

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ABNER AUGUSTO DOS SANTOS LEITE

**BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA COM
ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

ABNER AUGUSTO DOS SANTOS LEITE

**BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA COM
ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o Esp Sérgio Oberhauser Q. Braga

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA COM ADIÇÃO DE SÍLICA
ATIVA**

por

Abner Augusto dos Santos Leite

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16h30 do dia 18 de junho de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia R. de Oliveira
(UTFPR)

Prof. Me. Adalberto R. de Oliveira
(UTFPR)

Prof. Esp. Sérgio Roberto O. Q. Braga
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Marcelo Guelbert

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeira a Deus pela minha vida, saúde e oportunidades a mim concedidas. Por me dar forças dia após dia para me proporcionar ir em busca de meu sonhos e anseios. Por me acolher em seus braços, amparar quando em dificuldades através da fé e me dar uma família incrível.

Em especial a minha família, sobre tudo minha mãe e meu pai que sempre me apoiarem em minhas decisões e me repreenderam quando preciso, mas além de tudo confiarem em mim e me amar incondicionalmente. A minha avó por auxiliar meus pais em minha criação, cuidar de mim quando necessário e todas as orações a mim destinadas. Ao meu irmão pelo companheirismo e amizade.

Aos professores que passaram pela minha vida acadêmica, desde o ensino básico ao ensino superior. A todos os professores que colaboraram com minha formação profissional, inclusive os técnicos de laboratório que tanto auxiliaram neste trabalho de conclusão de curso.

Todos meus amigos e colegas que estiveram presente desde o inicio da minha formação e que contribuíram para o meu amadurecer na Universidade. Todos os amigos que torceram e torcem pelo meu sucesso. A minha namorada por seu auxilio, amor, compreensão e paciência em diversos momentos, inclusive nos momentos difíceis e de indisponibilidade.

RESUMO

LEITE, Abner. A. S. Blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de sílica ativa. 2015. 89f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão. 2015.

A adição de sílica ativa vem sendo amplamente estudada nos últimos tempos com seu uso em concreto de alto desempenho empregado em funções estruturais, com o objetivo de diminuir a seção de pilares. Em relação às peças de concreto pré-moldado para pavimentação, popularmente conhecido com *pavers*, utilizando adição de sílica ativa em seu traço não são disponíveis muitas referências de estudos, desta forma o estudo teve como grande parte as referências de concreto de alto desempenho. O concreto usado para a fabricação de peças para a pavimentação é denominado concreto seco, tendo como o principal método de moldagem com equipamento vibro-prensa. Com o surgimento de muitas indústrias informais para a produção de bloco de concreto e resulta em um alto índice de peças não conforme as normas técnicas. A NBR 9781 passou por revisão em 2013 modificando a resistência mínima à compressão para calçamento para 35 MPa. Desta forma, maneiras de aumentar a resistência do concreto são necessárias ser estudadas, a presente pesquisa tem como objetivo a adição de sílica ativa em um teor de 5 e 8% em relação a massa de cimento no traço padrão de uma indústria de Campo Mourão - PR com o objetivo de verificar alterações na resistência e na absorção de água dos blocos e do concreto para os blocos. Após a fabricação os blocos e corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência a compressão e absorção de água. Os resultados mostram que com a adição de sílica ativa ocorreu um aumento significativo na resistência à compressão e não houve variações significativas no valor de absorção de água dos blocos e corpos de prova, contudo analisando a penetração de água no interior do corpo de prova no ensaio de absorção de água por capilaridade notou-se que as amostras provenientes do traço com adição 8% de sílica ativa foram as que tiveram uma menor distribuição de água no interior do C.P.

Palavras chave: Bloco de concreto para pavimentação intertravada. *Pavers*. Sílica ativa.

ABSTRACT

LEITE, Abner. A. A. Concrete blocks with added silica fume for interlocking paving. 2015. 89f. Course work of course work (Bachelor of Civil Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2015.

The addition of silica fume in high performance concrete for structural purposes has been widely studied over the last years, in order to reduce the cross section dimensions of the columns. Regarding to the precast concrete blocks for paving, known as *pavers*, with added silica fume in the concrete mix ratio, the number of references which were available for study was limited, thus this paper was mainly based on the high performance concrete studies. The concrete used to manufacture products for paving purposes is denominated Zero-slump concrete, which the principal method of casting uses a vibro press block machine. Due to the growth of the informal sector that produces concrete blocks, a considerable amount of products which are not in accordance to the technical standards can be observed. The NBR 9781 was recently revised in 2013 and the concrete block for paving minimum compression resistance was changed to 35 MPa. Thus, several methods to improve the concrete resistance are necessary to be studied, and this paper aims to investigate the addition of silica fume, with a ratio of 5 and 8% of the cement mass present in a standard concrete mix ratio of an industry located in Campo Mourao – PR, verifying the changes in the resistance and water absorption of the blocks and the concrete used to produce the blocks. After the manufacture procedure, the specimens were submitted to compression resistance and water absorption tests. The results show that with the addition of silica fume to the concrete block, the compression resistance increased significantly, while the water absorption did not present a considerable change. However, the water penetration inside the specimens with 8% of silica fume during the water absorption by capillarity test was less distributed.

Keywords: Concrete blocks for interlocking paving. *Pavers*. Silica fume.

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ARI	Alta Resistência Inicial
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CBR	California Bearing Ratio
CP	Cimento Portland
CSA	Canadian Standards Association
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e transporte
ICPI	Instituto de Pavimentos de Peças Pré-moldadas de Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c	Relação Água/Cimento
a.C.	Antes de Cristo
Al_2O_3	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
cm^3	Centímetros cúbicos
CO_2	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
d.C.	Depois de Cristo
Fe_2O_3	Óxido de ferro
fck	Resistência Característica à Compressão
fck,est	Resistência Característica Estimada à Compressão
g	Gramas
h	Teor de Umidade
kg	Quilograma
km	Quilometro
kN	Quilonewtons
m^2	Metro Quadrado
m^3	Metro Cúbico
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal

N	Newtons
PPC	Peça pré-moldada de concreto
SA	Sílica ativa
SiO ₂	Dióxido de silício
t	Coefficiente de Student
ton	Tonelada

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- TIPOS DE REVESTIMENTOS.....	16
FIGURA 2- VIA OSTIENSE.....	18
FIGURA 3- RUA EM POMPÉIA.....	18
FIGURA 4- CALÇAMENTO PÉ-DE-MOLEQUE.....	19
FIGURA 5 - SEÇÃO DAS SUCESSIVAS CAMADAS DO PAVER.....	21
FIGURA 6- SEÇÃO DE CORTE DO PAVIMENTO COM ESPESSURAS INADEQUADAS	23
FIGURA 7 - GRANULOMETRIA AREIA DA EMPREGADA NA CAMADA DE ASSENTAMENTO.....	24
FIGURA 8 - GRANULOMETRIA DA AREIA PARA AS JUSTAS DE REJUNTAMENTO	24
FIGURA 9 - CONTENÇÕES LATERAIS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO OU ROCHA CORTADA.....	26
FIGURA 10 - CONTENÇÕES LATERAIS COM CONCRETO <i>IN LOCO</i>	26
FIGURA 11 - INTERTRAVAMENTOS: VERTICAL, ROTACIONAL E HORIZONTAL.	27
FIGURA 12- DESLOCAMENTO VERTICAL E HORIZONTAL.	28
FIGURA 13- CARGA EXCÊNTRICA EM UMA PEÇA SEM CONTENÇÕES LATERAIS (A) E CARGA EXCÊNTRICA EM UMA PEÇA COM CONTENÇÕES LATERAIS.	29
FIGURA 14 - MOVIMENTO DE GIRAÇÃO NO EIXO HORIZONTAL.....	30
FIGURA 15 - COMPARAÇÃO ENTRE CLASSES SEGUNDO VÁRIAS NORMAS.....	32
FIGURA 16- PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES DOS AGREGADOS.....	33
FIGURA 17 - CRISTAIS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM UMA MATRIZ DE C-S-H APÓS UM DIA DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.	37
FIGURA 18- MICROESTRUTURA DO CONCRETO COM C-S-H (1), CA (OH) ₂ (2) E O VAZIO CAPILAR (3).....	39
FIGURA 19 - EFEITO FÍLER DA SÍLICA ATIVA.....	42
FIGURA 20 - MISTURADOR PLANETÁRIO DE EIXO VERTICAL.....	46
FIGURA 21 - MISTURADOR PLANETÁRIO DE EIXO VERTICAL E SUAS PALHETAS.	46
FIGURA 22 – MISTURADOR DE EIXO HORIZONTAL.	46
FIGURA 23 - MISTURADOR DE EIXO HORIZONTAL E SUAS HÉLICES.....	46
FIGURA 24 - BLOCOS PARA PAVIMENTAÇÃO LOGO APÓS A SAÍDA DA VIBRO- PRESA.....	47
FIGURA 25 - ENTRADA DE MATERIAIS NO MISTURADOR DE EIXO VERTICAL. ...	49
FIGURA 26 - VIBRO-PRENSA COM ESTEIRA ROLANTE.....	50
FIGURA 27 - BLOCOS POSTOS LADO A LADO EM PALLETS EM PROCESSO DE SECAGEM E CURA.	51
FIGURA 28 - MAQUINA VIBRO COMPRESSÃO HIDRÁULICA.....	51
FIGURA 29 - BLOCOS DE CONCRETO EM <i>PALLETS</i>	52
FIGURA 30 - CONCRETO RETIRADO DO MISTURADOR PARA MOLDAGEM DE C.P.	53

FIGURA 31 - CORPOS DE PROVA APÓS A MOLDAGEM.....	53
FIGURA 32 - CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DEPOIS DE DESMOLDADOS E MARCADOS SEGUNDO AS ADIÇÕES.....	54
FIGURA 33 - CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DEPOIS DE RETIDAS AS FORMAS	55
FIGURA 34 - ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL POR MEIO DO FRASCO CHAPMAN.....	56
FIGURA 35 - COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM A ZONA UTILIZÁVEL E ZONA ÓTIMA DA AREIA NATURAL.....	57
FIGURA 36 - COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM A ZONA UTILIZÁVEL E ZONA ÓTIMA DA AREIA ARTIFICIAL.....	59
FIGURA 37 - COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM A ZONA UTILIZÁVEL E ZONA ÓTIMA DA BRITA 0.....	61
FIGURA 38- PRENSA HIDRÁULICA MANUAL ELETRÔNICA	64
FIGURA 39 - CORPOS DE PROVA DEPOIS DE REALIZADO O CAPEAMENTO DE UM DOS LADOS.....	64
FIGURA 40 - PESAGEM DO CORPO DE PROVA NA CONDIÇÃO SATURADO SUPERFÍCIE SECA	67
FIGURA 41 - CORPOS DE PROVA NA ESTUFA.....	67
FIGURA 42 - PRENSA COM OS PRATOS CARREGAMENTO O CORPO DE PROVA À RUPTURA À COMPRESSÃO.....	68
FIGURA 43 - BADEJA COM SUPERFÍCIE DE 5 MM DE ÁGUA COM CORPOS DE PROVA PARA A OBTENÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	70
FIGURA 44 - RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	80
FIGURA 45 - DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO INTERIOR DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO COM CONCRETO SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA.....	81
FIGURA 46 - DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO INTERIOR DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO COM CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE SÍLICA ATIVA.	81
FIGURA 47 - DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO INTERIOR DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO COM CONCRETO COM ADIÇÃO DE 8% DE SÍLICA ATIVA.	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - GRANULOMETRIA DA AREIA DE ASSENTAMENTO SEGUNDO A ABNT	25
TABELA 2 - MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA AREIA	56
TABELA 3 - GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO NATURAL	57
TABELA 5 - GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO ARTIFICIAL	59
TABELA 4 - MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO PÓ DE PEDRA.....	58
TABELA 7 - GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL.....	61
TABELA 6 - MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL	60
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA.....	62
TABELA 9 - FATOR MULTIPLICATIVO <i>P</i>	65
TABELA 10 - COEFICIENTE DE <i>STUDENT</i>	66
TABELA 11 - BLOCO DE CONCRETO SEM ADIÇÃO S.A.....	71
TABELA 12 - BLOCO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% S.A.	72
TABELA 13 - BLOCO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 8% S.A.	72
TABELA 14 - RESUMO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MEDIA E RESISTÊNCIA ESTATÍSTICA DOS BLOCOS DE CONCRETO	73
TABELA 15 - VALORES DE PESAGEM DOS BLOCOS DE CONCRETO SECO, SATURADO COM SUPERFÍCIE SECA E O RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA.	75
TABELA 16 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CORPO DE PROVA COM TRAÇO PADRÃO (0%).....	76
TABELA 17 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO C.P. COM TRAÇO COM ADIÇÃO DE 5%	76
TABELA 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO C.P. COM TRAÇO COM ADIÇÃO DE 8%	77
TABELA 19 - VALORES DE PESAGEM DOS CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICOS...78	
TABELA 20 - RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DOS CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICOS	79
TABELA 21 - RESULTADOS DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICO.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1	O PAVIMENTO	15
4.1.1	Tipos de Pavimento	15
4.1.2	Início da Pavimentação	16
4.1.3	Histórico da Pavimentação Intertravada	17
4.1.3.1	No Mundo	17
4.1.3.2	No Brasil	19
4.2	PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BLOCOS DE CONCRETO	20
4.2.1	Definição	20
4.2.2	Intertravamento	27
4.3	MATERIAIS QUE CONSTITUEM O BLOCO DE CONCRETO	30
4.3.1	Agregados	31
4.3.1.1	Agregado Miúdo	34
4.3.1.2	Agregado Graúdo	34
4.3.2	Cimento Portland	35
4.3.2.1	Sólidos na pasta de cimento hidratada	36
4.3.2.1.1	Silicato de cálcio hidratado	36
4.3.2.1.2	Hidróxido de cálcio	37
4.3.2.1.3	Sulfoaluminatos de cálcio	37
4.3.2.1.4	Grãos de clínquer não hidratados	38
4.3.2.2	Vazios na pasta de cimento hidratado	38
4.3.2.2.1	Espaço interlamelar no C-S-H	38
4.3.2.2.2	Vazios Capilares	39
4.3.2.2.3	Ar incorporado	40
4.3.3	Reações de hidratação resumidas	40
4.3.3	Sílica Ativa	40
4.3.3.1	O Efeito da Sílica ativa na microestrutura do concreto	43
4.3.3.2	Teor de sílica ativa	43
4.3.4	Superplastificante	44
4.4	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS PARA PAVIMENTO	45
5	METODOLOGIA	48
5.1	PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO	48
5.1.1	Traço	48
5.1.2	Caracterização do equipamento utilizado	49
5.1.3	Procedimento de cura dos blocos de concreto	52
5.1.4	Procedimento de moldagem do concreto nos corpos de prova em formatos cilíndricos	52
5.1.5	Procedimento de amostragem dos blocos de concreto	54
5.1.6	Caracterização dos materiais utilizados na produção dos blocos de concreto	55
5.1.6.1	Cimento	55

5.1.6.2 Agregado Miúdo Natural.....	55
5.1.6.3 Agregado Miúdo Artificial.....	58
5.1.6.4 Agregado Graúdo Natural.....	60
5.1.6.5 Água.....	62
5.1.6.6 Sílica Ativa.....	62
5.2 ENSAIOS REALIZADOS.....	63
5.2.1 Resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimento.....	63
5.2.2 Absorção de água dos blocos de concreto para pavimento.....	66
5.2.3 Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos feito com concreto de blocos para pavimento.....	68
5.2.4 Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova cilíndricos moldados com concreto para blocos.....	69
6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	71
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO.....	71
6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO.....	75
6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS COM CONCRETO PARA BLOCOS.....	76
6.4 ABSORÇÃO CAPILAR DE ÁGUA DO CONCRETO PARA BLOCOS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	78
7 CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

As peças intertravadas, também denominadas como *pavers*, vêm sendo usadas como revestimentos para pavimento como alternativa ao revestimento asfáltico em todo mundo. Como vantagens: a liberação do tráfego mais rápido, a praticidade de manutenção pontual de peças e possibilidade de retirada do revestimento posterior à execução para manutenção/implantação de dutos subterrâneos.

A industrialização dos blocos de concreto para o pavimento intertravado possibilita as peças uniformidade e qualidade, através de testes de conformidades de formato e resistência à compressão, deste modo há um padrão para as peças aprovadas.

Em busca de uma resistência à compressão mais elevada e uma maior durabilidade das peças que constituem o revestimento optou-se por acrescentar na constituição dos blocos de concreto uma adição de sílica ativa, como alternativa para essa melhora segundo estudos dos concretos de alto desempenho.

