

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**  
**LABORATÓRIO DE MATERIAIS AVANÇADOS À BASE DE CIMENTO**  
**USP – EESC – SET – LMABC**

**THIAGO CATOIA**

**LADRILHOS E REVESTIMENTOS HIDRÁULICOS DE ALTO DESEMPENHO**

**São Carlos**

**2007**



**THIAGO CATOIA**

**LADRILHOS E REVESTIMENTOS HIDRÁULICOS DE ALTO DESEMPENHO**

**Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Área de concentração:**

**Engenharia de Estruturas**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio**

**São Carlos**

**2007**

Ficha catalográfica preparada pela  
Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C366L Catoia, Thiago  
Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto  
desempenho / Thiago Catoia ; orientador Jefferson B. L.  
Liborio. -- São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área  
de Concentração : Engenharia de Estruturas) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2007.

1. Argamassa. 2. Ladrilho hidráulico. 3. CAD.  
4. Revestimento. 5. Durabilidade. I. Título.



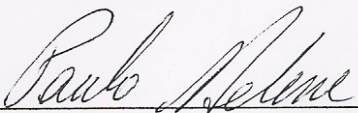
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **THIAGO CATOIA**

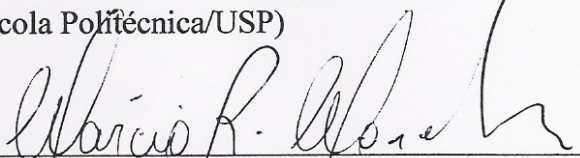
Dissertação defendida e julgada em 08/05/2007 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBÓRIO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

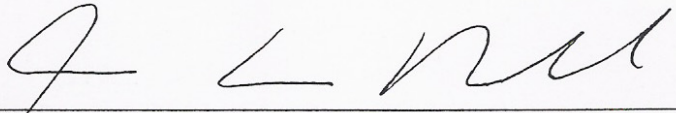
Aprovado

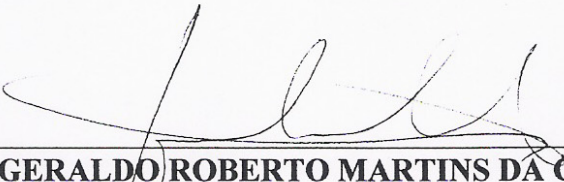
  
Prof. Titular **PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE**  
(Escola Politécnica/USP)

aprovado

  
Prof. Dr. **MARCIO RAYMUNDO MORELLI**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

  
Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)

  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC



*À minha mãe Lucia e ao meu  
pai Roberto, dedico este trabalho  
com todo amor.*



## AGRADECIMENTOS

---

A Deus por estar sempre ao meu lado, e me proporcionar saúde e disposição em mais esta etapa de minha vida.

Aos meus pais, Lucia Helena Catoia e Roberto Carlos Catoia, pelos paradigmas básicos de amor, carinho, respeito, responsabilidade, dignidade e doação.

À minha amiga e irmã Bruna Catoia pelo apoio, incentivo na pesquisa, e companheirismo no desenvolvimento de relatórios e dissertação, estando sempre disposta a me auxiliar.

À minha amiga e irmã Micheli Catoia, pelo incentivo e apoio, contribuindo com todo seu amor e carinho.

Aos meus irmãos, Denise Aparecida Pim e Fabio Rodrigues Pim, pelo apoio e amizade sempre dedicados a mim.

A meu amor, Regina Candeloro Grabarz, pelo apoio, incentivo e compreensão, pela indispensável contribuição nos ensaios de caracterização, por estar sempre presente e disposta a ajudar seja qual for o trabalho, e pelo amor dedicado a mim. Aos seus acolhedores pais, Sandra Janete Candeloro e Mendel Grabarz, pelo apoio e incentivo, sempre me proporcionando momentos felizes.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Liborio, pela valiosa oportunidade concedida, pela confiança depositada em mim desde o início deste trabalho, e por sempre valorizar minha dedicação.

Ao Prof. Dr. Libânio Miranda Pinheiro, pela sempre valorização do meu esforço acadêmico e dedicação experimental.

Ao Marcelo Pinarelli Cover e Fernando Periotto, pela amizade e dedicação destinada às minhas irmãs e família.

Ao Luciano Guimarães Monteiro de Castro e Sorandra Jane Candeloro Zaupa, pelo apoio na participação do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, ocorrido na cidade do Rio de Janeiro.

Ao meu amigo Romeu Lui Filho, por estar sempre pronto a me auxiliar na manutenção e utilização de computadores e maquinários eletro-eletrônicos.

Ao Isaías de Oliveira Junior, pela dedicação a minha família, contagiando a todos com sua serenidade e amor ao próximo.

Aos colegas que fizeram e fazem parte do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC): Alessandra Lorenzetti de Castro, José Américo Alves Salvador Filho, Rodrigo Vieira da Conceição, Giuliano Romagnolo, Samir Costa Fagury, Fernanda Giannotti da Silva, Valdirene Maria Lima, Fernanda Leal Costenaro, Fernando Mazzeo Grande, Romel Dias Vanderlei, Vanessa Silveira Silva, Sandra Maria de Lima, Rafaelle Tiboni, Gerusa de Cássia Salado, Marcelo

Sartorio, Carlos Eduardo Jun Futida, Érika Mieko Uagaia, José Luiz Camarero Neto, pela harmoniosa convivência e salutar troca de informação.

Aos meus colegas de turma, pelo companheirismo.

Aos técnicos, Jorge Brabo, Renato Antonio da Silva e Marco Valério Antônio, pela colaboração no programa experimental.

Ao Wilson Moreira e Vandira Cascimiro dos Santos, pela cuidadosa e cotidiana limpeza do LMABC.

Ao especialista em laboratório, Luiz Vicente Vareda, pelo auxílio na utilização de equipamentos importantes na realização de ensaios.

Ao analista de sistemas, Masaki Kawabata Neto, pelo auxílio e manutenção dos computadores do LMABC.

Ao Laboratório de Engenharia de Estruturas, pelo apoio técnico.

À Rosi Aparecida Jordão Rodrigues, Antônio Valdir Carneiro e Sylvania Helena Morette, da secretaria do departamento de Engenharia de Estrutura, pelos auxílios prestados.

Ao Prof. Dr. Hoberto Hieaki Tsunaki, ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo, ao Pós Doutorando Fabricio Tadeu Paziani, e ao técnico Luiz Neves, do Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica (LMAFE – SEM – EESC – USP), pelo auxílio nos ensaios de expansão por cura e retração por secagem.

Ao Prof. Tit. José Eduardo Rodrigues e ao Pós Doutorando Rogério Pinto Ribeiro, do Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Geotecnia (SGS – EESC – USP), pelo auxílio e discussão dos ensaios de desgaste por abrasão.

Ao Prof. Dr. Arthur Belford Powell e ao técnico Adilson Rocini, do Laboratório de Laminação do Departamento Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista de Rio Claro (DPM – IGCE – UNESP/RC), pelo auxílio nos ensaios de desgaste por abrasão.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa e demais apoios concedidos, que muito contribuiu para realização da presente pesquisa de mestrado.

Às seguintes empresas, pela doação de materiais utilizados nesta pesquisa:

- Grace Brasil Ltda.
- Mineração Jundu Ltda.
- Metacaulim do Brasil Ltda.
- Elkem Materials South America Ltda.
- MBT Brasil Indústria e Comércio Ltda.
- Degussa Construction Chemicals Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), que tanto me orgulho.

## RESUMO

---

CATOIA, T. **Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Os ladrilhos hidráulicos são revestimentos produzidos utilizando aglomerante hidráulico, cuja tecnologia de produção não acompanhou a grande evolução tecnológica dos concretos, as disponibilidades de novos materiais e técnicas de utilização ocorrentes nos últimos anos, sendo assim esses revestimentos perderam espaço e competitividade no mercado pela característica artesanal de sua produção. O trabalho teve como objetivo desenvolver uma argamassa para produção de ladrilhos hidráulicos utilizando a tecnologia utilizada na produção de concretos de alto desempenho. Os agregados foram selecionados e compostos utilizando diferentes técnicas de empacotamento de partículas, essas técnicas foram implementadas experimentalmente e seus resultados foram analisados e comparados através da medida de massa unitária no estado compactado seco. Os aglomerantes foram selecionados de forma a atender a utilização de pigmentos claros e escuros necessários para a produção de ladrilhos hidráulicos decorativos, assim foram elaboradas duas diferentes composições de aglomerantes, a primeira com cimento Portland branco estrutural e metacaulinita branca, e a segunda com cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos e sílica ativa de ferro-silício. Diferentes aditivos superplastificantes foram testados, sendo a medida de compatibilidade com os aglomerantes e a determinação dos teores ideais a serem utilizados com cada tipo de aglomerantes realizadas através da medida de consistência em mesa cadente. A avaliação das argamassas desenvolvidas para produção dos ladrilhos hidráulicos foi realizada através dos ensaios de compressão axial simples, tração na compressão diametral, e determinação do módulo de elasticidade. Os ladrilhos hidráulicos foram produzidos em fôrmas previamente elaboradas e moldados com auxílio de vibração, após desmoldagem e cura foram avaliados através dos ensaios de módulo de flexão, desgaste por abrasão, absorção de água, retração por secagem, ação química, e determinação das variações de dimensões em diferentes tempos de cura. Após elaboração, produção e avaliação dos ladrilhos hidráulicos, também foram realizados alguns testes práticos, e avaliados os custos dos materiais para produção desses revestimentos, como parte de um estudo para implementação da produção desses elementos em escala industrial. Os ladrilhos hidráulicos desenvolvidos apresentaram alto desempenho nas características avaliadas, com resistência à compressão axial simples de até 143 MPa e absorção de água próxima a 1 %, também apresentando viabilidade de produção.

Palavras-chave: Ladrilho hidráulico. Argamassa. CAD. Revestimento. Durabilidade.





## ABSTRACT

---

CATOIA, T. **High performance hydraulic tiles and coverings**. M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

The hydraulic tiles are coverings produced by using hydraulic binders, whose production technology has not followed the great technological evolution of the concretes, the availabilities of new materials and the usual techniques in recent years, thus they have lost space and competition in the market due to their handicraft characteristic of production. This work had the objective to develop a mortar for production of hydraulic tiles using high performance concrete production technology. The aggregates were selected and proportioned using different techniques of particle packing, these techniques were implemented experimentally and their results were analyzed and compared through the measurement of the unit weight by rodding. The binders were selected to be used with clear and dark pigment necessity for production of decorative hydraulic tiles, thus two different mixture proportions of binders were elaborated, the first with structural white Portland cement and white metakaolin, and the second with high initial strength Portland cement resistant to sulphate and ferrosilicon silica fume. Different superplasticizer additives were tested, being the measure of compatibility with the binders and the determination of ideal proportions to be used with each type of binders measured in flow table consistency test. The evaluation of mortars developed for hydraulic tiles production was carried out by simple axial compression test, cylinder splitting test, and elastic modulus determination test. The hydraulic tiles were produced in a previously elaborated mould and molded by vibration, after demoulding and cure were evaluated by flexural modulus test, wear by abrasion test, water absorption test, drying shrinkage test, chemical action test, and determination of the dimensions variations in different times of cure. After hydraulic tiles elaboration, production and evaluation, also were made some practical tests, and evaluated the material costs for production of these coverings, as part of an implementation study for production of these elements in industrial scale. The developed hydraulic tiles showed high performance in the evaluated characteristics, with simple axial compression strength until 143 MPa and water absorption about 1 %, also showed production viability.

Keywords: Hydraulic tile. Mortar. HPC. Covering. Durability.



## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b>	- Diagrama ilustrativo da influencia da microestrutura dos agregados	11
<b>Figura 2.2</b>	- Desenvolvimento da microestrutura na hidratação do cimento Portland	16
<b>Figura 2.3</b>	- Modelo de empacotamento de partículas	30
<b>Figura 2.4</b>	- Densidade relativa x Arredondamento relativo	32
<b>Figura 2.5</b>	- Gráfico idealizado da melhor composição entre os agregados P1 e P2	32
<b>Figura 2.6</b>	- Densidade relativa x Composição das partículas	33
<b>Figura 2.7</b>	- Dopagem de agregados para aumentar a aderência	34
<b>Figura 2.8</b>	- Influência do efeito parede no empacotamento de agregados	34
<b>Figura 2.9</b>	- Modelos de mesma granulometria e diferentes empacotamentos	35
<b>Figura 2.10</b>	- Ladrilhos hidráulicos	36
<b>Figura 2.11</b>	- Fábrica Dalle Piagge, em São Paulo	38
<b>Figura 2.12</b>	- Ladrilhos hidráulicos em ambiente interno	38
<b>Figura 2.13</b>	- Ladrilhos hidráulicos em imóvel comercial	39
<b>Figura 2.14</b>	- Ladrilhos hidráulicos em ambiente externo	39
<b>Figura 2.15</b>	- Moldes para realização dos desenhos dos ladrilhos	40
<b>Figura 2.16</b>	- Pigmentos utilizados como base para as tintas	40
<b>Figura 2.17</b>	- Preparo das tintas	41
<b>Figura 2.18</b>	- Etapas do processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos	42
<b>Figura 2.19</b>	- Ladrilhos hidráulicos com diferentes desenhos e texturas	43
<b>Figura 3.1</b>	- Medida de consistência de argamassa em mesa cadente	48
<b>Figura 3.2</b>	- Faceador para corpos-de-prova com detalhe do disco	49
<b>Figura 3.3</b>	- Corpos-de-prova com topo retificado e não retificado	50
<b>Figura 3.4</b>	- Prensa servo-hidráulica utilizada	51
<b>Figura 3.5</b>	- Corpo-de-prova solicitado à compressão axial simples	51
<b>Figura 3.6</b>	- Ruptura cônica de corpos-de-prova comprimidos axialmente	52
<b>Figura 3.7</b>	- Corpo-de-prova solicitado à compressão diametral	52
<b>Figura 3.8</b>	- Ruptura dos corpos-de-prova comprimidos diametralmente	53
<b>Figura 3.9</b>	- Ensaio para determinação do módulo de elasticidade	54
<b>Figura 3.10</b>	- Acabamento superficial obtido no elemento hidráulico	55
<b>Figura 3.11</b>	- Fôrma para obtenção do ladrilho hidráulico	56
<b>Figura 3.12</b>	- Moldagem de ladrilhos hidráulicos com auxílio de vibrador	57
<b>Figura 3.13</b>	- Cura dos ladrilhos hidráulicos antes da desfôrma	57
<b>Figura 3.14</b>	- Prensa servo-elétrica utilizada	59
<b>Figura 3.15</b>	- Ladrilho hidráulico solicitado à flexão	60
<b>Figura 3.16</b>	- Ruptura no terço central dos ladrilhos hidráulicos solicitados à flexão	60
<b>Figura 3.17</b>	- Máquina Amsler utilizada no ensaio de desgaste por abrasão	61
<b>Figura 3.18</b>	- Corte de peça com serra policorte e disco rotativo diamantado ( $\varnothing$ 500 mm)	62
<b>Figura 3.19</b>	- Medida de espessura com relógio comparador	62
<b>Figura 3.20</b>	- Ensaio de abrasão em máquina Amsler com detalhe do corpo-de-prova	63

<b>Figura 3.21</b>	- Medida de ladrilhos hidráulicos em torre eletrônica de medição	64
<b>Figura 3.22</b>	- Corte de peça com serra policorte e disco rotativo diamantado (Ø 110 mm)	66
<b>Figura 4.1</b>	- Curva granulométrica da areia Itaporanga	68
<b>Figura 4.2</b>	- Curva granulométrica da areia Descalvado	69
<b>Figura 4.3</b>	- Variação da massa unitária nas diversas proporções entre as areias	77
<b>Figura 4.4</b>	- Sobreposição da curvas granulométricas	80
<b>Figura 4.5</b>	- Espalhamento da mistura clara (CPB 40 + MB) com GLENIUM 51	86
<b>Figura 4.6</b>	- Espalhamento da mistura clara (CPB 40 + MB) com ADVA Cast	86
<b>Figura 4.7</b>	- Espalhamento da mistura escura (CP V ARI RS + SFS) com GLENIUM 51	87
<b>Figura 4.8</b>	- Espalhamento da mistura escura (CP V ARI RS + SFS) com ADVA Cast	88
<b>Figura 4.9</b>	- Elementos moldados com argamassa clara com e sem pigmento	93
<b>Figura 4.10</b>	- Elementos moldados com argamassa escura com e sem pigmento	93
<b>Figura 4.11</b>	- Etapas da verificação da possibilidade de junção de peças	97
<b>Figura 4.12</b>	- Elementos hidráulicos após junção	98
<b>Figura 4.13</b>	- Ladrilhos hidráulicos após restauração de superfície	99
<b>Figura 5.1</b>	- Diversidade de ladrilhos hidráulicos moldados com e sem pigmento	102

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela 2.1</b>	- Principais constituintes do cimento Portland	14
<b>Tabela 2.2</b>	- Propriedades dos quatro principais componentes do cimento	14
<b>Tabela 2.3</b>	- Significado físico das reações de hidratação do cimento Portland	17
<b>Tabela 2.4</b>	- Relação: dimensão das partículas de cimento e tempo de hidratação	18
<b>Tabela 2.5</b>	- Composição química da escória	19
<b>Tabela 2.6</b>	- Características da sílica ativa para uso como adição	21
<b>Tabela 2.7</b>	- Limites de material pozzolânico para uso como adição	23
<b>Tabela 2.8</b>	- Requisitos a serem atendidos pela água de amassamento	24
<b>Tabela 4.1</b>	- Composição granulométrica da areia Itaporanga	68
<b>Tabela 4.2</b>	- Composição granulométrica da areia Descalvado	69
<b>Tabela 4.3</b>	- Composição química da areia Jundu	70
<b>Tabela 4.4</b>	- Dados técnicos do CPB 40 Estrutural	71
<b>Tabela 4.5</b>	- Dados técnicos do CP V ARI RS	72
<b>Tabela 4.6</b>	- Composição química da metacaulinita	73
<b>Tabela 4.7</b>	- Composição química da sílica ativa de Fe-Si	74
<b>Tabela 4.8</b>	- Dados técnicos do aditivo ADVA Cast	75
<b>Tabela 4.9</b>	- Dados técnicos do aditivo GLENIUM 51	75
<b>Tabela 4.10</b>	- Características dos pigmentos RHEOCOLOR	76
<b>Tabela 4.11</b>	- Composição das areias Itaporanga e Descalvado - Modelo 1	77
<b>Tabela 4.12</b>	- Composição granulométrica do Modelo 3	79
<b>Tabela 4.13</b>	- Valores da massa unitária no estado compactado seco	80
<b>Tabela 4.14</b>	- Traços com e sem areia Jundu	82
<b>Tabela 4.15</b>	- Características das misturas estudadas e resultados dos ensaios	90
<b>Tabela 4.16</b>	- Características e resultados dos ensaios de ladrilhos hidráulicos	94
<b>Tabela 4.17</b>	- Custo dos materiais que compõem a mistura clara	100
<b>Tabela 4.18</b>	- Custo dos materiais que compõem a mistura escura	100



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

---

#	- Malha de peneiras
A	- Área da seção transversal do corpo-de-prova
a	- Agregado
a/a	- Relação água/aglomerante
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abs	- Teor de absorção de água
a/c	- Relação água/cimento
ad	- Adição
AFt	- Etringita
AFm	- Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
agl	- Aglomerante (cimento + adição)
ASTM	- American Society for Testing and Materials
b	- Largura da placa ao longo da ruptura
C	- Consumo de material
C <sub>2</sub> S	- Silicato dicálcico ou belita
C <sub>3</sub> A	- Aluminato tricálcico ou aluminato
C <sub>3</sub> S	- Silicato tricálcico ou alita
C <sub>4</sub> AF	- Ferroaluminato tetracálcico ou ferrita
CAD	- Concreto de alto desempenho
CAR	- Concreto de alta resistência
CH; Ca(OH) <sub>2</sub>	- Portlandita ou hidróxido de cálcio
CP	- Cimento Portland
CPB 40	- Cimento Portland Branco Estrutural com classe de resistência de 40 MPa
CPFT	- Porcentagem acumulada de partículas menores que D <sub>p</sub>
CP V ARI (Plus)	- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP V ARI RS	- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos
CR	- Carga de ruptura
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
d	- Diâmetro do corpo-de-prova
D <sub>L</sub>	- Diâmetro da maior partícula
D <sub>p</sub>	- Diâmetro da partícula
D <sub>s</sub>	- Diâmetro da menor partícula
Δε	- Intervalo de deformação específica
Δl	- Deslocamento
Δσ	- Intervalo de tensão de compressão
E	- Módulo de Elasticidade
EC	- Teor de expansão por cura
ε	- Deformação específica
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos

