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,35	00
	5	4,75 e 6,3	0,35	00
	5	6,3	0,35	00
	5	9,5	0,35	00
55 (CRG)	5	4,75; 6,3 e 9,5	0,50	87

Conforme mostra a Tabela 7.13, os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) estão em conformidade com a ACI (2006) para concretos permeáveis, uma vez que seus valores foram menores que 20 mm. O *Slump* do traço CRG está dentro do padrão para concreto convencional. Deve-se ressaltar que o concreto com a mesma relação água/cimento, independente do tipo de granulometria, apresenta valores iguais ou semelhantes para o *Slump*, ou seja, o tipo de granulometria não influencia no *Slump* do concreto.

A relação água/cimento do traço CRG é diferente proporcionando um valor diferente de abatimento de tronco de cone. O aumento da relação água/cimento muda a trabalhabilidade do concreto aumentando o abatimento de tronco de cone (*Slump Test*).

7.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

7.3.1 Resistência à compressão

Os valores encontrados para resistência à compressão do concreto no estado endurecido são apresentados na Tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Resistência à compressão do concreto endurecido.

Teor de Argamassa (%)	Nomenclatura do Traço	Granulometria	Tempo (Dias)		
			03	07	28
30	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	11,35	14,13	15,98
	CPGC2	4,75 e 6,3	5,62	6,47	8,36
	CPGU1	6,3	9,92	10,21	12,31
	CPGU2	9,5	10,07	11,58	14,64
33	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	12,20	15,31	17,10
	CPGC2	4,75 e 6,3	7,87	10,33	11,92
	CPGU1	6,3	10,98	11,45	13,51
	CPGU2	9,5	12,06	14,50	16,25
35	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	13,87	16,78	18,42
	CPGC2	4,75 e 6,3	8,92	11,93	13,45
	CPGU1	6,3	12,55	13,98	15,32
	CPGU2	9,5	13,42	16,08	17,37
40	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	20,66	26,11	31,67
	CPGC2	4,75 e 6,3	13,60	18,33	21,86
	CPGU1	6,3	19,87	25,22	29,49
	CPGU2	9,5	20,15	25,71	30,08
42	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	23,36	30,84	37,48
	CPGC2	4,75 e 6,3	15,89	19,64	23,89
	CPGU1	6,3	21,07	27,74	32,77
	CPGU2	9,5	21,84	24,29	35,23
44	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	26,36	32,10	38,30
	CPGC2	4,75 e 6,3	19,88	24,21	25,82
	CPGU1	6,3	23,00	28,87	29,99
	CPGU2	9,5	25,37	30,97	36,02
55	CRG	4,75; 6,3 e 9,5	22,87	30,13	36,93

Atendem ao requisito de desempenho de 35MPa.

De acordo com a Figura 7.5, em cada tipo de granulometria houve uma variação da resistência à compressão. O que se observa é que a granulometria continua com três tamanhos

diferentes apresentou uma maior resistência, devido ao melhor preenchimento dos vazios do concreto. No caso de granulometria uniforme o maior valor apresentado foi com a granulometria de maior tamanho.

Esta tendência seguiu ocorrendo com as idades de 7 e 28 dias, conforme mostram as Figuras 7.6 e 7.7.

As Figuras 7.5 a 7.22 mostram um aumento das resistências com o aumento da idade, para todas as granulometrias ensaiadas. As Figuras 7.5 a 7.22 mostram, também, que as resistências à compressão aumentaram à medida que o teor de argamassa aumentou.

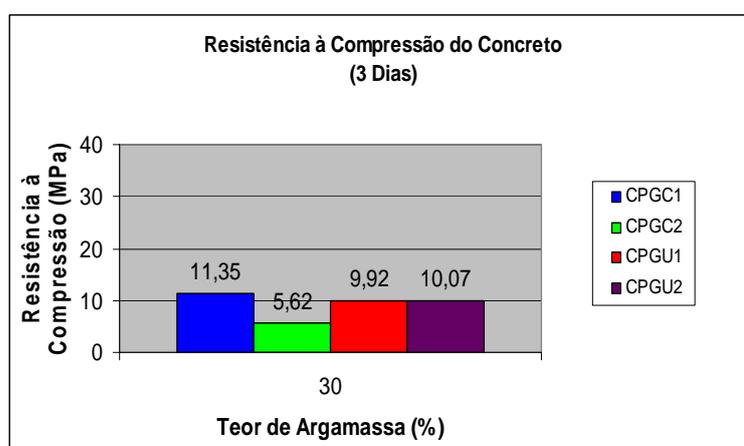


Figura 7.5 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% e 03 dias de idade.

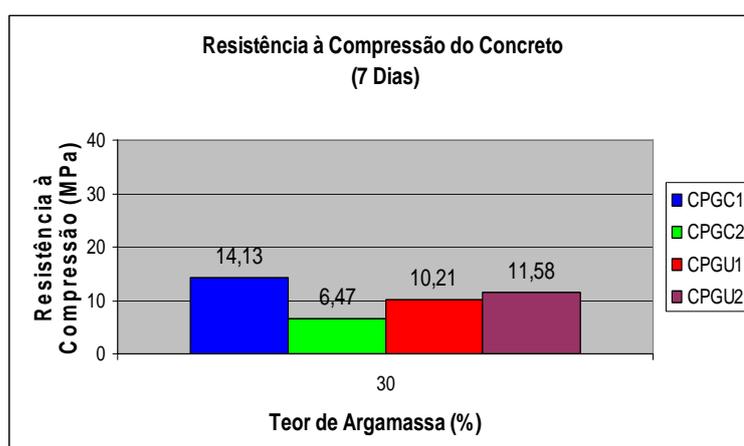


Figura 7.6 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% e 07 dias de idade.

Os resultados, Figura 7.7, mostram que a maior resistência à compressão aos 28 dias corresponde ao traço CPGC1, o qual ficou 54,34% abaixo do que exige a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que é de 35 MPa.

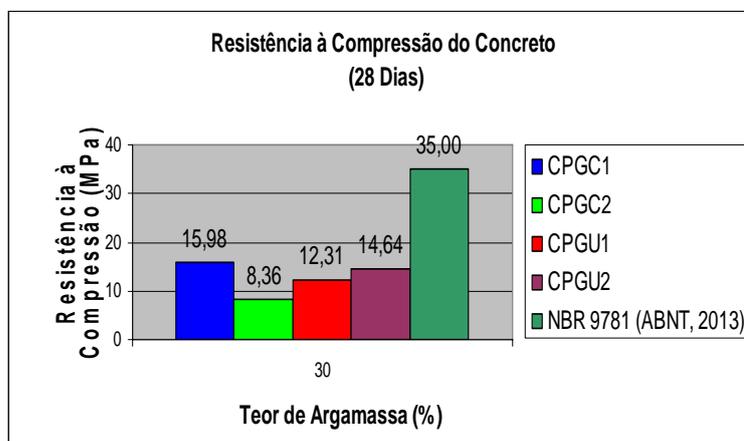


Figura 7.7 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 30% e 28 dias de idade.

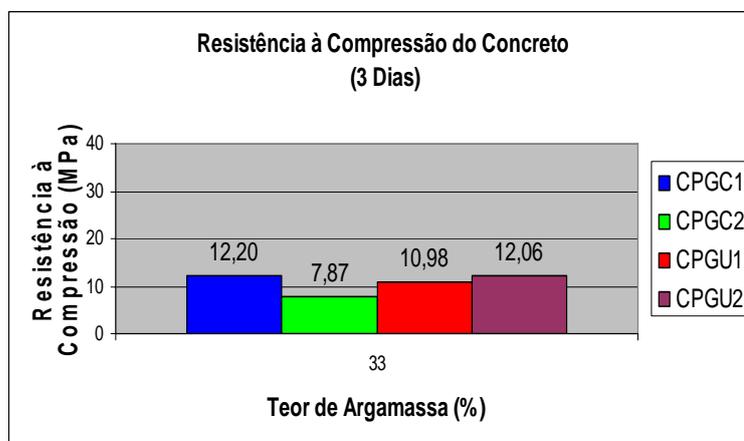


Figura 7.8 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% e 03 dias de idade.

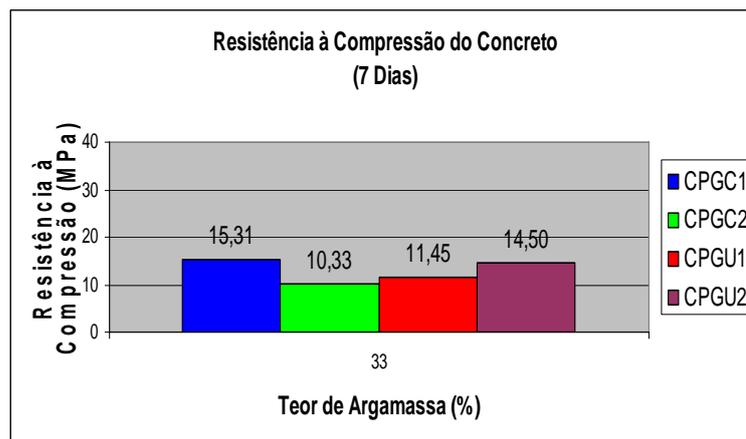


Figura 7.9 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% e 07 dias de idade.

Os resultados, Figura 7.10, mostram que a maior resistência à compressão aos 28 dias corresponde ao traço CPGC1, o qual ficou 51,14% abaixo do que exige a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que é de 35 MPa.

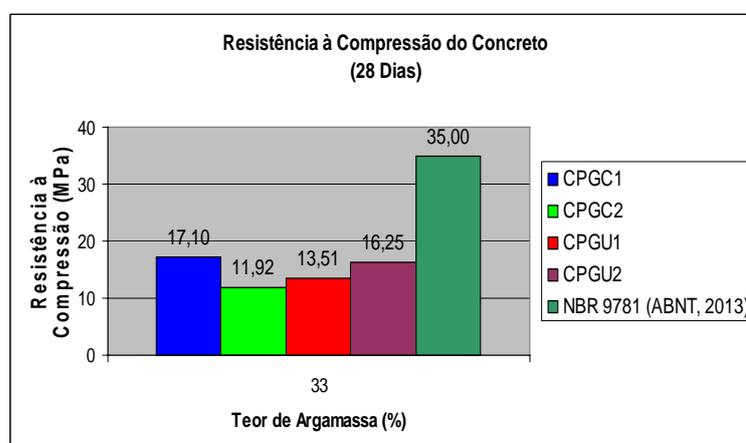


Figura 7.10 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 33% e 28 dias de idade.