O presente trabalho é dividido em objetivos, a revisão bibliográfica que aborda a pavimentação intertravada, os materiais que podem ser empregados para fabricação dos blocos de concreto e os equipamentos usados para a confecção dos blocos como prensas e misturadores, materiais e métodos onde são mostradas as características dos materiais utilizados além da metodologia de ensaios que foram submetidos os blocos de concreto e corpos de prova. Já nos resultados obtidos e discussões é feita uma análise de resultados de todos os ensaios de cada traço usado. Por fim é apresentada a conclusão da pesquisa e as referências bibliográficas que foram utilizadas para o estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é avaliar as especificações do bloco de concreto para pavimento com base na NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013). Realizar os ensaios nos blocos de concreto para pavimento e também ensaios com corpos de prova moldado com o concreto para blocos, com adição de sílica ativa em comparativo com os sem adição.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico dessa pesquisa é propor teores para a dosagem de sílica ativa em relação ao cimento com base no estudo do concreto de alto desempenho, fixados esses teores de sílica ativa confeccionar os blocos na empresa colaboradora, analisar as propriedades físicas e mecânicas do bloco de concreto com adição de sílica ativa e realizar os seguintes ensaios:

- Resistência à compressão característica do bloco de concreto sem e com adição de sílica ativa.
- Absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação analisados.
- Resistência à compressão dos corpos de provas cilíndricos moldados com o concreto para blocos de pavimento com adição de S.A. e sem adição.
- Absorção de água por capilaridade dos corpos de provas cilíndricos moldados com o concreto para blocos, comparando os blocos com adição e sem de sílica ativa.

3 JUSTIFICATIVA

Os *pavers* são boas alternativas para a pavimentação de locais do cotidiano das pessoas, são eles praças, calçadas, parque e até no setor industrial com alta solicitação como armazéns de estocagem, docas de portos e estacionamento de manobras e acesso.

Por ser um sistema de pavimento fácil de ser executado, com uma mão de obra bem treinada possibilita a rápida liberação do pavimento. Quando ocorrem quebras de peças a manutenção é pontual e apenas os blocos danificados precisam ser trocados. Depois de ser executado o pavimento se há a necessidade de passar qualquer tubulação sob o pavimento, podem ser retiradas as peças, armazenadas e depois recolocadas sem causar resíduos, diferente do pavimento flexível que precisaria ser quebrado e depois refeito assim diminuindo o custo da manutenção.

Muitas peças vendidas por fabricantes do Brasil são reprovadas nos ensaios da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013). Na maioria dos casos no critério da Resistência Característica à Compressão (f_{ck}) que estabelece 35 MPa para calçamento, tráfego veículos leves e comerciais de linha, 50 MPa para tráfego de veículos especiais e uma utilização que cause uma abrasão acentuada no *pavers*. Segundo AMADEI (2011, p. 61) a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 1987) não abrangia usos como calçamentos, ciclovias e até mesmo rodovias.

Para produzir um *paver* que atenda essas necessidades é necessário utilizar um alto consumo de cimento, isso afeta o custo final maior na produção do bloco. Se analisarmos em um contexto geral, com a o decréscimo do consumo de cimento se diminuí a poluição gerada em sua produção, visto que o cimento apresenta um enorme poluente advindo da queima da mistura para a obtenção do clínquer, dos componentes da massa do bloco o cimento é o que mais gera poluição atmosférica. Buscar soluções para diminuir emissões de CO₂ e demais poluentes é um dos desafios do século (METHA E MONTEIRO, 2008).

O pavimento intertravado vem sido usado desde a década 1950, na Europa. Na década de 70 a Ideal se torna uma das primeiras companhias a produzir blocos de concreto para *paver* nos Estados Unidos. Já nessa época o pavimento intertravado era denso, com dimensões precisas de blocos e o piso antiderrapante (IDEAL CONCRETE BLOCK COMPANY, INC, 2006, p. 4).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O PAVIMENTO

O Pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem, com camadas de materiais com resistências e deformabilidades distintas, com função de transmitir segurança e confiança ao usuário da via.

Para Bernucci, et al.(2006), o pavimento deve resistir ao tráfego de veículos e do clima, além de proporcionar ao usuários melhorias na condição de rolamento, em conforto, economia e segurança.

4.1.1 Tipos de Pavimento

Podem-se dividir os tipos de pavimento em três sendo eles: Rígido, Semi-Rígido e Flexível, de acordo com Andrade (2012).

Para Senço (2001) os revestimentos divididos em rígidos e flexíveis com os alguns exemplos mais executados estão mostrados na figura 1:

Terminologia dos revestimentos					
Revestimentos	Rígidos	Concreto de cimento			
		Macadame de cimento			
		Paralelepípedos rejuntados com cimento			
	Flexíveis	Betuminosos	Concreto betuminoso		Usinados
			Pré-misturado a quente		
			Pré-misturado a frio		
		Tratamento Superficial	Penetração direta		Simplex
			Penetração invertida		Duplo
		Calçamentos articulados			Tripo
					Quádruplo
Alvenaria poliédrica					
Paralelepípedos					
Blocos de concreto pré-moldado					

Figura 1- Tipos de revestimentos

Fonte: Adaptado de SENÇO (2001).

Segundo DNIT (2006) o revestimento rígido absorve quase que totalmente as tensões vinda do carregamento aplicado devido ao sua alta rigidez em relação às demais camadas. Já os flexíveis têm todas suas camadas sofrendo deformação elástica e as parcelas são distribuídas pelas camadas de forma equivalente. Os semi-rígidos são caracterizados por uma base cimentada por algum aglomerante.

Cabe destacar que o DNIT considera a pavimentação por blocos de concreto, uma estrutura flexível para calçamento. Sendo implantada em geral em pátios de estacionamentos, vias urbanas e acessos viários. Tem como vantagens a utilização em projetos que apresentam rampas íngremes, onde o *paver* forneça maior aderência entre pneu e faixa de rolagem, trechos urbanos que são previsto instalações subterrâneas e posteriores reparos, em aterro recém-construído e terrenos com recalque acentuado (DEPARTAMENTO..., 2006).

4.1.2 Início da Pavimentação

A humanidade desde seus primórdios sempre buscou meios de facilitar sua vida. A história da pavimentação se faz através do povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercambio religioso, comercial e cultura, auxiliando o desenvolvimento do mundo.

Como os pavimentos, a história também é construída em camadas e, freqüentemente, as estradas formam um caminho para examinar o passado, daí serem uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas... (BERNUCCI et.at.,2008, p. 11).

Mascarenhas Neto foi um magistrado e desembargador da Casa de Suplicação em Portugal, onde exerceu funções de superintendente geral de calçadas e estradas no final do século XXIII e início do século XIX. Com as experiências adquiridas na prática em projetos na Inglaterra, Escócia e França, pode escrever um tratado para construção de estradas, assim construindo estradas em Portugal com menores despesas por conhecer cada província do reino sabendo do relevo e terrenos.

Desde aquela época já havia preocupações em relação a diversos aspectos construtivos para uma boa pavimentação. Como:

- Drenagem e abaulamento
- Erosão
- Distância de transporte
- Compactação
- Sobrecarga
- Marcação

4.1.3 Histórico da Pavimentação Intertravada

4.1.3.1 No Mundo

Durante as décadas entre os anos 400 a.C. e 200 a. C. os romanos intensificaram a construção de um grande sistema de caminhos tendo uma extensão de 120.700 km. Vinte e nove estradas saíam de Roma e se abriam em numerosas outras. O povo romano herdou o conhecimento de construção de caminhos dos Etruscos. Os solos normalmente eram arenosos misturados com seixos rolados, como revestimento utilizava-se de pedras talhadas manualmente (MULLER, 2005, p. 12).

A Via Ápia, é uma das mais conhecidas quando se fala pavimentos que os romanos fizeram. O projeto previa ligar Roma a Cápua com uma distância de 195 km. Com o sucesso da Via Ápia, os romanos realizaram uma série de demais projeto. A Via Ostiense (figura 2) que ligava Roma a Óstia outro projeto que foi realizado o revestimento de pedras intertravadas possibilitando o trânsito de pedestre e veículos rolantes. O exemplo do intertravamento de peças no pavimento utilizado na antiguidade é a cidade de Pompeia, cidade lembrada pela erupção do vulcão Vesúvio em 79 d.C., como visto na figura 3.



Figura 2- Via Ostiense

Fonte: <http://www.romaincamper.it/ostia.html>



Figura 3- Rua em Pompéia

Fonte: <http://viagem.uol.com.br/guia/italia/pompeia/roteiros/esqueletos-petrificados-dao-ar-sinistro-a-passeio-por-pompeia-na-italia/index.htm>

Por volta do final do século XIX foi fabricada a primeira peça pré-moldada de concreto e há registros de algumas patentes antes da primeira guerra mundial. Por apresentar melhor uniformidade e obviamente não necessitarem re-aparelhamento antes do assentamento (CRUZ, 2003, p. 10).

4.1.3.2 No Brasil

O paralelepípedo é uma pedra talhada utilizada para revestimentos de pavimento até os dias de hoje. Com dimensões próximas aos 50 cm e formas irregulares são agrupadas no terreno natural. Tem como origem o pé-de-moleque, técnica trazida por portugueses na colonização. Cidades históricas com Paraty – RJ, Mariana – MG e São Sebastião – SP tem o paralelepípedo em muitos locais com revestimento para o pavimento, a figura 4 vê-se o calçamento pé-de-moleque.



Figura 4- Calçamento pé-de-moleque

Fonte: Bittencourt, 2012, p. 8

Uma das primeiras estradas feitas no Brasil, no governo de Mem de Sá teve início em 1560. O caminho liga São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661, a capitania de São

Vicente recuperou a estrada e deu o nome de Estrada do Mar (Caminho do Mar), permitindo o tráfego de veículos (BERNUCCI, et al, 2006, p. 16).

Para Nogueira (1961, p. 334), a pavimentação com revestimento de paralelepípedos se divide em bases de areia, macadame e concreto. O modo de executar o revestimento consiste em colocar as peças em um colchão de areia, estabelecido em um subleito pronto. São retidos por peças chamadas meio-fio ou tentos com função de impossibilitar o deslocamento lateral construídas nos bordos da pista, durante a construção e quando finalizado, resistindo aos esforços do tráfego.

O meio fio e tentos que Nogueira (1961) se refere em seu livro como peças que devem ser construída em linha reta ou em trechos de curva, alinhadas ao longo do bordo da pista e impede o movimento de peças do centro. Mesma função que as contenções laterais exercem no *paver* como será explicado adiante no trabalho.

4.2 PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BLOCOS DE CONCRETO

4.2.1 Definição

O pavimento intertravado é composto por peças juntas postas de concreto, travadas entre si por contenções laterais, sobre uma camada de areia de assentamento. Sendo o intertravamento a capacidade dos blocos resistirem a movimentos de deslocamentos individuais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010).

Por ser constituído por peças pré-moldadas onde se passa por verificações de qualidade e aceitação, os *pavers*, apresentam um revestimento uniforme sem eventuais diferenças nas faixas de rolagem. Através de blocos com superfícies diferenciadas, como pisos táteis, auxilia no deslocamento de pessoas com deficiência visual e blocos como cores distintas para facilitar a sinalização.

Para Hallack (2001), os *pavers* são conhecidos por suas qualidades estéticas, versatilidade do material, facilidade de estocagem e homogeneidade. Contudo vale ressaltar algumas propriedades desse pavimento, como:

- Utilização imediata após a execução.
- Impede a transmissão e aparecimento de trincas das camadas de base.
- Tem a capacidade de manter continuidade do pavimento mesmo quando sujeitos a acomodações do subleito.
- Permite fácil reparação se ocorrer assentamento do subleito se afetar a condição estrutural do pavimento.
- Acessos de tubulações subterrâneas e reparo, sem marcas visíveis.
- As peças de concreto são de alta qualidade, garantindo a resistência abrasão e durabilidade característica indispensável em portos e indústrias.
- O pavimento é mais permeável, permitindo microdrenagens de águas fluviais.

O pavimento intertravado é formado por subleito, sub-base, base, contenção lateral, areia de assentamento, peças pré-moldadas e areia de rejuntamento (selagem das juntas) (BITTENCOURT, 2012, p. 10).

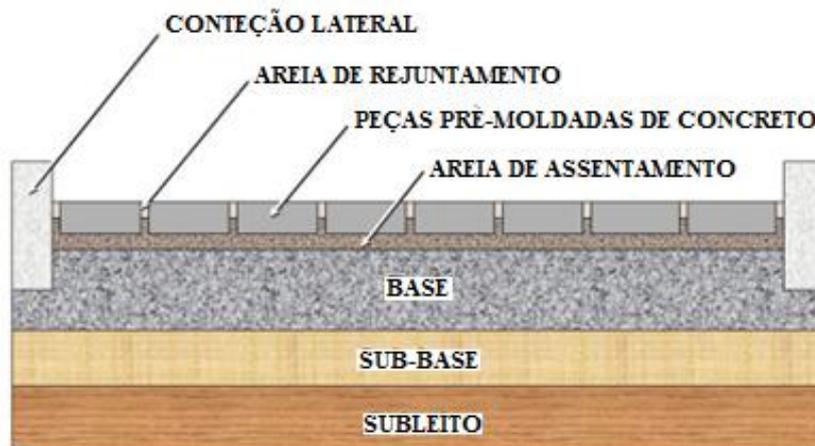


Figura 5 - Seção das sucessivas camadas do paver

Fonte: Adaptado de Godinho (2009, p.35).

➤ **Subleito:**

É o terreno de fundação do pavimento. Tem como função suportar a estrutura do pavimento e a solicitação de tráfego da camada de rolamento.

Requisitos mínimos para o subleito, segundo NBR 12307 (ASSOCIAÇÃO..., 1991):

- Valor CBR maior que 2%

- Livre de raízes de plantas
- Nível do Lençol freático abaixo 1,5m
- Expansão volumétrica menor 2%
- Com um caimento mínimo de 2%
- Se necessitar reforço no subleito de acordo com NBR 12752 (ASSOCIAÇÃO..., 1992)

➤ Base e sub-base:

Camadas localizadas entre o subleito e o revestimento, contribuem para a capacidade estrutural com função de resistir aos esforços do pavimento.

As bases aplicadas para *pavers* conforme as normas brasileiras que devem ser seguidas são:

- NBR 11803 (ASSOCIAÇÃO..., 2013): Materiais para bases e sub-base de brita graduada tratada com cimento.
- NBR 11804 (ASSOCIAÇÃO..., 1991): Especificação de materiais para sub-base e bases de pavimentos estabilizados granulometricamente.
- NBR 11806 (ASSOCIAÇÃO..., 1991): Especificação de materiais para sub-base e bases de brita graduada.
- NBR 11798 (ASSOCIAÇÃO..., 2012): Requisitos de materiais para base de solo-cimento.
- NBR 15115 (ASSOCIAÇÃO..., 2004): Execução de camadas de pavimentação com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção.

➤ Camada de Assentamento:

Superfície de areia onde são assentados os blocos de concreto (*pavers*), alguns autores utilizam o termo “colchão de areia” para se referir à camada de assentamento. A superfície deve ser regular para que a colocação dos blocos seja a melhor possível, devendo ter a capacidade de se adaptar à faixa rolagem.

A camada de assentamento não pode ter uma espessura excessiva nem tanto uma espessura menor que de projeto, devido há problemas que são gerados no pavimento no assentamento das peças, bem como a rotação em relação ao corte do pavimento e rupturas de peças de revestimento como mostra a figura a seguir:

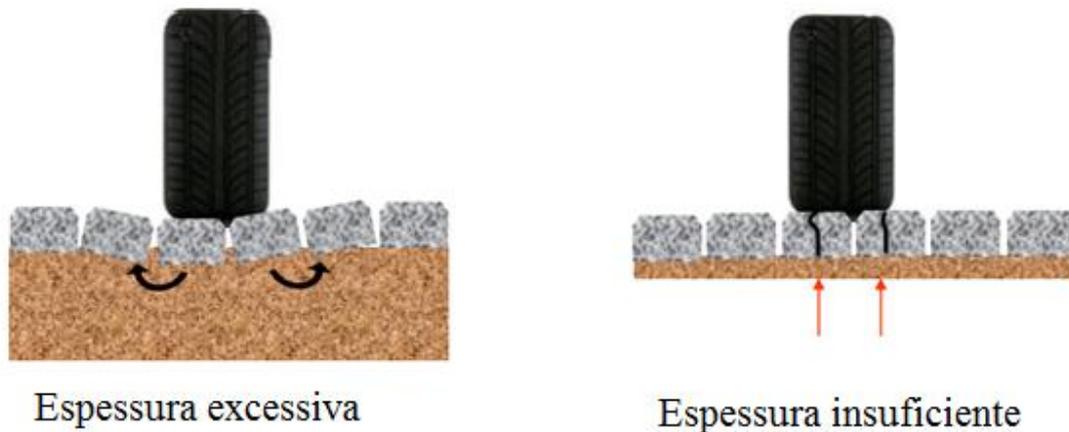


Figura 6- Seção de corte do pavimento com espessuras inadequadas

Fonte: ABCP (apud SILVA, 2012, pg23)

O padrão de assentamento dos blocos deve seguir o projeto arquitetônico, tanto a distâncias das juntas quanto o seu alinhamento. De acordo o Manual do *Interlocking Concrete Pavement Institute*(1996) traduzido por Souza (2013, p. 39), necessita ser feito uma verificação quanto a existência de qualquer corpo estranho nos blocos que carecem ser colocados justapostos na camada de assentamento conforme o padrão do projeto.