$e_{\min}$	- Espessura mínima da placa
F	- Carga
FAPESP	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
$F_{ch}$	- Fração de cheios
$f_{t,d}$	- Resistência à tração na compressão diametral
$F_{vz}$	- Fração de vazios
$\gamma_{solto}$	- Massa unitária no estado solto
$\gamma_{comp}$	- Massa unitária no estado compactado seco
h	- Altura do corpo-de-prova
L	- Distância entre as barras de apoio
$l_0$	- Medida de dimensão de peça após desmoldagem
$l_1$	- Medida de dimensão de peça saturada superfície seca
$l_2$	- Medida de dimensão de peça seca
$\ell$	- Altura da haste do extensômetro
LMABC	- Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento
$m_1$	- Massa de peça saturada superfície seca
$m_2$	- Massa de peça seca
MB	- Metacaulinita Branca
Mix	- Mistura
MRF	- Módulo de resistência à flexão
$Na_2O$	- Óxido de sódio
NBR	- Norma Brasileira Registrada
$P_f$	- Fator de empacotamento
q	- Módulo ou coeficiente de distribuição
RS	- Teor de retração por secagem
SFS	- Sílica de ferro-silício
$\rho$	- Massa específica
$\rho_{emp}$	- Densidade relativa de empacotamento
$\rho_{bulk}$	- Densidade volumétrica do sistema de partículas
$\rho_s$	- Densidade máxima de partículas sólidas
$SiO_2$	- Dióxido de silício (sílica amorfa)
SP	- Aditivo superplastificante
$\sigma$	- Tensão de compressão
USP	- Universidade de São Paulo
$V_{ef}$	- Volume efetivo



## SUMÁRIO

---

<b>RESUMO</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	iii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	v
<b>LISTA DE TABELAS</b>	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b>	ix
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Justificativa e importância do trabalho	1
1.3. Objetivos	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	3
2.1. Concreto de alto desempenho	3
2.1.1. Definições	3
2.1.2. Histórico	5
2.1.3. Aplicações	8
2.1.4. Materiais	9
2.1.4.1. Agregado	9
2.1.4.2. Cimento	13
2.1.4.3. Adição	18
2.1.4.4. Água de amassamento	23
2.1.4.5. Aditivo	25
2.1.4.6. Pigmento	28
2.1.5. Empacotamento de partículas	30
2.2. Ladrilhos e revestimentos hidráulicos	36
2.2.1. Definições	36
2.2.2. Histórico	37
2.2.3. Produção atual	39
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	45
3.1. Caracterização de agregados miúdos	45
3.2. Empacotamento de partículas	46
3.3. Determinação da massa específica de aglomerantes	47
3.4. Determinação do teor de sólidos de aditivos líquidos	47
3.5. Ensaio de consistência em mesa cadente	47
3.6. Determinação da massa específica da argamassa fresca	48
3.7. Moldagem e preparo de corpos-de-prova cilíndricos	49
3.8. Ensaios mecânicos de corpos-de-prova cilíndricos	50
3.9. Determinação do módulo de elasticidade de corpos-de-prova cilíndricos	53
3.10. Moldagem e cura de ladrilhos hidráulicos	54
3.11. Ensaio dimensional e visual de ladrilhos hidráulicos	58
3.12. Ensaio de flexão de ladrilhos hidráulicos	58

3.13. Desgaste por abrasão de ladrilhos hidráulicos	61
3.14. Absorção de água de ladrilhos hidráulicos	63
3.15. Retração por secagem de ladrilhos hidráulicos	64
3.16. Resistência ao ataque químico de ladrilhos hidráulicos	65
<b>4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>67</b>
4.1. Seleção dos materiais	67
4.1.1. Agregados miúdos	67
4.1.2. Cimento	70
4.1.3. Adição	72
4.1.4. Aditivo	74
4.1.5. Pigmento	75
4.2. Dosagem da argamassa	76
4.2.1. Empacotamento das partículas de agregados	76
4.2.2. Empacotamento de partículas do traço	81
4.2.3. Traço da argamassa	83
4.2.4. Ordem de mistura dos materiais	84
4.2.5. Consistência da argamassa	85
4.2.6. Caracterização da argamassa	89
4.2.7. Pigmentos na argamassa	92
4.3. Avaliação dos revestimentos	94
4.4. Junção de peças	96
4.5. Restauração dos revestimentos hidráulicos	98
4.6. Custo dos materiais	99
<b>5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>101</b>
5.1. Conclusões	101
5.2. Considerações finais	102
5.3. Prosseguimento da pesquisa	105
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>107</b>

---

## 1. INTRODUÇÃO

---

### 1.1. Considerações gerais:

Os ladrilhos hidráulicos foram introduzidos no Brasil pelos italianos e, embora no passado fosse uma alternativa na produção de revestimentos, essencialmente com caráter decorativo, pelas disponibilidades existentes, seu uso foi abandonado com o advento da indústria cerâmica.

Outra razão para o abandono do uso desse revestimento, deveu-se também às poucas alternativas existentes no comércio, com pequenas empresas capacitadas para produzi-los, e ainda assim com baixo desempenho em aplicações específicas.

Embora nos anos 80 arquitetos e decoradores começassem a valorizar novamente os revestimentos hidráulicos, como forma de personalizar projetos e até pela possibilidade de utilização em mosaicos, a inserção no mercado de produtos com bom aspecto visual ainda passa por uma produção artesanal que está embasada no empirismo, com pouco cientificismo, sendo ainda utilizada as técnicas trazidas da Itália.

O advento do concreto de alto desempenho, com valores de resistência a compressão que podem atingir os 200 MPa, permite que seja transposto para a prática um novo conceito de um revestimento hidráulico, com realces marcantes no tocante à durabilidade, resistências mecânicas (flexão, compressão, tração, desgaste, etc) e resistências químicas proporcionadas inclusive pela alta impermeabilidade..

### 1.2. Justificativa e importância do trabalho:

Enquanto numa fábrica de cerâmica a média diária de produção por pessoa é de 10 mil m<sup>2</sup>, em empresas de ladrilhos não passa de 20 m<sup>2</sup>, justificada pela mão de obra artesanal. Com isso, seu preço não é módico: peças de 20 x 20, 15 x 15, 10 x 10 e 5 x 5 centímetros custam entre R\$ 1,50 e R\$ 6,00 a unidade. Modelos que compõem barrados são vendidos aproximadamente a R\$ 28,00 o metro linear. Esses custos poderiam então atingir valores, como os preços de março de 2003, de R\$ 150,00/m<sup>2</sup>, evidenciando que o uso desse material se deve hoje aos saudosistas e abastados, visto que a implantação final ultrapassaria hoje R\$ 200,00/m<sup>2</sup> (MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003).

Com isso, esse material não apresenta competitividade com outros revestimentos como os porcelanatos, granitos, e qualquer outro revestimento cerâmico, que podem inclusive imitar os mosaicos bizantinos. Daí a importância da pesquisa, que visa contribuir com a melhora do produto e da produção, podendo levar os ladrilhos hidráulicos a uma maior diversidade de aplicação e a uma melhor competitividade no mercado.

Cabe ressaltar que as inovações científicas e tecnológicas referente à produção dos ladrilhos e revestimentos hidráulicos, desenvolvidas nessa pesquisa, estão sendo submetidas a um pedido de patente pelos autores.

### **1.3. Objetivos:**

O presente trabalho tem como objetivo produzir revestimentos hidráulicos para piso e paredes, de alto desempenho e alta resistência, a partir de toda tecnologia existente utilizada no desenvolvimento do concreto de alto desempenho.

De maneira mais específica pretende-se elaborar, produzir e avaliar revestimentos hidráulicos obtidos por moldagem, com elevada resistência à compressão, elevado módulo de elasticidade, resistentes à abrasão, de baixíssima absorção, com baixa retração por secagem, resistentes a ação química, resistentes à flexão, e com bom acabamento superficial.

---

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1. Concreto de alto desempenho:

#### 2.1.1. Definições:

A grande maioria dos autores da expressão "concreto de alto desempenho" argumenta que ela é muito vaga, pois a definição e a medida de desempenho de um concreto não podem ser obtidas precisamente.

Segundo Aitcin (2000), um concreto de alto desempenho (CAD) é essencialmente um concreto tendo relação água/aglomerante baixa. O valor de 0,40 é sugerido como limite entre um concreto comum e um de alto desempenho. Apesar de ser um valor arbitrário, adota-o como limite ao considerar muito difícil, se não impossível, trabalhar e lançar um concreto com relação água/aglomerante menor ou igual a 0,40, feito com cimento Portland encontrado no mercado, sem o uso de aditivos superplastificantes. Além disso, esse valor se aproxima do valor teórico que garante a completa hidratação do cimento Portland proposto por Powers em 1968.

O conceito de CAD é bastante variado, diversas definições vêm sendo apresentadas desde que o CAD foi proposto e variam de acordo com cada país ou centro de pesquisa. Uma definição bastante usada é dada por Zia (1993)<sup>1</sup> *apud* Lobo e Ferraris (1998): "um concreto que encontra desempenho especial e requisitos de uniformidade que nem sempre podem ser obtidos usando ingredientes convencionais, processos de mistura tradicionais e práticas de cura típicas". Outras definições estabelecidas, que variam de acordo com cada país e centro de pesquisa, são apresentadas a seguir:

- a) SHPR – Strategic Highway Research Program (1991):
  - resistências à compressão axial simples:
    - idade de 4 horas  $\geq$  20MPa;
    - idade de 24 horas  $\geq$  35MPa;
    - idade de 28dias  $\geq$  70MPa;
  - fator de durabilidade maior que 80%, para ciclos gelo e degelo;
  - o CAD deve ter relação água/aglomerante  $<$  0,35 kg/kg.

As definições da *SHRP*, no que se refere à resistência, durabilidade e características da mistura foram desenvolvidas para construção de pavimentos rodoviários.

- b) NIST / ACI – National Institute of Standards and Technology / American Concrete Institute (1990):

---

<sup>1</sup> ZIA, P. (1993). High performance concrete in severe environments. **American Concrete Institute**. Detroit: SP-140, p.iii.

O CAD é um concreto que apresenta propriedades e uniformidade que não podem ser obtidas rotineiramente utilizando apenas constituintes e misturadores normais, lançamento convencional e necessitam de práticas de cura especiais. Como exemplos dessas propriedades, têm-se:

- fácil lançamento e compactação sem segregação;
- propriedades mecânicas melhoradas a longas idades;
- altas resistências mecânicas nas primeiras idades;
- alta dureza superficial;
- estabilidade volumétrica;
- vida útil longa em meios ambientes severos.

Esses exemplos pressupõem que esse conjunto de condições não pode ser atingido pelos concretos convencionais.

c) Universidade de Tóquio (1990):

Nesta definição, o CAD é caracterizado como um “concreto compensador” das práticas de pouca qualidade nas construções e nos detalhes construtivos e, que por si só, promova as seguintes características:

- capacidade de preencher as fôrmas com pouco ou nenhum esforço externo de compactação (auto-adensável);
- mistura coesiva com baixa segregação;
- que origine pouquíssimas fissuras nas pequenas idades devido à retração e deformações térmicas;
- que proporcione resistência mecânica suficiente a longas idades e baixa permeabilidade.

Esta definição é um reflexo de que os japoneses enfatizam que tanto as facilidades de construção, resistência e durabilidade do concreto devam ser evidenciadas.

d) PCI – Prestressed Concrete Institute / Committee on Durability (1994):

O CAD é um concreto com ou sem sílica ativa e que tem relação  $a/c < 0,38$ , resistência à compressão acima de 55,2 MPa (8000 psi) e permeabilidade menor que 50% (medida pelos métodos AASHTO T-259 ou T-277) das misturas convencionais.

e) CERF – Civil Engineering Research Foundation (1994):

O CAD e o concreto convencional diferem entre si pelas seguintes características:

- facilidade de lançamento e compactação;
- atinge altas resistências em pequenas idades;
- apresenta propriedades melhoradas tais como: resistência mecânica a longas idades, resistência à abrasão ou carga de impacto e, baixa permeabilidade;
- apresenta estabilidade de volume e forma, e menos fissuras que o concreto convencional;
- é mais durável que concreto convencional quando sujeito a ataque químico, gelo e degelo ou alta temperatura;
- apresenta características de durabilidade.

Para Liborio (2002), o concreto de alto desempenho “deve ser entendido como um material, cientificamente produzido, que atende as expectativas do cliente do ponto de vista estrutural, da estética, de durabilidade frente ao meio ambiente atual e futuro, para fins pré-determinados. Deve ser econômico (custo/benefício) e propiciar vantagens frente a outras alternativas tecnológicas”. Essa última observação é feita a fim de se evitar a panacéia.

Portanto, a idéia de se fazer um CAD está relacionada com um concreto durável, com a satisfação do usuário e com o seguro de vida da empresa.

Assim como há numerosas definições para o CAD, há diferentes tipos de CAD. Geralmente o termo CAD se refere a um concreto com uma variedade de propriedades e características melhoradas. Embora possa haver outras propriedades específicas, na maioria das vezes elas são baseadas na resistência à compressão simples, medidas em corpos-de-prova cilíndricos e assim se utiliza o termo concreto de alta resistência (CAR). Entretanto, em todos os casos, os concretos apresentam baixa relação água/aglomerante.

### 2.1.2. Histórico:

Em meados dos anos 60, os projetistas estavam satisfeitos com a execução de estruturas de concreto com resistências variando de 15 MPa a 20 MPa, as quais eram consideradas seguras e econômicas. Além disso, os produtores de concreto estavam ganhando dinheiro suficiente com a venda do mesmo para a construção de estruturas do tipo horizontal.

Foi no início dos anos 60, na cidade de Chicago, que o trabalho de um projetista corajoso em conjunto com um produtor de concreto inovador começou a usar pequenas quantidades significativas de concreto de alta resistência em estruturas importantes (FREEDMAN, 1971<sup>2</sup> *apud* AITCIN, 2000).

Deve-se lembrar que os cimentos e aditivos disponíveis naquele tempo não eram tão adequados à manufatura do concreto de alta resistência como alguns desses materiais utilizados atualmente. Os cimentos eram mais grossos que os atuais e os redutores de água usados eram, em sua maioria, baseados em lignossulfonatos, os quais variavam consideravelmente em composição e pureza e, conseqüentemente, geravam uma variação significativa nas características de desempenho. Além disso, esses redutores possuem uma forte tendência para a incorporação de ar e retardar a pega quando utilizados em grandes quantidades. Também, vale ressaltar que a utilização da cinza volante em quantidades significativas em concreto dosado na central estava apenas começando, pois os produtores desse material estavam iniciando a garantia da qualidade e da consistência do mesmo e o potencial econômico da cinza volante de boa qualidade ainda não tinha sido percebido.

Para que fosse possível o início da utilização do concreto de alta resistência, os produtores de concreto pediam permissão aos proprietários das altas construções que estavam sendo executadas para inserirem, sem custo adicional, uma ou duas colunas feitas de concreto experimental

---

<sup>2</sup> FREEDMAN, S. (1971). High strength concrete. **Portland Cement Association**. Skokie, I.L., 19p.

com resistência à compressão de 10 MPa a 15 MPa maiores que do concreto convencional já selecionado para as colunas principais. Ao provar que isso era possível, foi fácil ver a aplicação desse concreto na construção do edifício seguinte. Usando esse estratagema, triplicou-se a resistência à compressão dos concretos usados nos edifícios da cidade de Chicago devagar e progressivamente durante dez anos, aumentando a resistência de 15 MPa - 20 MPa para 45 MPa - 60 MPa (AITCIN, 2000).

Ao alcançarem 60 MPa, uma barreira técnica foi encontrada e só poderia ser ultrapassada com a utilização de novos materiais. Porém, no início dos anos 70 era impossível vencer essa barreira, pois os aditivos redutores de água existentes na época não eram capazes de reduzir ainda mais a relação *a/a*.

O aumento da resistência à compressão está relacionado com a diminuição da relação *a/a*, possível com a utilização adequada de redutores de água mais eficientes. Além disso, a busca pela redução da relação *a/a* para uma faixa entre 0,35 e 0,40 parecia estar relacionada com a escolha do cimento. O cimento tinha que apresentar um bom desempenho tanto do ponto de vista mecânico quanto do ponto de vista reológico, ou seja, ele deveria gerar uma perda relativamente pequena do abatimento durante a primeira hora após a mistura. Os primeiros cimentos usados eram dos tipos I e II, ou cimento do tipo "II modificado", são segredos comerciais dos produtores de cimento e de concreto. Os fornecedores de concreto começaram a substituir certa quantidade de cimento Portland por cinza volante, o que reduzia a demanda de água e perda do abatimento, permitindo a redução da relação *a/a* mais do que o suficiente para compensar as perdas da resistência inicial causadas pela substituição do cimento.

A fim de reduzir a relação *a/a*, maiores quantidades de redutor de água foram adicionadas, sendo essas levemente maiores que as recomendadas para os concretos com resistência à compressão variando entre 20 MPa e 30 MPa. A dosagem dos redutores de água não podia ser muito maior porque causava retardamento de pega e armazenamento de quantidade excessiva de bolhas de ar, resultando em baixas resistências. O grande segredo dos fornecedores de concreto de alto desempenho daquela época era a necessidade de encontrar um aditivo capaz de produzir menos efeitos secundários indesejáveis. Portanto, o aumento da quantidade desses aditivos redutores de água era feito até que a quantidade máxima fosse inserida antes que ocorresse o retardamento excessivo de pega ou que ar em excesso fosse incorporado. Além disso, com o objetivo de reduzir ao máximo a relação *a/a*, os concretos eram entregues com abatimento baixo, variando entre 75 mm a 100 mm.

Os aditivos superplastificantes foram utilizados pela primeira vez em concreto no final dos anos 60, simultaneamente no Japão e na Alemanha (HATTORI, 1981<sup>3</sup> *apud* AITCIN, 2000), sendo as primeiras aplicações como fluidificantes e não como redutores de água (nesta época os concretos já possuíam aditivos redutores de água a base de lignossulfonatos incorporados na sua mistura inicial dosada em centrais de concreto). A razão em aplicar esses superplastificantes dessa maneira era facilitar o lançamento do concreto sem riscos de segregação e perda de resistência que ocorrem

---

<sup>3</sup> HATTORI, K. (1981). Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan, ACI SP-62, p.37-66.



quando se adiciona mais água à mistura. Como o tempo durante o qual a primeira geração de superplastificantes efetivamente fluidificava o concreto era limitado, eles eram adicionados na obra imediatamente antes do lançamento do concreto.

Durante os anos 80, as dosagens de superplastificantes foram aumentadas pouco a pouco, até que se percebeu que eles poderiam ser usados como excelentes redutores de água. Eles eram mais poderosos que os lignossulfonatos e poderiam ser usados em quantidades maiores sem que nenhum retardamento significativo pudesse ocorrer e sem que fosse incorporado ar em quantidades excessivas ao concreto.

Enquanto maiores dosagens de superplastificantes eram usadas, a relação a/a diminuía e o problema com a perda de abatimento tornava-se cada vez mais importante. Com a utilização de altas dosagens desses superplastificantes, descobriu-se que era possível fabricar concretos com relação a/a de até 0,30 e ainda obter abatimento inicial de 200 mm. Porém, para superar o problema da perda de abatimento, os fabricantes desses aditivos desenvolveram fórmulas de superplastificantes incorporados com retardadores de pega.