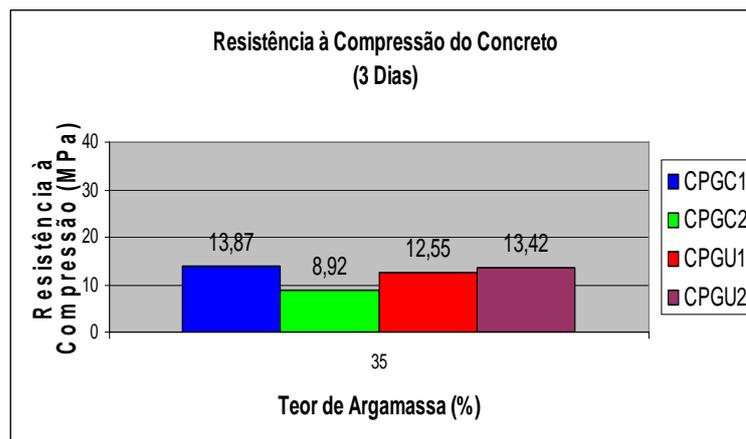


Figura 7.11 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% e 03 dias de idade.

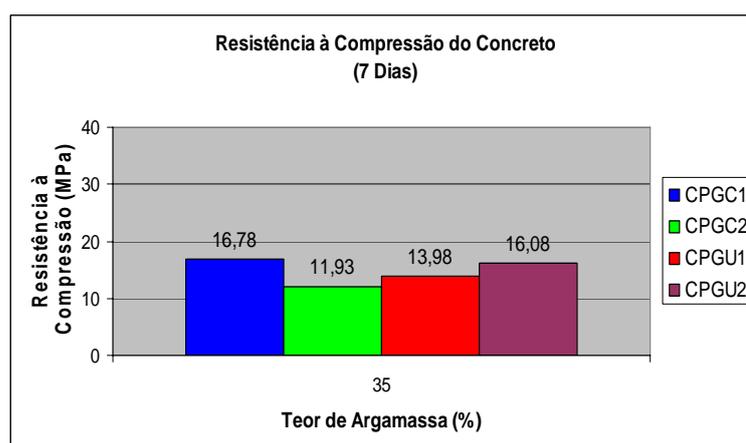


Figura 7.12 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% e 07 dias de idade.

Os resultados, Figura 7.13, mostram que a maior resistência à compressão aos 28 dias corresponde ao traço CPGC1, o qual ficou 47,17% abaixo do que exige a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que é de 35 MPa.

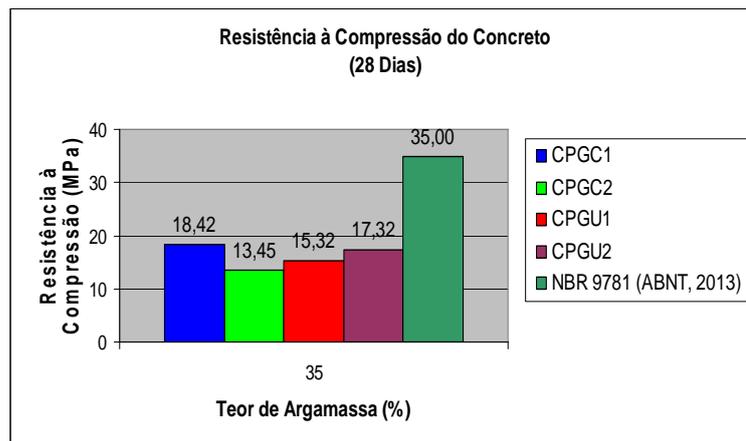


Figura 7.13 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 35% e 28 dias de idade.

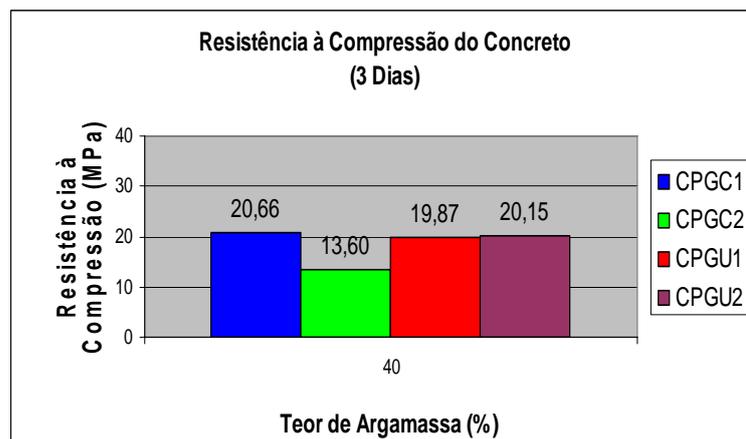


Figura 7.14 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% e 03 dias de idade.

O teor de argamassa está diretamente ligado a resistência à compressão do concreto. É possível observar, na Figura 7.14, que com um aumento de 5% no teor da argamassa a resistência do concreto de granulometria contínua com três tamanhos diferentes, passou de 13,18 MPa para 20,66 MPa. Um aumento em torno de 56,8%.

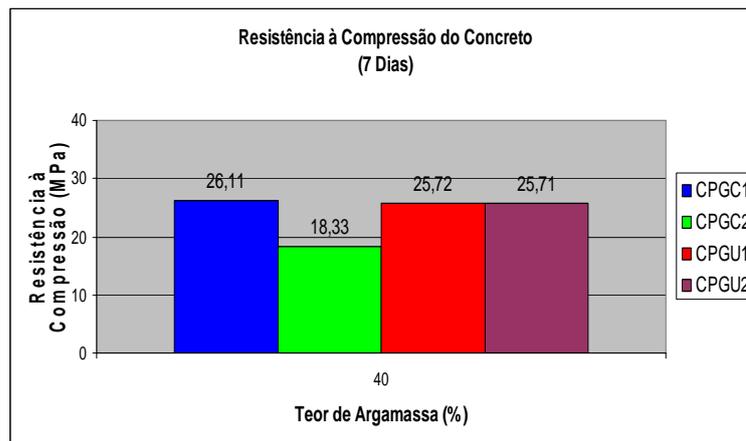


Figura 7.15 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% e 07 dias de idade.

Os resultados, Figura 7.16, mostram que a maior resistência à compressão aos 28 dias corresponde ao traço CPGC1, o qual ficou 9,52% abaixo do que exige a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que é de 35 MPa.

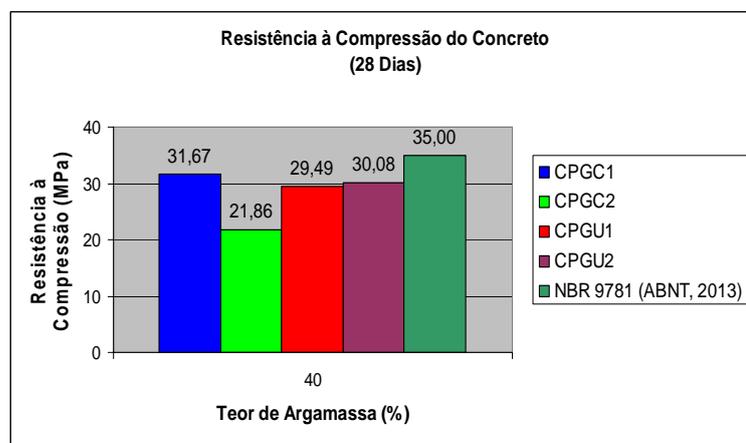


Figura 7.16 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 40% e 28 dias de idade.

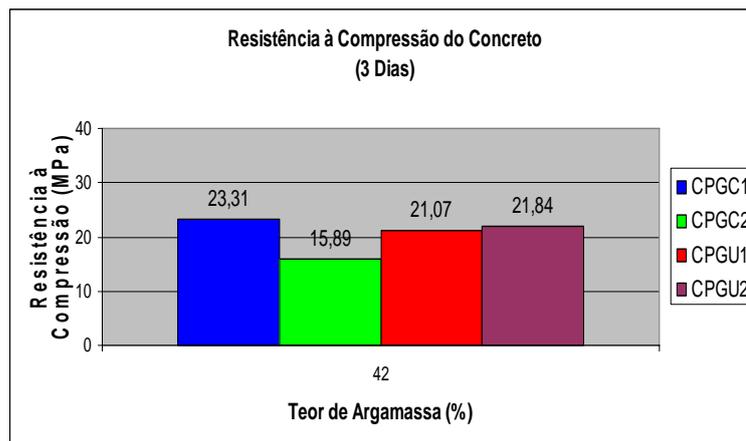


Figura 7.17 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% e 03 dias de idade.

A resistência medida em sete dias ficou mais próxima dos valores determinados pela norma vigente (35 MPa), conforme mostra a Figura 7.18.

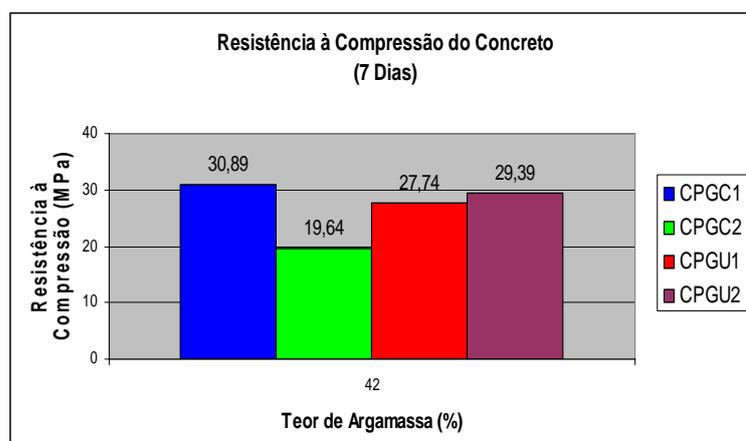


Figura 7.18 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% e 07 dias de idade.

Com o teor de argamassa de 42% a resistência à compressão obtida com a granulometria CPGC1 ficou 7,08% acima do que estabelece a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). A resistência medida no concreto de granulometria CPGU2 foi de 35,23 MPa o que corresponde à 0,66% acima do que estabelece a norma.