Para Silva (2012, p. 24), a camada de assentamento necessita ter uma umidade de 3% a 7% no momento do assentamento da camada de peças pré-moldadas de concreto (PPC), a camada livre de materiais friáveis, torrões de argila e impurezas orgânicas, uma espessura uniforme de 5 a 2 cm na condição de não compactada.

Os limites granulométricos e a forma dos grãos que deve ser empregado no colchão de areia no assentamento seguem a figura7, apresentada por Cruz (2003, p. 24), a faixa granulométrica adotada por países que utilizam a pavimentação intertravada com blocos de concreto há mais tempo que o Brasil:

Peneira	Austrália	Inglaterra	África do Sul	Norma Americana ASTM C33	Norma Canadense CSA A23.1
	% passante na peneira				
9,52	100	100	100	100	100
4,75	95 a 100	90 a 100	90 a 100	95 a 100	95 a 100
2,36	80 a 100	75 a 100	75 a 100	85 a 100	80 a 100
1,18	50 a 85	55 a 90	55 a 90	50 a 85	50 a 90
0,6	25 a 60	35 a 59	35 a 70	25 a 60	25 a 65
0,3	10 a 30	8 a 30	8 a 35	10 a 30	10 a 35
0,15	5 a 15	0 a 10	1 a 10	2 a 10	2 a 10
0,075	0	0 a 3	0 a 3	0	0

Figura 7 - Granulometria areia da empregada na camada de assentamento

Fonte: Adaptado de Cruz (2003, p. 24)

Já para a areia que será destinada às juntas de rejuntamento, a faixa granulométrica recomenda é conforme a figura 8:

Peneira	Norma Americana ASTM C144		Norma Canadense	Austrália
	Areia Natural	Areia Artificial	CSA A179	África do Sul
	% passante na peneira			
4,75	100	100	100	100
2,36	95 a 100	95 a 100	95 a 100	100
1,18	70 a 100	70 a 100	90 a 100	90 a 100
0,6	40 a 75	40 a 100	35 a 80	60 a 90
0,3	10 a 35	20 a 40	15 a 50	30 a 60
0,15	2 a 15	10 a 25	2 a 15	15 a 30
0,075	0 a 1	0	0	5 a 10

Figura 8 - Granulometria da areia para as justas de rejuntamento

Fonte: Adaptado de Cruz (2003, p. 24)

No Brasil é recomendado que o agregado utilizado no colchão de areia, valor de percentual retido na peneira, tem valores próximo que são utilizados em demais países como mostrado anteriormente, o D.M.C. do ponto médio da faixa é 6,3 mm e na figura 9 é evidenciado a faixa que granulometria da areia de assentamento seguindo a NBR 15953 (ASSOCIAÇÃO..., 2012).

Tabela 1 - Granulometria da areia de assentamento segundo a ABNT

Abertura da Peneira (mm)	Porcentagem retida em massa (%)
6,3	0 a 7
4,75	0 a 10
2,36	0 a 25
1,18	5 a 50
0,6	15 a 70
0,3	50 a 95
0,15	85 a 100
0,075	90 a 100

Fonte: Adaptado de ABCP (apud SILVA, 2012, p. 25).

➤ **Contenção Lateral:**

As contenções laterais precisam ser executadas antes do assentamento da camada de revestimento para garantir a estabilidade lateral do sistema. São constituídas por estruturas rígidas que impossibilitam o deslocamento lateral dos blocos, podendo ser fixados na camada de base.

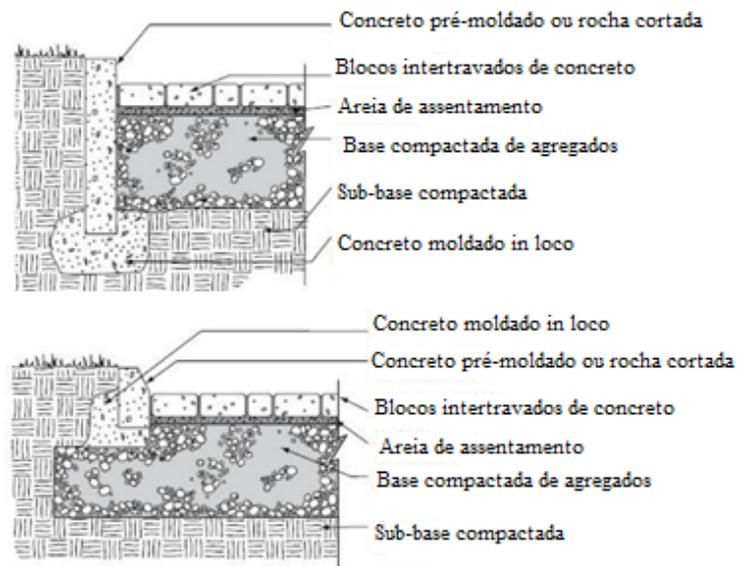


Figura 9 - Contenções laterais em concreto pré-moldado ou rocha cortada.

Fonte: Adaptado de ICPI (apud SOUZA, 2013, p. 32)

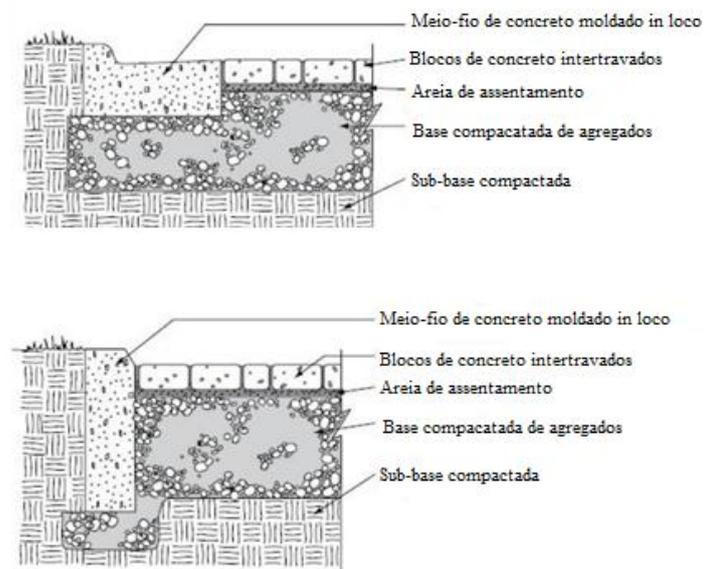


Figura 10 - Contenções laterais com concreto *in loco*.

Fonte: Adaptado de ICPI (apud SOUZA, 2013, p. 32).

Para Souza (2013, p. 32), as contenções laterais têm função também garantir que não haja perda de material de assentamento pelas margens do pavimento.

4.2.2 Intertravamento

O intertravamento é a característica principal do pavimento com PPC que recebe esse nome pelo seu método construtivo, as peças são intertravadas umas nas outras impedindo o deslocamento de cada peça em relação ao conjunto.

Segundo Muller (2005, p. 33), Bittencurt (2012, p. 30) e Cruz (2003, p. 30) os deslocamentos das peças podem ser divididos em movimento horizontal, vertical, rotação e giração.

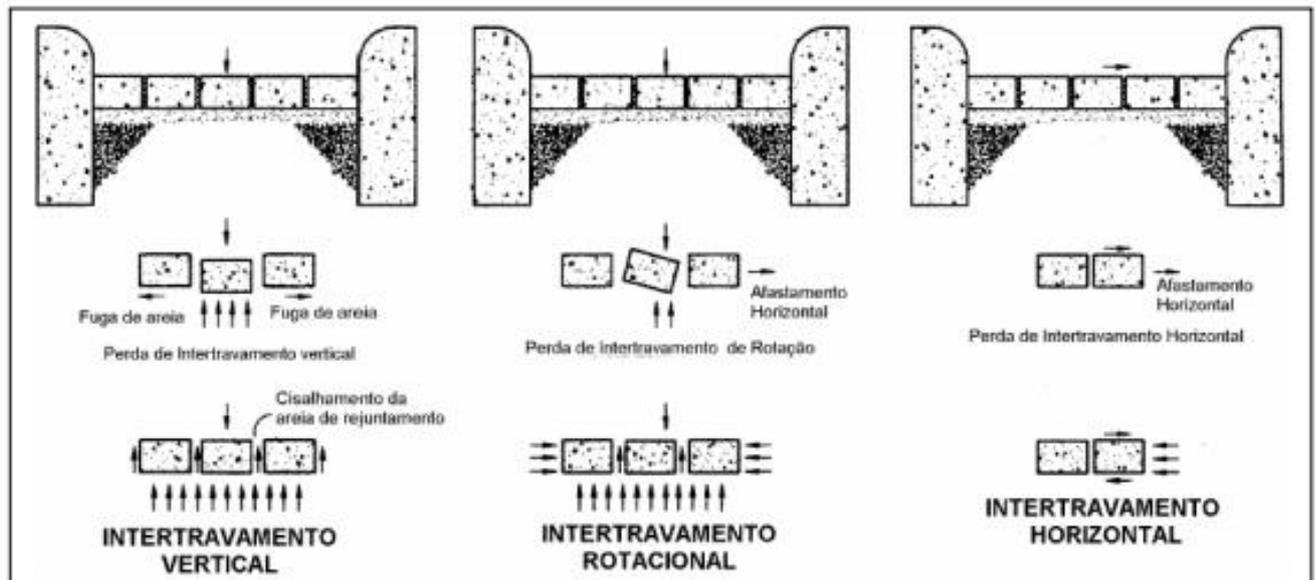


Figura 11 - Intertravamentos: Vertical, rotacional e horizontal.

Fonte: ICPI (apud MULLER, 2005, p. 57)

❖ Intertravamento Vertical

O deslocamento vertical é anexo ao carregamento vertical centrado no meio da peça. “Se um conjunto de blocos de um piso recebe uma carga bem no centro de um dos blocos, a tendência dele é afundar, ter um deslocamento vertical.” (ABCP, 2010, p. 10).

Para Farinha e Souza (2011, p. 13), o intertravamento vertical é a capacidade da peça não se mexer em relação às peças ao redor, a carga é suportada pelas camadas inferiores que compõem o pavimento e através dos esforços absorvidos pelo rejuntamento.

❖ Intertravamento Horizontal

Tem como função garantir que não ocorra deslocamento horizontal entre peças vizinhas. O formato das peças, seus respectivos arranjos de assentamento e as juntas quando executadas de modo correto e material adequado que garantem o intertravamento na direção horizontal do pavimento. (MULLER, 2005, p. 56)

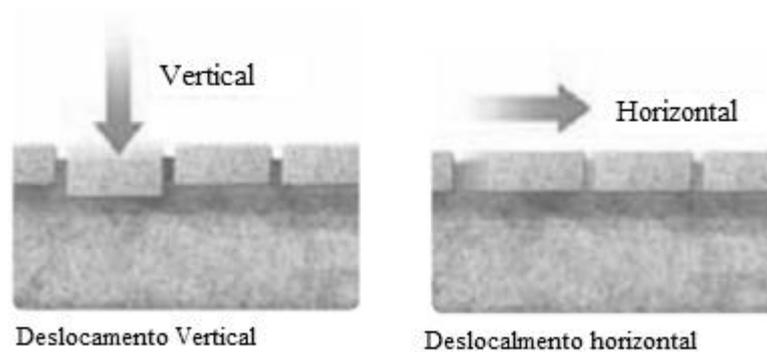


Figura 12- Deslocamento Vertical e Horizontal.

Fonte: ABCP (apud PORTLAND, 2010, p 10).

❖ Intertravamento Rotacional

Knaption (1996 apud GODINHO, 2009, p. 47) descreve o intertravamento rotacional como a capacidade da peça não girar em torno do seu eixo vertical. Isso é possível pela espessura das juntas entre peças e o confinamento do paver ao todo.

De maneira geral a rotação da peça é provocada pelo de tráfego e frequência, visto na figura 13, é intensa nas áreas de frenagem, acelerações e tensões radiais dos pneus, curvas e o confinamento lateral duvidoso.

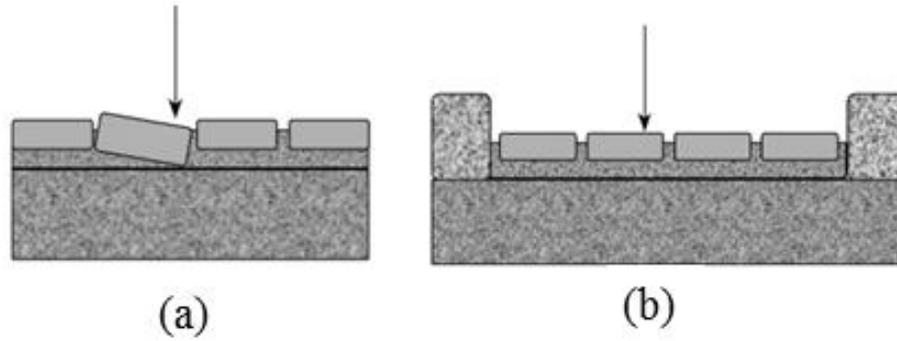


Figura 13- Carga excêntrica em uma peça sem contenções laterais (a) e carga excêntrica em uma peça com contenções laterais.

Fonte: Adaptado de Hallack (apud GODINHO, 2009, p. 47).

❖ Intertravamento Giratório

Capacidade dos blocos que constituem o *paver* de não girarem em seu eixo horizontal. Esse fenômeno não ocorre com frequência e pode ser facilmente evitado usando contenções laterais adequadas que fornecem um bom confinamento junto com as PPCs.

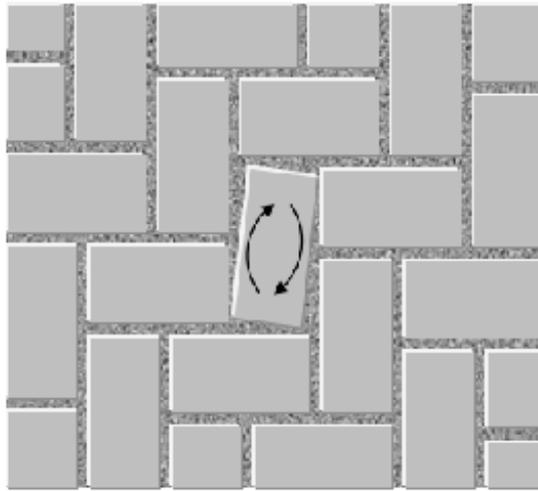


Figura 14 - Movimento de Giração no eixo horizontal

Fonte: Hallack (apud GODINHO, 2009, p. 48).

4.3 MATERIAIS QUE CONSTITUEM O BLOCO DE CONCRETO

De acordo com NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) os materiais que constituem os blocos de concreto para o pavimento intertravado são: cimento Portland, agregados e água, contudo é permitido o uso de aditivos e pigmentos. Os agregados podem ser naturais, industriais ou reciclados. Neste estudo será utilizada a adição de sílica ativa, material com característica pozolânica, e aditivo superplastificante.

4.3.1 Agregados

Os agregados se constituem por fragmentos de rochas, com tamanhos e propriedades adequadas em geral para todas as obras de infraestrutura da construção civil. Desses materiais incluem-se: pedras, pedregulhos, cascalhos, seixos, brita, pedrisco, areia, entre outros. Tendo tamanhos amplamente variáveis desde blocos de grandes dimensões, usados em barragens, até partículas milimétricas empregadas como agregado na confecção do concreto. Em pavimentos é necessário utilizar de uma mistura de fragmentos de diversos tamanhos, de modo a ganhar mais estabilidade ou resistência, denominada estabilização granulométrica (ISAIA, 2007, p. 481).