Quando os superplastificantes começaram a ser utilizados como redutores de água, a relação a/a de 0,30 era considerada uma “barreira psicológica”, ou seja, esse valor correspondia à mínima relação água/aglomerante adequada à hidratação do cimento Portland usado na mistura. Entretanto, com uma seleção cuidadosa do cimento e do superplastificante permitiu-se, inicialmente, a redução da relação a/a para 0,30, depois para 0,27, 0,25 e, por fim, até uma relação de 0,23 que permitiu obter um concreto com resistência à compressão de 130 MPa (GODFREY, 1987<sup>4</sup> *apud* AITCIN, 2000).

A sílica ativa começou a ser utilizada como material cimentício suplementar do concreto no final dos anos 70 na Escandinávia. Na América do Norte, sua utilização como tal material se deu apenas no início dos anos 80. De acordo com Aitcin (2000), a sílica ativa teve uma rápida aceitação em quase todo o mundo em menos de cinco anos devido aos primeiros resultados interessantes obtidos pelos escandinavos no concreto usual, às descobertas na Dinamarca através do microconcreto, e ao esforço significativo de pesquisa no início dos anos 80 em vários países do mundo. O seu uso permite produzir concretos trabalváveis com resistências à compressão de até 200 MPa.

Atualmente, a aceitação e o uso do CAD estão crescendo devagar em todo o mundo, porém o seu uso corresponde a uma porcentagem muito baixa no mercado do concreto. Dentre os países que lançaram importantes programas de pesquisa específicos sobre o CAD no final dos anos 80 estão os Estados Unidos, Noruega, Canadá, França, Suíça, Austrália, Japão, Coreia, China e Taiwan.

A fabricação e utilização do concreto de alto desempenho não são mais um desafio, pois já existem muitas informações disponíveis em seminários, simpósios, cursos de curta duração e artigos publicados em vários jornais.

---

<sup>4</sup> GODFREY, K.A.Jr. (1987). Concrete strength record jumps 36 %. Civil Engineering, October 84-6.

### 2.1.3. Aplicações:

A utilização do CAD iniciou nos anos 70, quando a resistência à compressão dos concretos usados nos pilares de alguns edifícios era maior do que a dos concretos comuns usados na construção. Tornou-se evidente e legítimo chamar esses novos concretos de “concreto de alta resistência” e eles passaram a serem utilizados porque suas resistências eram maiores que as dos concretos produzidos naquela época. De fato, esses concretos eram apenas concretos usuais mais desenvolvidos, quando comparados aos padrões atuais. A sua confecção era feita com a mesma tecnologia usada para a produção dos concretos usuais, porém uma melhor seleção dos materiais a serem empregados era realizada.

Quando os aditivos superplastificantes começaram a ser utilizados para reduzir a relação água/cimento ou água/aglomerante, descobriu-se que, além de serem usados como lubrificantes para concretos usuais, eles forneciam características melhoradas aos concretos com menor relação a/c ou a/a. Essas características correspondem a: uma fluidez mais elevada, um módulo de elasticidade mais alto, uma maior resistência à flexão, uma menor permeabilidade, uma melhor resistência à abrasão e uma maior durabilidade. Foi a partir daí que a expressão “concreto de alto desempenho” passou a ser mais utilizada.

A aplicação do CAD nas obras da construção civil aumentou nos últimos anos, devido ao aumento na procura por um concreto mais durável na tentativa de prolongar a vida útil e reduzir os custos com manutenção das estruturas de concreto.

O CAD transforma o concreto comum em um material com melhor desempenho, o que permite aos projetistas usarem-no eficientemente em estruturas cada vez mais esbeltas. Os arquitetos utilizam o CAD em edifícios altos com a intenção de projetar lajes menos espessas e colunas esbeltas, além de ser esteticamente mais interessante; as colunas de concreto com diâmetros menores em construções com grande altura implicam em maiores espaços úteis e, conseqüentemente, em mais lucros para os proprietários. O gosto pelo uso do CAD pelos empreiteiros deve-se a desfôrma mais rápida dos elementos estruturais. No caso das pontes, o CAD permite a construção de pilares e tabuleiros compostos por elementos mais esbeltos e elegantes e que podem ser harmoniosamente inseridos na natureza (AITCIN, 2000).

O CAD, além de reduzir a fissuração e a retração, aumenta a rigidez da estrutura em construções de grande altura e, com isso, diminui as deflexões dos membros de concreto. Para a aplicação do CAD em pilares de grandes edifícios, a rigidez transversal de toda a estrutura é aumentada, reduzindo a oscilação lateral causada pela ação do vento e aumentando o conforto dos usuários. Como o CAD permite a construção de estruturas mais esbeltas, sua utilização em construções de grande altura reduz a quantidade de armadura a ser utilizada e, conseqüentemente, o peso próprio da estrutura. Dessa maneira, as estruturas compostas de CAD podem ser construídas em solos com menor capacidade de suporte.

Vale ressaltar que o CAD mantém a versatilidade do concreto usual, porém sua resistência e durabilidade se assemelham a uma rocha natural que, neste caso, pode ser facilmente modelada,

reforçada com barras de aço protendidas ou pós-tensionadas com cabos ou misturada com todos os tipos de fibras.

Nas aplicações de sucesso que envolve o CAD estão algumas obras internacionais:

- edifício Water Tower Place, Chicago (1970);
- plataforma submarina Gullfaks da Noruega (1981);
- viaduto Sylans e Glacières, França (1986);
- ponte da Île de Ré, França (1988);
- ponte Montée St-Rémi, Montreal, Canadá (1993);
- plataforma submarina Hibernia, Newfoundland, Canadá (1996);
- ponte Confederação entre a ilha Prince Edward e New Brunswick, Canadá (1997);
- edifício Petronas Towers, Kuala Lumpur, Malásia (1999);
- edifício TAIPEI, Taiwan (2003).

No Brasil, na cidade de São Paulo, alcançou-se o recorde em concreto colorido de alto desempenho, com resistência média à compressão de 125 MPa e relação água/cimento de 0,19, na construção do edifício e-Tower, concluído em 2005. (HELENE, 2003).

Os critérios para a decisão da utilização de um determinado material estrutural estão relacionados com a tipologia estrutural, a função, a localização e as considerações econômicas locais, dentre outros, após serem considerados os prós e os contras de cada material. Nos projetos citados acima, diferentes fatores que influenciam o CAD foram considerados, incluindo a resistência à compressão, que tem influenciado no uso do concreto de alto desempenho por razões econômicas.

#### **2.1.4. Materiais:**

##### **2.1.4.1. Agregados:**

Freqüentemente, os agregados são considerados como um material de enchimento inerte do concreto por não fazerem parte das reações químicas complexas com a água. No entanto, devido ao crescente conhecimento a cerca do papel desempenhado por eles na determinação de muitas propriedades importantes do concreto, este ponto de vista tradicional vem sendo seriamente questionado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os agregados, de uma maneira geral, são classificados de acordo com a dimensão máxima das partículas em dois grupos: agregados miúdos e agregados graúdos. De acordo com a NBR 7211:1983, o agregado miúdo é definido como a “areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm”; já os agregados correspondem ao “pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm”.

A escolha do agregado é de fundamental importância para a preparação do concreto de alto desempenho ou de elevada resistência: no estado endurecido, os agregados podem influenciar a resistência, a estabilidade dimensional e a durabilidade do concreto; no estado fresco, eles têm papel

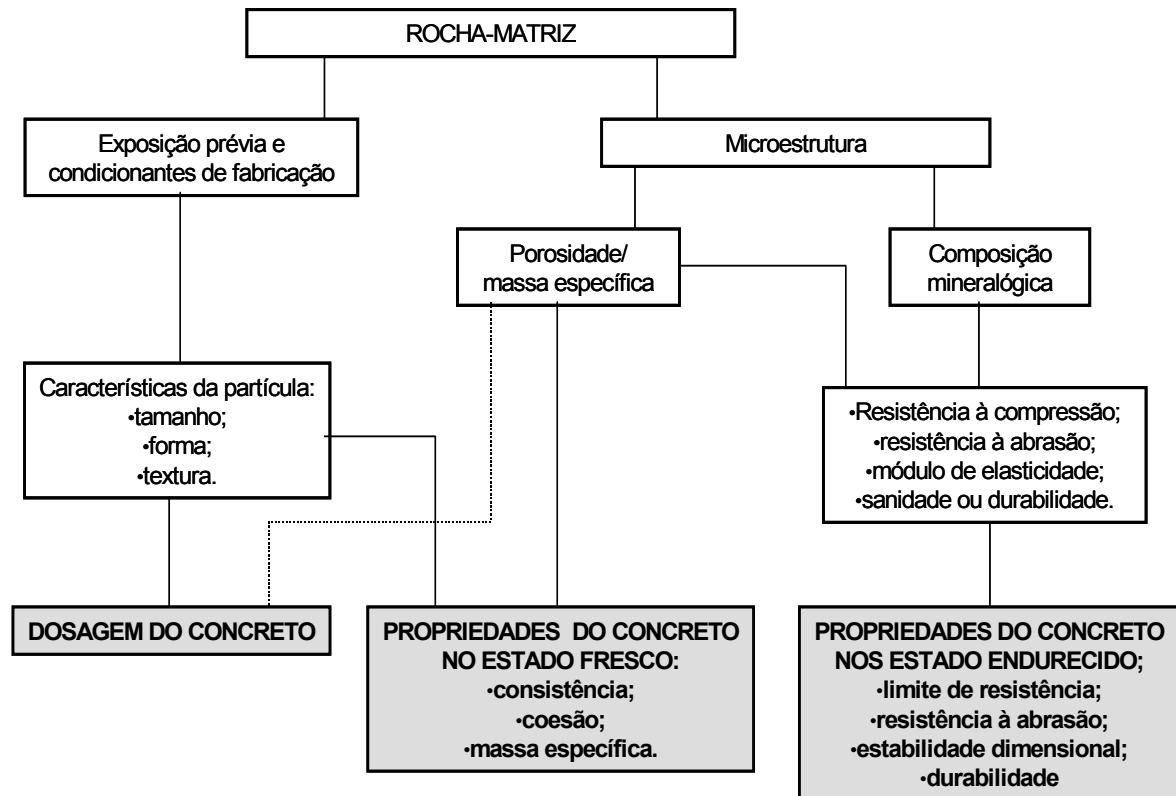
fundamental na determinação do custo e da trabalhabilidade das misturas de concreto. Assim, é necessário conhecer macroscopicamente sua forma, sua estrutura superficial visando melhorar e aumentar a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, além de buscar a resistência mecânica adequada para o uso afim.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o conhecimento de algumas características dos agregados é uma exigência para as dosagens de concretos (massa específica, composição granulométrica e teor de umidade), enquanto outras são responsáveis pela determinação das propriedades dos concretos no estado fresco (porosidade ou massa específica, composição granulométrica e forma e textura superficial). A composição mineralógica dos agregados afeta a sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e durabilidade que, por sua vez, interferem nas propriedades do concreto no estado endurecido. A partir do ponto de vista da tecnologia dos concretos, ao analisar o diagrama a seguir (Figura 2.1), pode-se determinar características importantes dos agregados como as decorrentes da microestrutura do material, das condições prévias de exposição e do processo de fabricação.

Segundo Scrivener (1989)<sup>5</sup> *apud* Silva (2000) a influência dos agregados no concreto começa no ato da mistura, a granulometria, forma e textura desses agregados definirão a compactidade e o consumo de água para uma dada trabalhabilidade. Com o avanço da hidratação, outras propriedades importantes do concreto, como porosidade, permeabilidade, resistência à tração, estrutura cristalina, coeficiente de expansibilidade térmica, dureza e composição química são influenciadas pelos agregados.

---

<sup>5</sup> SCRIVINER, K.L. (1989). The microstructure of concrete. **The American Ceramic Society – Materials Science of Concrete**. Westerville: edited by SKALNY, J.P., p.127-162.



**Figura 2.1** – Diagrama ilustrativo de como a microestrutura, as condições prévias de exposição e condicionantes do processo de fabricação do agregado determinam as suas características e como estas afetam o traço e as propriedades do concreto fresco e endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

#### Forma e textura das partículas:

A forma das partículas de agregado diz respeito às características geométricas das mesmas, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. A textura superficial, definida pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, é baseada numa avaliação visual; ela é dependente da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição à ação de atrito (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Dessa maneira, a forma e a textura superficial das partículas de agregado influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido. Ao comparar as partículas lisas e arredondadas com as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, verifica-se que a quantidade de pasta de cimento necessária para produzir misturas trabalháveis é muito maior para as últimas partículas do que para as primeiras, resultando num maior custo do concreto.

No caso do agregado miúdo, sua forma e textura têm um efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura; enquanto a lamelaridade e a forma do agregado graúdo geralmente têm um efeito apreciável sobre a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

A forma e a textura superficial de um agregado também têm grande influência sobre a resistência do concreto do qual ele faz parte. A resistência à flexão é mais afetada do que a resistência à compressão, sendo os efeitos da forma e da textura das partículas mais evidentes em concretos de alta resistência. Neville (1997) relata que o papel da forma e da textura do agregado sobre a evolução da resistência do concreto ainda não é conhecido, mas que é provável que uma

superfície mais áspera resulte em maiores forças de aderência entre as partículas de agregado e da matriz de cimento.

Mehta e Monteiro (1994) citam evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do concreto, em particular a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura superficial do agregado e que texturas mais ásperas favorecem a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado. Em idades mais avançadas, esse efeito não é tão importante, pois ocorre o desenvolvimento de uma forte aderência química entre a pasta e o agregado.

A aderência pasta-agregado ocorre a partir do intertravamento do agregado com a pasta de cimento hidratada, devido à aspereza da superfície das partículas de agregado. Ela é influenciada por outras propriedades físicas e químicas do agregado, relacionadas com sua composição química e mineralógica e com a condição eletrostática da superfície. Aparentemente, a relação entre a resistência de aderência e a resistência da pasta de cimento aumenta com o tempo. No caso dos concretos de alta resistência, a interface entre o agregado e a pasta de cimento que o envolve pode ser considerada um local onde a ruptura tende a se localizar, pois o agregado significa uma descontinuidade, dando origem a um efeito parede.

#### **Reação álcali-agregado:**

Durante os últimos anos, tem-se observado um número cada vez maior de reações químicas entre o agregado e a pasta de cimento hidratada que o envolve. A reação mais freqüentemente observada ocorre entre os constituintes de sílica ativa do agregado e os álcalis do cimento Portland. Na literatura recente, este fenômeno é conhecido como *reação álcali-sílica* e se manifesta através da expansão, fissuração, pipocamentos e exsudação de um líquido fluido viscoso álcali-silicoso, levando à perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto.

Dependendo do tempo, da temperatura e do tamanho das partículas, Mehta e Monteiro (1994) consideram como agregados reativos a álcalis todos os silicatos ou minerais de sílica, sílica hidratada (opala) ou amorfa (obsidiana, vidro de sílica), mesmo um grande número desses minerais reagindo num grau insignificante. Por outro lado, feldspatos, piroxênios, anfibólios, micas e quartzos, que são minerais constituintes dos granitos, gnaisses, xistos, arenitos e basaltos, são classificados como minerais não reativos.

A reatividade dos álcalis do cimento com a sílica presente no inerte é afetada pela concentração de álcalis na superfície reativa (uma função do teor de álcalis do cimento), pela concentração das características geométricas das partículas e de sua porosidade, pela concentração da quantidade de água livre da pasta de cimento e de sua permeabilidade, pelo efeito molhagem/secagem e pelo aumento da temperatura entre, pelo menos, 10°C e 40°C (fato que acelera a reação) (SILVA, 2000).

A reação álcali-sílica começa com o ataque dos minerais silicosos do agregado pelos hidróxidos alcalinos resultantes dos álcalis do cimento. Com isso, um gel de álcali-silicato é formado nos poros dos agregados (local onde está presente a sílica) ou na superfície das partículas. No último local, cria-se uma zona de alteração superficial característica, levando à destruição da aderência entre o inerte e a pasta de cimento que o envolve (NEVILLE, 1997).

Esse gel, do tipo “expansão ilimitada”, tende a absorver água e, ao se expandir, gera tensões internas que podem levar à expansão, fissuração e desagregação do concreto. Parte do gel, relativamente mole, é posteriormente lixiviado pela água e depositado sobre as fissuras formadas pelo inchamento dos agregados.

Na prática, acredita-se que conteúdos alcalinos no cimento menores ou iguais a 0,60% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente são suficientes para impedir danos devidos à reação álcali-agregado, independente do tipo de agregado reativo; na Alemanha e Inglaterra, considera-se que o conteúdo total de álcalis do concreto, provenientes de todas as fontes, deverá estar abaixo de  $3 \text{ kg/m}^3$  para que não ocorram danos decorrentes de tais reações. Porém, em casos de concretos com grandes consumos de cimento, até mesmo quantidades inferiores a 0,60% de álcalis no cimento podem ser prejudiciais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

#### **2.1.4.2. Cimento:**

De acordo com a norma americana ASTM C150:1991 o cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico resultante da moagem do clínquer, o qual consiste basicamente de silicatos de cálcio hidráulicos com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como produto de adição. É obtido a partir da calcinação e clínquerização de uma mistura de calcário e argila em proporções adequadas. A qualidade final do produto depende da matéria-prima utilizada, das adições feitas posteriormente à calcinação e do grau de finura atingido pela moagem.

Os cimentos Portland são especificados de acordo com sua composição química, tipo de adições e propriedades físicas (finura, expansibilidade, tempo de pega, falsa pega, resistência à compressão, calor de hidratação, perda ao fogo e massa específica).

#### **Fabricação:**

O processo de fabricação do cimento Portland consiste basicamente da moagem da matéria-prima (calcário e argila), da boa mistura das proporções adequadas entre esses materiais e da queima dessa mistura em um forno rotativo até uma temperatura próxima a  $1450^\circ\text{C}$ . Ao alcançar essa temperatura, o material sofre uma fusão que provoca a formação de pelotas conhecidas como clínquer, que é resfriado e moído até a obtenção de um pó bem fino. A mistura e moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto na presença de água quanto a seco originando os processos denominados por via úmida e por via seca, respectivamente (NEVILLE, 1997).

Durante a moagem do clínquer, adiciona-se um teor mínimo de gesso a fim de controlar o tempo de pega do cimento, ou seja, o tempo de início das reações do aglomerante com a água. Sem essa adição, o clínquer puro sofre pega instantânea, provocando o endurecimento irreversível da mistura.

O clínquer, por sua vez, é um material complexo com múltiplas fases, cujas características e propriedades dependem da composição da matéria-prima moída e da pirotecnologia que transforma essa matéria-prima em fases de silicatos de cálcio e de aluminatos de cálcio e de ferro. Do ponto de vista da composição, o clínquer sai do forno rotativo como uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalinos ( $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ ) e uma fase intersticial composta por  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , além de algumas poucas impurezas (periclásio -  $\text{MgO}$ , óxido de cálcio calcinado endurecido -  $\text{CaO}$  e sulfatos alcalinos).

Com a adição de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  durante a transformação das matérias-primas em clínquer, a temperatura necessária para a queima de tais matérias-primas é reduzida e, com isso, criam-se as fases aluminato e ferroaluminato que se fundem para a formação do  $\text{C}_3\text{S}$ ; isso permite ainda que os íons  $\text{Ca}^{2+}$  se difundam mais rapidamente e transformem o  $\text{C}_2\text{S}$  previamente formado em  $\text{C}_3\text{S}$ . Após a calcinação é feito um resfriamento brusco para cerca de  $150^\circ\text{C}$ , para que os cristais dos compostos formados permaneçam de forma desordenada e, dessa maneira, reativos com a água. Este resfriamento rápido solidifica as diferentes fases nas suas formas às altas temperaturas, evitando que elas sigam sua natureza de transformação, que teria acontecido em caso de resfriamento lento (AITCIN, 2000).