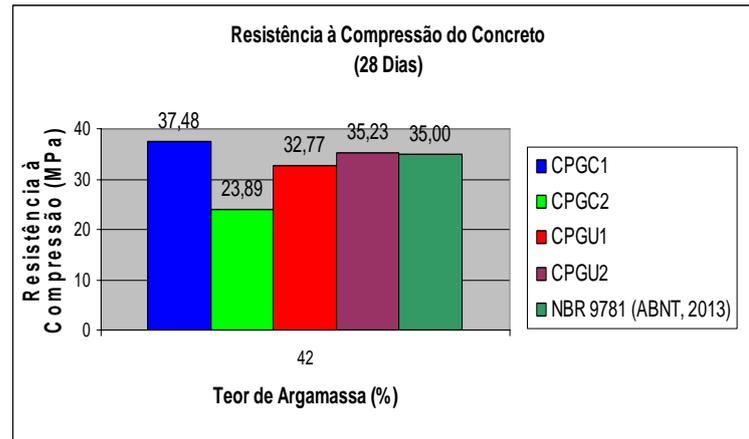


Figura 7.19 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 42% e 28 dias de idade.

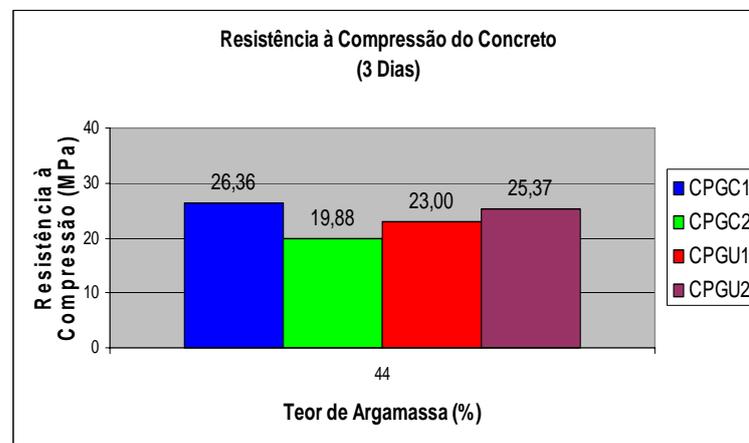


Figura 7.20 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% e 03 dias de idade.

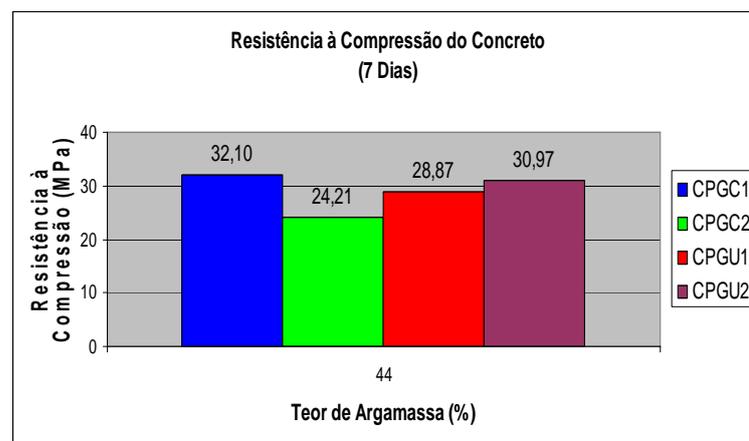


Figura 7.21 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% e 07 dias de idade.

Com o teor de argamassa de 44% a resistência à compressão obtida com a granulometria CPGC1 ficou 9,43% acima do que estabelece a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). A resistência medida no concreto de granulometria CPGU2 foi de 36,02 MPa que corresponde à 2,91% acima do que estabelece a norma para os 28 dias.

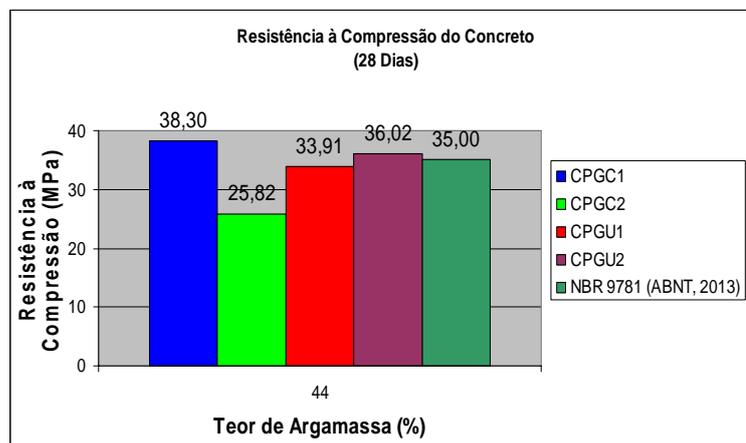


Figura 7.22 – Resistência do concreto permeável com teor de argamassa de 44% e 28 dias de idade.

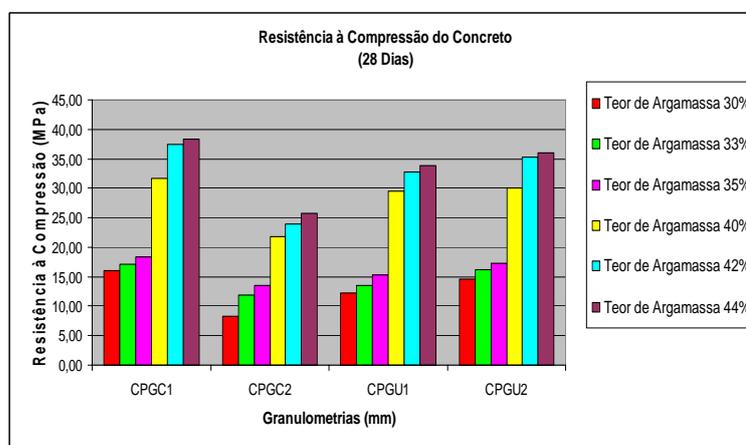


Figura 7.23 – Resistência à compressão dos concretos estudados com 28 dias de idade.

O aumento do teor de argamassa foi obtido com o aumento da quantidade de agregado miúdo no traço, o que proporcionou uma diminuição dos vazios e, conseqüentemente, um aumento na resistência à compressão do concreto.

A granulometria diversificada do agregado graúdo também influenciou na resistência à compressão. O que se observou é que a granulometria contínua (CPGC1), para qualquer teor de argamassa, contribui para um melhor preenchimento dos vazios, tornando o traço mais resistente. A granulometria uniforme com maior tamanho de agregado graúdo (9.5 mm), para qualquer teor de argamassa, mostrou maiores valores de resistência à compressão do que a granulometria uniforme com menor tamanho (6,3 mm).

Analisando a Figura 7.23 é possível verificar que o valor da resistência à compressão com corpo-de-prova com teor de argamassa de 30, 33 e 35% são próximos mesmo com a variação do teor de argamassa. Os corpos-de-prova com teor de argamassa de 40, 42 e 44% apresentam resistência à compressão com valores mais distantes à medida que o teor de argamassa varia.

Os resultados dos ensaios dos concretos confirmaram o que diz a literatura, a resistência à compressão apresenta uma relação inversa à permeabilidade do concreto.

No que se refere à resistência à compressão, os traços que levaram a obtenção de resistências superiores a 35 MPa foram os concretos com teor de argamassa de 42% e 44% com granulometria contínua de 4,75; 6,3 e 9,5 mm e com granulometria uniforme de 9,5 mm.

7.3.2 Coeficiente de permeabilidade

Nesta análise foi considerada a variação dos teores de argamassa para todos os traços. A Tabela 7.15 apresenta os valores medidos para o tempo de percolação da água através do corpo-de-prova (CP) de concreto permeável.

Tabela 7.15 – Tempos de percolação da água através do corpo-de-prova.

Teor de Argamassa (%)	Granulometria	Dimensão do CP (cm)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Média do Tempo (s)	Coefficiente de Permeabilidade K (m/s)
30	CPGC1	10x15	21	23	23	22,34	0,00414
	CPGC2	10x15	20	20	19	19,67	0,00470
	CPGU1	10x15	17	16	17	16,67	0,00555
	CPGU2	10x15	14	13	14	13,67	0,00677
33	CPGC1	10x15	26	25	26	25,67	0,00360
	CPGC2	10x15	23	23	21	22,34	0,00414
	CPGU1	10x15	19	20	20	19,67	0,00470
	CPGU2	10x15	16	17	17	16,67	0,00550
35	CPGC1	10x15	34	34	35	34,33	0,00269
	CPGC2	10x15	32	31	31	31,33	0,00295
	CPGU1	10x15	29	28	29	28,67	0,00323
	CPGU2	10x15	26	26	25	25,67	0,00360
40	CPGC1	10x15	46	44	45	45,00	0,00205
	CPGC2	10x15	41	43	42	42,00	0,00220
	CPGU1	10x15	39	38	40	39,00	0,00237
	CPGU2	10x15	37	36	35	36,00	0,00257
42	CPGC1	10x15	64	64	65	64,33	0,00143
	CPGC2	10x15	61	62	62	61,67	0,00150
	CPGU1	10x15	58	59	58	58,34	0,00158
	CPGU2	10x15	55	56	55	55,34	0,00167
44	CPGC1	10x15	76	75	74	75,50	0,00123
	CPGC2	10x15	74	73	74	73,67	0,00125
	CPGU1	10x15	72	73	74	72,50	0,00128
	CPGU2	10x15	68	67	68	67,67	0,00137

Os resultados apresentados na Tabela 7.15 mostram uma relação inversa entre o tempo de percolação e o coeficiente de permeabilidade, pois quanto menor é a permeabilidade do corpo-de-prova maior é o tempo que a água vai levar para atravessá-lo.

Outro fato observado é que com o aumento do teor de argamassa o índice de vazios do concreto diminui o que proporciona um tempo de percolação maior. Existe uma ordem de um menor para um maior K, onde se observa a influência dos diferentes tipos de granulometrias.

$$K \text{ de CPGC1} < K \text{ de CPGC2} < K \text{ de CPGU1} < K \text{ de CPGU2.}$$

As Figuras 7.24 a 7.29 apresentam os valores encontrados de permeabilidade.