Segundo Serna e Rezende (2009, p.1), os agregados podem ser naturais ou artificiais. Os naturais são os que se encontram na forma particulada na natureza, como areia, cascalhos e pedregulhos. Os artificiais são produzidos por algum processo industrial, como as pedras brotadas, areias artificiais, argila expandida entre outros.

As principais classes de solos e materiais com seus limites de granulométrico (mm), de acordo com NBR 7225 (ASSOCIAÇÃO..., 1992), NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO..., 1995), Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) e da norma ASTM D 2487, são mostrados na figura 17.

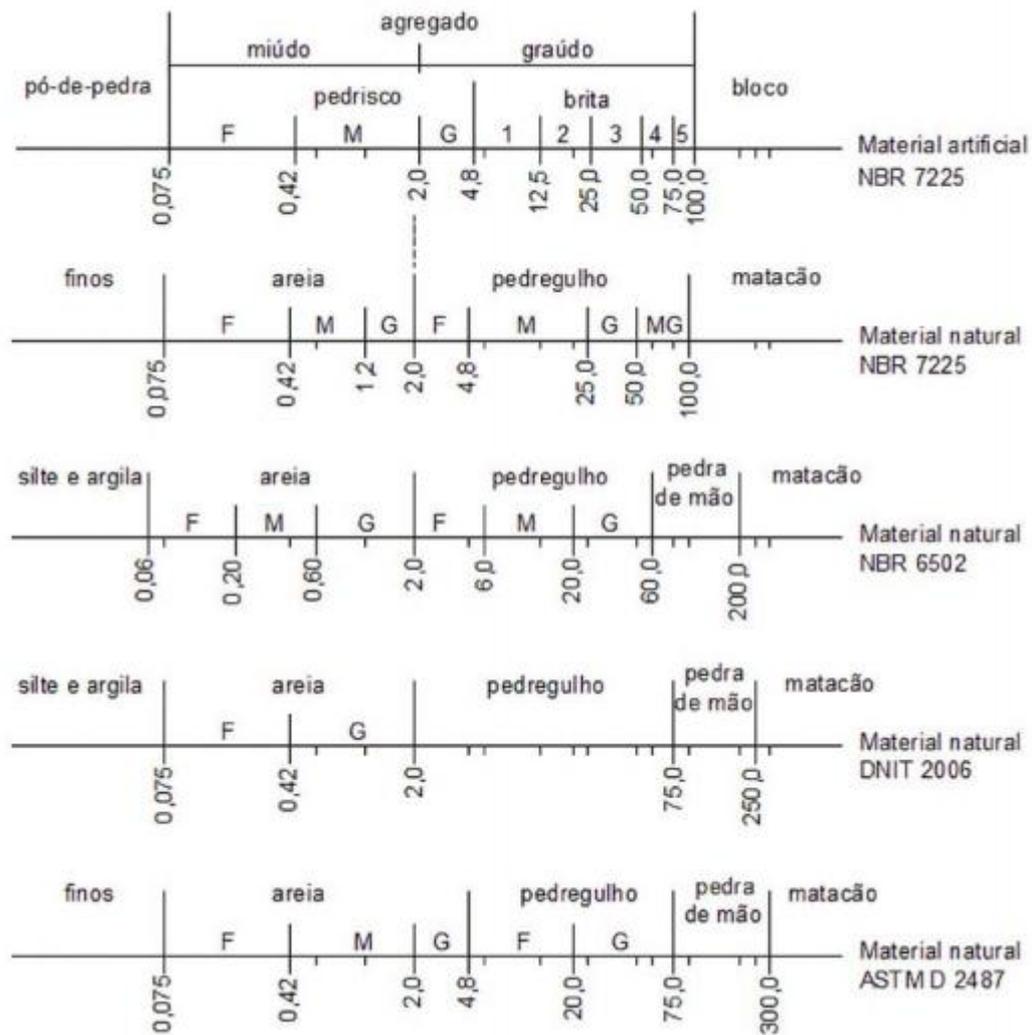


Figura 15 - Comparação entre classes segundo várias normas

Fonte: Isaia (2007, p. 485).

Segundo Metha e Monteiro (2008), as características dos agregados podem ser divididas em três grupos:

- Características que depende da porosidade,
 - Massa específica aparente,
 - Absorção de água,
 - Resistência,
 - Módulo de elasticidade e sanidade;
- Características que dependem da composição química e mineralógica
 - Resistência

- Módulo de elasticidade
- Substâncias deletérias presentes
- Cargas elétricas
- Característica dependente das condições prévias e condicionantes de fabricação
 - Tamanho
 - Forma
 - Textura das partículas

O uso dos agregados está relacionado ao seu tamanho e granulometria, sendo empregados com uma mistura aglomerante (preparação do concreto) ou sem mistura aglomerante (drenos, filtros, gabiões, etc.). Na figura a seguir segue os usos mais comuns para os agregados.

Areia Artificial e Areia Natural	Assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, embolso, podendo entrar na composição de concreto e asfalto.
Pedrisco	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, bloquetes, intertravados, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral.
Brita 1	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes
Brita 2	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas
Brita 3	Também denominada pedra de lastro utilizada nas ferrovias.
Brita 4	Produto destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas.
Rachão, pedra de mão ou pedra marroada	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.

Figura 16- Principais utilizações dos agregados

Fonte: KULAIIF (apud SERNA; REZENDE, 2009, p. 3)

4.3.1.1 Agregado Miúdo

4.3.1.1.1 Areia Natural

A areia utilizada para o concreto do bloco deve ser média a fina, lavada e limpa. Livre de impurezas como húmus, torrões de argila, turfa, carvão, mica e livre de partículas vegetais. Antes do uso da areia, deve-se analisar o teor de umidade na areia utilizada (RIPPER, 1995, p.10).

4.3.1.1.2 Areia Artificial

Proveniente do processo de britagem de rocha vulcânica, para a obtenção do agregado graúdo, em sua composição apresenta: dióxido de silício, óxidos de ferro, óxido de cálcio, óxido de magnésio, trióxido de enxofre, óxido de sódio, óxido de potássio (JUNIOR; PELISSER, 2013, p.1).

Também popularmente chamada como pó de pedra, a areia artificial era inicialmente visto como rejeito, depois de observado suas características granulométrica pode ter seu uso como agregado miúdo (RIBEIRO, 2010, p. 1).

4.3.1.2 Agregado Graúdo

A brita é proveniente de fragmentos de rochas de diverso tamanhos que são quebradas em processo mecanizado. Sua classificação é de acordo com seu diâmetro, podendo ser brita nº 0 (zero) a 5, classificada em ordem crescente. As britas são separadas e classificadas por uma série de peneiras no ensaio granulométrico, deve-se ter uma quantidade de 95% retida nas peneiras de cada grupo:

- Brita 0 – diâmetro 4,8 a 9,5 mm
- Brita 1 – diâmetro 9,5 a 19 mm
- Brita 2 – diâmetros 19 a 25 mm
- Brita 3 – diâmetros 25 a 50 mm
- Brita 4 – diâmetros 50 a 76 mm
- Brita 5 – diâmetros 76 a 100 mm

4.3.2 Cimento Portland

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção civil, é constituído de em sua maior parte pelo clínquer e as adições de acordo com o tipo do cimento, essas adições que definem o nome do cimento Portland.

Cimento é uma palavra que vem do latim *Caementum* que significa união. A origem do cimento remota a cerca de 4500 anos. Os grandes monumentos do Egito já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. (SILVA, 2003, p. 17)

De acordo com Petrucci (1973, p. 330), No processo de fabricação do cimento as matérias primas para o cimento têm origem calcária e argilosa. Contudo às vezes pode ser usado um único material, que deve conter o teor mínimo de argila em sua composição.

As adições minerais são acrescentadas ao clínquer na fase de moagem, tem como finalidade desde a melhoria da trabalhabilidade no estado fresco até a garantia de durabilidade necessária e podem ser divididas em três grandes categorias: materiais cimentícios, com as escórias de alto-forno; materiais pozolânicos, como cinzas volantes e sílica ativa; e materiais não reativos, como o fíler calcário. (ISAIA, 2007, p. 761)

O clínquer tem sua composição dada partir da queima de materiais primas contendo CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O processo ocorre com uma tecnologia de piro processamento que transforma matérias-primas em fases de silicatos de cálcio e de aluminato de cálcio/ ferro. É de suma importância da natureza da combustível do forno, de maneira mais precisa a natureza das impurezas geradas por ele, como teor de enxofre e de cinzas, sendo

esse responsável por desempenhar um papel crítico na formação de sulfatos alcalinos voláteis e estas na formação do próprio clínquer. (AÏTCHIN 1997, p.113 e p.115)

Para a produção de uma tonelada de clínquer utiliza-se cerca de 1500 a 1800 kg de matéria-prima. O processo de fabricação de cimento Portland pode ser por dois processos: por via seca ou via úmida. Devido aos diferentes teores de umidade dos materiais no processo de moagem devem ser trabalhados praticamente secos ou saturados. Dai a origem dos dois processos que a diferença se faz no começo da mistura crua. As etapas conduzem à obtenção de uma pasta (via úmida) ou um pó (via seca), que deveram ser secados, descarbonatado e clinquerizado (PETRUCCI, 1973, p. 330).

4.3.2.1 Sólidos na pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento é formada através da mistura de água com um ou mais aglomerantes que são elementos ativos que sofrem transformações químicas promovendo a união entre os grãos dos agregados (materiais inertes). A pasta de cimento hidratada irá influenciar na capacidade de transporte de fluidos (líquidos ou gases) que se deslocam ou ingressam no concreto. No processo de hidratação é formado o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sulfoalumianato de cálcio hidratado e os grãos de cimento não hidratados (HOFFMAN, 2001, p. 22).

4.3.2.1.1 Silicato de cálcio hidratado

O Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui cerca de 50 a 60% do volume de sólidos formados na pasta de cimento Portland. Sua formação é dada pelas reações de hidratação dos compostos C_3S e C_2S do cimento anidro, é o responsável principal pela resistência da pasta de cimento devido às forças de Van der Waals (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, s.d., p. 7).

O C-S-H não é um composto bem definido, a relação C/S varia entre 1,5 a 2 e o conteúdo da água estrutural varia ainda mais. A morfologia do C-S-H pode altera de fibras poucos cristalinas até redes reticulares. Devido as suas dimensões coloidais e à tendencia de

se aglomerarem, os cristais de C-S-H só podem ser analisados com o microscópio eletrônico (figura 17). Na literatura antiga é frequentemente citado com *gel* de C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 29).

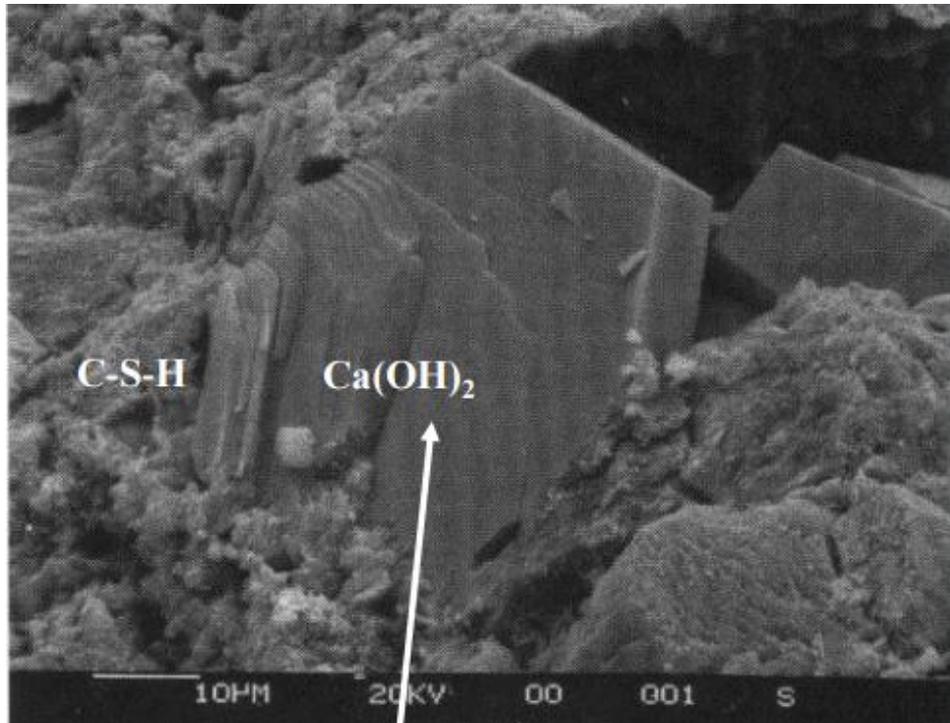


Figura 17 - Cristais de hidróxido de cálcio em uma matriz de C-S-H após um dia de hidratação do cimento Portland.

Fonte: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL (s.d., p. 7).

4.3.2.1.2 Hidróxido de cálcio

O Hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, constitui entre 20 a 25% do volume de sólido da pasta, costumam formar cristais grandes de forma hexagonal, distribuídos desordenadamente em pilhas ou em rede ordenada de grandes placas, como mostrada na figura 17. Em grande quantidade sua presença é indesejável, pois possibilita maior solubilidade em meios ácidos ou a água, isso afeta a durabilidade do material (NEVILLE, 1997 apud HOFFMAN, 2001, p. 11).

4.3.2.1.3 Sulfoaluminatos de cálcio

Os Sulfoaluminatos de cálcio hidratado correspondem de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta endurecida, se formam a partir da reação do C_3A e C_4AF com o SO_4^{2-} proveniente do gesso, sendo chamados também de etringita e aparecem em formas de agulhas sulfoaluminatos de cálcio hidratado, desempenhando um papel menos na resistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud HOFFMAN, 2001, p. 11).

4.3.2.1.4 Grãos de clínquer não hidratados

Dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação. Desta forma na mistura atua como material não ligante, não contribuindo com as propriedades coesivas do cimento quando hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud HOFFMAN, 2001, p. 11).

4.3.2.2 Vazios na pasta de cimento hidratada

Pastas de cimentos hidratadas contém vazios que influenciam as propriedades do concreto endurecido. Esses vazios podem ser vazios capilares, o espaço entre partículas de C-S-H e bolhas de ar incorporado.

4.3.2.2.1 Espaço interlamelar no C-S-H

Metha e Monteiro (2008, p. 30) destacam que esse espaço pode variar de 5 e 25Å e corresponde por 28% da porosidade no C-S-H sólido. Esse tamanho de vazio é muito pequeno para que se tenha um efeito adverso na resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratada. Entretanto, as pontes de hidrógeno podem reter água nesses pequenos vazios e sua remoção pode contribuir para a retração por secagem e fluência.

4.3.2.2.2 Vazios Capilares

São os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta hidratada. A hidratação do cimento pode ser vista como um processo do qual o espaço ocupado originalmente pela água e cimento é preenchido gradualmente pelos produtos de hidratação, o espaço não ocupado é chamado vazio capilares. O volume e o tamanho desses vazios são determinados pela distância original entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento no estado fresco, isto é fator a/c. Em pastas de cimento com baixa relação água/cimento, os vazios capilares variam de 10 a 50 nm. Em pastas com alta relação água/cimento, podem chegar a 5 μm . Poros de pequeno diâmetro, menor que 50 nm, são descritos com não prejudiciais ao comportamento mecânico (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.32).

Neville (1982, p. 28) destaca em seu livro que para não haver poros capilares a água de amassamento deve corresponder a uma relação água/cimento de 0,36 a 0,38. Se a relação água/cimento for menos que aproximadamente 0,38, em massa, não é possível a hidratação completa do cimento, pois o volume disponível é insuficiente para acomodar todos os produtos de hidratação. Na figura 18, verifica-se a microestrutura do concreto com respectivamente o silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e o vazio capilar.