#### Composição:

Os principais compostos presentes nos cimentos Portland comerciais, apesar de não corresponderem exatamente às fórmulas abreviadas da Tabela 2.1, são  $\text{C}_3\text{S}$  (alita),  $\text{C}_2\text{S}$  (belita),  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato) e  $\text{C}_4\text{AF}$  (ferrita).

**Tabela 2.1** – Principais constituintes do cimento Portland (NEVILLE, 1997)

Composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

As propriedades dos principais componentes do cimento estão resumidas na Tabela 2.2 a seguir.

**Tabela 2.2** – Propriedades dos quatro principais componentes do cimento (LIBORIO, 1999)

Propriedades	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
Resistência em pequenas idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de reação com a água (hidratação)	Media	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor gerado na hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência a águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

#### Mecanismos de hidratação do cimento Portland:

A hidratação do cimento Portland começa a partir de reações químicas entre o cimento anidro e a água. Com isso, o cimento se torna um agente ligante gerando, no final do processo de hidratação, produtos com características de pega e endurecimento. As reações químicas são consideradas complexas, uma vez que todas as fases constituintes do clínquer ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) estão misturadas.



O mecanismo de hidratação do cimento pode ser entendido de dois modos em momentos diferentes: mecanismo por dissolução-precipitação, dominante nos estágios iniciais, e topoquímico ou hidratação no estado sólido, dominante nos estágios posteriores (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O mecanismo por dissolução-precipitação consiste da dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, da formação de hidratos na solução e, devido à sua baixa solubilidade, de uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada; em geral, sua duração corresponde a 30% da hidratação, ou seja, entre 3 horas e 24 horas. O processo topoquímico ocorre quando a mobilidade iônica na solução se torna restrita, fazendo com que a hidratação da partícula residual de cimento ocorra por reações no estado sólido (difusão iônica), ou seja, as reações ocorrem diretamente na superfície do cimento anidro sem entrarem em solução, fenômeno conhecido como deslocamento da interface; esta etapa é independente da temperatura de cura.

Como a hidratação dos diferentes compostos do cimento ocorre de forma simultânea, torna-se necessário um estudo separado da hidratação de cada fase. Vale lembrar que a velocidade de hidratação para cada composto do clínquer é diferente, sendo que segundo Melo (2000) a reatividade apresentada é, aproximadamente, a seguinte:  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ .

#### Hidratação dos silicatos:

A hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$  produz uma série de silicatos de cálcio hidratados com estruturas semelhantes, mas que variam quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada. Ao considerar que as propriedades são determinadas pela estrutura dos compostos, pode-se dizer que as diferenças de composição existentes entre os silicatos de cálcio hidratados têm efeito pequeno sobre suas características físicas.

As fases silicatos constituem cerca de 70% a 90% do cimento Portland e, quando entram em contato com a água, produzem os mesmos compostos hidratados: o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e o CH (hidróxido de cálcio ou portlandita –  $Ca(OH)_2$ ).

De acordo com relatos apresentados por Mehta e Monteiro (1994), a hidratação do  $C_3S$  produz 61% de C-S-H e 39% de CH, enquanto que a hidratação do  $C_2S$  produz 82% de C-S-H e 18% de CH. Assim, como a propriedade adesiva (resistência mecânica) da pasta de cimento é principalmente devido à formação de silicato de cálcio hidratado, espera-se que a resistência mecânica final de um cimento Portland com alto teor de  $C_3S$  seja menor do que a de um cimento com alto teor de  $C_2S$ .

Com relação à durabilidade de pastas de cimento sob a ação de águas ácidas e sulfáticas, pode-se dizer que esta é reduzida devido à presença de CH; portanto, espera-se que um cimento contendo um maior teor de  $C_2S$  seja mais durável em ambiente ácidos e sulfatados do que outros com maiores teores de  $C_3S$ . Para a durabilidade frente a ataques químicos, existem muitas especificações que limitam o teor máximo permissível de  $C_3S$  nos cimentos; outras recomendam o uso de pozolanas para remover o excesso de CH da pasta de cimento hidratado.

#### Hidratação dos aluminatos (fase intersticial):

Dentre os compostos que constituem esta fase, o  $C_3A$  é o mais reativo com a água e, portanto, o que possui maior influência sobre as reações de hidratação da fase intersticial e na reologia dos cimentos Portland e concretos. Segundo Silva (2000), o comportamento da hidratação

do  $C_3A$  depende de alguns fatores, como temperatura, relação água/sólido, área específica do composto, processo de mistura, tamanho da amostra a ser hidratada e presença de aditivos e adições.

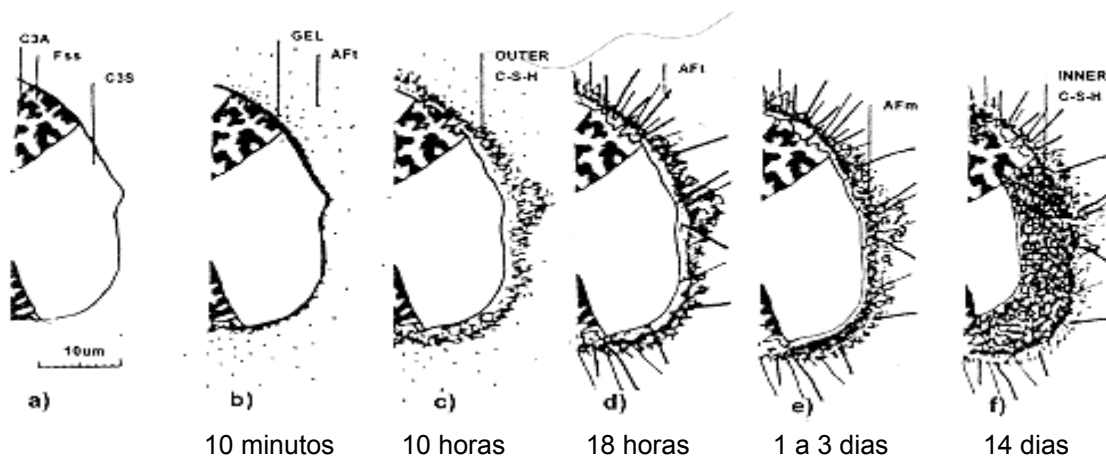
Devido à sua elevada reatividade, a velocidade de reação de  $C_3A$  é muito alta. A hidratação da fase ferrita ( $C_4AF$ ) ocorre paralelamente à hidratação do  $C_3A$ , com a formação de fases semelhantes (estringita e monossulfoaluminato), no entanto o  $C_4AF$  nunca reage rapidamente.

#### Hidratação do cimento Portland:

A pasta de cimento hidratada contida nos concretos convencionais é constituída das fases sólidas: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita (AFt), monossulfoaluminato (AFm) e hidróxido de cálcio ou portlandita (CH). Deve-se ressaltar que as reações de hidratação do cimento Portland são influenciadas pela finura do cimento, pela temperatura na qual se desenvolvem as reações e pela composição do clínquer utilizado (LIBORIO, 1999).

Levando-se em conta que o cimento é composto de uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação consiste de reações simultâneas ocorrendo entre os compostos anidro e a água, porém os compostos não hidratam com mesma velocidade. Paulon (1991) cita que os aluminatos, por exemplo, hidratam bem mais cedo do que os silicatos. A perda de consistência e a pega da pasta de cimento estão diretamente ligadas às reações envolvendo os aluminatos. Os silicatos por sua vez, têm um papel nas características do endurecimento da pasta.

O mecanismo de hidratação do cimento Portland pode ser representado como indicado na Figura 2.2. É muito importante atentar para o fato de que alterações nesse processo, por exemplo, um processo inadequado de cura, poderá significar um desenvolvimento inadequado da microestrutura.



**Figura 2.2** – Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland (SCRIVENER, 1989<sup>6</sup> *apud* SILVA, 2000)

<sup>6</sup> SCRIVINER, K.L. (1989). The microstructure of concrete. **The American Ceramic Society – Materials Science of Concrete**. Westerville: edited by SKALNY, J.P., p.127-162.

Na Figura 2.2, pode ser observado:

- Seção de um grão polifásico (escala da fase intersticial exagerada).
- A fase aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) inicia a sua reação com o sulfato em solução. Forma-se um gel amorfo na superfície e se inicia a formação de bastões curtos de etringita (AFt) na interface gel-solução.
- Reação da Alita ( $C_3S$ ) - conormação de camada externa de Silicato de Cálcio hidratado (C-S-H) sobre os bastões de AFt. Forma-se um vazio de  $1\mu m$  entre a superfície do grão e a camada externa (grão de Hadley).
- Hidratação secundária de  $C_3A$  produzindo bastões longos de AFt. O C-S-H interno começa a se formar internamente pela continuação de hidratação do  $C_3S$ .
- O  $C_3A$  reage com AFt da camada interna formando placas hexagonais de AFm. A formação do produto interno reduz a separação entre o grão anidro e a camada externa.
- Formou-se C-S-H suficiente para preencher o espaço vazio ao redor do grão. A camada externa torna-se fibrosa.

O significado físico das reações básicas de hidratação do cimento é apresentado de forma clara e objetiva na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Significado físico das reações básicas de hidratação do cimento Portland (JAWED, SKALNY & YOUNG, 1983<sup>7</sup> *apud* MELO, 2000)

Estágio da reação	Processo químico	Processo físico	Importância nas propriedades mecânicas
Primeiros minutos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dissolução inicial rápida dos sulfatos alcalinos e aluminatos.</li> <li>Hidratação inicial do <math>C_3S</math>.</li> <li>Formação de AFt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta taxa de evolução de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mudanças na composição da fase líquida podem influenciar a subsequente pega.</li> </ul>
Primeiras horas (período de indução)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminuição dos silicatos, mas aumento na concentração de íons <math>Ca^{2+}</math>.</li> <li>Começo da formação dos núcleos de CH e C-S-H.</li> <li>Concentração de íons <math>Ca^{2+}</math> atinge o nível de supersaturação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formação dos produtos de hidratação inicial.</li> <li>Baixa taxa de evolução de calor.</li> <li>Contínuo aumento da viscosidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formação das fases AFt e AFm pode influenciar a pega e a trabalhabilidade.</li> <li>Hidratação dos silicatos de cálcio determina o início de pega ao final do período de indução.</li> </ul>
De 3 a 12 horas, aproximadamente (estágio de aceleração)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reação química rápida do <math>C_3S</math> para formar C-S-H e CH.</li> <li>Diminuição da supersaturação dos íons <math>Ca^{2+}</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rápida formação de hidratos produz a solidificação e redução da porosidade.</li> <li>Alta taxa de evolução de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mudança de consistência plástica para rígida (início e fim de pega).</li> <li>Desenvolvimento de resistências iniciais.</li> </ul>
Estágio após a aceleração	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formação de C-S-H e CH controlada por difusão.</li> <li>Recristalização da AFt para AFm e alguma polimerização dos silicatos.</li> <li>A hidratação do <math>C_2S</math> torna-se significativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminui a evolução de calor.</li> <li>Contínuo decréscimo da porosidade.</li> <li>Formação de ligações partícula-partícula e pasta-agregado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desenvolvimento contínuo da resistência.</li> <li>Diminuição da fluência.</li> <li>A porosidade e a morfologia do sistema hidratado determinam a resistência final, estabilidade volumétrica e durabilidade.</li> </ul>

<sup>7</sup> JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J.F. (1983). Hydration of portland cement. **Structure and Performance of Cements**. London: Ed. Barbes, P. Applied Science Publishers.

A dimensão da partícula de cimento Portland é um importante fator durante a hidratação, pois na medida em que essa dimensão aumenta, aumenta também o tempo para que essa partícula hidrate. A Tabela 2.4 apresenta informações referentes a esta relação.

**Tabela 2.4** – Relação entre a dimensão das partículas de cimento e o tempo de hidratação (TAYLOR, 1992<sup>8</sup> *apud* SILVA, 2000)

Dimensão da partícula (µm)	Tempo de hidratação (dias)
0,43 a 0,47	1
1,7 a 2,6	7
3,5 a 5,4	28
6,1 a 8,9	150
> 45	Difícil
> 75	Nunca se hidrata

Para os concretos de alto desempenho, a hidratação do cimento Portland é importante no que diz respeito à resistência desenvolvida pelo sistema. Assim, é necessário que o cimento, ao se hidratar, desenvolva o máximo possível de C-S-H, pois os silicatos de cálcio (que representam cerca de 80% da massa total de cimento) são os responsáveis pelo desenvolvimento da resistência do concreto.

Segundo Aitcin (2000), o grande desenvolvimento de C-S-H pode ser conseguido com a redução da relação água/aglomerante que, mesmo reduzindo a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento, não prejudica a reologia do concreto fresco. Também deve haver um equilíbrio entre os íons sulfato, cálcio e alumínio na pasta de cimento fresco para se evitar a formação de aluminato de cálcio hidratado, que resultaria na pega instantânea do sistema.

#### 2.1.4.3. Adição:

As adições podem ser adicionadas aos cimentos em dosagens específicas ou inseridas nos cimentos ainda na fábrica como é o caso dos cimentos com resistência a sulfatos que possuem um teor de escória (de alto forno) em sua composição. Apresenta-se a seguir um pouco sobre a escoria e outras adições pozolânicas.

#### Escória:

Segundo a NBR 11172:1989, a escória é definida como um material vítreo que possui propriedades hidráulicas latentes, ou seja, quando finamente moída e misturada com a água, é capaz de reagir e endurecer. Consiste essencialmente de partículas finas de sílica vítrea, modificada consideravelmente pela presença de grandes quantidades de íons cálcio, magnésio e alumínio, conforme mostra a Tabela 2.5.

<sup>8</sup> TAYLOR, H.F.W. (1992). **Cement Chemistry**, 2nd ed. London: Academic Press Ltd.

**Tabela 2.5 – Composição química da escória**

Componentes	Valores médios (%)
Sílica amorfa (SiO <sub>2</sub> )	25 a 35
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12 a 20
Cálcio (Cão)	35 a 50
Magnésio (MgO)	1 a 10

Apesar da escória granulada ser auto-cimentante, a quantidade de produtos cimentantes formados e as taxas de formação são insuficientes para aplicação do material com fins estruturais, devendo ser usada em combinação com o cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A escória deriva da fabricação do ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. É um produto resultante da ganga do minério de ferro, da cinza do coque, do calcário e da dolomita, empregados como fundentes, que alimentam o alto-forno. A elevadas temperaturas há a separação entre o ferro e os óxidos fundidos, os quais não se misturam ao metal. Esses dois líquidos imiscíveis acumulam-se no fundo do alto forno, sendo coletadas duas substâncias diferentes, com massas específicas aparentes distintas: o ferro fundido (7000 kg/m<sup>3</sup>) e um material mais leve chamado escória (2000 a 2800 kg/m<sup>3</sup>), segundo Mehta e Monteiro (1994). Os dois líquidos são periodicamente separados: o ferro para posterior refino e a escória líquida para ser granulada por jatos de água. Possui uma área específica de 400 m<sup>2</sup>/kg a 500m<sup>2</sup>/kg.

Segundo Kattar e Regattieri (1998), quando o resfriamento é feito lentamente, como por exemplo, ao ar, os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, não sendo, portanto, usados na indústria cimenteira. Quando o resfriamento se dá de maneira rápida, pela imersão ou aspersão de água ou vapor, a escória se vitrifica e seus componentes não perdem as características hidráulicas. Este produto não cristalizado é moído à finura adequada e usado como adição ao cimento Portland.

Sua atividade hidráulica é bem menor que a do cimento Portland. Quando o grão de escória entra em contato com a água, forma-se ao redor uma membrana com baixa permeabilidade, restringindo a dissolução dos constituintes. Quando há a elevação da concentração de íons Ca<sup>2+</sup>, ou o aumento do pH da solução, essa membrana dissolve-se, permitindo o prosseguimento da reação. Quem propicia elevado pH é o Ca(OH)<sub>2</sub>, que além de permitir o prosseguimento das reações de hidratação da escória, reage com a mesma proporcionando durabilidade às pastas endurecidas frente a meios ácidos.

As escórias granuladas de alto-forno apresentam menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer, portanto os cimentos com adição desse material podem apresentar, em igualdade de condições, menor desenvolvimento inicial de resistência. A partícula de escória ativada pelo cimento Portland mostra sinais de início de reação após 7 dias de hidratação. Após 28 dias a hidratação de escória permanece incompleta, podendo ter um núcleo não hidratado.

#### **Sílica ativa de Fe-Si:**

A sílica ativa de ferro-silício (SFS), também conhecida como fumos de sílica condensada, sílica volatilizada, sílica amorfa ou microsilício, é um subproduto da fabricação de silício metálico ou

de ligas de ferro-silício. O silício e suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão (e ferro durante a produção das ligas de ferro-silício). Durante a redução do quartzo puro, um subóxido de silício, SiO, se desprende na forma de gás, se oxida e condensa em um material composto de partículas esféricas extremamente pequenas, com aspecto vítreo e muito reativas: dióxido de sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>). Segundo Liborio (2002), a sílica é comercialmente encontrada de três formas: não densificada ou no estado natural (material proveniente diretamente do filtro coletor), densificada (partículas beneficiadas pela aglomeração) e lama (suspensão aquosa com teor de sólidos de 50%).

A qualidade da sílica ativa depende de vários fatores, dentre eles o processo de produção, da forma de operação da fabricação, do processo de coleta do pó, dos meios de redução, da matéria-prima e do tipo de forno utilizado.

A sílica, dependendo da natureza do material e do processo de produção empregado, pode ser considerada um material altamente pozolânico, de mediana e até de baixa atividade pozolânica. A pozolanicidade da sílica é uma função de sua característica amorfa, de sua granulometria e de sua área específica.

Em termos de composição química, a sílica ativa pode ser qualificada como quase pura, pois suas partículas possuem altos teores de sílica amorfa quando comparado à presença de pequenas quantidades de alumina, ferro, cálcio, álcalis, carbono, dentre outros. O teor de sílica amorfa no subproduto é função do teor de sílica contido nas ligas e ou metais produzidos nas indústrias: quanto maior for o teor de silício da liga, maior será o teor de SiO<sub>2</sub> da sílica ativa. Por exemplo, a sílica ativa produzida durante a fabricação do silício metálico geralmente contém mais de 90% de SiO<sub>2</sub>, enquanto a sílica ativa produzida durante a fabricação de uma liga de 75% de Fe-Si tem teor de SiO<sub>2</sub> superior a 85% (AITCIN, 2000). Uma vez que as matérias-primas usadas na fabricação do silício e do ferro-silício são muito puras, a sílica ativa coletada num dado forno tem, usualmente, uma composição consistente.

Na Tabela 2.6, apresentam-se os limites estabelecidos pela NBR 13956:1997 para as características físicas e químicas de uma sílica ativa. Os métodos de ensaios de laboratório exigíveis na especificação de uma sílica para uso em pastas de cimento, argamassas e concretos, bem como adição durante a fabricação do cimento Portland são descritos na NBR 13957:1997. Os métodos de ensaio abrangidos por essa norma são as determinações do teor de sólidos em lama de sílica ativa, do teor de SiO<sub>2</sub>, da umidade, da perda ao fogo, do equivalente alcalino em Na<sub>2</sub>O e do resíduo na peneira 45 µm.

**Tabela 2.6** – Características da sílica ativa para uso como adição (NBR 13956:1997)

Parâmetro	Unidade	Limite
SiO <sub>2</sub>	%	≥ 85,0
Umidade <sup>(*)</sup>	%	≤ 3,0
Perda ao fogo	%	≤ 6,0
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	%	≤ 1,5
Resíduo na peneira # 325 (> 45µm)	%	≤ 10,0
Teor de sólidos em lama <sup>(∞)</sup>	%	± 2% do valor declarado pelo fabricante
Área específica B.E.T. <sup>(&amp;)</sup>	m <sup>2</sup> /kg	≥ 15000 ≤ 30000

(\*) Não se aplica à sílica ativa na forma de lama.