Conforme a Figura 7.24 apresenta coeficiente de permeabilidade com valor acima do valor determinado pela norma ACI 522 R-06.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 192,85% acima do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficou 239,28% acima. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 300,71% acima e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 382,14% acima do valor determinado pela norma.

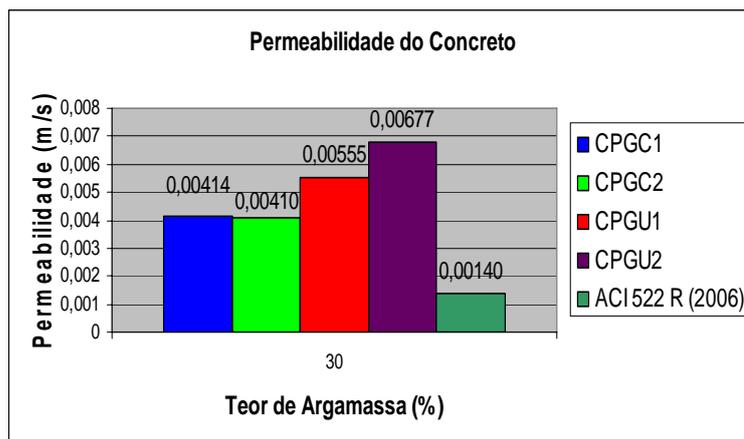


Figura 7.24 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 30%.

O aumento do teor de argamassa influencia inversamente no valor do coeficiente de permeabilidade do concreto. Na Figura 7.25 é possível observar que com o aumento do teor de argamassa o concreto diminuiu a permeabilidade.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 33% com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 159,28% acima do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficaram 192,85% acima. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 239,28% acima e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 300,71% acima do valor determinado pela norma.

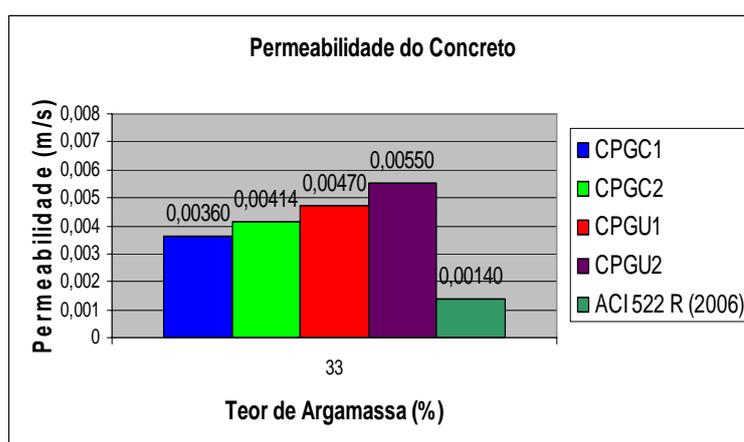


Figura 7.25 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 33%.

A Figura 7.26 mostra que com o aumento do teor de argamassa o concreto perde em permeabilidade, independente do tipo de granulometria utilizado.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 35% com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 91,43% acima do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficaram 109,28% acima. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 132,14% acima e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 159,28% acima do valor determinado pela norma.

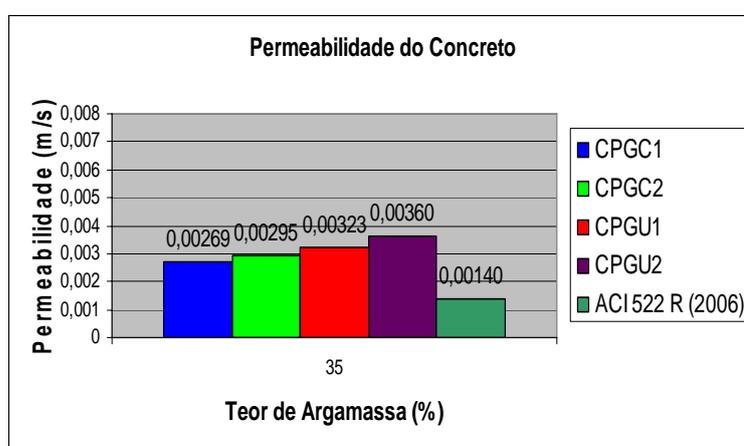


Figura 7.26 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 35%.

Conforme mostra a Figura 7.27 o aumento do teor de argamassa torna o concreto com mais sólido deixando o mesmo com menor permeabilidade, independente do tipo de granulometria utilizado.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 40% com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 46,43% acima do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficaram 57,14% acima. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 69,28% acima e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 83,57% acima do valor determinado pela norma.

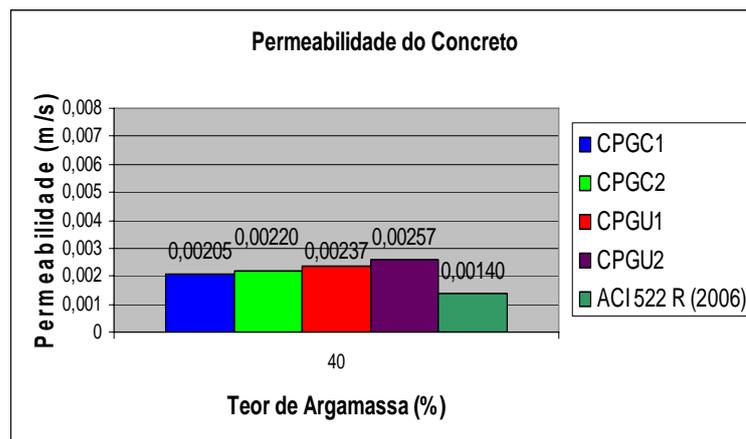


Figura 7.27 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 40%.

Conforme mostra a Figura 7.28 os concretos com teor de argamassa de 42% apresentam um coeficiente de permeabilidade com valor próximo ao valor mínimo determinado pela norma ACI 522 R-06.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 42% com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 2,14% acima do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficaram 7,14% acima. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 12,85% acima e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 18,57% acima do valor determinado pela norma.

Comparando os valores do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 40% e 42% nota-se que a queda do valor do coeficiente de permeabilidade é significativa.

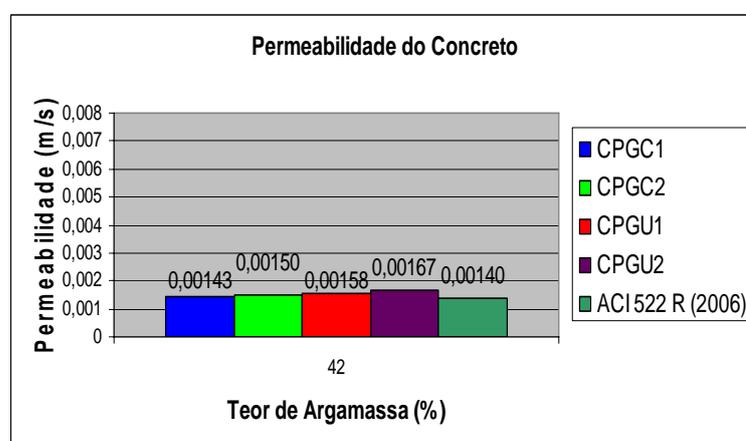


Figura 7.28 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 42%.

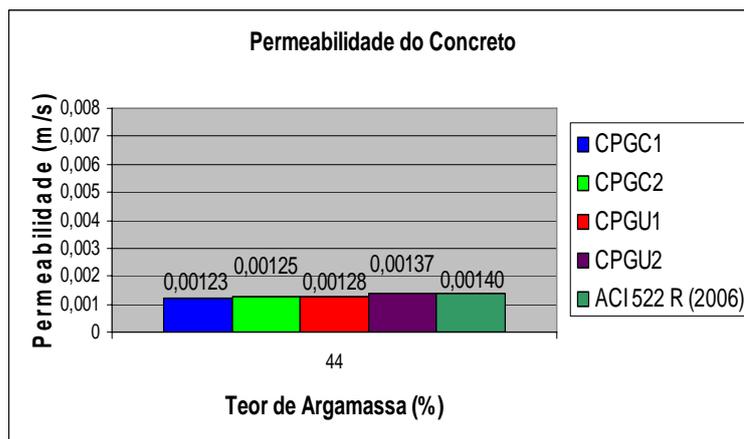


Figura 7.29 – Permeabilidade do concreto permeável com teor de argamassa de 44%.

Conforme mostra a Figura 7.29 os concretos com teor de argamassa de 44% apresentam um coeficiente de permeabilidade abaixo do valor mínimo determinado pela norma ACI 522 R-06.

O valor do coeficiente de permeabilidade do concreto com teor de argamassa de 44% com granulometria continua com três tamanhos diferentes ficaram 12,14% abaixo do valor estipulado pela norma. A granulometria continua com dois tamanhos diferentes ficaram 10,71% abaixo. A granulometria uniforme com diâmetro de 6,3mm ficou 8,57% abaixo e a granulometria uniforme com diâmetro de 9,5mm ficou 5,71% abaixo do valor determinado pela norma.

Estes resultados mostram que teores de argamassa superiores a 44% levam a produção de concretos com tendência a não atender ao requisito permeabilidade estipulado pela norma ACI 522 R-06.

A Figura 7.30 mostra um resumo dos valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade nos concretos estudados. Na Figura 7.30 observa-se que a variação da permeabilidade foi maior para as granulometrias uniformes quando comparado com as granulometrias continuas, para qualquer tamanho de agregado e qualquer teor de argamassa estudado.

Os resultados mostram que quanto mais diversificada (contínua) for à granulometria do agregado graúdo, menor será o índice de vazio e menor será permeabilidade do concreto.

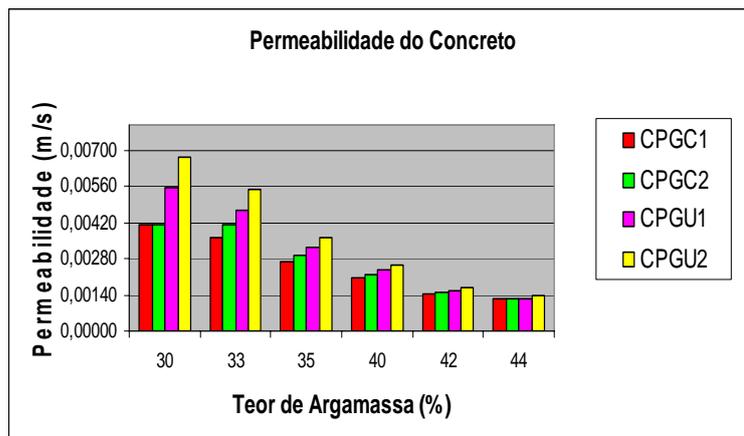


Figura 7.30 – Valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade do concreto.