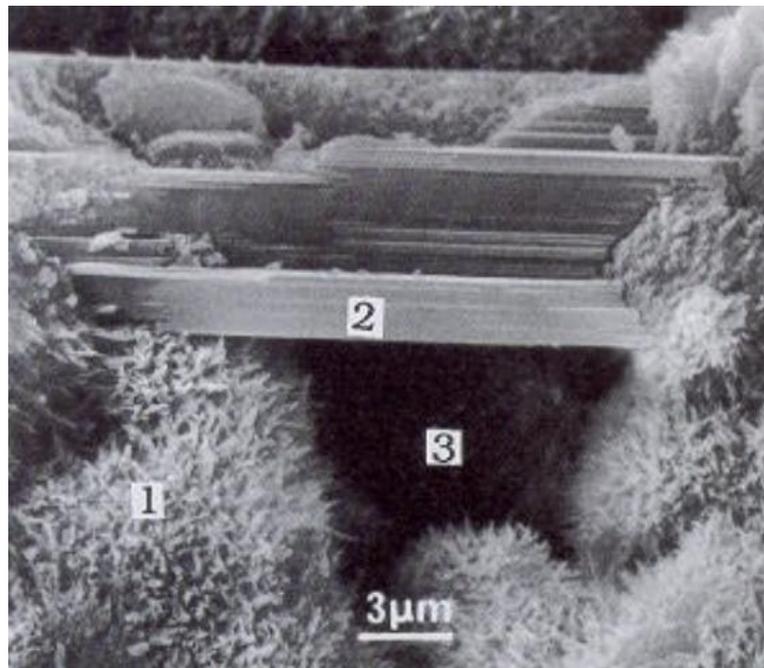


Figura 18- Microestrutura do concreto com C-S-H (1), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (2) e o vazio capilar (3).

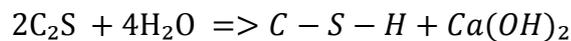
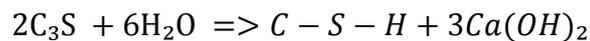
Fonte: KAEFER (1998, p. 5)

4.3.2.2.3 Ar incorporado

Diferente dos vazios capilares, os vazios de ar geralmente são esféricos. Uma pequena quantidade de ar fica aprisionada na pasta de cimento durante a mistura do concreto. Os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm, já os vazios de ar incorporado variam de 50 e 200 μm . Desta maneira tanto os vazios de ar incorporado quanto os vazios de ar aprisionado são bem maiores que os vazios capilares (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.32).

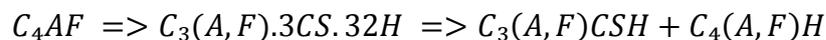
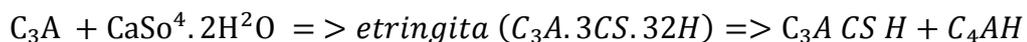
4.3.3 Reações de hidratação resumidas

As reações de hidratação dos Silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) de forma simples são:



O principal componente formado é o C-S-H cuja composição química é representado $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$.

Já as reações de hidratação dos Aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) são:



4.3.3 Sílica Ativa

A sílica ativa, microsílica, sílica volatizada ou fumo de sílica condensado é um subproduto da fabricação do silício metálico, proveniente das ligas de ferro-silício e demais ligas de silício. Produzidos em fornos de arco elétrico imersos onde o quartzo sofre o processo de redução na presença do carvão e ferro para a produção das ligas ferro-silício (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 315).

A sílica ativa é um material pozolânico, esse material é energeticamente mais econômico que o clínquer do cimento Portland e aproveita resíduos industriais poluidores oriunda das industriais de ferro-silício e silício metálico. O uso de pozolanas em adição do cimento confere características como menor calor de hidratação, melhor resistência ao ataque ácido, devido à reação com o hidróxido de cálcio na hidratação do cimento Portland, e uma maior durabilidade em função da diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada (NETTO, 2006).

A microsilica apresenta coloração que varia do cinza clara ao escuro, devido aos teores de carbono que não entraram em combustão, presentes na sílica ativa. Tem a produção anual em torno de um milhão de toneladas, sendo os Estados Unidos e a Noruega seus maiores produtores. O teor de SiO_2 presente na sílica ativa chega próximo dos patamares de 80%. As indústrias que utilizam de um teor de silício na ordem de 75% produzem rejeitos com teores de 85% a 90% de SiO_2 não-cristalina, ao passo que as indústrias que adotam um teor menor de silício, cerca de 50% apresenta um rejeito com quantidades inferiores de SiO_2 não-cristalina sendo menos reativa (CARMO; PORTELLA, 2008, p. 2)

Considerado um excelente pozolânica quando utilizado no concreto, devido as suas propriedades químicas (teor de $\text{SiO}_2 > 85\%$) e propriedades físicas (superfície específica média de $20 \text{ m}^2/\text{g}$) por meio do efeito fíler (DAL MOLIN; OLIVEIRA, s.d., p. 1). O efeito fíler da sílica ativa segundo Bache (apud AÏTCHIN, 1997), pode ser verificado na figura 19.

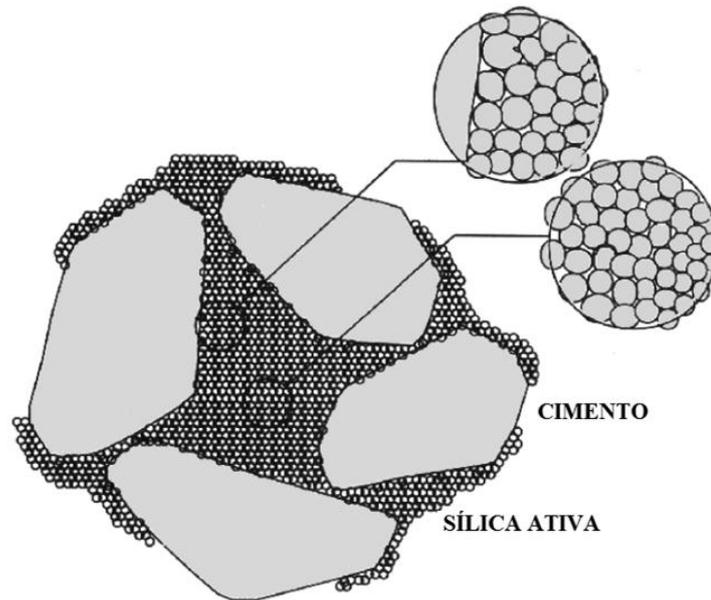


Figura 19 - Efeito fíler da Sílica Ativa.

Fonte: BACHE (apud AÏTCIN, 1997)

Aïtcin (1997, p. 160 161) destaca que a sílica ativa atualmente é encontrada em quatro formas: em bruto, como produzida, em nata de sílica ativa (em forma densificada) ou já misturada no cimento Portland. Em consequência de sua finura, as partículas de microssílica podem preencher os vazios entre as partículas de cimento, quando bem defloculadas na presença de um superplastificante adequadamente dosado.

Diz-se que o efeito fíler é também responsável pelo aumento na fluidez do concreto com uma relação a/c muito baixa. Por conseguinte, devido às suas características físicas únicas, a matriz sólida resultante sílica ativa é densa ainda antes que quaisquer ligações químicas entre partículas do cimento tenham se desenvolvido. (AÏTCIN, 1997, p. 162)

A adição de pozolânica confere um refinamento dos poros e dos grãos do produto de hidratação, além de incrementar o tamponamento e tortuosidade dos poros capilares deste modo apresentando menor porosidade ao concreto. A adição de sílica ativa vem sendo utilizada para se produzir um concreto com menor porosidade e resistências mais elevadas. (HOFFMAN, 2001, p. 24)

Segundo Mehta (1989 apud VIERA et al., 2003, p. 3), a sílica ativa é capaz de produzir um aumento de resistência mesmo no início, na fase de hidratação de um a três dias, contudo sua maior contribuição ocorre por volta dos 28 dias de idade. Após os 28 dias, o aumento de resistência final devido ao uso de sílica ativa não é significativo.

4.3.3.1 O Efeito da Sílica ativa na microestrutura do concreto

Os benefícios da microssílica na microestrutura e nas propriedades do concreto fresco e endurecido, se dá através de dois mecanismos de ação: o efeito pozolânico, efeito químico que reage com os produtos de hidratação do cimento e o efeito microfíler, efeito físico que possibilita o refinamento dos poros devido o material preencher os vazios (MENDES, 2002, p. 25).

Os materiais pozolânicos, materiais cimentícios suplementares, tem como característica em comum possuir alguma forma de sílica vítrea reativa que na presença de água é combinado com a cal, à temperatura ambiente, forma o silicato de cálcio hidratado semelhante ao formado pelo processo de hidratação do cimento Portland (AÏTCIN, 1997, p. 154).

Aïtcin (1997, p. 154) ainda destaca que quanto mais fina e vítrea for a pozolana mais rápido será a reação com a cal. Contudo, à temperatura ambiente, essa reação é lenta e pode levar meses para ser completada.

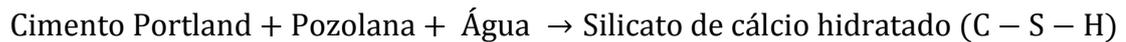
De maneira básica, a reação pozolânica pode ser escrita da seguinte forma:



4.3.3.2 Teor de sílica ativa

Conforme Aïtcin(1997, p. 218) para ser fixado todo o potencial de cal liberado pela hidratação de C_3S e do C_2S , a dosagem de sílica ativa deveria estar em torno de 25% e 30%. Contudo para essas dosagens é demandada uma quantidade muito elevada de superplastificante, assim não sendo viável devido ao custo elevado.

Contudo se a pozolana é misturada em proporções adequadas, 30% da massa de cimento. Com a quantidade necessária de superplastificante teoricamente toda a cal produzida na hidratação do cimento Portland poderia ser transformada em silicato de cálcio hidratado, seguindo a equação:



Para adições de 5% a 10% os ganhos de resistência são muitos significativos, mas qualquer adição que passa disto resulta em um ganho de resistência não tão expressivo. Em geral, a sílica ativa tem sido usada para melhorias em concretos com uma dosagem de 3% a 10% (AİTCIN, 1997).

4.3.4 Superplastificante

Os plastificantes ou superplastificante, também denominados plastificadores por alguns autores, são adicionados à mistura com o objetivo de deixá-la mais plástica (mais fluída) assim permite que se utilize menos água para a produção do concreto. Devido à resistência dos concretos serem inversamente proporcionar ao fator a/c a utilização do superplastificante corretamente dosado eleva a resistência do concreto.

De acordo com Bradley and Howarth(1986); Rixom and Mailvaganam (1986 apud AİTCIN, 1997, p. 139) existem quatro famílias principais de superplastificantes vendidas comercialmente:

- Superplastificantes de naftaleno, compostos de sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído.
- Superplastificantes de melamina, compostos de sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído.
- Lignossulfonatos com teores muito baixos de açúcar e de surfactantes
- Poliacrilatos

Porém os mais usados são os dois primeiros, contudo em suas formulações pode haver certas quantidades de redutores de água normais, tais como os lignossulfonatos e gluconatos.

A interação entre o cimento e o superplastificante no processo de hidratação é algo elaborada devido às interações simultâneas entre o cimento e os sulfatos e entre os sulfatos e os superplastificantes. Os superplastificantes interferem não apenas na hidratação do cimento Portland, mas também com os sulfatos em dissolução e o valor da relação SO_4^{2-} / AlO_2 assim interferindo na pega do concreto (AÏTCHIN, 1997).

4.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS PARA PAVIMENTO

Na maioria das empresas são usados equipamentos para a produção dos blocos de concreto, sendo eles misturados, prensas ou formas. Os equipamentos de mistura são muito importantes para garantir a homogeneização dos materiais segundo Sobrinho et al.(2008), são três tipos os mais comuns:

- Planetários de eixo vertical são mais eficientes devido as palhetas percorrem toda área de mistura garantindo uma maior homogeneização.
- Forçados de eixo horizontal apresentam de hélices para a mistura e possuem boa homogeneização.
- Basculantes, por tombamento, não é projetado para massas secas e não apresentando baixa homogeneidade.

Nas figura 20 e 21 , são apresentados o misturador planetario de eixo vertical e seu interior. Já nas figura 22 e 23, são vistos o misturador de eixo horizontal com suas helices.



Figura 20 - Misturador planetário de eixo vertical

Fonte: <http://www.betomaq.com.br/>



Figura 21 - Misturador planetário de eixo vertical e suas palhetas.

Fonte: <http://blogdopetcivil.com/>



Figura 22 - Misturador de eixo horizontal.

Fonte: <http://www.metalurgicapwr.com.br/>



Figura 23 - Misturador de eixo horizontal e suas hélices.

Fonte: <http://www.metalurgicapwr.com.br/>

A fabricação dos *pavers* é classificada em peças viradas, peças dormidas e peças vibroprensadas. As peças viradas são feitas de um concreto plástico em formas de conjuntas ou individuais, adensadas em mesa vibratória e desmoldada logo após a moldagem em uma base plana e impermeável, possibilitando peças com superfícies mais lisas. As peças dormidas na sua produção são usadas um concreto, diferente do concreto plástico, para preencher os as formas e adensadas também em mesa vibratória, contudo diferente das peças viradas só é feita

a desmoldagem no dia seguinte. Já as peças vibroprensadas têm a produção mecânica ao invés de manual com as peças viradas e dormidas, usando o concreto seco as peças são feitas através de vibroprensas hidráulicas e mecânicas (BITTENCURT, 2012, p. 22).

Segundo Isaia (2007, p. 955), para a fabricação dos blocos de concreto é utilizado vibro-prensas (figura 24), essas apresentam compactação hidráulica e vibração que possibilitam a obtenção de um produto de melhor qualidade que as peças feitas por mesas vibratórias.



Figura 24 - Blocos para pavimentação logo após a saída da vibro-presa

Fonte: <http://img.bomnegocio.com/images/94/948420109403444.jpg>

5 METODOLOGIA

Neste capítulo são relatadas as características dos materiais empregados para a confecção dos blocos de concreto para a pavimentação, algumas informações relativas aos equipamentos usados no processo de produção, a cura das peças e amostragem, além dos ensaios propostos realizados.

5.1 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO

Os blocos de concreto para a pavimentação foram fabricados em uma empresa colaboradora no município de Campo Mourão – PR. Esta empresa confecciona artefatos de concreto como blocos de concreto para pavimento e também blocos de alvenaria estrutural de vários formatos.

5.1.1 Traço

Não há normativa no Brasil para a dosagem de blocos de concreto para pavimento e como cada método de dosagem está totalmente relacionado com as características de cada equipamento de vibro-prensa, foi escolhido utilizar o traço padrão da empresa. Com a proposta de adição de sílica ativa com um teor de dosagem 5% e 8% em relação massa de cimento para a fabricação dos blocos do estudo é o traço padrão.

A quantificação de materiais para a obtenção da mistura foi contabilizados através de jericas, desta forma há uma variação na dosagem do traço. Sendo usados três jericas de areia natural, um jerica de pó de pedra e um jerica e meia de pedrisco para cada saco de cimento.

Para registro cada material foi pesado com uma balança do laboratório de materiais da UTFPR – CM com capacidade de até 300 kg antes de ir para o misturador. O peso médio de cada material foi de 208,8 kg de areia natural, 79,8 kg de pó de pedra e 122,6 kg de pedrisco a cada 50 kg de cimento. Assim o traço padrão em massa foi dado pela relação a seguir:

- 1: 4,2 (areia):2,5 (pedrisco):1,6 (pó de pedra)

As três diferentes amostras variam o percentual de sílica ativa, na primeira amostra foi utilizado o traço padrão sem adição de S.A., na segunda houve um acréscimo de 2,5 kg de sílica ativa (5%) e na terceira amostra foi adicionado 4 kg de sílica ativa (8%).

5.1.2 Caracterização do equipamento utilizado

O concreto seco próprio para a moldagem dos blocos para pavimento foi produzido por um misturador de eixo vertical. Este equipamento estava instalado na fábrica em um local próximo aos agregados para que fossem coletados e levados ao misturador por uma rampa que liga da porta do galpão ao topo do misturador (figura 25).



Figura 25 - Entrada de materiais no misturador de eixo vertical.

Fonte: Do autor.

Os blocos de concreto para pavimentação foram moldados em uma máquina de vibro-compressão hidráulica com capacidade de produção vinte blocos por ciclo, tendo cada ciclo de moldagem em torno de 25 segundos.

O concreto é levado do misturador até o topo da prensa hidráulica por uma esteira rolante que carrega o concreto seco para moldagem. Na figura 26, a foto foi tirada atrás da prensa (lado oposto a saída dos blocos).



Figura 26 - Vibro-prensa com esteira rolante

Fonte: Do autor

Após passar pela máquina vibro-prensa, o concreto sai moldado em blocos, um funcionário da empresa posiciona um pallet embaixo da máquina, de modo que os blocos recém-moldados são colocados nos pallets e são transportados para um galpão ao lado.

No galpão as peças de concreto sofrem o processo de secagem e de cura, com registrado na figura 27. Na figura 28, a foto foi tirada em frente à máquina onde saem os blocos moldados.



Figura 27 - Blocos postos lado a lado em pallets em processo de secagem e cura.