(∞) Só se aplica à sílica ativa na forma de lama.

(&) Ensaio facultativo.

As propriedades físicas também são de fundamental importância para um bom desempenho da sílica como uma superpozolana. Os efeitos benéficos estão associados à área específica, à granulometria e à sinergia da sílica com outros aditivos.

Em relação à granulometria, a sílica é um material extremamente fino, cujo tamanho das partículas apresenta um valor médio de cerca de 0,15 µm, podendo variar de 0,01 µm a 1µm; como esse valor não pode ser medido com precisão, considera-se que a sílica apresenta diâmetros médios de cerca de 50 a 100 vezes mais finos que os diâmetros médios das partículas de cimento Portland. Segundo Mehta e Monteiro (1994), é por esse motivo que o material, por um lado, é altamente pozolânico, enquanto por outro lado, cria problemas de manuseio e aumenta consideravelmente o consumo de água do concreto, quando não é feita qualquer adição de aditivos redutores de água. Devido aos diâmetros extremamente pequenos dos grãos de sílica, a área específica deste material é elevada (os valores típicos variam entre 15000 m<sup>2</sup>/kg e 25000m<sup>2</sup>/kg), sendo que sua ordem de grandeza varia de acordo com o processo de medida utilizado (atualmente, o mais adotado é o método BET). Portanto, quanto maior a área específica e menor a granulometria, maior a eficiência da ação da sílica. Segundo Silva (2000), essa eficiência também varia de acordo com a qualidade da sílica ativa utilizada, a qual depende da composição química que, por sua vez, é influenciada pelo tipo de liga ou metal produzido.

Quanto à massa unitária, a sílica ativa apresenta valor muito baixo, variando entre 200 kg/m<sup>3</sup> e 700 kg/m<sup>3</sup>. Já em termos de massa específica, o valor médio para a sílica de Fe-Si varia entre 2150 kg/m<sup>3</sup> e 2650 kg/m<sup>3</sup>.

Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto ocorrem devido à rápida reação pozolânica e ao efeito fíler da sílica ativa, além de seu efeito químico relacionado com a germinação de cristais de portlandita (AITCIN, 2000). Como resultado da presença de partículas de sílica ativa na pasta de cimento, argamassa ou concreto, Silva (2000) cita o grande aumento da compacidade que provoca os seguintes efeitos: a mistura se torna muito mais densa; a velocidade do fluxo interno de líquido na pasta é reduzida; e a coesão interna, o número de

sítios de nucleação e a ligação dos grãos de cimento e das partículas de sílica com os produtos de reação são aumentados.

Assim, com a introdução de sílica ativa nos concretos, as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade dos mesmos são melhoradas, enquanto a permeabilidade e a porosidade capilar são reduzidas. Com o refinamento dos poros, a zona de interface entre o agregado e a pasta de cimento com sílica é drasticamente reduzida e a exsudação interna e superficial da mistura é minimizada. Tudo isso leva a um alto desempenho do concreto com conseqüente aumento de sua durabilidade.

#### **Metacaulinita:**

A metacaulinita é um material amorfo reativo, de origem pozolânica, obtido a partir da calcinação (tratamento térmico entre 600°C e 900°C) do argilomineral caulinita.

Argilas calcinadas têm sido utilizadas como pozolana desde os tempos antigos e têm sido mais acessíveis que as pozolanas de origem vulcânica ou de rochas sedimentares ricas em sílica principalmente porque a argila encontra-se extensamente distribuída sob a superfície terrestre. A metacaulinita é obtida pela calcinação de argilas ricas em caulinita. No entanto, nem toda argila calcinada torna-se metacaulinita porque o comportamento dos argilominerais, sob temperatura, depende muito da sua estrutura, composição, tamanho dos cristais e grau de cristalinidade (TAYLOR, 1997).

As argilas empregadas na fabricação de pozolanas procedem de depósitos de superfície, mais frequentemente de idade Quaternária ou Recente. Derivam de alterações intempéricas de rochas de origem diversas, geralmente portadoras de significativas quantidades de minerais silicoaluminosos, notadamente feldspatos. Além desses depósitos gerados são também importantes aqueles formados através do transporte de acúmulos de sedimentos argilosos nas regiões topograficamente mais baixas ou nas planícies aluviais dos rios (ZAMPIERI, 1993).

Do ponto de vista mineralógico, as argilas se caracterizam por constituírem-se em grande parte de minerais específicos, denominados minerais de argila ou argilominerais ocorrendo normalmente associados a outros minerais e materiais tais como quartzo, feldspato, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos, matéria orgânica, etc. Os argilominerais são produtos de alterações de rochas seja por ação das intempéries ou em decorrência de processos hidrotérmicos de baixa temperatura. Apresentam-se fisicamente caracterizados por dimensões bastante reduzidas e um estado preferencial cristalino. Quimicamente são aluminossilicatos hidratados contendo outros elementos como magnésio, ferro, cálcio, potássio, sódio, etc. (ZAMPIERI, 1989).

A obtenção da metacaulinita é feita somente a partir do argilomineral caulinita ou, mais comumente, a partir da argila caulinita, ou seja, argila onde a caulinita se encontra em maiores proporções. As argilas usadas na produção de pozolanas geralmente contêm 50 a 65 % de SiO<sub>2</sub> e, de 17 a 38 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (SANTOS, 1966).

A metacaulinita produzida atualmente no Brasil é obtida a partir da argila caulínica: primeiramente o material é seco e homogeneizado, em seguida é encaminhado ao forno rotativo com temperatura de queima de 750° C (aproximadamente), após calcinação o produto é resfriado bruscamente para evitar a recristalização do material e manter a máxima reatividade da pozolana, finalmente o produto é moído. Além da temperatura de calcinação, outro fator importante na obtenção



das pozolanas é a taxa de elevação da temperatura, pois a mudança de estrutura da metacaulinita é muito sensível a taxa de aquecimento (CASTELEIN *et al.*, 2001).

A NBR 12653:1992 enquadra as argilas calcinadas na classe N. Os limites das características físicas e químicas estabelecidos pela norma estão apresentados na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7** – Limites de material pozolânico para uso como adição (NBR 12653:1992 Classe N)

Parâmetro	Unidade	Limite
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	%	$\geq 70,0$
Umidade	%	$\leq 3,0$
Perda ao fogo	%	$\leq 10,0$
Álcalis disponíveis	%	$\leq 1,5$
Resíduo na peneira # 325 ( $> 45 \mu\text{m}$ )	%	$\leq 34,0$

As propriedades do concreto e da argamassa, tais como trabalhabilidade, resistência mecânica e permeabilidade são muito mais influenciadas pelas características mineralógicas e granulométricas das adições minerais que propriamente por suas composições químicas (LACERDA, 2005).

A NBR 12653:1992 limita o tamanho máximo de partículas de adições pozolânicas, restringindo a 34 % de retidos na peneira # 325. Isto porque é sabido que partículas com tamanho maiores que  $45 \mu\text{m}$  apresentam pouco ou nenhuma reatividade em condições normais de hidratação.

A metacaulinita comercializada é composta por partículas bem menores que as partículas de cimento e apresenta uma elevada área específica. Isso promove o efeito de preenchimento filler ou microfiller e proporciona a reação pozolânica devido a pozolanicidade de suas partículas. Assim a metacaulinita pode trazer os mesmos benefícios a pasta de cimento, argamassa ou concreto que a sílica ativa, melhorando suas características mecânicas e de durabilidade pelo refinamento da porosidade. E como a sílica ativa, a metacaulinita aumenta a compactidade e o consumo de água da mistura.

Segundo Malhotra e Mehta (1996) os subprodutos industriais com características pozolânicas tais como: cinza volante, sílica ativa e escória, usados em cimentos e concretos, estão sendo gradativamente substituídos por pozolanas naturais e argilas calcinadas.

#### 2.1.4.4. Água de amassamento:

A água é um componente fundamental para o concreto, pois possui duas funções importantíssimas: uma química, que consiste em produzir as reações de hidratação, e outra física, onde estabelece determinadas características reológicas ao concreto para sua manipulação. Dessa maneira, o concreto ideal deveria conter somente água suficiente para desenvolver a resistência máxima do cimento e, ao mesmo tempo, fornecer as propriedades reológicas necessárias ao seu lançamento (GRZESZCZYK e KUCHARSKA, 1990).

A qualidade da água de amassamento desenvolve um papel importante na produção do concreto: impurezas contidas na água podem afetar, de maneira negativa, a resistência do concreto,

causar manchas na superfície concretada e desenvolver um processo de corrosão da armadura (NEVILLE, 1997). Dessa maneira, deve-se dar atenção tanto à qualidade da água de amassamento quanto à da água utilizada na cura do concreto.

No Brasil, os requisitos para a água de amassamento utilizada na produção de concretos são estabelecidos pela NBR 6118:2003, que fixa valores máximos permitidos para materiais presentes na mesma (Tabela 2.8).

**Tabela 2.8** – Requisitos a serem atendidos pela água de amassamento, valores máximos estabelecidos (NBR 6118:2003)

Requisitos	Valores máximos permitidos
Matéria orgânica (em O <sub>2</sub> consumido)	3 mg/L
Resíduos sólidos	5000 mg/L
Sulfatos (em SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	300 mg/L
Cloretos (em Cl <sup>-</sup> )	500 mg/L
Açúcar	5 mg/L

A água pode estar presente de várias formas na pasta de cimento Portland endurecida e sua classificação é feita de acordo com o grau de dificuldade com o qual ela pode ser removida do concreto (MELO, 2000):

- a *água capilar* é considerada como o volume de água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. É subdividida em água livre e água retida. A água livre corresponde àquela encontrada nos vazios grandes (diâmetros superiores a 50 nm), sendo sua remoção isenta de alterações de volume. A água retida por tensão capilar é encontrada nos pequenos capilares (diâmetros variando entre 5 nm e 50nm) e sua remoção causa a retração do sistema;
- a *água adsorvida* se localiza próxima à superfície do sólido, isto é, fica sob influência de forças de atração e as moléculas de água estão fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos da pasta, sendo perdida quando a umidade relativa estiver em torno de 30%. A perda desta água gera a retração do sistema por secagem;
- a *água interlamelar*, também conhecida como água de gel, está associada à estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ligada por pontes de hidrogênio. Só ocorre a perda dessa água caso a umidade relativa caia para abaixo de 11%, o que pode causar uma retração considerável na estrutura do C-S-H;
- a *água quimicamente combinada*, também denominada água de cristalização, corresponde à água considerada como parte definitiva da estrutura de vários produtos hidratados de cimento. Ela não é perdida durante a secagem, mas só é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento.

#### 2.1.4.5. Aditivo:

Apresenta-se uma breve descrição sobre os aditivos. Em seguida, será feito um estudo mais detalhado a cerca dos aditivos superplastificantes (SP), já que este é o tipo de aditivo mais comumente empregado na produção de CAD.

A norma brasileira NBR 11768:1992 define os aditivos como “produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”. Distinguem-se pela ação principal de três maneiras: ação física, ação química e ação físico-química. Além disso, as substâncias ativas das formulações dos aditivos podem ser orgânicas ou inorgânicas, distribuídas num veículo líquido, pastoso ou sólido.

Mehta e Monteiro (1994) dividem, de forma ampla, as substâncias empregadas como aditivos em dois tipos: substâncias que começam a agir instantaneamente sobre o sistema água-cimento, através da modificação da tensão superficial da água e pela adsorção das partículas de cimento à superfície; e substâncias que se dissociam em seus íons constituintes afetando, dessa maneira, as reações químicas entre os compostos do cimento e a água, de alguns minutos até algumas horas após sua adição.

Os aditivos são classificados de acordo com sua função principal, embora algumas vezes sejam mencionadas suas ações secundárias. Na classificação, são considerados aditivos os produtos adicionados ao cimento em doses de até 5%. No Brasil, a NBR 11768:1992 engloba todos os aditivos e apresenta a seguinte classificação: **P**: plastificantes, **R**: retardador, **A**: acelerador, **PR**: plastificante retardador, **PA**: plastificante acelerador, **IAR**: incorporador de ar, **SP**: superplastificante, **SPR**: superplastificante retardador, **SPA**: superplastificante acelerador.

A NBR 10908:1986 prescreve métodos para determinação do pH, do teor de sólidos, da massa específica e do teor de cloretos dos aditivos. A NBR 12317:1992 determina os ensaios que devem ser realizados para análise comparativa ao concreto de referência (sem aditivo) quanto à redução de água, ao tempo de pega, à exsudação, às resistências à compressão e à tração por compressão diametral ou tração na flexão e à variação de comprimento.

A eficiência de qualquer aditivo varia de acordo com a dosagem do concreto e também com os constituintes da mistura, especialmente das propriedades do cimento. Com alguns aditivos, deve-se considerar a quantidade de sólidos e não a massa total do aditivo na forma líquida (NEVILLE, 1997). No que diz respeito ao teor de água presente nos aditivos, este deve ser deduzido do valor total da água de amassamento da mistura.

Dentre algumas finalidades pelas quais os aditivos são empregados nos concretos e argamassas destacam-se: aumento da trabalhabilidade sem aumento do consumo de água; redução do consumo de água, mantendo a mesma trabalhabilidade; obtenção de resistências mecânicas maiores; redução do consumo de água e de cimento, na mesma proporção, mantendo a mesma trabalhabilidade e as mesmas resistências; aumento das resistências iniciais; retardação ou aceleração do tempo de início de pega; e redução da segregação, importante para o lançamento a grandes alturas (concreto bombeável). No estado endurecido, os aditivos podem modificar as propriedades dos concretos e argamassas através do aumento da durabilidade frente à ação físico-

química, do controle da expansão causada pela reação álcali-agregado, da redução do coeficiente de permeabilidade, da redução da taxa de evolução do calor de hidratação durante o período inicial de endurecimento, do aumento da resistência à compressão, à tração ou à flexão, da ausência de trincas ou fissuras, da melhoria na resistência ao impacto e na resistência à abrasão e da inibição da corrosão do aço no interior do concreto, dentre outras.

Porém, não se conhecendo bem as propriedades e ações de um aditivo, pode ocorrer uma incompatibilidade entre este e o cimento utilizado, gerando algumas ações prejudiciais ao concreto tais como: rápida perda de abatimento, resultando em baixa coesão, porosidade e, geralmente, concretos pouco trabalháveis; aumento drástico da quantidade de ar incorporado, reduzindo a resistência; aumento da exsudação; não ocorrência da redução da quantidade de água prevista, resultando num concreto com grande quantidade de água e com baixa resistência e durabilidade; a ação, como retardador, prevista pode não ocorrer, gerando sérios problemas de moldagem, adensamento e acabamento; e a ação como acelerador pode não ocorrer, gerando problemas de acabamento e de resistência às pequenas idades.

#### **Superplastificantes:**

Segundo a NBR 11768:1992 os aditivos superplastificantes (tipo SP), também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência pela norma americana ASTM C494:1992, são definidos como produtos que aumentam o índice de consistência do concreto mantendo-se a quantidade de água de amassamento constante, ou ainda, como os produtos que possibilitam a redução mínima de 12% da água de amassamento na produção de um concreto com uma dada consistência.

De acordo com Neville (1997), os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente por um complexo processo de polimerização utilizado para a obtenção de moléculas longas com elevada massa molecular e, portanto, relativamente caros. Porém, ao serem produzidos para um fim específico, suas características, em relação ao comprimento das moléculas, são otimizadas para um mínimo de entrelaçamento necessário tornando, assim, a aplicação do produto mais viável.

Os tipos de superplastificantes mais importantes disponíveis no mercado são os lignosulfonados modificados, as resinas de naftaleno-formaldeído sulfonado, a resina de melamina-formaldeído sulfonada e o éter-carboxílico modificado. Outros polímeros que apresentam propriedades de redução de água e fluidificação do concreto também podem ser usados como aditivos superplastificantes.

Os aditivos superplastificantes são adicionados aos concretos quando se deseja obter uma alta trabalhabilidade com menor quantidade de água de amassamento, permitindo maior flexibilidade nas relações água/cimento e, assim, tornado-se um potencial para elevadas resistências. Essa redução da água de amassamento é geralmente necessária para aumentar a trabalhabilidade do concreto sem o acréscimo de água, para produzir resistências maiores para uma dada trabalhabilidade e para planejar dosagens de concreto de baixas relações água/cimento por razões de durabilidade.

Os aditivos do tipo SP não alteram significativamente o tempo de pega do concreto, salvo quando são usados na presença de cimentos com baixo teor de  $C_3A$ ; neste caso, pode-se observar um retardamento excessivo na pega do sistema. Além disso, esses aditivos não têm influência sobre a retração, a fluência, o módulo de elasticidade, as resistências ao gelo/degelo e aos sulfatos do concreto, assim como não apresenta qualquer efeito sobre a durabilidade do mesmo. Quando utilizados com algum agente incorporador de ar, deve-se tomar bastante cuidado, pois o teor de ar incorporado pode ser reduzido pelo superplastificante (NEVILLE, 1997).

Segundo Melo (2000), os dados das análises químicas importantes para a correta utilização do SP são: a porcentagem em massa de material ativo (partículas sólidas) para uma solução, o tipo de sal, o valor do pH, o teor de sulfato, de cloro e de formaldeído e a viscosidade (que reflete a variação da massa molecular do polímero, propriedade que apresenta forte influência sobre o desempenho do produto). O autor ainda afirma que, mesmo esses dados sendo fundamentais e constituindo o primeiro passo para o conhecimento que possibilita o correto emprego desses aditivos, eles não fornecem qualquer informação no que diz respeito ao possível desempenho apresentado pelo produto.

Dessa maneira, o rendimento dos aditivos superplastificantes está condicionado não só por sua compatibilidade com o cimento, mas também pelas técnicas de mistura e transporte, pela correta dosagem, pela metodologia de incorporação, pelas condições ambientais e por uma total compreensão de todas as vantagens que podem ser obtidas com o seu uso.

Os aditivos superplastificantes, que modificam as propriedades reológicas das pastas de cimento, argamassas e concretos, no estado fresco, têm como função principal a alta eficiência na redução de água de amassamento. No entanto, há funções secundárias ou acessórias que normalmente acompanham esses aditivos: incorporação de ar, aceleração de pega e do endurecimento e retardamento de pega com eventual redução da resistência mecânica.

Deve-se ressaltar que nem todos os cimentos que cumprem as especificações regulamentares têm o mesmo comportamento reológico com um dado superplastificante quando se trabalha com baixas relações água/cimento. Da mesma maneira, nem todos os superplastificantes que cumprem as normas interagem da mesma forma com um dado cimento.

#### Ação e efeito dos aditivos superplastificantes:

As partículas de cimento Portland, caracterizadas pelas muitas cargas de superfície não saturadas, apresentam uma grande tendência à floculação quando entram em contato com um líquido tão polar como a água, devido a vários tipos de interações: forças de Van der Waals entre as partículas, forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratados. Assumir uma tal estrutura floculada implica na retenção de uma certa quantidade de água dentro dos flocos e, com isso, gerando uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água e, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para a fluidificação da mistura.

Segundo Silva (2000) estes efeitos resultam num enrijecimento ou aumento da viscosidade aparente do sistema cimentício. Assim, para se conseguir uma distribuição homogênea da água e um

ótimo contato água/cimento, as partículas de cimento deverão estar corretamente defloculadas e conservadas num alto estado de dispersão.

Opiniões controversas existem em torno da atuação dos aditivos redutores de água. Antigamente, propriedades tensoativas que reduzem a tensão superficial da água sobre uma superfície lhes eram atribuídas. Com o avanço do conhecimento sobre esses aditivos, descobriu-se que sua ação principal é defloculante ou dispersante. De qualquer forma, admite-se que há uma contribuição com propriedades tensoativas no comportamento do SP. Portanto, quando adsorvido pelas partículas de cimento, o tensoativo confere uma forte carga negativa, a qual auxilia numa redução considerável da tensão superficial da água circundante, aumentando a fluidez do sistema de maneira significativa (SILVA, 2000).