Em todas as famílias de concretos estudadas ocorreu decréscimo do coeficiente de permeabilidade quando o teor de argamassa aumenta.

De acordo com a Figura 7.30 pôde ser verificado que o teor de argamassa é um fator preponderante no coeficiente de permeabilidade. Conforme a literatura, quanto maior o teor de argamassa menor é a permeabilidade dos concretos permeáveis, porque a argamassa preenche os espaços vazios dos agregados, controlando o fluxo de água através do concreto.

Os resultados mostram que isto corre independente da granulometria dos agregados.

Observando a Figura 7.30 nota se que a maioria dos teores de argamassa ensaiados, exceto o teor de argamassa de 42% e de 44%, apresentou coeficientes de permeabilidade bastante acima do estabelecido pela norma ($K \geq 0,0014$ m/s).

Os concretos estudados com teor de argamassa de 44% apresentaram valores inferiores ao que estabelece a norma e foram qualificados como concreto não permeável.

7.3.3 Desgaste por abrasão

As Tabelas 7.16, 7.17 e 7.18 apresentam os valores do peso e das medidas de cada fase do ensaio.

Como mostra a Tabela 7.16, no ensaio foram utilizados dois corpos de prova para cada tipo de granulometria do concreto.

Tabela 7.16 – Resultados antes do início do ensaio desgaste por abrasão.

Teor de Argamassa (%)	Corpo-de-Prova	Medida Inicial (mm)					Peso Inicial (g)
		FACES				Média	
		1	2	3	4		
40	CPGC1.1	51,00	50,20	50,20	51,30	50,68	432,62
	CPGC1.2	50,20	50,30	50,20	50,10	50,20	433,35
	CPGC2.1	49,10	49,00	50,20	49,00	49,33	378,82
	CPGC2.2	48,10	48,10	50,20	48,10	48,63	377,97
	CPGU1.1	50,20	50,20	49,10	50,10	49,90	385,85
	CPGU1.2	48,00	50,20	50,10	50,10	49,60	384,66
	CPGU2.1	50,30	51,10	51,20	50,30	50,73	392,12
	CPGU2.2	51,10	50,30	50,20	51,10	50,68	390,94
42	CPGC1.1	51,00	51,20	50,60	50,00	50,70	437,68
	CPGC1.2	51,20	51,10	50,60	49,80	50,68	436,94
	CPGC2.1	49,00	48,30	48,80	48,30	48,60	381,75
	CPGC2.2	49,00	49,00	48,90	48,60	48,88	382,60
	CPGU1.1	50,00	51,00	49,80	49,60	50,10	389,70
	CPGU1.2	49,80	50,00	49,60	49,80	49,80	388,51
	CPGU2.1	51,30	50,20	49,30	50,40	50,30	396,04
	CPGU2.2	50,80	51,10	49,00	48,90	49,95	394,85
44	CPGC1.1	49,80	50,90	51,00	51,00	50,68	439,86
	CPGC1.2	49,30	50,80	51,00	50,90	50,50	439,12
	CPGC2.1	48,60	48,40	49,00	50,00	49,00	383,66
	CPGC2.2	49,00	49,60	49,80	49,90	49,58	384,51
	CPGU1.1	50,20	49,00	50,30	49,00	49,63	391,65
	CPGU1.2	49,00	50,10	48,80	48,80	49,18	390,45
	CPGU2.1	51,00	50,20	51,00	50,90	50,78	398,02
	CPGU2.2	50,80	50,30	50,10	51,00	50,55	396,82
55	1	50,20	50,00	50,10	50,00	50,08	444,25
	2	50,00	50,20	50,00	50,00	50,05	443,51

Tabela 7.17 – Resultados após 500 m de desgaste por abrasão.

Teor de Argamassa (%)	Corpo-de-Prova	Medida em 500 m (mm)					Peso (g)
		FACES				Média	
		1	2	3	4		
40	CPGC1.1	48,80	47,90	47,88	48,94	48,38	425,57
	CPGC1.2	47,90	48,10	47,90	47,82	47,93	426,32
	CPGC2.1	46,60	46,49	47,69	46,47	46,81	369,09
	CPGC2.2	45,40	45,60	47,80	45,50	46,08	368,22
	CPGU1.1	47,70	47,70	46,60	47,50	47,38	378,20
	CPGU1.2	46,60	47,10	47,70	47,10	47,13	377,02
	CPGU2.1	48,00	47,80	49,80	48,10	48,43	384,73
	CPGU2.2	48,70	48,00	48,00	48,70	48,35	383,54
42	CPGC1.1	48,90	49,10	48,52	47,91	48,61	431,16
	CPGC1.2	49,20	49,06	48,52	47,71	48,62	430,44
	CPGC2.1	46,60	45,84	46,38	45,80	46,16	372,72
	CPGC2.2	46,50	46,52	46,44	46,10	46,39	373,55
	CPGU1.1	47,80	48,70	47,40	47,30	47,80	382,62
	CPGU1.2	47,50	47,70	47,40	47,40	47,50	381,45
	CPGU2.1	49,06	47,90	47,10	48,10	48,04	389,24
	CPGU2.2	48,40	48,80	46,76	46,62	47,65	388,00
44	CPGC1.1	47,80	48,87	48,96	48,98	48,65	433,55
	CPGC1.2	47,30	48,79	48,96	48,89	48,49	432,83
	CPGC2.1	46,10	45,80	46,60	47,60	46,53	374,94
	CPGC2.2	46,60	47,20	47,40	47,40	47,15	375,83
	CPGU1.1	48,00	46,82	48,00	46,64	47,37	384,85
	CPGU1.2	46,80	47,80	46,48	46,46	46,89	383,60
	CPGU2.1	48,80	48,00	48,70	48,60	48,53	391,41
	CPGU2.2	48,60	47,98	47,80	48,70	48,27	390,18
55	1	47,96	48,00	47,86	47,82	47,91	437,35
	2	47,80	47,90	47,60	47,58	47,72	436,57

Tabela 7.18 – Resultados após 1000 m de desgaste por abrasão.

Teor de Argamassa (%)	Corpo-de-Prova	Medida em 1000 m (mm)					Peso (g)
		Fases				Média	
		1	2	3	4		
40	CPGC1.1	46,60	45,70	45,50	47,00	46,20	418,42
	CPGC1.2	45,50	45,50	45,40	45,70	45,53	418,95
	CPGC2.1	44,00	43,80	45,00	43,80	44,15	359,17
	CPGC2.2	42,80	43,00	45,00	42,80	43,40	358,30
	CPGU1.1	45,30	45,30	44,10	45,00	44,93	370,44
	CPGU1.2	43,20	45,30	45,10	45,00	44,65	369,26
	CPGU2.1	45,60	46,50	46,40	45,80	46,08	377,24
	CPGU2.2	46,30	45,60	45,70	46,60	46,05	376,08
42	CPGC1.1	46,80	47,01	46,42	45,80	46,51	424,53
	CPGC1.2	47,06	46,98	46,42	45,60	46,52	423,80
	CPGC2.1	44,20	43,40	44,00	43,40	43,75	363,57
	CPGC2.2	44,00	44,10	44,00	43,60	43,93	364,54
	CPGU1.1	45,50	46,40	45,26	45,00	45,54	375,44
	CPGU1.2	45,22	45,50	45,10	45,20	45,26	374,30
	CPGU2.1	46,90	45,70	44,90	45,94	45,86	382,28
	CPGU2.2	46,32	46,60	44,50	44,46	45,47	381,05
44	CPGC1.1	45,78	46,84	46,92	46,96	46,63	427,15
	CPGC1.2	45,30	46,76	46,94	46,88	46,47	426,42
	CPGC2.1	43,70	43,40	44,20	45,10	44,10	366,10
	CPGC2.2	44,20	44,70	45,10	45,00	44,75	367,01
	CPGU1.1	45,80	44,50	45,90	44,55	45,19	377,93
	CPGU1.2	44,50	45,50	44,30	44,30	44,65	376,66
	CPGU2.1	46,60	45,82	46,50	46,46	46,35	384,71
	CPGU2.2	46,30	45,90	45,58	46,50	46,07	383,47
55	1	45,74	45,64	45,78	45,60	45,69	430,24
	2	45,50	45,80	46,68	45,64	45,91	429,42

Com os valores obtidos no ensaio foi calculada a percentagem da perda de massa e o desgaste que o corpo de prova sofreu.

As Figuras 7.31 a 7.37 mostram os valores calculados para 500 m e 1000 m.

Para o traço com teor de argamassa de 40%, como mostra a Figura 7.31, o corpo-de-prova com granulometria CPGC2 sofreu um desgaste maior, pois o percentual de perda de massa foi maior que todos os valores obtidos para os outros corpos-de-prova. Neste caso nenhum corpo-de-prova obteve valor menor que o do corpo-de-prova com traço CRG, portanto, os mesmos não foram aprovados no que se refere ao desgaste por abrasão.

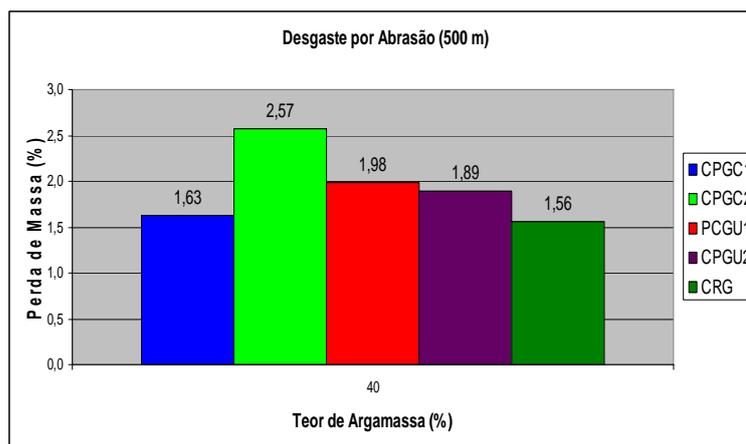


Figura 7.31 – Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 40%.