Fonte: Do autor



Figura 28 - Máquina vibro compressão hidráulica.

Fonte: Do autor

5.1.3 Procedimento de cura dos blocos de concreto

A empresa colaborada não possui uma câmara úmida com controle de temperatura e umidade. Dessa forma todos os artefatos de concreto recém-saídos do maquinário de vibro prensa permanecem em um galpão da fabrica em pallets postos lado a lado, o gerente da fabrica afirmou que os blocos permanecem lá por cerca de sete dias e são molhados uma vez nas primeiras 24 horas, conforme a figura 29.



Figura 29 - Blocos de concreto em *pallets*.

Fonte: Do autor

5.1.4 Procedimento de moldagem do concreto nos corpos de prova em formatos cilíndricos.

Foram confeccionados seis corpos de prova cilíndricos para cada traço utilizado. O concreto foi retirado do misturador de eixo vertical por um funcionário da empresa e colocado em um balde (figura 30) e após isso, foram moldados os corpos de prova seguindo o método

da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Os corpos de provas após a moldagem são apresentados na figura 31.



Figura 30 - Concreto retirado do misturador para moldagem de C.P.

Fonte: Do autor



Figura 31 - Corpos de prova após a moldagem

Fonte: Do autor

5.1.5 Procedimento de amostragem dos blocos de concreto

No terceiro dia, após a moldagem dos blocos de concreto para pavimentação, foi efetuado a separação de doze blocos de cada traço, o traço padrão da empresa, o traço padrão com adições de 5 e 8% de sílica ativa. Depois de coletados, os blocos foram levados para o laboratório de ensaios tecnológicos da UTFPR de Campo Mourão. Os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados no laboratório e ficaram em câmara úmida, em uma caixa d'água saturada em cal até a idade de 28 dias. Foram retirados apenas os blocos que seriam submetidos ao ensaio de resistência compressão características, para ser realizada a preparação dos corpos de prova para o ensaio (capeamento). Na figura 32 e figura 33, são mostrados os corpos de prova cilíndricos depois de retiradas as formas e marcados de acordo com o traço da amostra.



Figura 32 - Corpos de prova cilíndricos depois de desmoldados e marcados segundo as adições.

Fonte: Do autor



Figura 33 - Corpos de prova cilíndricos depois de retidas as formas

Fonte: Do autor

5.1.6 Caracterização dos materiais utilizados na produção dos blocos de concreto

5.1.6.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V – ARI da marca Itambé, este por ser o material já empregado pela empresa colaboradora com a pesquisa para a fabricação de blocos de concreto. A não alteração do cimento utilizado é importante, pois não modificam as características desejáveis dos blocos como as resistências iniciais elevadas. O CP V – ARI permite que o concreto para o bloco não apresente influência de outra pozzolânica a não ser da sílica ativa, devido apresentar apenas adições de apenas 5% de fíler calcário.

5.1.6.2 Agregado Miúdo Natural

A areia utilizada para a confecção do concreto para os blocos estava separada por baias dos demais agregados expostos a intempéries, ao lado do galpão onde ficava a vibroprensa e o misturador.

Os resultados da caracterização física do agregado miúdo natural encontram-se na Tabela 2, foi realizado o ensaio de Massa Específica através do frasco de Chapman (Figura 34). Também foi realizado o ensaio de Massa Específica Aparente, conforme os procedimentos descritos na NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO..., 1987) e na NBR 7251 (ASSOCIAÇÃO..., 1982), esses resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica real e massa específica aparente da areia

	g/cm ³
Massa específica real	2,65
Massa específica aparente	1,62

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.



Figura 34 - Ensaio de Massa Específica Real por meio do frasco Chapman

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Cabe esclarecer que, a massa específica real consiste em mensurar a massa dos grãos, sem contabilizar o espaço de vazios do material e a massa específica aparente consiste em verificar a quantidade de agregado em um volume, por ele ocupado considerando os vazios.

Foram obtidas as características granulométricas do agregado miúdo natural a partir do processo de ensaio descrito na NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO..., 2003). Os resultados da granulometria da areia natural são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo natural

Abertura da Peneira (mm)	% retido	% acumulado
4,8	0,3	0,3
2,4	1,1	1,4
1,2	3,9	5,3
0,6	13,8	19,1
0,3	45,6	64,7
0,15	31,3	96
< 0,15	3,9	100
Diâmetro Máximo Característico		2,4
Módulo de Finura		1,83
Classificação		Fino

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

A curva granulométrica do agregado miúdo natural está apresentada na figura 35, junto com a zona ótima e zona utilizável, de acordo com Itambé (2011).

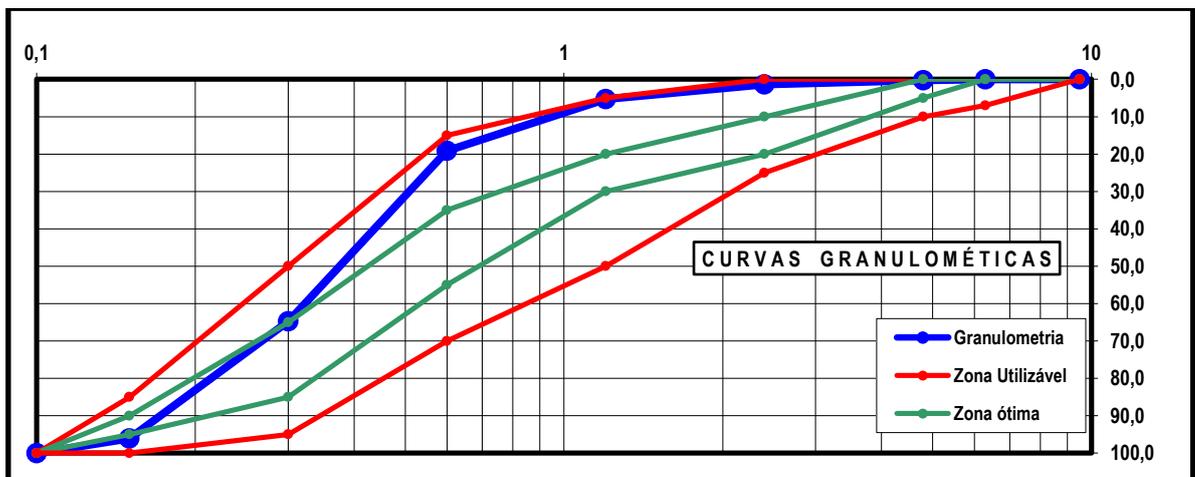


Figura 35 - Comparativo da distribuição granulométrica com a zona utilizável e zona ótima da areia natural.

Fonte: Itambé (2011).

O ensaio aponta o Diâmetro Máximo Característico de 2,4 mm, devido uma quantidade inferior a 5% da massa de material ter ficado retida e acumulado nessa malha. Porém, a maior parte do material ficou retida nas peneiras #0,30 mm e #0,15 mm. O valor encontrado para o Módulo de Finura é de 1,83, classificando o material como um agregado fino.

5.1.6.3 Agregado Miúdo Artificial

A areia artificial utilizada para a produção do bloco de concreto é o pó de pedra. Material fino, de dimensão máxima de 6,3 mm, proveniente do processo de britagem e moagem de rochas. O pó de pedra está armazenado em baía ao lado de onde foram executados os blocos de concreto, semelhante a areia natural e o pedrisco.

A caracterização física do agregado miúdo artificial, pó de pedra, como a massa específica real e massa específica aparente são mostrados na Tabela 3. Os ensaios foram realizados segundo a NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO..., 1987) e a NBR 7251 (ASSOCIAÇÃO..., 1982), semelhante ao agregado miúdo natural.

Tabela 4 - Massa específica real e massa específica aparente do pó de pedra

	g/cm ³
Massa específica real	2,96
Massa específica aparente	1,77

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

A composição granulométrica do agregado artificial foi realizada de acordo com as especificações da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), os resultados são expostos nas tabelas 4.

Tabela 5 - Granulometria do agregado miúdo artificial

Abertura da peneira (mm)	% retido	% acumulado
4,8	0	0
2,4	5,9	5,9
1,2	28,1	34
0,6	18	52
0,3	12,4	64,4
0,15	8,9	73,3
< 0,15	26,6	100
Diâmetro Máximo Característico		4,8
Módulo de Finura		2,03
Classificação		Fino

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

A curva granulométrica do agregado miúdo artificial, ou pó de pedra, está apresentado na figura 36.

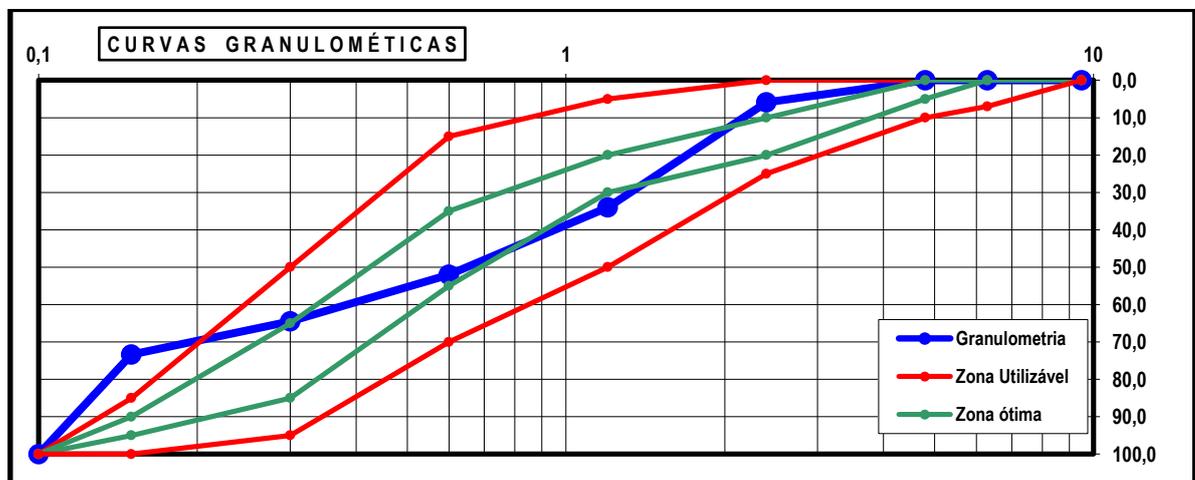


Figura 36 - Comparativo da distribuição granulométrica com a zona utilizável e zona ótima da areia artificial.

Fonte: Itambé (2011).

O ensaio aponta o Diâmetro Máximo Característico de 4,8 mm, devido uma quantidade superior a 5% da massa de material ter ficado retida e acumulado na malha de abertura 2,4 mm. Porém, a maior parte do material ficou retida nas peneiras #0,30 mm, #0,15

mm e no fundo. O valor encontrado para o Módulo de Finura é de 2,03, classificando o material como um agregado fino.

5.1.6.4 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural utilizado foi a brita zero, também conhecida pela denominação de Pedrisco, este agregado é o responsável por desempenhar a função do agregado graúdo para as dosagens utilizadas na a fabricação dos blocos de concreto.

Utilizando os métodos de ensaios descritos na NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO..., 2009), obteve a massa específica real e massa específica aparente do agregado graúdo natural. Os resultados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica real e massa específica aparente do agregado graúdo natural

	g/cm ³
Massa específica real	2,93
Massa específica aparente	1,58

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

A composição granulométrica do agregado graúdo natural foi realizada de acordo com as especificações da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), os resultados são expostos na tabela 7.

Tabela 7 - Granulometria do agregado graúdo natural

Abertura da peneira (mm)	% retido	% acumulado
9,5	0	0
4,8	68,6	68,6
2,4	27,7	96,3
1,2	2,1	98,4
0,6	1,7	100
0,3	0	100
< 0,3	0	100
Diâmetro Máximo Característico		9,5
Módulo de Finura		4,63
Classificação		Brita 0

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

A tabela 7, resultado da granulometria do pedrisco, mostra um Diâmetro Máximo Característico de 9,5 mm, tendo maior parte do material retido nas peneiras #4,8 mm e #2,4 mm.

A curva granulométrica do agregado graúdo é verificada na figura 37, em comparativo com a composição granulométrica de britas com diferentes dimensões.

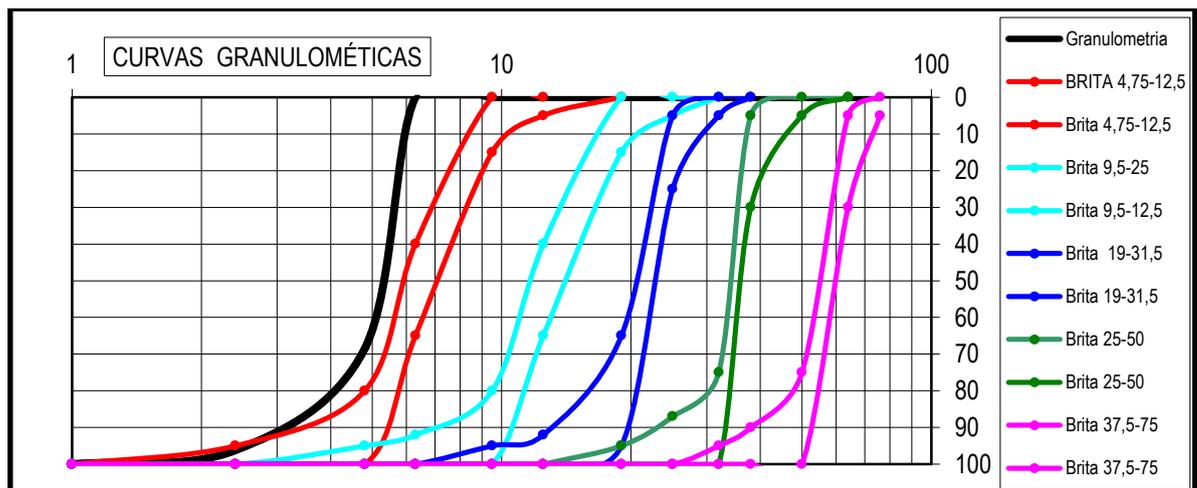


Figura 37 - Comparativo da distribuição granulométrica com a zona utilizável e zona ótima da brita 0.

Fonte: ITAMBÉ (2011).

Verifica-se que as dimensões do agregado graúdo e sua quantidade retida acumulada nas peneiras são menores do que as granulometria propostas pela Itambé (2011), desta forma a curva granulométrica da brita se encontra fora das faixas mostradas acima.

5.1.6.5 Água

A água utilizada na confecção dos blocos de concreto para a pavimentação intertravada foi a disponível na empresa colaboradora, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.

5.1.6.6 Sílica Ativa

Para a elaboração dos concretos utilizados nos blocos para pavimentos, utilizou-se sílica ativa nacional. Fornecida pela empresa Tecnosil, localizada na cidade de Itupeva no estado de São Paulo. Foi disponibilizado em pó não densificado em sacos de 15 kg.

As características físicas e químicas da sílica ativa, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Características físicas da Sílica Ativa

Características físicas da Sílica Ativa	
Massa Específica (kg/m ³)	2220
Superfície Específica (m ² /kg)	~ 19000
Formato da Partícula	Esférica
Diâmetro Médio da Partícula (µm)	0,20
Massa Unitária Desificado (kg/m ³)	< 350
Massa Unitária não Desificado (kg/m ³)	> 350

Fonte: TecnoSil.

5.2 ENSAIOS REALIZADOS

Nos itens mostrados a seguir são apresentados os ensaios que foram submetidos aos blocos de concreto com adição de sílica ativa e também os ensaios realizados nos corpos de prova feitos com o mesmo concreto que o usado para os blocos moldados em formatos cilíndricos e prismáticos de acordo com a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO..., 2015).

5.2.1 Resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimento

A resistência à compressão característica é o principal parâmetro de controle de qualidade dos blocos para pavimento feito de concreto, assim o traço padrão e os traços com adições de sílica ativa foram rompidos com 28 dias.

Os ensaios mecânicos para a determinação da resistência característica à compressão foram realizados de acordo com o Anexo A da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013), sendo realizado no laboratório de materiais e ensaios tecnológicos da UTFPR de Campo Mourão. Para isto, foi utilizada uma presa hidráulica manual (EMIC) com carga máxima de 100 ton. Na figura 38, ilustra-se a prensa hidráulica de ensaio que foi utilizada.



Figura 38- Prensa hidráulica manual eletrônica

Fonte: Do autor

A NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) também determina que nas superfícies de carregamento seja preparado um capeamento com pasta de cimento segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO..., 2015), além da necessidade do corpo de prova estar saturado em água no período de 24h anterior ao ensaio de rompimento. Na figura 39, é visto o bloco de concreto depois de feito o capeamento de um lado dos corpos de prova.