Freqüentemente, uma redução de água de 20% a 25% é conseguida no concreto de referência (sem aditivo), sem qualquer redução de sua consistência. Com isso, observa-se um aumento nas propriedades mecânicas (resistências à compressão e à flexão), que são geralmente proporcionais à redução da relação água/cimento. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, freqüentemente, devido a uma maior velocidade da hidratação do cimento em um sistema bem disperso, concretos com adição de SP apresentam resistências a 1, 3 e 7 dias até maiores que concretos de referência para uma mesma relação água/cimento.

#### **2.1.4.6. Pigmento:**

A coloração integral do concreto, seja dosado em central, pré-moldado, argamassas ou blocos, transforma a aparência fria e monótona natural do concreto em tons alegres, harmoniosos e agradáveis. Os pigmentos oferecem uma instigante ferramenta de cores para ser usada no projeto de edificações e na sua interação com o ambiente. A química moderna tornou disponível um número razoável de colorantes a baixo custo com desempenho confiável e duradouro, cujo uso adequado pode oferecer uma coloração para toda a vida útil do concreto ou argamassa, dispensando a manutenção.

Os pigmentos para a aplicação em produtos à base de cimento ou outros materiais cimentantes tais como a cal e o gesso, deve ser completamente estáveis em relação aos álcalis, eficientes e resistentes às intempéries. Devem ser também relativamente baratos, contudo ter um alto poder de coloração para proporcionar um rendimento satisfatório.

Uma das principais classes de colorantes, os pigmentos à base de óxido de ferro, contempla todos estes critérios citados. Pigmentos de óxido de ferro podem ser distinguidos em duas subcategorias, os naturais e os sintéticos.

Os óxidos de ferro naturais, como o nome indica, são as hematitas (vermelho), limonitas (amarelos), e magnetitas (pretos). Seus teores de óxido de ferro são relativamente baixos, enquanto que o material restante em sua composição é inerte e sem valor de coloração. Os óxidos de ferro naturais, algumas vezes remetem a cores minerais, sendo assim designados tais como âmbar, sienna e ocre.

Estes óxidos de ferro naturais estão sendo substituídos pelos novos óxidos sintéticos, que oferecem maior grau de pureza na sua composição, uniformidade mais consistente, grande

diversidade de tons, e capacidade maior de coloração. Apesar de serem mais caros, suas propriedades proporcionam maior economia no produto final.

Os óxidos de ferro sintéticos amarelos provem nuances do “creme” até o amarelo. Estes são produzidos por meio de processos de redução orgânica (LEWIS, 1987). Estes óxidos têm formato alongado, o que pode aumentar o imbricamento entre as partículas do concreto, e por consequência aumentar o fator a/c da mistura.

Os pigmentos sintéticos pretos podem gerar tons desde o cinza claro até tonalidades como o carvão. A fabricação do óxido de ferro preto pode ser obtida por processos análogos aos utilizados para a fabricação do óxido de ferro amarelo. Este pigmento também pode ser obtido pela redução do óxido de ferro amarelo, ou da hematita.

Óxidos de ferro sintéticos (puros) vermelhos podem ser encontrados em gamas de cores, desde o amarelado “terracota” até os azulados “borgonha”, com uma larga seleção de tons intermediários. Lewis (1987) cita que os óxidos de ferro vermelhos podem ser obtidos por meio processos de calcinação dos pigmentos amarelos ou pretos. Em geral as partículas dos óxidos de ferro vermelhos são menores que 3 µm, e seu formato arredondado contribui com o empacotamento das partículas constituintes do concreto.

Tons como bronze ou marrom podem ser conseguidos com misturas entre os três pigmentos básicos de óxido de ferro. Estes também podem ser obtidos por precipitação direta ou pela redução controlada do óxido de ferro preto (LEWIS, 1987).

O óxido de cromo verde é igualmente satisfatório na utilização em produtos à base de cimento (comparável aos pigmentos de óxido de ferro), porém são mais caros. Em projetos especiais, onde o custo é secundário, podem ser utilizados pigmentos tais como óxido hidratado de cromo verde (turquesa), níquel-titânio verde (tom canário), e aluminato de cobalto azul. Entretanto, os óxidos de ferro e, em um grau menor, os óxidos de cromo verde são os únicos colorantes inorgânicos encontrados para pigmentação do concreto, apesar de os demais pigmentos citados anteriormente serem considerados perfeitamente seguros para coloração de concretos e argamassas.

Alguns outros colorantes com utilização limitada em produtos à base de cimento são amplamente mencionados, tais como os carbonos solúveis em água pretos, as fitalocianinas solúveis em água verdes e o azul ultramarino. Muitos outros colorantes orgânicos e inorgânicos devem ser restritos a áreas internas, incluindo a fitalocianina azul, devido sua baixa durabilidade frente aos raios ultravioleta.

Pigmentos hidrofóbicos tais como os carbonos negros e as fitalocianinas verdes devem ser convertidos em pigmentos hidrofílicos. Para tanto, devem ser aplicados agentes dispersantes próprios para utilização em materiais à base de cimento. Comercialmente é vendida uma grande variedade de colorantes com estas propriedades.

Diversos fatores influenciam a coloração do concreto e da argamassa. O cimento cinza, além de tornar o concreto com aparência suja e lavada, tira o brilho de qualquer pigmento utilizado. Por esta razão, elementos de concreto fabricados com cimento Portland comum não produzem cores vivas como os fabricados com cimento branco. Porém, o ganho de brilho da cor obtido pelo uso de cimento branco depende do pigmento utilizado. No caso dos pigmentos de cor preta, não existe

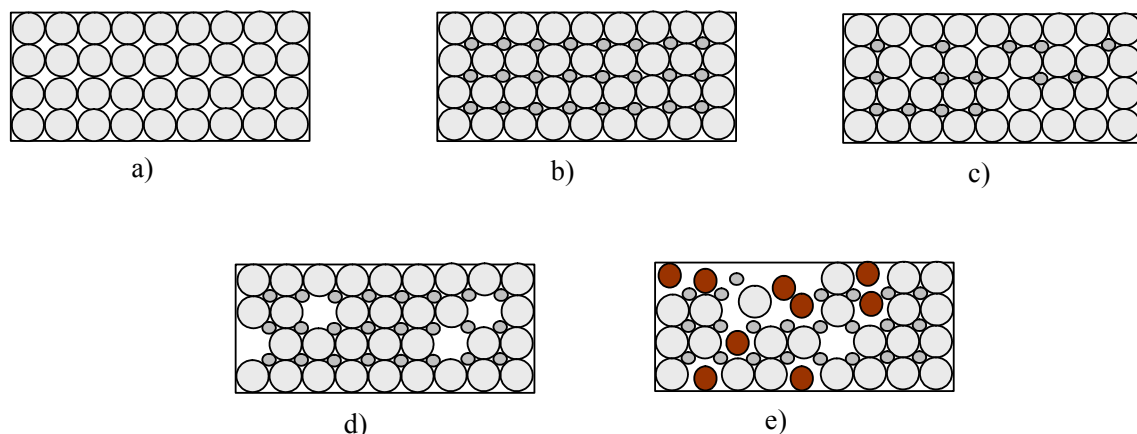
teoricamente diferença na utilização de cimento cinza ou branco. No caso das cores vermelha e marrom, a diferença é discreta, e quando se utiliza pigmento amarelo ou azul, a diferença é evidente.

Na coloração do concreto, não são os agregados que são pigmentados, mas sim a pasta de cimento, a qual forma uma película em torno das partículas dos agregados. De acordo com Kohnert (1997) um concreto com maior consumo de cimento, com a mesma concentração de pigmento (em porcentagem da massa de cimento), terá uma coloração mais intensa que um concreto com consumo menor.

Ao adicionar quantidades de pigmentos no traço de concreto, inicialmente a intensidade da cor varia linearmente com a concentração de pigmento. Porém, quanto maior a concentração de pigmentos chega-se a uma taxa em que sua adição não promove maiores alterações na cor, ponto de saturação, da superfície, tornando-se antieconômico (KOHNET, 1997).

### 2.1.5. Empacotamento de partículas:

Diversas propriedades das argamassas e concretos estão relacionadas ao empacotamento das partículas que os constituem. O empacotamento de partículas é um fator que, além de poder tornar os produtos constituídos mais econômicos, tende a produzi-los sem grandes alterações volumétricas. McGeary (1961) define o empacotamento de partículas como “o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”. O modelo, conforme conceituado por Oliveira *et al.* (2000), está apresentado na Figura 2.3.



**Figura 2.3** – Modelo de empacotamento de partículas – Caso a), com ocupação média de 67% do volume de vazios, num sistema monodisperso; caso b) teoricamente, uma condição para a máxima condição de empacotamento; caso c) ausência de quantidade de finos; caso d) ausência de partículas grandes e, caso e) um empacotamento deficiente (OLIVEIRA *et al.*, 2000)

O fator de empacotamento ( $P_f$ ) é definido como:

$$P_f = \frac{P_e}{100}$$



onde:  $P_e$  = conteúdo de sólido presente em qualquer unidade de volume que o contenha (partículas mais volume de vazios entre partículas).

A porosidade ( $P_o$ ) é o volume de vazios entre as partículas, expresso em fração do volume, e o volume efetivamente ocupado pelas partículas ( $V_{ef}$ ) é:

$$V_{ef} = \frac{1}{(1-P_o)} = \frac{1}{P_f}$$

A densidade relativa de empacotamento ( $\rho_{emp}$ ) é definida como o quociente entre a densidade volumétrica do sistema de partículas ( $\rho_{bulk}$ ) e a densidade máxima de partícula sólida ( $\rho_s$ ):

$$\rho_{emp} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_s}$$

onde:  $\rho_{bulk}$  = massa de sólido dividida pelo volume total do sistema (partículas+porosidade);

$\rho_s$  = massa do sólido dividida pelo volume realmente ocupado pelo sólido.

Segundo Oliveira *et al.* (2000), de uma maneira geral, empacotamentos reais (estruturas de empacotamento aleatórias) de monodispersões esféricas ocorrerão sempre com o mesmo fator de empacotamento ( $P_f \approx 0,60 - 0,64$ ), apesar de ser teoricamente possível obter valores superiores, no caso de estruturas ordenadas ( $P_f \leq 0,74$ ). Entretanto, uma série de fatores pode alterar essa condição.

Os fatores que afetam o empacotamento de partículas são apresentados a seguir:

#### **Distribuição granulométrica:**

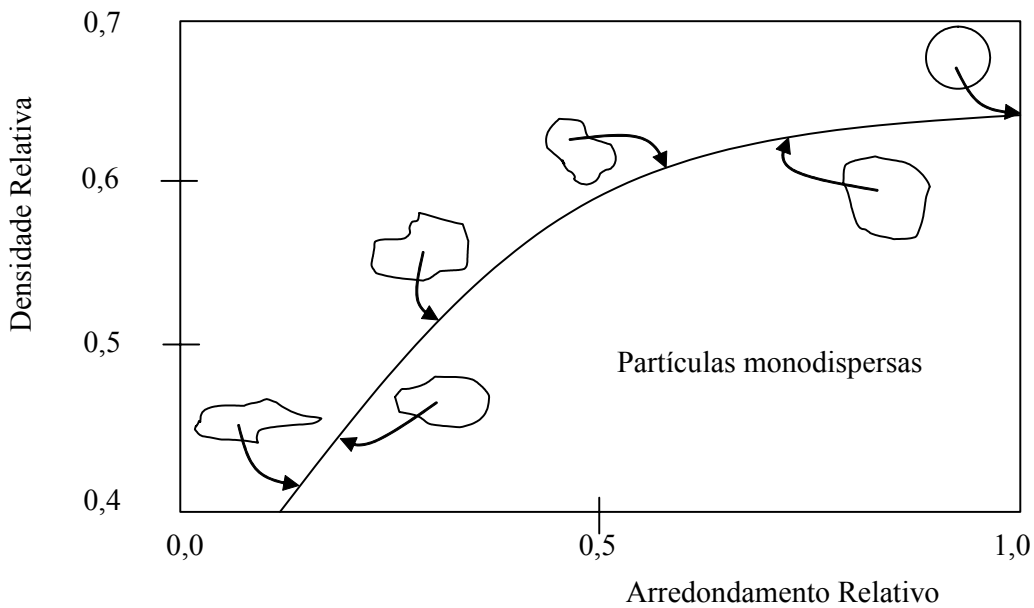
A distribuição granulométrica altera a condição de monodispersão, esse fato permite que se atinja valores próximos a 1, até o caso das monodispersões, com um teor elevado, notoriamente ao redor de 67%.

#### **Preenchimento:**

O preenchimento de vazios com partículas menores que aqueles existentes numa monodispersão, realmente diminuem em muito os vazios. No entanto, se nesse instante se introduzirem partículas maiores que esses vazios, se formarão outros vazios, pelo deslocamento das partículas maiores de uma posição original, como visto na Figura 2.3, (caso e), o que poderá levar a um aumento na porosidade e diminuição da eficiência do empacotamento. Portanto a seqüência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a distribuição granulométrica do sistema, determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão, como visto na Figura 2.3.

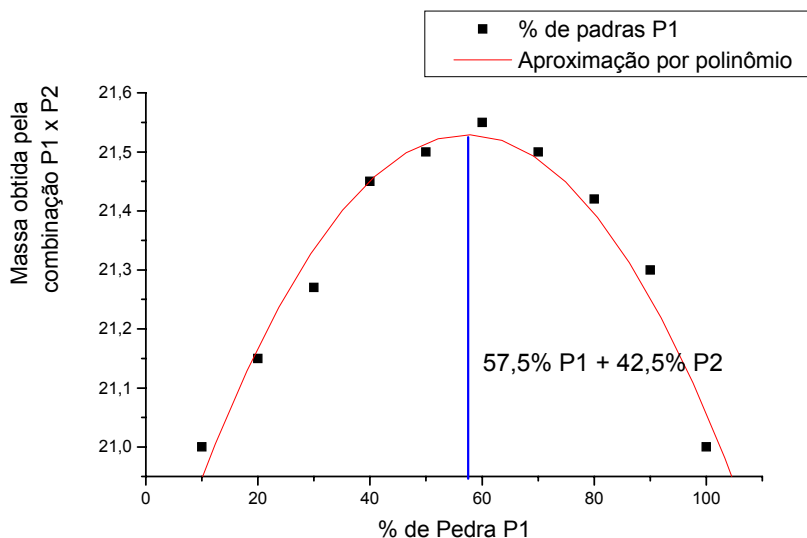
#### **Morfologia das partículas:**

A morfologia das partículas é outro fator importante, e sendo um fator de forma torna-se interessante que seja analisado. Quanto mais alongada for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, conforme Figura 2.4. Quanto menores forem essas partículas, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica.



**Figura 2.4** – Relação qualitativa existente entre densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamentos monodispersos aleatórios de partículas (GERMAN, 1992<sup>9</sup> *apud* OLIVEIRA *et al*, 2000)

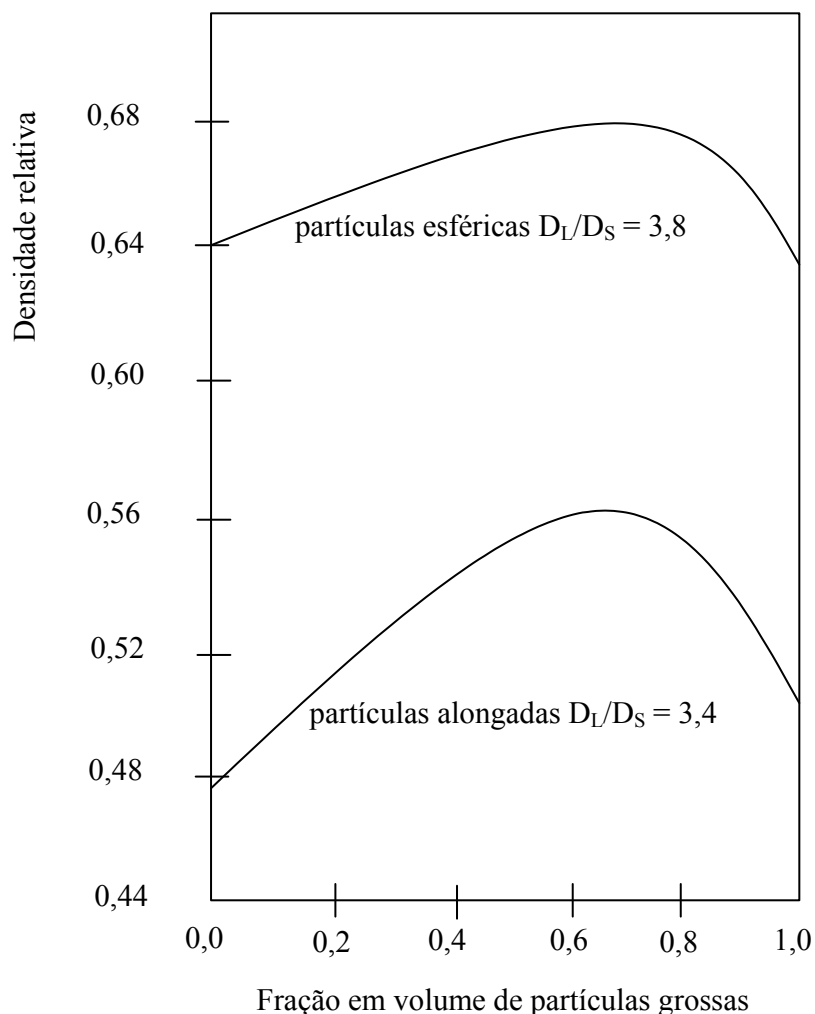
O comportamento de uma mistura bimodal de partículas não esféricas, em relação à densidade de empacotamento, é o mesmo que o de partículas esféricas, mas com valores de densidades inferiores. Na Figura 2.5 é apresentado um estudo para determinação da melhor composição entre dois agregados, a aproximação representa o comportamento da mistura, tanto de agregados esférico quanto não esférico.



**Figura 2.5** – Gráfico idealizado da melhor composição entre os agregados P1 e P2 (LIBORIO, 2004)

<sup>9</sup> GERMAN, R.M. (1992). The role of particle packing density in powder injection molding. BROOKES, C.A. **Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics**, v.5, p.81-110.

Na medida em que, num sistema de empacotamento de partículas não esféricas, a relação (o quociente) entre os tamanhos (diâmetros) das partículas maiores ( $D_L$ ) e os das menores ( $D_S$ ) aumenta, há uma elevação na densidade, conforme Figura 2.6.