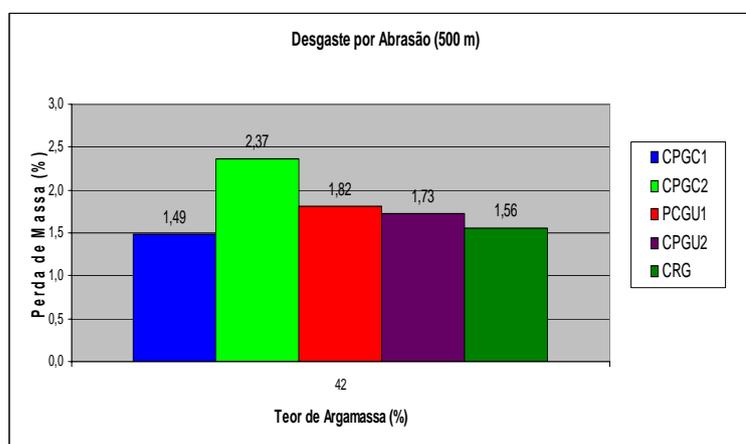


Figura 7.32 – Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 42%.

Para o traço com 42% de teor de argamassa verifica-se, através da Figura 7.32, que o desgaste de modo geral foi menor. Com o teor de argamassa maior a resistência à compressão do corpo-de-prova é maior proporcionando um desgaste menor.

Neste caso apenas o corpo-de-prova com granulometria CPGC1 apresentou um percentual de perda de peso menor que o corpo de prova com traço de referência.

A Tabela 7.19 apresenta a diferença entre o percentual de perda de massa dos traços com 40% e 42% de teor de argamassa.

Tabela 7.19 – Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% e 42%.

Teor de Argamassa (%)	40	42	Diferença
CPGC1	1,63	1,49	0,14
CPGC2	2,57	2,37	0,20
CPGU1	1,98	1,82	0,16
CPGU2	1,89	1,73	0,16

Pelos valores apresentados na Tabela 7.19 verifica-se que a perda de massa dos corpos-de-prova diminuiu em torno de 7,78% em relação à massa inicial.

A perda de massa para o corpo-de-prova com traço CPGC2 também foi maior para o teor de argamassa de 42%.

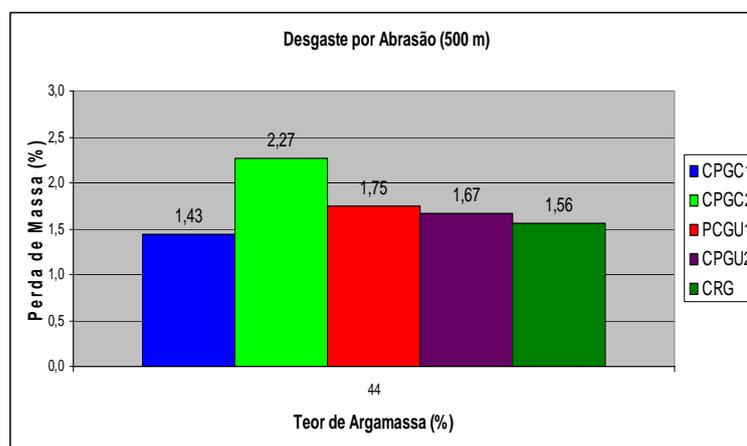


Figura 7.33 – Desgaste por abrasão após 500 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 44%.

O aumento do teor de argamassa no traço, como no aumento de 40% para 42%, também resultou em uma perda de massa menor, ou seja, o desgaste do corpo-de-prova foi menor. Para o teor de argamassa de 44% apenas o corpo-de-prova com granulometria CPGC1 apresentou valores adequados quando comparado com o valor de perda de massa obtido com o traço de referência (CRG).

A Figura 7.34 apresenta a comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 para os três teores de argamassa e a perda de massa do traço CRG.

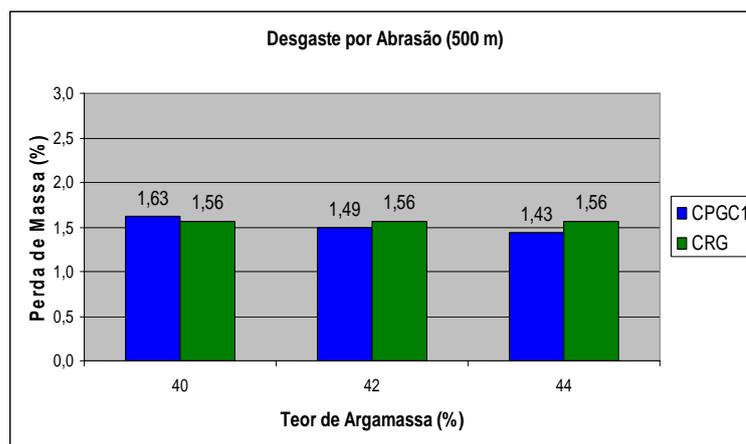


Figura 7.34 – Comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 para o teor de argamassa de 40%, 42% e 44% e a perda de massa do traço CRG.

Com o traço com teor de argamassa de 40% com mais 500 m percorridos no equipamento de ensaio de desgaste por abrasão, como mostra a Figura 7.35, o corpo-de-prova com granulometria CPGC2 sofreu um desgaste maior, pois o percentual de perda de massa foi maior que todos os valores obtidos para os outros corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova com teor de argamassa de 40% apresentaram desgaste superior ao concreto de referência empregada na presente pesquisa.

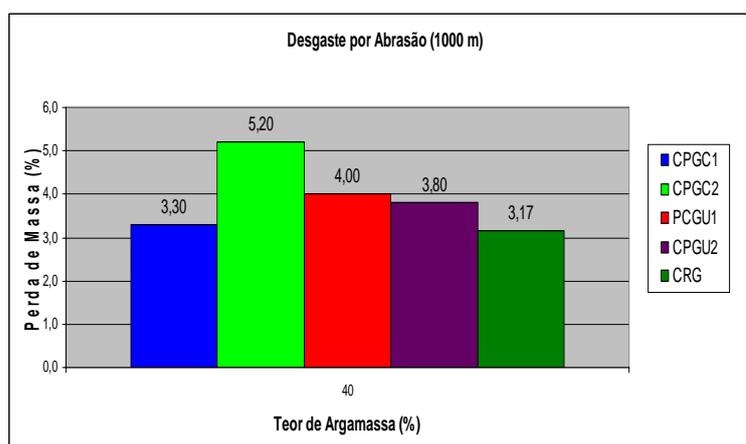


Figura 7.35 – Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 40%.

A Tabela 7.20 apresenta a diferença de perda de massa entre o traço com teor de argamassa 40% com 500 m e 1000 m de percurso.

Tabela 7.20 – Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% com 500 m e 1000 m de percurso.

Teor de Argamassa (%)	40 (500 m)	40 (1000 m)	Diferença
CPGC1	1,63	3,30	1,67
CPGC2	2,57	5,20	2,63
CPGU1	1,98	4,00	2,02
CPGU2	1,89	3,80	1,91

Pelos valores apresentados na Tabela 7.20 nota-se que o nível de desgaste se manteve. A diferença apresenta valores bem próximos dos valores do traço com 40% de teor de argamassa com 500 m de percurso.

Para o traço com 42% de teor de argamassa verifica-se, através da Figura 7.36, que o desgaste de modo geral foi menor. Com o teor de argamassa maior a resistência à compressão do corpo-de-prova é maior proporcionando um desgaste menor.

Neste caso apenas o corpo-de-prova com granulometria CPGC1 foi o único que apresentou valor de perda de massa adequado em relação ao corpo-de-prova com traço CRG. Manteve-se o mesmo corpo-de-prova (traço CPGC1) para o teor de argamassa de 42% com 500 m de percurso a mais.

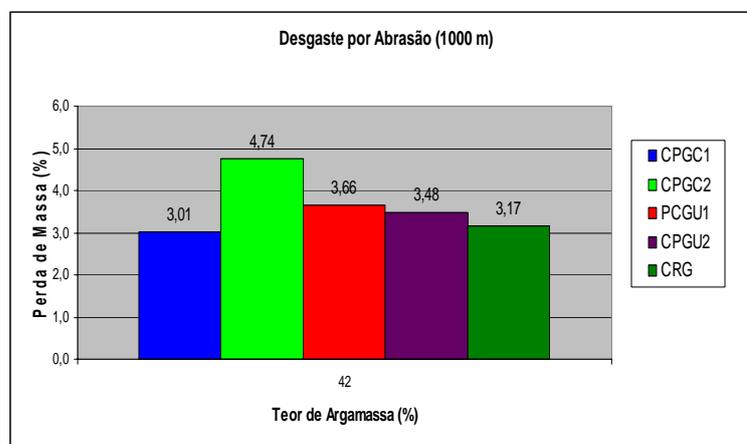


Figura 7.36 – Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 42%.

A Tabela 7.21 apresenta a diferença entre o percentual de perda de massa dos traços com 40% e 42% de teor de argamassa.

Tabela 7.21 – Diferença entre o percentual de perda de massa do teor de argamassa de 40% e 42%.

Teor de Argamassa (%)	40	42	Diferença
CPGC1	3,30	3,01	0,29
CPGC2	5,20	4,74	0,46
CPGU1	4,00	3,66	0,34
CPGU2	3,80	3,48	0,32

A perda de massa para o corpo de prova com traço CPGC2 também foi maior para o teor de argamassa de 42%.

Pelos valores apresentados na Tabela 7.21 verifica-se que a perda de massa dos corpos-de-prova diminuiu em torno de 8,85% com relação ao teor de argamassa de 40%. Este valor está bem próximo do valor calculado para a redução da perda de massa entre os corpos de prova com teor de argamassa de 40% e 42% para 500 m de percurso.

Conforme foi observado anteriormente o aumento do teor de argamassa no traço, como no aumento de 40% para 42%, para 44% também resultou em uma perda de massa menor, ou seja, o desgaste do corpo-de-prova foi menor. A Figura 7.37 mostra os desgastes, em massa, dos corpos-de-prova após 1000 m de percurso.

Para o teor de argamassa de 44% apenas o corpo-de-prova com granulometria CPGC1 apresentou valores similares quando comparado com o valor de perda de massa obtido com o traço CRG.