Figura 39 - Corpos de prova depois de realizado o capeamento de um dos lados

Fonte: Do autor

A resistência à compressão da peça, expressa em megapascals (MPa), é obtido dividindo-se a carga de ruptura que é expressa em newtons (N) pela área de carregamento em milímetros (mm), obtido o valor multiplica-se pelo fator p que é dado em função da altura, conforme a tabela 9.

Tabela 9 - Fator multiplicativo p

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

Fonte: NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

A resistência à compressão da peça é dada pela equação a seguir:

$$f_c = (Carga/Área) \times p \quad (1)$$

A resistência à compressão estimada, que é a resistência que obedece a distribuição normal pela curva *Student* com nível de confiança de 80%, é dada pela equação:

$$f_{ck, est} = f_p - t \times s \quad (2)$$

Onde f_p é a resistência média das peças e $f_{ck, est}$ a resistência característica estimada das peças expressas em megapascals (MPa), s é o desvio-padrão da amostra e t é o coeficiente de Student em função do tamanho da amostra, como mostrada na tabela 10.

Tabela 10 - Coeficiente de Student

n	t
6	0,920
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,870

Fonte: NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

5.2.2 Absorção de água dos blocos de concreto para pavimento

A absorção de água do bloco de concreto é inversamente proporcional à resistência deste mesmo bloco, devido isso ao maior número de vazios com uma maior absorção de água. O ensaio foi feito segundo o método da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) disposto no Anexo B.

O processo se constitui de deixar o bloco de concreto imerso em água por 24h depois de feita a remoção de todo pó e partículas soltas disposto no bloco. Saturados com superfície seca os blocos são pesados, todos os corpos de prova que foram pesados são levados à estufa até a condição de constância de massa, sendo pesados imediatamente após a saída da estufa. Na figura 40, vê-se a pesagem do corpo de prova, na condição saturada com superfície seca, já na figura 41, os blocos dispostos na estufa depois da pesagem saturados.



Figura 40 - Pesagem do corpo de prova na condição saturado superfície seca

Fonte: Do autor.



Figura 41 - Corpos de prova na estufa

Fonte: Do autor.

A absorção de água é expressa em porcentagem pela equação (3):

$$A = ((m2 - m1) / m1) \times 100 \quad (3)$$

Onde A é absorção de água expresso em %, m_1 é massa do corpo de prova seco em gramas (g) e m_2 é massa do corpo de prova saturado em gramas (g).

5.2.3 Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos feito com concreto de blocos para pavimento

A resistência à compressão é a principal característica dos concretos, tanto para usos gerais quanto para empregados para fabricação de blocos, assim os corpos de prova cilíndricos foram rompidos com 28 dias no laboratório de estruturas da UTFPR de Campo Mourão. O ensaio a determinação da resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739(ASSOCIAÇÃO..., 2007). Para isto, foi utilizada uma presa hidráulica (EMIC) com carga máxima de 1000 ton. Na figura 43, é mostrado o corpo de prova cilíndrico de concreto na prensa. Foram preparados os topos do corpo de prova pelo processo de desgaste mecânico da extremidade, para o melhor contato do C.P. com o prato da prensa.



Figura 42 - Prensa com os pratos carregamento o corpo de prova à ruptura à compressão

Fonte: Do autor.

A resistência á compressão da peça, expressa em megapascals (MPa), é obtido dividindo-se a carga de ruptura que é expressa em newtons (N) pela área de carregamento em milímetros quadrados (mm²), obtendo o valor da resistência à compressão da peça, seguindo a equação (4).

$$f_c = \text{Carga de ruptura} / \text{Área C.P.} \quad (4)$$

5.2.4 Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova cilíndricos moldados com concreto para blocos

A permeabilidade e absorção por capilaridade situam-se dentre os principais mecanismos de transportes de fluidos, podendo ser água ou agentes agressivos para o interior do concreto.

A penetração de água, íons agressivos e a porosidade da camada superficial são importantes, especialmente à espessura dessa camada. Os movimentos desses agentes agressivos dependem da porosidade, isto é, do diâmetro e distribuição dos poros, e da continuidade entre eles. A eliminação dos poros capilares contínuos deve ser considerada uma condição necessária para a obtenção de concretos duráveis (BARDELLA; BARBOSA; CAMARINI, 2005, p. 2).

O ensaio segundo a NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO..., 1995) tem como objetivo a determinação da absorção de água através da ascensão capilar do concreto endurecido. O procedimento do ensaio é secar os corpos de prova em estufa até a constância de massa, retirar os C.P.s da estufa e pesá-los secos. Colocá-los em uma bandeja com água (figura 44) com uma altura de 5 mm(±1) e fazer leituras uma balança, de resolução mínima de 1 g, em 3h,6h,24h,48h,72h a partir da hora que colocados em contato com a água.



Figura 43 - Badeira com superfície de 5 mm de água com corpos de prova para a obtenção da absorção de água por capilaridade

Fonte: Do autor.

Após todas as etapas descritas a cima, devem ser rompidos todos os corpos de prova por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), de modo a permitir a visualização da distribuição de água no interior do C.P.. Os resultados da absorção de água por capilaridade devem ser expressos em g/cm^2 e são calculados através da equação:

$$C = (A - B)/S \quad (5)$$

Onde:

C - absorção de água por capilaridade, em g/cm^2 .

A – massa do C.P. que permanece com uma das faces em contato com a água por um tempo estimado, em g.

B – massa do C.P. seco, em g.

S – área da seção transversal, em cm^2 .

6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO

A seguir serão apresentados os valores para o ensaio dos blocos de concreto quanto à resistência característica à compressão. Nas tabelas 11,12 e 13 são apresentados os resultados da resistência a compressão dos blocos sem adição de sílica ativa, com 5% de adição de S.A. e 8% de adição.

Tabela 11 - Bloco de Concreto sem adição S.A.

C. P.	Força (kN)	f (Mpa)	f_c (Mpa)
1	233,8	36,51	34,68
2	207,1	32,34	30,72
3	214,3	33,46	31,79
4	207,9	32,46	30,84
5	179,4	28,01	26,61
6	193,4	30,20	28,69
7	222,3	34,71	32,98
8	148,4	23,17	22,01
9	186,5	29,12	27,67
Média (f_p em MPa)			29,55
Desvio Padrão (s)			3,81
Coef. Student 80% (t)			0,889
$f_{ck,est}$			26,17

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Tabela 12 - Bloco de Concreto com adição de 5% S.A.

C. P.	Força (kN)	f (Mpa)	f_c (Mpa)
1	213,8	33,38	31,72
2	201,9	31,53	29,95
3	217,3	33,93	32,23
4	200,9	31,37	29,80
5	241,9	37,77	35,88
6	204,8	31,98	30,38
7	209,2	32,67	31,03
8	253,8	39,63	37,65
9	244,4	38,16	36,25
Média (f_p em MPa)			32,77
Desvio Padrão (s)			3,01
Coef. Student 80% (t)			0,889
$f_{ck,est}$			30,09

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Tabela 13 - Bloco de Concreto com adição de 8% S.A.

C. P.	Força (kN)	f (Mpa)	f_c (Mpa)
1	279,9	43,71	41,52
2	280	43,72	41,54
3	217,8	34,01	32,31
4	227,3	35,49	33,72
5	217	33,88	32,19
6	295,1	46,08	43,78
7	291,1	45,45	43,18
8	330,2	51,56	48,98
9	235,1	36,71	34,87
Média (f_p em MPa)			39,12
Desvio Padrão (s)			6,01
Coef. Student 80% (t)			0,889
$f_{ck,est}$			33,78

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

No gráfico 1, são apresentados os valores de resistência à compressão média para cada traço. Na tabela 14 são apresentados os valores de resistência à compressão média dos blocos de concreto, os desvios padrões de cada amostra e a resistência à compressão estatística.

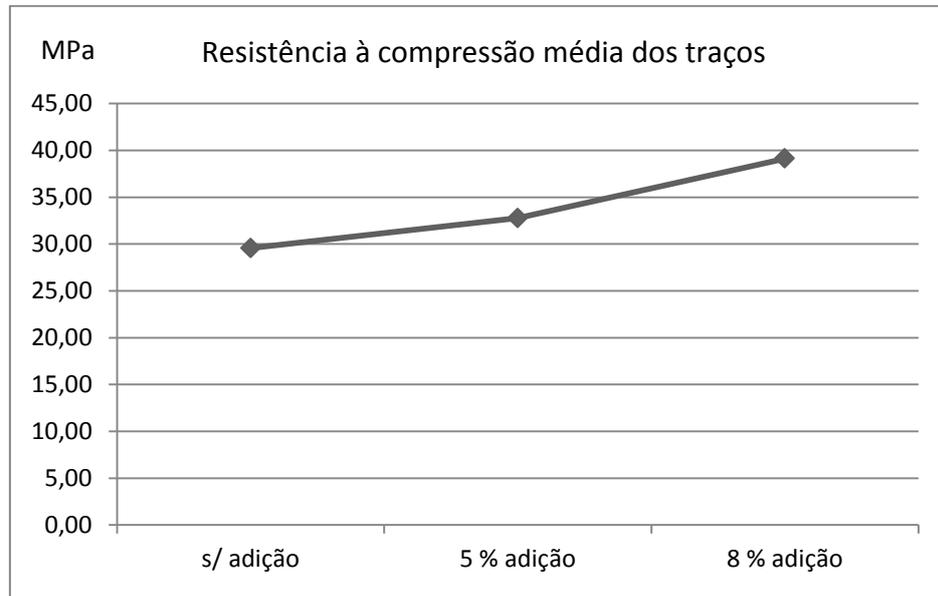


Gráfico 1 - Resistência à compressão média dos blocos de concreto para cada traço.

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Tabela 14 - Resumo da resistência à compressão média e resistência estimada dos blocos de concreto

	S/ adição	5 % adição	8 % adição
f_p (Mpa)	29,55	32,77	39,12
D. Padrão	3,81	3,01	6,01
$f_{ck,est}$	26,17	30,09	33,78

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

O traço padrão da empresa colaboradora, sem adição de sílica ativa, teve um valor obtido de $f_{ck,est}$ de 26,17 MPa, o mesmo traço com adição de 5% de sílica ativa teve um resultado de 30,09 MPa, já o traço com adição de 8% obteve um valor de 33,78 MPa.

É notório o ganho de resistência à compressão com adição de sílica ativa ao traço dos blocos de concreto para pavimento. Com adição de 5% de sílica ativa em razão a massa de cimento, obteve uma melhora de 11% na resistência à compressão média em relação ao traço padrão sem adição. Já a adição de 8% de S.A., teve um ganho de resistência média de 32% em relação ao traço sem adição. De 5% para 8% a melhora na resistência média foi de 19%.

Considerando-se como análise a resistência estimada o traço de 5% de sílica ativa teve melhora de 15% ao traço sem adição, o traço de 8% de sílica ativa em sua composição teve uma melhora de 29% em relação ao traço padrão.

Contudo, apesar da melhora notável na resistência à compressão das peças de concreto para pavimento. Se comparados os valores obtidos de $f_{ck,est}$ com a exigência mínima da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013), os valores não são satisfatórios devido os resultados serem menor que 35 MPa. Segundo a norma os blocos não podem nem ser utilizados para calçamento, tráfego com menor exigência.

Analisando as possíveis causas da não obtenção da resistência mínima de norma, verifica-se que o traço usado pela empresa inadequado, em relação ligante/agregados, para o uso do concreto seco e a granulometria de alguns agregados empregados no concreto do bloco não se encontrava na zona ótima e zona utilizável, como o pó de pedra e o pedrisco.

Outras possíveis causas podem ser que o equipamento de vibro-prensa não estava calibrado corretamente para a confecção de blocos para pavimento e água/cimento utilizado foi 0,24. Assim a água empregada foi insuficiente para ocorrer à hidratação completa do cimento, conforme Neville (1982) o fator água/cimento deve ser pelo menos cerca de 0,36 a 0,38 para que seja possível ocorrer a hidratação completa. Sendo assim há uma menor quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência do concreto o concreto não atingiu sua resistência máxima.

6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTO

Na tabela 15, são mostrados os resultados da determinação da absorção de água dos blocos de concreto para pavimento segundo o ensaio do Anexo B da NBR9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

Tabela 15 - Valores de pesagem dos blocos de concreto seco, saturado com superfície seca e o resultado da absorção de água.

	Massa saturada superfície Seca (g)	Massa Seca (g)	Abs. de Água (ml)	% Abs. Água
CP 1 (adição = 0%)	2920	2826	94	3,33%
CP 2 (adição = 0%)	2817	2722	95	3,49%
CP 3 (adição = 0%)	2814	2722	92	3,38%
CP 4 (adição = 5%)	2733	2639	94	3,56%
CP 5 (adição = 5%)	2571	2470	101	4,09%
CP 6 (adição = 5%)	2814	2718	96	3,53%
CP 7 (adição = 8%)	2600	2513	87	3,46%
CP 8 (adição = 8%)	2839	2753	86	3,12%
CP 9 (adição = 8%)	2700	2609	91	3,49%

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

No gráfico 2, são mostrados os resultados médios da absorção de água dos blocos de concreto para pavimento para cada traço.

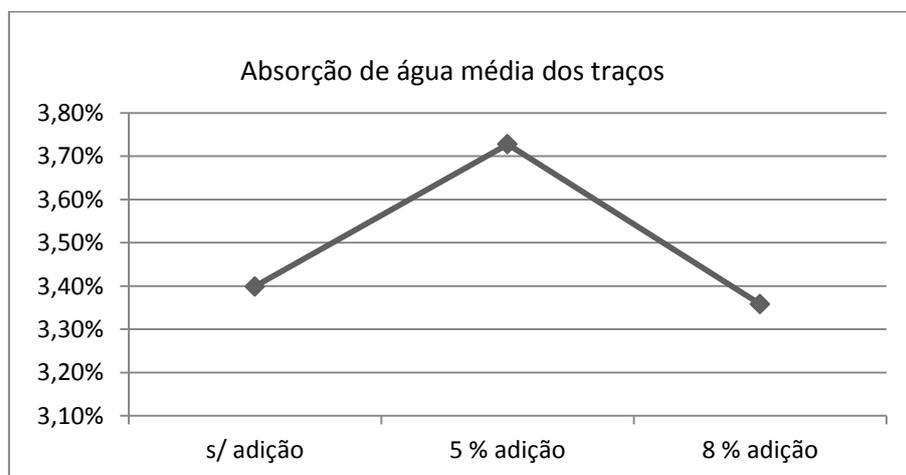


Gráfico 2 - Absorção de água média dos blocos de concreto para cada traço.

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Com os resultados da absorção de água dos blocos de concreto (*pavers*) com os diferentes traços com adições de sílica ativa percebe-se que os blocos têm valores de absorção de água próximo uns dos outros, cerca 3% a 4% aproximadamente. Desta maneira, não apresentando mudanças significativas na absorção de água devido à adição de sílica ativa.

Todos os blocos ensaiados quanto à absorção de água atenderam a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) que normatiza que a média dos valores deve ser menor que 6% e também nenhum valor individual de absorção de água seja maior que 7%.

6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS COM CONCRETO PARA BLOCOS.

A seguir são apresentados os valores para o ensaio da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos moldados com concreto para blocos para pavimento, tabela 19 para traço padrão (sem adição), tabela 20 traço com adição de 5% e tabela 21 traço com 8% de sílica ativa em relação à massa de cimento.

Tabela 16 - Resistência à compressão do corpo de prova com traço padrão (0%)

	Diâmetro (mm)	Carga Rup Comp. (kN)	Resistência (Mpa)
CP 1	100,3	58	7,34
CP 2	100,5	118,5	14,94
CP 3	100,0	73,7	9,38
CP 4	100,0	125,3	15,96
f_{cm} (MPa)	11,91	Desvio Padrão (s)	4,20

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Tabela 17 - Resistência à compressão do C.P. com traço com adição de 5%

	Diâmetro (mm)	Carga Rup Comp. (kN)	Resistência (Mpa)
CP 1	100,5	119,3469	15,04
CP 2	100,0	122,3	15,57
CP 3	100,6	87,7	11,03
CP 4	100,1	111,4	14,15
f_{cm} (MPa)	13,95	Desvio Padrão (s)	2,03

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Tabela 18 - Resistência à compressão do C.P. com traço com adição de 8%

	Diâmetro (mm)	Carga Rup Comp. (kN)	Resistência (Mpa)
CP 1	100	175,335	22,32
CP 2	100,6	138,3	17,40
CP 3	100,3	205,0	25,97
CP 4	100,9	168,8	21,11
f_{cm} (Mpa)	21,70	Desvio Padrão (s)	3,53

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

O traço padrão sem adição de sílica ativa teve um valor obtido de f_{cm} de 11,91 MPa, o traço com adição de 5% de sílica ativa teve um resultado de 13,95 MPa, já o traço com adição de 8% obteve um resultado de 21,70 MPa.