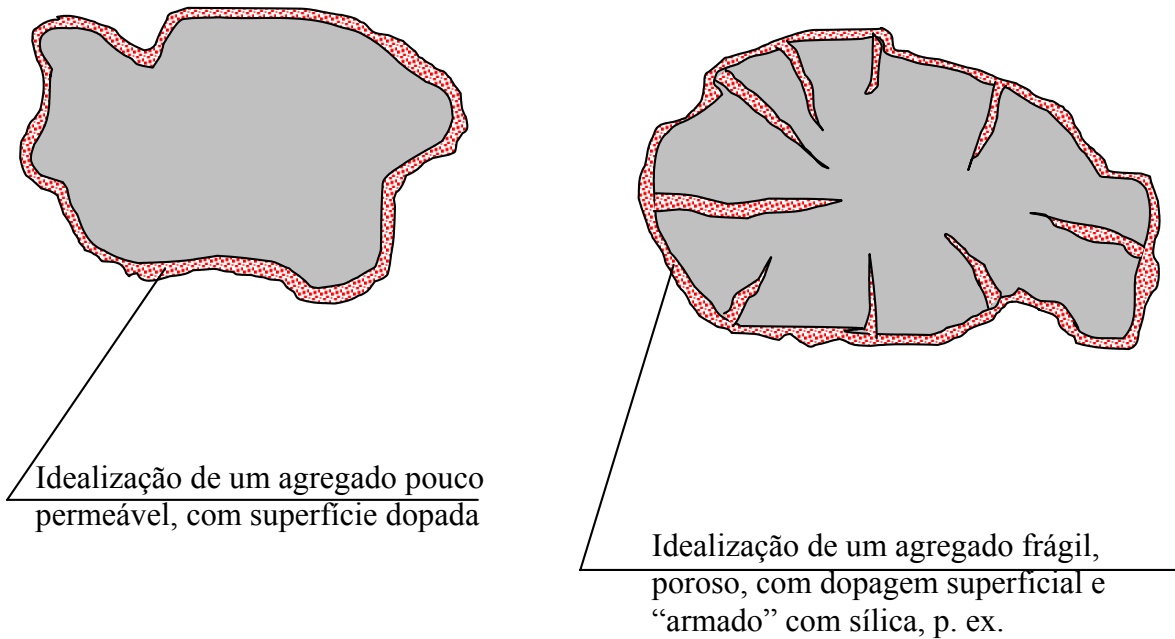


**Figura 2.6** – Dependência da densidade relativa do empacotamento em função da composição, para misturas de partículas de formatos esférico e irregular (GERMAN, 1992<sup>10</sup> *apud* OLIVEIRA *et al*, 2000)

#### Porosidade interna:

A porosidade interna das partículas também influencia na obtenção do empacotamento de partículas. Oliveira *et al.* (2000) menciona que é necessário que se utilizem partículas densas, com a menor porosidade possível. Isto posto, nos sistemas com cimento Portland, é possível que se faça uma dopagem do material conforme Liborio (2004) transformando uma partícula com poros abertos em um material denso, além de proporcionar uma textura superficial, tanto para as partículas porosas quanto para as densas, que facilite a aderência entre as partículas, melhorando inclusive a zona de interface entre os materiais, conforme se observa na Figura 2.7.

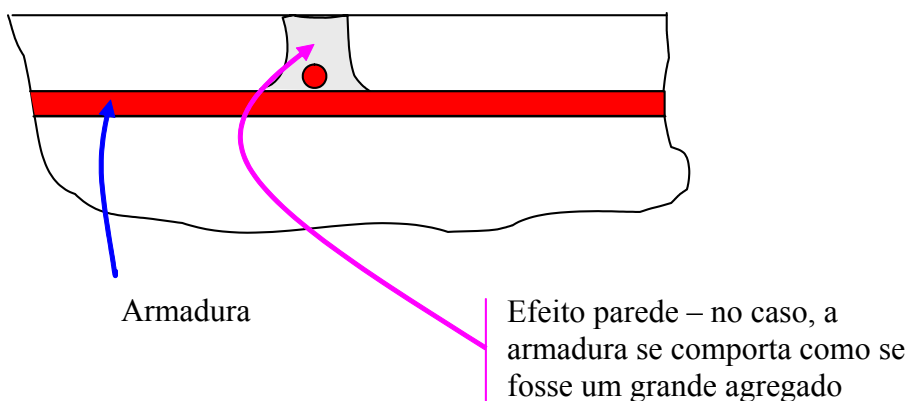
<sup>10</sup> GERMAN, R.M. (1992). The role of particle packing density in powder injection molding. BROOKES, C.A. **Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics**, v.5, p.81-110.



**Figura 2.7** – Dopagem de agregados para aumentar a aderência e propiciar seu reforço (LIBORIO, 2004)

#### Efeito parede:

Esse efeito é pronunciado, e interfere no empacotamento, quando a relação entre o tamanho de partículas for muito grande, ou seja, quando as partículas pequenas, em alta quantidade, estiverem adjacentes aos agregados de grande tamanho e puderem ser considerados como superfícies planas. Segundo Liborio (1990), nesse caso a porosidade nessa região será maior que em outras regiões restantes do volume considerado. A Figura 2.8 demonstra que em regiões próximas a armadura pode ocorrer o efeito parede das partículas de agregados com a barra de aço.



**Figura 2.8** – Influência do efeito parede no empacotamento da argamassa, para elementos estruturais de argamassa armada, culminando em patologia, pela alta porosidade do material na posição da armadura, decorrente da diminuição de densidade do material (LIBORIO, 1990)

O efeito parede também pode ocorrer em regiões próximas à fôrma. Na Figura 2.9 (b) se pode observar a tendência de ocorrer maiores vazios, na disposição aleatória das partículas de diferentes tamanhos, em regiões adjacentes a superfície plana do recipiente.

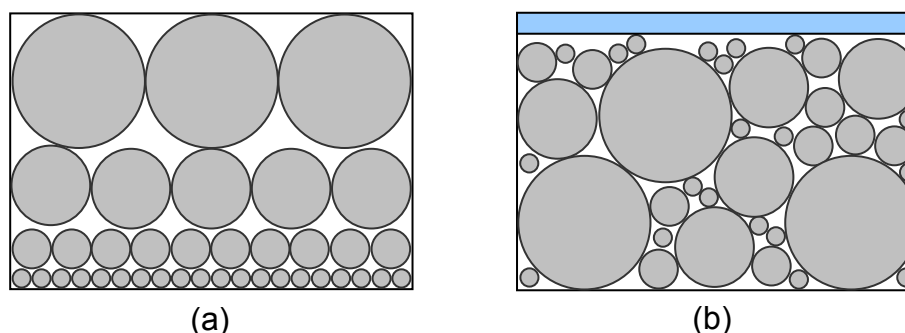
### Técnicas de compactação:

Os fatores que afetam o empacotamento apresentados até aqui dizem respeito às características do sistema de partículas, no entanto, a maneira como essas partículas são colocadas em suas devidas posições também interfere no empacotamento.

Para ilustrar esse conceito, imagina-se um sistema de partículas densas e esféricas, no qual suas partículas sejam distribuídas em dois recipientes (iguais) de maneiras distintas:

- as partículas dessa distribuição são subdivididas em suas monodispersões, formando camadas sucessivas de partículas de um único diâmetro como na Figura 2.9 (a);
- as partículas são depositadas aleatoriamente e o recipiente é submetido a vibração possibilitando que as partículas se movimentem, atingindo assim suas posições de equilíbrio no empacotamento como apresentado na Figura 2.9 (b).

Assim percebe-se que a mesma distribuição pode gerar empacotamentos distintos dependendo da técnica de compactação empregada, pois no caso (b) as partículas menores ocupam os espaços entre as partículas maiores, otimizando o empacotamento. A faixa azul representa a redução do espaço ocupado pelas partículas no caso (a).



**Figura 2.9** – Comparação de modelos com mesma distribuição granulométrica e empacotamentos distintos: (a) camadas monodispersas; (b) empacotamento aleatório submetido a vibração (OLIVEIRA *et al.*, 2000)

### Estado de dispersão das partículas:

Partículas muito finas podem causar dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento por possuir uma maior tendência à aglomeração, devido à sua maior relação entre a área superficial e o volume (massa). Esse efeito de aglomeração tende a inibir a coordenação espacial que leva às maiores densidades de empacotamento. De uma maneira geral, o problema de aglomeração torna-se efetivo com partículas inferiores a 1  $\mu\text{m}$ , no entanto partículas maiores podem também apresentar tal comportamento, sendo muitas vezes necessário utilizar dispersantes (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A dispersão inadequada pode ainda alterar a curva granulométrica prevista, já que as partículas mais finas podem formar aglomerados (partículas maiores). Esses aglomerados equivalem a partículas ocas, que originam poros na microestrutura e podem prejudicar a resistência final dos concretos e argamassas pela maior necessidade de água à mistura, já que a resistência é inversamente proporcional a quantidade de água inserida na mistura (Lei de Abrams).

## 2.2. Ladrilhos e revestimentos hidráulicos:

### 2.2.1. Definições:

A origem do nome desse tipo de revestimento está relacionada com o material utilizado em sua fabricação, pois se utiliza um aglomerante hidráulico (cimento Portland) que adquire resistência com a adição de água (hidratação do cimento), e disso decorre o nome de ladrilho “hidráulico”. A Figura 2.10 apresenta alguns ladrilhos hidráulicos.



**Figura 2.10** – Ladrilhos hidráulicos  
(MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003)

A NBR 9457:1986 define ladrilho hidráulico como placa de concreto de alta resistência ao desgaste para acabamento de paredes e pisos internos e externos, contendo uma superfície com textura lisa ou em relevo, colorido ou não, de formato quadrado, retangular ou outra forma geométrica definida.

Segundo a NBR 9457:1986 o ladrilho hidráulico possui três partes:

- Face aparente: superfície do ladrilho pertencente à camada superior com textura lisa ou em relevo, colorido ou não.
- Camada inferior: parte do ladrilho que contém a superfície destinada ao seu assentamento.
- Camada intermediária: parte do ladrilho que fica entre as camadas superiores e inferiores.

Além da NBR 9457:1986 que trata da especificação dos ladrilhos hidráulicos ainda existe outras duas normas referentes a esse revestimento, a NBR 9458:1986 que se refere ao procedimento de assentamento de ladrilhos hidráulicos, e a NBR 9459:1986 que padroniza formatos e dimensões dos ladrilhos hidráulicos. Entretanto como a presente pesquisa tenta expandir a aplicação da tecnologia dos concretos de alto desempenho para a produção de ladrilhos e revestimentos hidráulicos não serão seguidas todas as especificações indicadas pelas normas, pois essas normas não acompanharam o desenvolvimento tecnológico das argamassas e concretos de alto desempenho, que podem trazer benefícios tanto para o produto como para o processo produtivo dos

ladrilhos hidráulicos. Mas mesmo assim as normas serão de grande valia para definir métodos de avaliação e controle dos revestimentos produzidos.

### **2.2.2. Histórico:**

Os ladrilhos hidráulicos, derivados dos mosaicos bizantinos, foram muito utilizados na Europa, antes de chegar a centros comerciais brasileiros, desenvolvidos pelas mãos de imigrantes italianos, que podiam facilmente moldar elementos de revestimento, a frio, para adornar suas construções ou as construções de seus senhorios.

No passado, o material aqui fabricado, pouco decorativo, era destinado às casas mais populares. Já as peças vindas de Portugal, da França e da Bélgica, belas e sofisticadas, enfeitavam os pisos das casas de fazendeiros, de museus ou da entrada de prédios chiques.

O ladrilho hidráulico chegou ao Brasil no início do século XX, num momento de grande expansão imobiliária, e passou a ser amplamente utilizado nas áreas "frias" das residências, quando deixava de ser utilizado o cimentado "vermelhão", tido como material muito pobre. Daí em diante, uma casa modesta utilizava ladrilho liso ou com algumas peças com desenho simples, de uma ou duas cores, normalmente geométrico, formando "tapetes". Nas casas mais abastadas, o desenho era mais sofisticado, com formas mais elaboradas e com mais cores (MACHADO, 2005).

Pisos feitos de tais ladrilhos podem ser vistos em muitos prédios históricos de São Paulo, tais como o Palácio dos Campos Elíseos, o Museu do Ipiranga, a Casa da Marquesa de Santos no Pateo do Collegio, o Colégio Sion, Universidade Mackenzie, a Igreja Nossa Senhora do Brasil e o Mosteiro de São Bento, além de igrejas, lojas e calçadas.

Com o surgimento da cerâmica industrializada, na década de 60, o ladrilho passou a repousar no esquecimento. O revestimento emergente trazia ares de modernidade às casas, além de vantagens com relação a acabamento e manutenção.

Embora ainda seja tênue a utilização desses revestimentos nos dias atuais, produzidos por algumas fábricas que ainda permanecem abertas na capital paulista, foi nos anos 80 que os arquitetos e decoradores começaram a valorizar novamente os revestimentos hidráulicos, como forma de personalizar projetos e até pela possibilidade de utilização em mosaicos.

Como no passado, a produção ainda hoje é feita artesanalmente. Nas poucas fábricas existentes, nada de máquinas ou computadores. Apenas poucos homens trabalhando, geralmente com mais de 40 anos, herdeiros da técnica transmitida pelos antepassados. Na fábrica Dalle Piagge, em São Paulo, trabalhador prepara a tinta para os ladrilhos hidráulicos, como se pode observar na Figura 2.11. A maioria dos moldes presos na parede veio da Itália, país onde estão os poucos fabricantes de ladrilhos que restam no mundo. No Brasil, um único senhor, que vive no interior de São Paulo, faz as fôrmas de ferro com desenhos (MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003).



**Figura 2.11** – Fábrica Dalle Piagge, em São Paulo  
(MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003)

Antigamente, o revestimento era usado em ambientes rústicos, como casas de fazenda, de praia e montanha, mas hoje é possível vê-lo em salas de apartamentos e casas da cidade, fazendo as vezes de tapete, ou em quartos, banheiros e cozinhas. Esses revestimentos apresentam alta durabilidade e facilidade na restauração, as figuras a seguir demonstram algumas aplicações desses revestimentos.

Os ladrilhos permitem a composição de pisos, resultando em belos efeitos decorativos, a Figura 2.12 apresenta a aplicação de ladrilhos hidráulicos em ambientes internos, decorando e tornando o ambiente mais aconchegante.



**Figura 2.12** – Ladrilhos hidráulicos em ambiente interno  
(SALTENSE, 2006)

Em imóveis comerciais, os ladrilhos hidráulicos são utilizados em locais de destaque valorizando o local, como apresentado na Figura 2.13.





**Figura 2.13** – Ladrilhos hidráulicos em imóvel comercial (SALTENSE, 2006)

Em ambientes externos, os revestimentos hidráulicos são utilizados em calçadas, praças, contornos de piscinas e outros, pois podem apresentar características antiderrapantes e suportar cargas aplicadas de forma similar ao concreto (Figura 2.14).



**Figura 2.14** – Ladrilhos hidráulicos em ambiente externo (SALTENSE, 2006)

### 2.2.3. Produção atual:

A elaboração do ladrilho começa no desenho, que é transposto para um molde de cobre, ferro ou outro metal, que tem a função de separar as cores na moldagem das peças, alguns exemplos de molde encontram-se na Figura 2.15 e na Figura 2.10.



**Figura 2.15** – Moldes para realização dos desenhos dos ladrilhos (ORNATOS, 2006)

A produção dos revestimentos se inicia com a escolha do molde onde serão depositadas manualmente as porções de tinta, uma camada de cimento seco e outra de argamassa. O resto lembra o ofício de uma quituteira: desfôrmar, deixar repousando, imergir em água, dispor em um armário para “curtir”.

Quanto mais hábil e experiente o artesão, maior será a qualidade do ladrilho fabricado, pois como os moldes são preenchidos com diferentes cores ainda frescas pode ocorrer a mistura das cores nos diferentes, e muitas vezes estreitos, compartimentos do molde, desmanchando o desenho elaborado, por isso também os revestimentos com desenhos mais elaborados apresentam maiores custos (MACHADO, 2005).

Os desenhos dos ladrilhos são composições de tintas prensadas que ocupam metade da espessura da peça e tem como base pó de mármore e outros pigmentos (óxidos de ferro), ilustrados na Figura 2.16, os quais também compõem o rejunte.



**Figura 2.16** – Pigmentos utilizados como base para as tintas (MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003)

As cores são colocadas no molde de forma a não se misturarem umas com as outras, há casos em que os desenhos exigem que a tinta seja despejada gota a gota. A Figura 2.17 ilustra o preparo das tintas.



**Figura 2.17** – Preparo das tintas  
(MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003)

O trabalho manual deixa moroso o feito e exige profissionais ultra qualificados tanto na produção quanto na aplicação do material. O assentamento precisa ser realizado com a argamassa de assentamento (nivelamento) ainda mole, já que o processo manual não padroniza a altura das placas, o que obriga o nivelamento. A instalação deve ser a última etapa da obra: depois de fixados, os ladrilhos recebem uma camada de resina, só aplicada quando não há risco de poeira. O rejunte é feito por um pequeno filete, de no máximo 1 milímetro de espessura, com a mesma composição da tinta para evitar quebras no desenho (MEDEIROS, CAPPI e PALHAIS, 2003).

O ciclo para a produção dos revestimentos hidráulicos é de aproximadamente 20 dias, tornando-o assim, um material artesanal. A produção atual dos ladrilhos hidráulicos apresenta as seguintes características:

- Produção artesanal e manual peça a peça.
- Necessidade de profissionais ultra qualificados.
- Técnica baseada no empirismo com pouco cientificismo.
- Produção de peças personalizadas.
- Ocupação de grandes áreas para armazenagem das peças na produção.
- Secagem de maneira natural sem qualquer processo de aceleração de cura.
- Dispensa qualquer processo de queima.
- Baixa produtividade.
- Produção sob encomenda.

A seguir estão numeradas as etapas da produção e aplicação dos ladrilhos hidráulicos:

- a) Escolha da forma e molde de ferro de acordo com o tipo de revestimento desejado.
- b) Utilização de fôrma de ferro com molde para despejo da tinta.
- c) Retirada do molde e a camada de tinta recebe uma porção de cimento seco que elimina o excesso de água.
- d) Colocação da camada de argamassa.
- e) Prensagem do conjunto.
- f) Desfôrma da peça.

- g) Repouso do material por 12 horas.
- h) Imersão dos pisos por cerca de oito horas após o repouso.
- i) Secagem das peças de forma natural por cerca de vinte dias após o tempo de imersão.
- j) Assentamento dos pisos com a argamassa ainda mole para facilitar o nivelamento.
- k) Execução dos rejuntas com a mesma composição das tintas.
- l) Aplicação de uma camada de resina sobre os ladrilhos já em seu local definitivo.

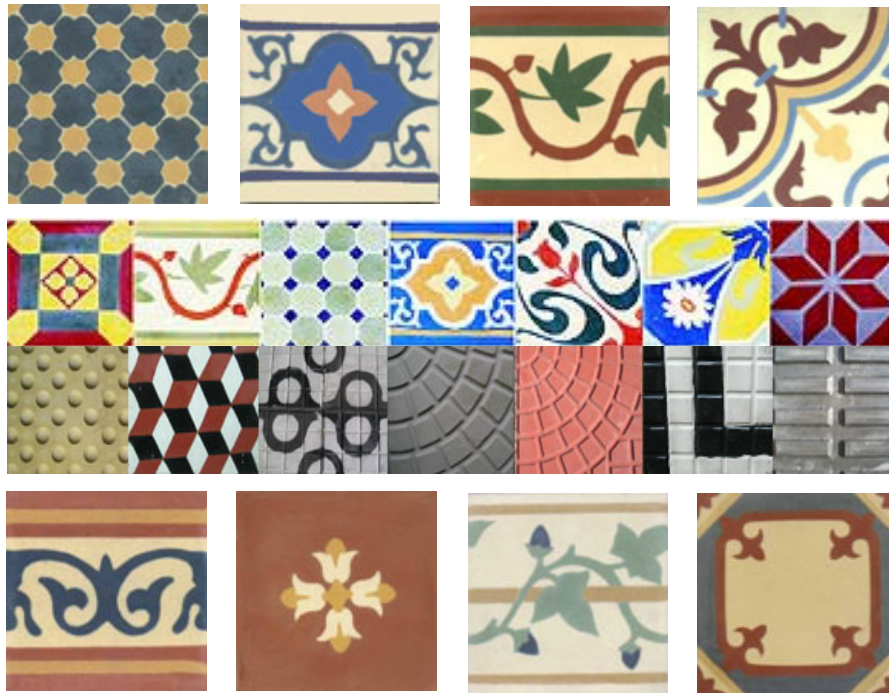
As etapas atualmente utilizadas para fabricação de ladrilhos hidráulicos estão ilustradas nas seqüências a seguir:



**Figura 2.18** – Etapas do processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos

Também são produzidos ladrilhos hidráulicos sem figuras e desenhos, o que elimina a etapa de montagem dos adornos no processo produtivo, por isso esses revestimentos hidráulicos possuem preços menores. Na Figura 2.19 são apresentados ladrilhos produzidos artesanalmente com diferentes desenhos e texturas.