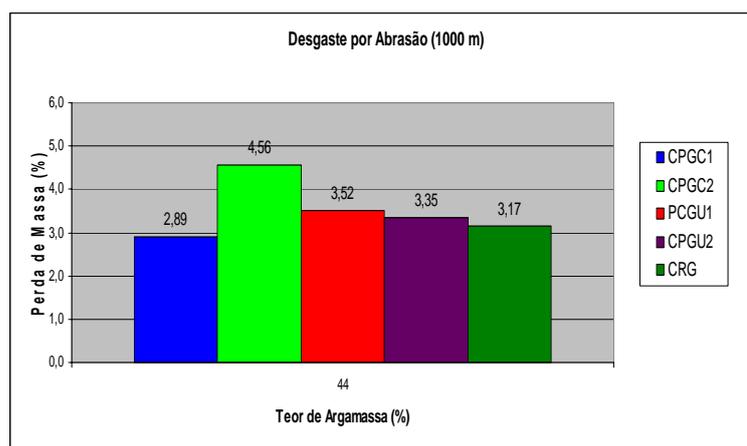


Figura 7.37 – Desgaste por abrasão após 1000 m de percurso – perda de massa do corpo-de-prova com concreto com teor de argamassa de 44%.

A Figura 7.38 apresenta a comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 que apresentou a menor perda de massa e a perda de massa do traço CRG.

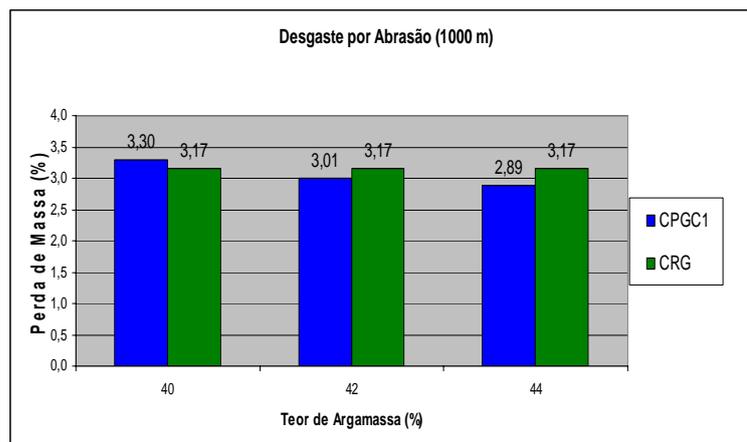


Figura 7.38 – Comparação entre a perda de massa do traço CPGC1 para o teor de argamassa de 40%, 42% e 44% e a perda de massa do traço CRG.

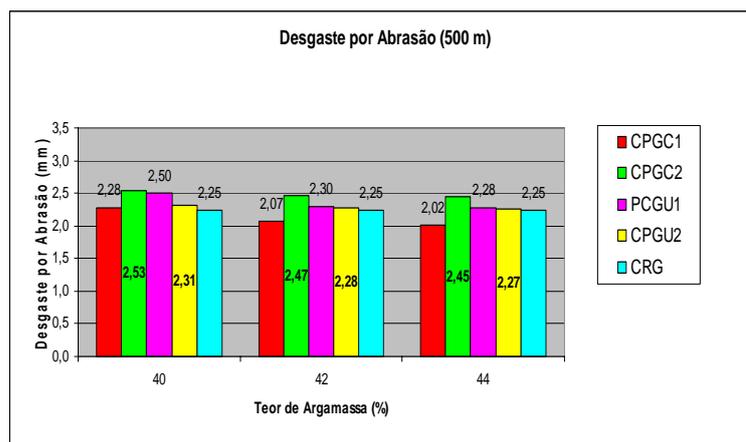
Esta análise verifica o comportamento do desgaste por abrasão dos corpos-de-prova moldados com concreto com teor de argamassa de 40%, 42% e 44% com granulometria contínua de 4,75; 6,3 e 9,5mm e 4,75 e 6,3mm e granulometria uniforme de 6,3mm e 9,5mm e teor de argamassa de 55% (CRG)

Os corpos de prova com teor de argamassa de 30%, 33% e 35% não foram avaliados devido aos inadequados resultados obtidos de resistência à compressão, os quais foram muito inferiores ao que estabelece a norma (35 MPa).

A Figura 7.39 apresenta um resumo dos valores encontrados para o desgaste por abrasão para os teores de argamassa de 40%, 42% e 44% após 500 m de desgaste e a Figura 7.39 mostra um resumo dos valores encontrados após 1000 m de desgaste.

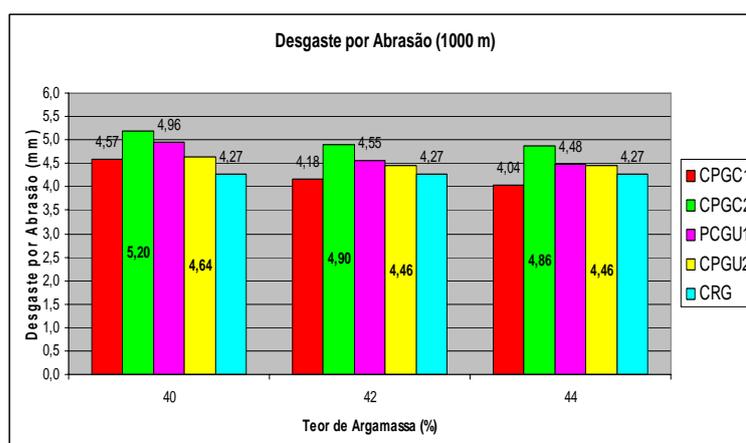
O aumento do teor de argamassa significa o aumento da quantidade de agregado miúdo e cimento no traço o que proporciona um número de vazios menor e, conseqüentemente, torna o traço mais resistente à compressão e ao desgaste. O que se observa é que a granulometria com diferentes tamanhos (CPGC1) e melhor distribuição dos grãos contribui para um melhor preenchimento dos vazios, tornando o traço mais resistente ao desgaste.

Pode-se deduzir que o desgaste por abrasão tem uma relação direta com a resistência à compressão. Os corpos de prova com maior valor de resistência à compressão foram os que apresentaram um desgaste menor.



A Figura 7.39 - Valores encontrados para o desgaste por abrasão para os teores de argamassa de 40%, 42% e 44% após 500 m de desgaste.

Em comparação ao concreto de traço o CRG, o traço CPGC1 apresentou os melhores resultados com valores de desgaste inferiores ao valor do traço CRG. O traço CPGC2 apresentou os piores valores de desgaste.



A Figura 7.40 - Valores encontrados para o desgaste por abrasão para os teores de argamassa de 40%, 42% e 44% após 1000 m de desgaste.

Com 1000 m de percurso, o que se observa é que o traço CPGC1 apresentou os melhores valores com pouco desgaste, com exceção do CPGC1 com teor de argamassa de 40% que desgastou mais que o do traço CRG. O traço CPGC2 apresentou os piores valores com um desgaste maior que o do traço CRG.

8 CONCLUSÃO

Após análise dos resultados de resistência à compressão, coeficiente de permeabilidade e desgaste por abrasão conclui-se que é possível produzir piso intertravado de concreto permeáveis que atenda aos requisitos normativos da ABNT e ACI.

Os ensaios demonstraram que o teor de argamassa e a granulometria do agregado graúdo influenciam substancialmente nos resultados obtidos para a resistência à compressão, coeficiente de permeabilidade e desgaste à abrasão do concreto.

Os concretos produzidos com teores de argamassa de 30%, 33%, 35% e 40%, independente do tipo de granulometria usado, não atingiram o valor mínimo de 35 MPa para resistência à compressão. Com relação ao coeficiente de permeabilidade, estes concretos apresentaram valores acima do valor mínimo estabelecido de 0,0014m/s.

Os concretos produzidos com teor de argamassa de 42% com granulometria CPGC1 e CPGU2 apresentaram valores de resistência à compressão maiores que o valor mínimo de 35 MPa. Em relação ao coeficiente de permeabilidade todos os concretos produzidos com teor de argamassa de 42% apresentaram valores acima de 0,0014m/s. No que se refere ao desgaste à abrasão, apenas o CPGC1 perdeu menos massa que o concreto de referência.

Os concretos produzidos com teor de argamassa de 44% com granulometria CPGC1 e CPGU2 apresentaram resistências à compressão maiores que o valor mínimo de 35 MPa. Em relação ao coeficiente de permeabilidade nenhum dos concretos produzidos com teor de argamassa de 44% apresentou um valor acima de 0,0014m/s. Para o desgaste à abrasão apenas o CPGC1 apresentou valor abaixo do desgaste do concreto de referência.

O concreto que atende aos parâmetros da presente pesquisa foi o executado com teor de argamassa de 42% e com granulometria contínua CPGC1 (4,75; 6,3 e 9,5) mm. Esta composição apresentou, simultaneamente, valores de resistência à compressão superiores a 35 MPa, coeficiente de permeabilidade (K) maior que o mínimo exigido de 0,0014 m/s e desgaste por abrasão inferior ao concreto de referência.

8.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Após a conclusão da presente pesquisa, os seguintes estudos são sugeridos para o avanço da área:

- a) Aprofundar os estudos sobre as proporções ideais de aditivos e adições para a produção de concretos permeáveis que atendam aos requisitos normativos;
- b) Avaliar aspectos referentes à durabilidade do concreto permeável;
- c) Verificar o comportamento do concreto permeável frente à obstrução dos poros durante seu uso;
- d) Realizar ensaios permeabilidade em concretos permeáveis, segundo os critérios da ASTM 1701/C (2009), que estejam em uso;
- e) Realizar novos ensaios empregando cimento CP 40;
- d) Produzir concreto permeável utilizando RCD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES F.. **Precast concrete paving & kerb association**. Leicester, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI- 211-3R-02**. Guide for Selecting Proportions for No- Slump concrete 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI – 522R-06**. Pervious concrete. Michigan, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1701/C**. Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete. Pennsylvania 2009.

ALMEIDA, I. R., SCIPION, B.. **Projetos – LAMCO**, Disponível em http://www.uff.br/matconst/historia_do_cimento1.htm, Acessado em novembro de 2013.

ANDRIOLO, F.R. **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução**. São Paulo, Pini, 738p. 1984,

ANDRIOLO, F. R.; SGARBOSA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto**. São Paulo: Newswork, 1993.