No gráfico 3, são mostrados os valores de resistência à compressão média dos corpos de prova cilíndricos para cada amostra.

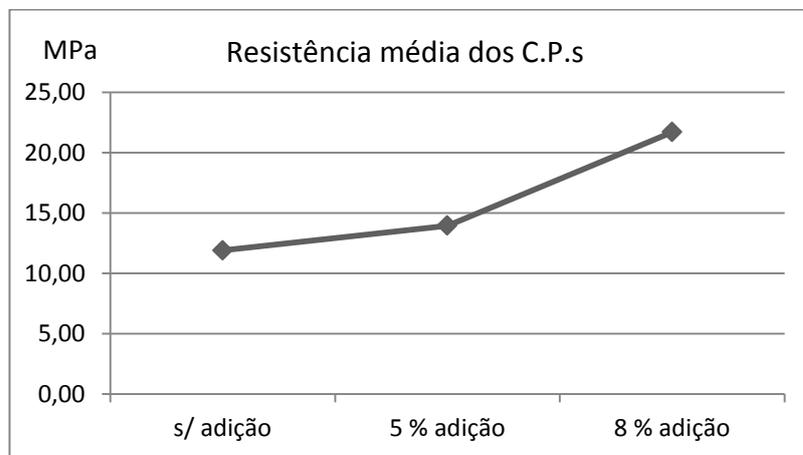


Gráfico 3 - Resistência à compressão média dos corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Diferente do ensaio à compressão dos blocos, onde a melhora na resistência com a adição de sílica ativa foi cerca de 10% a 30%, o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos teve uma melhora significativa de aproximadamente 80% da relação do traço sem adição com o traço com adição de 8%. Para o traço com 5% de adição obteve uma melhora de 17% na resistência à compressão média em relação ao traço padrão sem adição. Já o traço com adição de 8% de sílica ativa, teve um ganho de resistência média

de 82% em relação ao traço sem adição. Do traço de 5% para o traço de 8% a melhora na resistência média foi de 56%.

6.4 ABSORÇÃO CAPILAR DE ÁGUA DO CONCRETO PARA BLOCOS MOLDADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Na tabela 16 é mostrado o valor das pesagens dos corpos de prova seco e em contato com uma superfície de 5 mm de água nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h.

Tabela 19 - Valores de pesagem dos corpos de provas cilíndricos

	Massa Seca (g)	Massa 3h (g)	Massa 6h (g)	Massa 24h (g)	Massa 48h (g)	Massa 72h (g)
CP 1 (0%)	3321	3338	3343	3354	3362	3367
CP 2 (0%)	3337	3353	3358	3370	3378	3384
CP 3 (5%)	3303	3318	3324	3340	3351	3357
CP 4 (5%)	3281	3301	3307	3321	3331	3337
CP 5 (8%)	3310	3327	3332	3343	3351	3355
CP 6 (8%)	3405	3419	3422	3431	3437	3442

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Na tabela 17 são apresentados os resultados de absorção de água por capilaridade dos C.P.s. cilíndricos com concreto de bloco sem adição, com adição de 5% e 8% de adição de S.A. e a média da absorção em cada tempo estimado para cada traço.

Tabela 20 - Resultados da absorção de água por capilaridade dos corpos de provas cilíndricos

	Absorção de água (3h) (g/cm ³)	Absorção de água (6h) (g/cm ³)	Absorção de água (24h) (g/cm ³)	Absorção de água (48h) (g/cm ³)	Absorção de água (72h) (g/cm ³)
CP 1 (0%)	0,22	0,28	0,42	0,52	0,59
CP 2 (0%)	0,20	0,27	0,42	0,52	0,60
Média	0,21	0,27	0,42	0,52	0,59
CP 3 (5%)	0,19	0,27	0,47	0,61	0,69
CP 4 (5%)	0,25	0,33	0,51	0,63	0,71
Média	0,22	0,30	0,49	0,62	0,70
CP 5 (8%)	0,22	0,28	0,42	0,52	0,57
CP 6 (8%)	0,18	0,22	0,33	0,41	0,47
Média	0,20	0,25	0,38	0,46	0,52

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Analisando-se os dados obtidos de absorção de água por capilaridade, observa-se que, em todos os tempos estipulados pela norma, a absorção de água dos corpos de prova com adição de 5% de sílica ativa foi maior que os demais traços. Tendo o traço sem adição o segundo maior valor de absorção e o traço com adição de 8% de S.A. o que teve menor valor de absorção de água por capilaridade.

Contudo as variações de absorção de água para os respectivos traços são em casas decimais e a maior variação acontece a partir do tempo de 48h, cerca de 20% maior a absorção de água do traço com 5% de adição em relação ao sem adição e aproximadamente 10% menor o valor de absorção de do traço com 8% em relação ao sem adição.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é mostrado na figura 45 e na tabela 18 são apresentados os resultados segundo a NR9772 (ASSOCIAÇÃO..., 1994).



Figura 44 - Ruptura dos corpos de prova por compressão diametral

Fonte: Do autor.

Tabela 21 - Resultados da resistência a tração por compressão diametral dos corpos de provas cilíndrico

			Seção	Massa	Volume		Carga de	
	Diâmetro	Altura	Transversal	do CP	do C.P.	Massa	Rup.	Resistência
	(mm)	(mm)	(mm ²)	(g)	(cm ³)	Esp.	Comp.	(MPa)
						(g/cm ³)	Diâm. (kN)	
CP 1(0%)	100	192,45	7854,00	3321	1511,50	2,197	58	1,92
CP 2(0%)	100,25	194	7893,32	3337	1531,30	2,179	46,2	1,51
CP 3(5%)	100,1	194,1	7869,72	3303	1527,51	2,162	63,8	2,09
CP 4(5%)	100,4	193,8	7916,96	3281	1534,31	2,138	45,3	1,48
CP 5(8%)	100	195,6	7854,00	3310	1536,24	2,155	55,8	1,82
CP 6(8%)	100	195,5	7854,00	3405	1535,46	2,218	67,5	2,20

Fonte: Ensaio realizado pelo autor.

Depois de rompimentos por compressão diametral, pode-se notar diferenças na distribuição de água para cada traço dos corpos de prova ensaiados. Como mostrado nas figuras 46, 47 e 48.



Figura 45 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova cilíndrico com concreto sem adição de sílica ativa.

Fonte: Do autor.



Figura 46 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova cilíndrico com concreto com adição de 5% de sílica ativa.

Fonte: Do autor.

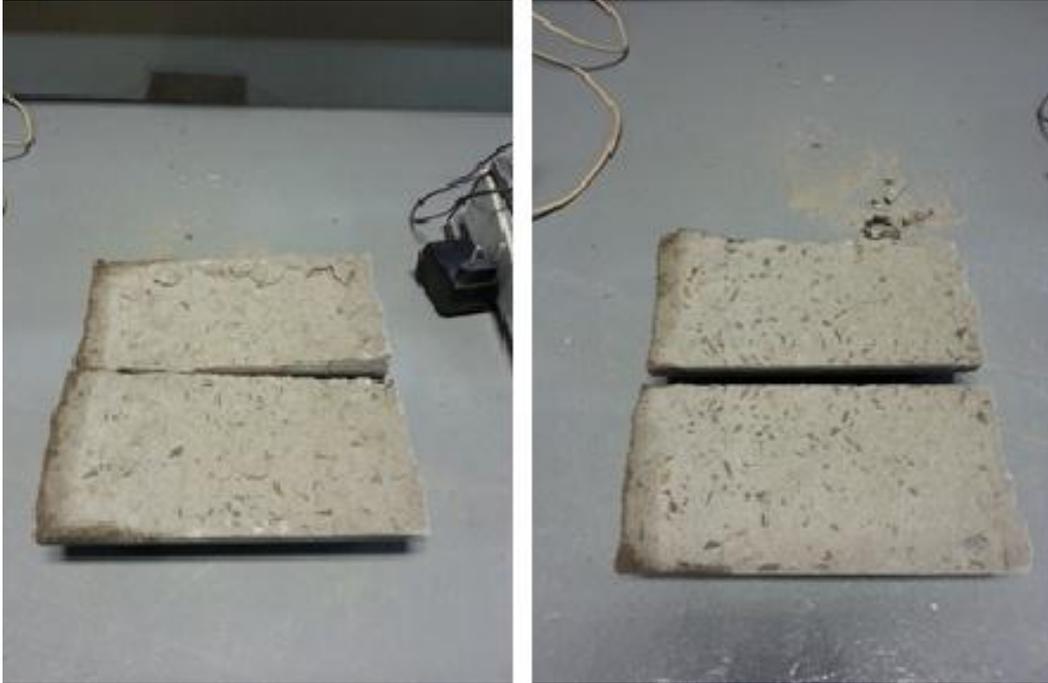


Figura 47 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova cilíndrico com concreto com adição de 8% de sílica ativa.

Fonte: Do autor.

Após os corpos de prova serem rompidos por compressão diametral e possibilitando-se visualizar o interior do corpo de prova, nota-se que os corpos de prova com o traço com adição de 8% de sílica ativa tiveram uma altura muito menor de água que absorvida por capilaridade em relação aos demais traços. O traço com 5% de adição também teve uma altura de água que penetrou no interior do corpo de prova menor que o traço padrão.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos dos ensaios realizados, conclui-se:

- Constatou-se um aumento na resistência à compressão com a adição de sílica ativa para os blocos de concreto. Com um teor de 8% de S.A., o aumento foi de mais 30% quando comparado com as dos blocos concreto de referência. Apesar desse aumento, os blocos mostraram-se insatisfatórios segundo o critério de resistência a compressão estimada da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) que normatiza um $f_{ck,est}$ de pelo menos 35 MPa.
- A absorção de água dos blocos de concreto não apresentou variações significativas. Contudo os valores de absorção de água para a amostra de 5% de sílica ativa foram maiores que os valores da amostra padrão (sem adição), comportamento diferente do esperado, devido à adição de pozolana possibilitar um refinamento dos poros e da estrutura dos produtos de hidratação do cimento assim tendendo a absorver menos água em relação a traços sem adições.
- Assim como nos blocos de concreto, verificou-se um acréscimo na resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos moldados com o concreto para blocos. Com um teor de 8% de S.A. houve um incremento de resistência que chega há 80% do traço padrão, e adição de 5% de sílica ativa o acréscimo foi menor 17% em relação ao traço sem adição.
- A absorção de água dos C.P.s por ascensão capilar, diferente da absorção de água dos blocos de concreto por imersão, apresentou variações significativas. Os corpos de prova com adição de 8% de S.A. foram os que apresentaram menores valores de absorção de água e menor altura de água que penetra no interior do concreto. Já o traço com adição de 5%, inesperadamente obtiveram os maiores resultados de absorção de água por capilaridade, chegando a 73% a mais que o resultado do traço padrão, esperava-se que com a adição 5% de sílica ativa esse valor fosse o intermediário entre as amostra padrão e de adição de 8%. Contudo para a amostra de 5% de S.A. a altura de água no interior do concreto foi menor que a altura que penetra no maciço de concreto de traço sem adição.

Cabe salientar que, com a análise dos valores de absorção de água e o estudo do comportamento físico do concreto quando usado uma material pozolânico, apresentou-se uma

divergência do resultado esperado com base nos estudos teóricos, desta forma sugere-se para trabalhos futuros que sejam feitos ensaios com maior quantidades de amostra e mais percentuais de adição, como 3%, 5%, 8%, 10% e 12% de sílica ativa, para verificar com maior clareza e amplitude de dados a absorção de água em relação a adição de pozolana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, Pierre C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 1997.

AMADEI, Daysa I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 151 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual do Pavimento Intertravado: Passeio Público**. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 7251: Agregado no estado solto – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BARDELLA, P. Sérgio.; BARBOSA, D. Cristina.; CAMARINI, Gladis. Sistemas de cura de concretos produzidos com cimento Portlan de alto-forno com utilização de sílica ativa. In: 1º

ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 11, 2005, São Carlos. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/115.pdf>. Acesso em: 10. Mai. 2015

BITTENCOURT, S. Ferreira. **Avaliação da resistência a compressão de *pavers* produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. 2012. 125 f , dissertação(Mestrado em tecnologia) – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

CARMO, J. B. M.; PORTELA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. Programa interdisciplinar de pós-graduação em engenharia – PIPE. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2008.

CRUZ, L. O. Maia. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. 281f, Tese (Mestrando em Ciências em Engenharia Civil) - UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2003.

DAL MOLIN, Denise C. C.; OLIVEIRA, Ana Paula M. Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para empregos em pisos especiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, s.d. Disponível em: <http://allquimica.locaweb.com.br/arquivos/websites/artigos/Estudo_de_Concretos_com_Adicao_de_S%C3%ADlica_Ativa_2006122610819.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**: Rio de Janeiro, 2006.

FARINHA, Ana Maria P.; SOUZA, Franciele C. **Pavimento intertravado de concreto com adição de resíduos de óxido alumínio – sinter**. 2011. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade São Francisco, Itatiba, São Paulo, 2011.

GODINHO, D. Pacheco. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. 158 f, Dissertação (Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura) – UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

HALLACK, A. Piso intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, São Paulo, dez. 2001. Disponível em: <<http://www.revistaprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=107>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

HOFFMAN, Anelise T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/cimento, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 132 f. Dissertação

(Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2001.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007

IDEAL CONCRETE BLOCK COMPANY, INC. **A Contractor's guide to installing interlocking concrete pavers.** 2006. Disponível em: <http://www.idealconcreteblock.com/tl_files/pages/contractors/paver-installation/Cont_Installing_Pavers.pdf> Acesso em: 04 dez. 2014.

JUNIOR, Jurandi J. N.; PELISSER, Fernando. Efeito do pó de pedra em argamassas para alvenaria estrutural. **UDESC,** Joinville, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/handle/1/1724/Jurandi%20Jos%C3%A9%20Nunes%20Junior.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 30 nov. 2014

KAEFER, Luís Fernando. Considerações sobre a microestrutura do concreto. Disponível em <http://engenhariaconcursos.com.br/arquivos/Materiais/microestrutura_do_concreto.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, S. E. Silveira. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizado agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** 2002. 146 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. 2002.

MULLER, R. Menegaz. **Materiais pozolânicos.** 2006. 149 f, Monografia (Especialização em construção civil) – UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2006.

NETTO, Rafael M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto.** 2005. 234 f, Tese (Mestrado em Ciências em engenharia civil) – UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NOGUEIRA, C. **Pavimentação: projeto e construção.** Rio de Janeiro. Sedegra, 1961

PETRUCCI, Eladio G. R. **Materiais de Construção.** São Paulo: Globo S.A., 1973

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. **Integridade x degradação da pasta de cimento endurecida por CO₂:** em ambiente de armazenamento deológico de carbono. Disponível em:

<http://www.pucrs.br/cepac/download/ccsbasico/12b.Integridade_Pocos.pdf>. Acesso em: 9 mai.2015.

RIBEIRO, Benício C. **Utilização da areia artificial (areia de brita) no preparo do concreto.** 2010. 9f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010.

RIPPER, Ernesto. **Manual de materiais de construção.** São Paulo: Pini Ltda., 1995

SILVA, Cláudio Oliveira. Execução e Manutenção de pavimento intertravado. Disponível em <<http://www.rpu.org.br/Pavimento%20intertravado%20-%20execu%C3%A7%C3%A3o%20e%20manuten%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 11 nov.2014.

SILVA, A. Leandro. **Concreto de alto desempenho – CAD** Estudo de caso: Edifício e-Tower. 2003. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Anhembi Morumbi, São Paulo, São Paulo, 2003.

SOBRINHO, Carlos W. A. P. et al. Blocos de concreto: características do processo de produção na região metropolitana do Recife. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 10, 2008, BRASIL, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_069_496_12161.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2015

SOUZA, A. M. Lino. **Pavimentação com blocos intertravados de concreto: análise crítica da técnica de execução.** 2013. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

VIERA, Fernanda P. et al. DURABILIDADE E RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS E ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA. Silicon, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://www.silicon.ind.br/wp-content/themes/silicon/estudos/Durabilidade_e_Resistencia_Mecanica_de_Concretos_e_Argamassa.pdf>. Acesso em: 28mar. 2015.