ARAGÃO FILHO, L. A. C. M., **Materiais de construção II – agregados**, notas de aula. Disponível em <http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/conc02.pdf>. Acessado em setembro de 2013.

ARAGÃO, M. M., **Materiais de construção II aglomerantes**, Notas de aulas. Disponível em http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/cimento_portland.pdf. Acessado em novembro 2013.

ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDEFUM J. A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRG. Porto Alegre, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Guia básico de utilização do cimento portland** – BT-106, 7 ed., São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

_____. **NBR 5564**: Lastro Padrão – Determinação da Forma do Material. Rio de Janeiro, 2011

_____. **NBR 5738**: Concreto procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739:** Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6467:** Agregados: Determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

_____. **NBR 7218:** Agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro. 2010.

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

_____. **NBR NM 7251:** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9935:** Agregados para concreto – Terminologias. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº. 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12654:** Controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992b.

_____. **NBR 13292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

BACARJI, T. F. R., KOENDERS, E. A. B., FIGUEIREDO, E. J. P., LOPES, J. L. M. P. **Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers.** Construction & Building Materials, ISSN 0950-0618. v. 45, p 1-10, 2013.

BASÍLIO, E. S.. **Agregados para concreto. Estudo técnico n° 41.** São Paulo: ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, fev.1995. 44p.

BATEZINI, R.. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves,** Dissertação de Mestrado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BAUER, L. A. F.. **Materiais de construção.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 435 p., 1987.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr, E. R. J.. **Resistência dos materiais.** 3ª ed. São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1255 p., 1995.

BIANCHI, F. R., BRITO, I. R. T., CASTRO, V. A. B.. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível.** Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste. Disponível e [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_ apresentações /ISIS_RAQUEL.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentações/ISIS_RAQUEL.pdf). Acessado em setembro de 2008.

BRITISH STANDARDS (BSI). **Pavements constructed with clay, natural stone or concrete pavers.** Part 13: Guide for the design of permeable pavements constructed with concrete paving blocks and flags, natural stone slabs and setts and clay pavers. BS 7533-13:2009. Londres, 2009.

BRIZOLA, R. M.. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada,** Dissertação de Mestrado do programa de pós-graduação em Engenharia Civil – GEPECON da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

CIMENTO ITAMBÉ - **Treinamento de mão de obra para construção civil. Cimento.** Disponível em <http://www.cimentoitambe.com.br/assessoria-tecnica/timao/>. Acessado em novembro de 2013.

CLARO, A., BARCELOS, D., FONTANA, G., SANTOS, M. E. e MAIA, T. **Pavimentação.** Trabalho de conclusão do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina – Santa Catarina, 2012.

COSTA, C.; CARVALHO, P. ALMEIDA; BORDADO, J.C. e NUNES, A. **Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia electrónica de varrimento.** C.Tecn. Mat.[online]. 2009, vol.21, n.3-4, pp. 31-35. ISSN 0870-8312.

FEBESTRAL. **Les revêtements drainantss.** Disponível em: <<http://www.febe-febestral.be>>. Acesso em setembro de 2013.

FERGUSON, B. K. **Porous pavements.** Integrative Studies in Water Management and Land Development. Florida, 2005.

FREITAS JR., J. A. **Materiais de construção.** Notas de aula. Disponível em http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/0/00/TC031_Agregados_.pdf. Acessado em 2013.

FREITAS JR., J. A. **Materiais de construção – aditivos para concreto,** notas de aula. Disponível em <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/0/00/TC031>. Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

GIAMUSSO, S. E. **Manual do concreto.** São Paulo, 1992.

GIONGO, J. S.. **Concreto armado – introdução e propriedades dos materiais,** notas de aulas ministradas em Estrutura de concreto Armado I da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007, disponível em [http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/ Downloads/Introd_Prop_Materiais.pdf](http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Introd_Prop_Materiais.pdf).

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com blocos pré-moldados de concreto – o método da PCA.** In: Associação Brasileira de Pavimentação (ABPV). 24ª Reunião anual d pavimentação, Belém, 1990.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992.

HOLANDA, A. B. de. **Dicionário Aurélio básico da língua portuguesa**. 1ª Ed. RJ, 1988.a

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. A Paramount Communications Company, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, IBRACON, 2007. Editor Geraldo Cechella Isaia

INTERPAVE. **Permeable pavements: guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**. Publicação L534:L217. Ed. 5. Leicester, 2008.

INTERPAVE. **Responsible rainwater management around the home**. Interpave – The Precast Concrete Paving & Kerb Association. Leicester, 2006.

JAMES, W.; VON LANGSDORFF, H. **“The use of permeable concrete block pavements in controlling environmental stressors in urban areas”**. 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City – África do Sul, 2003.

KARASAWA, A.; SUDA, S. **Characteristics of new type permeable concrete block paving system**. 5th International Concrete Block Paving Conference, Tel-Aviv – Israel, 1996.

KNAPTON, J.; COOK, IAN D. **Permeable paving for a new container handling area at Santos container port, Brazil**. In: 6th International Conference on Concrete Block Paving. Tokyo – Japan, 2000.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**, Monografia apresentada ao Curso de especialização em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MARCHIONI, M.; SILVA, Cl. O. **Pavimento intertravado permeável – melhores práticas** - ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo, Pini, 573 p. 1994.

MELLO, V., TEIXEIRA, A. M. **Mecânica dos solos**. Publicação n. 137. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1967.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos (MPR)**, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Publicação IPR – 714, 2ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 2005.

MOREIRA, A. R., ROMANO, C. A. **Apostila de tecnologia do concreto**, notas de aulas. Disponível em <http://pessoal.utfpr.edu.br/amacinrm/tecc-epc/arquivos/Apostila01.pdf>. Acesso em novembro de 2013.

NEITHALATH, N., WEISS, W.J., and OLEK, J. **Enhanced porosity concrete: electrical impedance, acoustic absorption, and hydraulic permeability**. Presented at the ACI Fall Convention, Boston, 2003.

NETO, G. L. G. **Estudo comparativo entre a pavimentação flexível e rígida**, Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, Belém, Pará, 2011.

NISSOUX, J. L.; GNAGNE, C.; MARZIN, J.; LEFEBVRE, J. P.; PIPIEN, G. **A pervious cement concrete wearing course below 73 dB(A)**. Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University, Indiana, 1993, Vol.2, pp. 269-284.

NUNES, W. C. **Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido**, dissertação de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.

OLIVEIRA, I. **Apostila de MACO I – Agregados**, notas de aula da disciplina de Materiais de Construção Civil I do Curso de Engenharia Civil da PUC Goiás. Disponível em [http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/14878/material/Agregados %202012-2%20Jana%C3%ADna.pdf](http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/14878/material/Agregados%202012-2%20Jana%C3%ADna.pdf), acessado em novembro 2012.

ONSTENK, E.; AGUADO, A.; EICKSCHEN, E.; JOSA, A. **Laboratory study of porous concrete for its use as top layer of concrete pavements**. Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University, Indiana, Vol.2, pp. 125-139. 1993,

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1995.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de textos**. 2ª edição. São Paulo, 2002.

PORTO, H.G. **Pavimentos drenantes**, 1ª edição. São Paulo, SP: D&Z editora, 1999.

PORTAL DO CONCRETO. **Cimento** Portland. Disponível em <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/caementu.html>. Acessado em novembro 2013.

RAUBER, J. J. (Coord.); SOARES, M. (Coord.). **Apresentação de trabalhos científicos**. 3ª ed. Passo Fundo: UPF, 2003.

REYES, F.; TORRES, A. **Concreto poroso: tecnologia e investigación para su uso en pavimentos**. In: Revista Noticreto nº65. Colombia, p. 56-61. 2002.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade**, dissertação de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**, vol.1. São Paulo: Pini, 1997.

SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavement**. 1st edition. Elsevier, New York and London, 1990.

SILVA, A. M.. **Notas de aula: infiltração**. Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Lavras - MG, 2008.

SILVA, C. O. **Execução e manutenção de pavimento intertravado**, ABCP, 2012.

SILVA, N. G.; COLLODETTI, G.; PICHETTI, D. Z. C. M. e GLEIZE, P. J. P. **Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia**, Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2009, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.

SILVEIRA, D. A. **Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto**. Dissertação de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2010.

SILVEIRA, L. A. X. **Contribuição para um modelo de seleção de revestimentos de pavimentos em ambientes urbanos (caso de Curitiba)**. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Construção Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2003.

SMITH, D. R. **Permeable interlocking concrete pavements**. 4th edition. ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute. Washington D.C., 2011.

SIQUEIRA, E. **Companhia brasileira de cimento Portland Perus: contribuição para uma história da indústria pioneira do ramo no Brasil (1926-1987)**, Dissertação de mestrado do programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Ciências e Letras da UNESP, 2011.

SIQUEIRA, L. V. M. **Laboratório de materiais de construção II – 1ª parte – agregados**, Ensaios Tecnológicos da Disciplina de Materiais de Construção II do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Santa Catarina, 2008.

SITE DA EMPRESA MPZ Aplicações Tecnológicas. **Amoco Geotêxteis, Estradas, Aeroportos, Estacionamentos, Terminais de Carga e Áreas de Estocagem**. Disponível em <http://www.mpz.com.br/geotextil.html>. Acesso em: setembro de 2013.

SOARES, J. **Pavimentos de concreto cimento**, Notas de aula. http://www.det.ufc.br/jsoares/super/10_Pavimentos_de_concreto.pdf. Acesso em setembro de 2013.

SOUZA, L. M. S. **Estudo de hidratação e nanoindentação de pastas de cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar com hidróxido de cálcio**, Dissertação de Mestrado do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

SWAN, D. J. **Development of the permeable design pro permeable interlocking pavement design system**. 9th International Conference on Concrete Block Paving. Buenos Aires, 2009.

TUCCI, C. E.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Posto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS-ABRH, 1995, 428p.

URBONAS, B; STAHERE, P. **Stormwater best management practices and detention**. Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey: 450 p, 1993.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Urbanization and streams: studies of hydrological impacts**. Office of Water. Publicação 841-R-97-009. Washington D.C., 1997.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

WINGER, Jr. R.J. **In place permeability tests used for subsurface drainage investigation**. Denver, Colorado, Divison of. Drainage and Groundwater Engineering, 1965. Lv. i.l.