**Figura 2.19** – Ladrilhos hidráulicos com diferentes desenhos e texturas



---

## 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

---

### 3.1. Caracterização de agregados miúdos:

#### **Composição granulométrica:**

A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com recomendações da NBR 7217:1987, utilizando peneiras que atendem a NBR 5734:1980 com aberturas de 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, 0,075 mm e 0,037 mm. A dimensão máxima característica e o módulo de finura foram determinados utilizando a composição granulométrica obtida. A dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 % em massa. O módulo de finura corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras utilizadas, dividida por 100.

#### **Massa unitária no estado solto:**

Definida como o quociente entre a massa de agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente, a massa unitária foi determinada de acordo com as especificações da NBR 7251:1982. Encheu-se um recipiente de 3 dm<sup>3</sup> com agregado seco sendo o agregado lançado de uma altura de aproximadamente 10 cm do topo do recipiente, após rasadura de superfície determinou-se a massa do agregado, através da relação entre esta massa e o volume do recipiente obteve-se a massa unitária no estado solto.

#### **Massa unitária no estado compactado seco:**

Definida como o quociente entre a massa de agregado lançado e compactado no recipiente e o volume desse recipiente, a massa unitária no estado compactado seco foi determinada de acordo com as especificações da NBR 7810:1983. Encheu-se um recipiente de 3 dm<sup>3</sup> com agregado seco em 3 camadas, sendo cada camada compactada com 25 golpes utilizando haste padronizada, após rasadura de superfície determinou-se a massa do agregado, através da relação entre esta massa e o volume do recipiente obteve-se a massa unitária no estado compactado seco.

#### **Massa específica:**

Definida como a relação entre a massa do agregado seco em estufa e o volume igual do sólido, a massa específica dos agregados foi determinada de acordo com a NBR 9776:1987, medindo a massa do material seco em uma balança de resolução de 0,1 g e o volume determinado pelo deslocamento de água no frasco de Chapman.

**Número de angulosidade:**

O conceito de angulosidade está relacionado com a norma inglesa BS 812:1975 Part 1. O número de angulosidade corresponde à diferença da subtração entre 67 (porcentagem de volume sólido do agregado mais arredondado) e a porcentagem de volume de sólidos em um recipiente preenchido com agregado segundo um procedimento estabelecido. Quanto maior o número (diferença entre as porcentagens de volume), mais anguloso é o agregado, sendo que o número de angulosidade varia entre 0 e 11. Comparando-se agregados semelhantes com diferentes números de angulosidade verifica-se que o teor de vazios diminui à medida que diminui o número de angulosidade.

**3.2. Empacotamento de partículas:**

O empacotamento de partículas visa minimizar os vazios existentes na mistura tornando o produto final mais compacto e conseqüentemente mais resistente. Neste trabalho serão apresentados três modelos de empacotamento de partículas denominados na presente pesquisa como: Modelo 1; Modelo 2; Modelo 3.

**Modelo 1:**

O Modelo 1 é o método indicado por Helene e Terzian (1992), que consiste na determinação experimental da massa unitária no estado compactado seco (NBR 7810:1983) de diferentes combinações de proporções dos dois componentes em que se deseja obter o melhor empacotamento. A melhor proporção entre os componentes é aquela que apresentar a maior massa unitária, pois representa a melhor condição de preenchimento dos vazios entre as partículas. É possível determinar a melhor proporção entre dois componentes e em seguida fixar esta proporção para compor com um terceiro componente e assim sucessivamente, desde que as composições sigam a ordem decrescente das dimensões dos componentes.

**Modelo 2:**

Este modelo consiste em determinar a fração de cheios ( $F_{ch}$ ) de um componente através da relação entre a massa unitária no estado compactado seco ( $\gamma_{comp}$ ) e a massa específica ( $\rho$ ), para em seguida obter a fração de vazios ( $F_{vz}$ ) ocupada pelo agregado e então determinar a quantidade de um componente com partículas menores necessária para preencher os vazios entre as partículas do componente inicial, relações indicadas por Bomfim (2005). Este modelo permite compor dois componentes e após a determinação da massa específica e da massa unitária no estado compactado seco da mistura retornar ao início do processo e compor um terceiro componente e assim sucessivamente, partindo do componente com partículas maiores para o componente com partículas menores.



**Modelo 3:**

O Modelo 3 é o modelo de Alfred, descrito por Oliveira *et al.* (2000), que consiste em estabelecer uma porcentagem acumulada de partículas (CPFT) menores que um determinado diâmetro  $D_P$  (diâmetro da partícula), de acordo com a equação a seguir:

$$CPFT = \left( \frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100$$

onde:  $D_L$  = diâmetro da maior partícula;

$D_S$  = diâmetro da menor partícula;

$q$  = módulo ou coeficiente de distribuição, que de acordo com Funk e Dinger (1993)<sup>11</sup> *apud* Oliveira *et al* (2000) assume o valor de 0,37 para os casos de máxima densidade de empacotamento.

**3.3. Determinação da massa específica de aglomerantes:**

Sendo a massa específica a quantidade de massa contida na unidade de volume, é preciso medir a massa e o volume dos sólidos do material para determinação de sua massa específica. As medidas foram realizadas de acordo com a NBR NM 23:1998, a massa do material foi medida em uma balança de resolução de 0,001 g, enquanto o volume foi determinado através do deslocamento de líquido no frasco de Le Chatelier. O líquido utilizado para a medida do volume foi o querosene para evitar a reação química dos aglomerantes com o líquido.

**3.4. Determinação do teor de sólidos de aditivos líquidos:**

A determinação do teor de sólidos dos aditivos superplastificantes e dos pigmentos foi realizada de acordo com as especificações da NBR 10908:1990, secando uma quantidade de material em estufa a 105° C até constância de massa. O teor de sólidos é determinado calculando a porcentagem da massa da amostra após secagem em estufa em relação a massa inicial da amostra.

**3.5. Ensaio de consistência em mesa cadente:**

O ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa foi realizado em mesa cadente segundo recomendações da NBR 7215:1991. Antes do início do ensaio a superfície circular da mesa cadente (diâmetro igual a 500 mm) e o molde rígido tronco-cônico (base maior igual a 125 mm, base menor igual a 80 mm e altura igual a 65 mm) foram ligeiramente lubrificadas com óleo mineral.

<sup>11</sup> FUNK, J.E.; DINGER, D.R. (1993). Particle packing, part IV: computer modeling of particle packing phenomena. *Interceram*, v.42, n.3, p.150-152.

A argamassa foi preparada em misturador mecânico recomendado pela NBR 7215:1991 em velocidade baixa, que representa uma velocidade de rotação da pá do misturador em torno do seu eixo de  $140 \pm 5$  rpm e um movimento planetário de  $62 \pm 5$  rpm.

Em seguida o molde rígido tronco-cônico, previamente posicionado no centro da mesa cadente com sua base maior para baixo, foi preenchido com argamassa em três camadas sensivelmente de mesma altura, sendo a 1ª, 2ª e 3ª camadas socadas com 15, 10 e 5 golpes respectivamente, com auxílio de soquete normal (soquete de 170 mm de comprimento de seção circular: 35 mm com diâmetro igual a 25 mm e 135 mm com diâmetro igual a 16 mm).

Após regularizar o topo e limpar a mesa, o molde tronco-cônico foi retirado verticalmente, em seguida promoveu-se a queda da mesa (altura de queda igual a 14 mm) 30 vezes em aproximadamente 30 segundos, provocando o abatimento do tronco de cone de argamassa. A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa após abatimento foi realizada com auxílio de um paquímetro em duas posições ortogonais, sendo a média aritmética dessas medidas o índice de consistência.

Uma medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa após abatimento é ilustrada na Figura 3.1, onde também se pode observar o molde rígido tronco cônico e o soquete normal.



**Figura 3.1** – Medida de consistência de argamassa em mesa cadente

A mistura dos materiais, assim como a medida de consistência em mesa cadente foi realizada a temperatura de  $25 \pm 5$  °C e umidade ambiente.

### **3.6. Determinação da massa específica da argamassa fresca:**

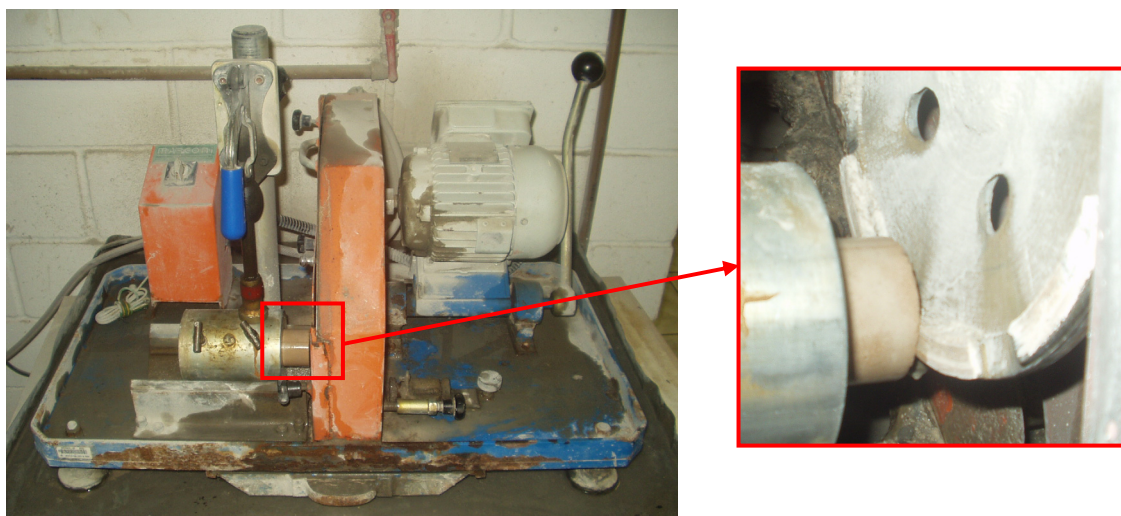
A massa específica da argamassa fresca foi determinada de acordo com a NBR 9833:1987, utilizando um recipiente de  $3 \text{ dm}^3$  e um vibrador de agulha. O recipiente foi cheio com argamassa utilizando adensamento vibratório, e a massa medida após regularização de superfície. Através da relação entre a massa de argamassa contida no recipiente e o volume do recipiente obteve-se a massa específica da argamassa no estado fresco.

### 3.7. Moldagem e preparo de corpos-de-prova cilíndricos:

A moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm foi realizada de acordo com a NBR 7215:1991. Após a mistura dos materiais em misturador mecânico em velocidade baixa os corpos-de-prova foram moldados em quatro camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com soquete normal, homoganeamente distribuídos.

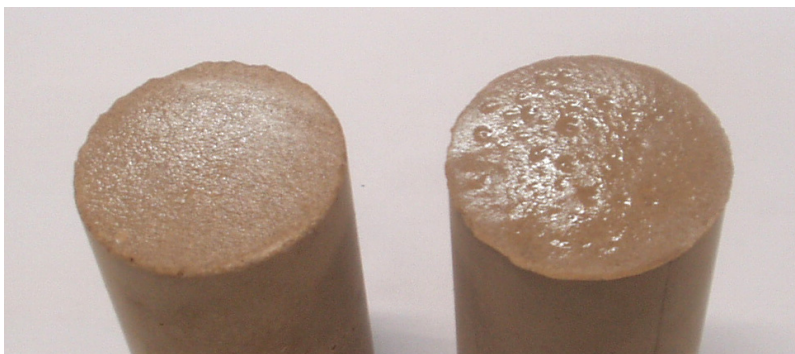
A cura dos corpos-de-prova se iniciou após rasadura de topo, isolando a superfície exposta dos corpos-de-prova com filme plástico com o intuito de impedir a perda de umidade da argamassa, pois grande parte do processo de hidratação do cimento ocorre antes da mistura estar pronto para o desmolde, principalmente no caso de concreto (argamassa) de alto desempenho. Os corpos-de-prova foram desmoldados 15 horas após a moldagem e permaneceram na cura por imersão até as datas de ensaio.

O preparo dos corpos-de-prova para ensaios de compressão axial simples e determinação do módulo de elasticidade foi realizado retificando suas superfícies de contato com os pratos da prensa servo-hidráulica (topo e base), por meio de um faceador de corpos-de-prova com disco diamantado mostrado na Figuras 3.2.



**Figura 3.2** – Faceador para corpos-de-prova com detalhe do disco

A retificação dos corpos-de-prova foi executada de acordo com a NBR 5738:1994, com o intuito de promover a regularização de superfícies, consistindo na remoção de uma fina camada de material da superfície a ser preparada, proporcionando uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos, reduzindo concentração de tensões durante os ensaios mecânicos. A diferença entre corpo-de-prova retificado e não retificado está demonstrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** – Corpos-de-prova com topo retificado (esquerda) e não retificado (direita)

No corpo-de-prova a direita da Figura 3.3 pode-se observar irregularidade na superfície que apesar de ser corretamente moldado apresenta ondulações decorrentes da retração da argamassa durante a cura, já no corpo-de-prova a esquerda a superfície do corpo-de-prova se apresenta lisa após a sua retificação.

O capeamento de superfície não é utilizado em corpos-de-prova de concretos ou argamassas de alta resistência, pois nesse caso a resistência do material utilizado no capeamento (enxofre, argamassa comum, etc.) é inferior a do concreto ou argamassa, e com isso o capeamento rompe antes do corpo-de-prova ocasionando concentração de tensões e conseqüentemente falseando resultados durante os ensaios.

### **3.8. Ensaios mecânicos de corpos-de-prova cilíndricos:**

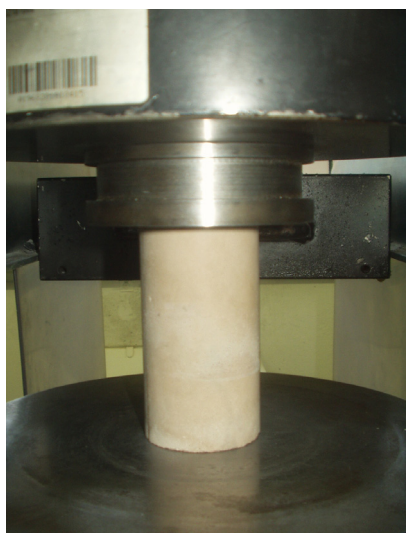
Os ensaios mecânicos em corpos-de-prova cilíndricos de argamassa, de diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, foram realizados em prensa servo-hidráulica até ruptura nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias. Na Figura 3.4 é apresentada a prensa servo-hidráulica onde se pôde ensaiar os corpos-de-prova com velocidade de carregamento controlada de acordo com as respectivas normas.



**Figura 3.4 – Prensa servo-hidráulica utilizada**

#### **Compressão axial simples:**

O ensaio de compressão axial simples em corpos-de-prova cilíndricos de argamassa foi realizado de acordo com a NBR 5739:1994, com velocidade de carregamento constante e igual a 0,6 MPa/s. Na Figura 3.5 está demonstrado um corpo-de-prova de argamassa, com diâmetro e altura iguais a 50 mm e 100 mm respectivamente, sendo solicitado a compressão axial simples.



**Figura 3.5 – Corpo-de-prova solicitado à compressão axial simples**

Foi possível comprovar a validade dos ensaios de compressão axial simples através da análise de ruptura dos corpos-de-prova, sendo a ruptura em forma cônica, apresentada na Figura 3.6, a que representa a correta distribuição de tensões no corpo-de-prova durante as solicitações.



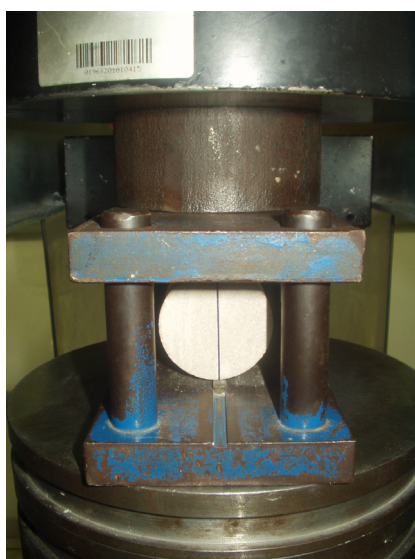


**Figura 3.6 – Ruptura cônica de corpos-de-prova comprimidos axialmente**

A resistência à compressão de cada corpo-de-prova foi obtida dividindo sua carga de ruptura, obtida no ensaio de compressão axial simples, pela área da seção transversal do corpo-de-prova. A resistência à compressão em cada idade de ensaio foi determinada através da média aritmética dos resultados dos ensaios de corpos-de-prova que obtiveram ruptura cônica entre os 4 corpos-de-prova ensaiados.

#### **Tração na compressão diametral:**

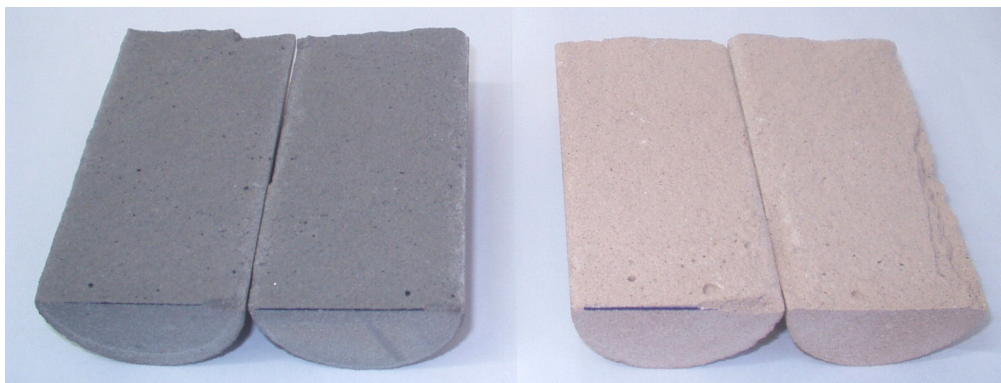
O ensaio de tração na compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos de argamassa foi realizado de acordo com a NBR 7222:1994, com velocidade de carregamento constante e igual a 0,06 MPa/s. Na Figura 3.7 está demonstrado um corpo-de-prova de argamassa, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, sendo solicitado à compressão diametral. Utilizou-se um aparato para marcação da linha central das superfícies circulares dos corpos-de-prova, esta linha auxiliou o posicionamento dos corpos-de-prova no dispositivo utilizado para manter o corpo-de-prova corretamente posicionado durante o ensaio.



**Figura 3.7 – Corpo-de-prova solicitado à compressão diametral**

Foi possível comprovar a validade dos ensaios de compressão diametral através da análise de ruptura dos corpos-de-prova, sendo a ruptura colunar no centro do corpo-de-prova, demonstrada

na Figura 3.8, a que representa a correta atuação das cargas nos corpos-de-prova durante as solicitações.



**Figura 3.8** – Ruptura dos corpos-de-prova comprimidos diametralmente

A resistência à tração por compressão diametral de cada corpo-de-prova foi calculada utilizando a equação a seguir:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h}$$

onde:  $f_{t,D}$  = resistência a tração por compressão diametral (MPa);

F = carga máxima obtida no ensaio (N);

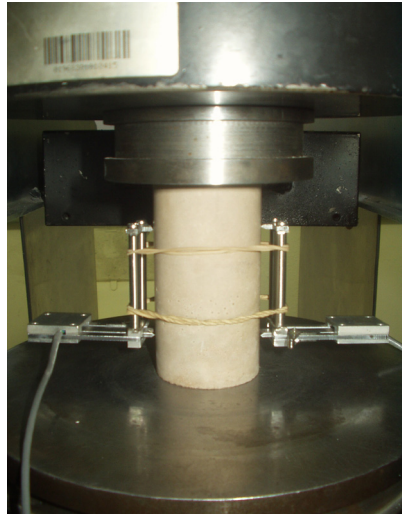
d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm);

A resistência a tração por compressão diametral em cada idade de ensaio foi determinada através da média aritmética dos resultados dos ensaios de corpos-de-prova que obtiveram ruptura colunar no centro do corpo-de-prova entre os 4 corpos-de-prova ensaiados.

### **3.9. Determinação do módulo de elasticidade de corpos-de-prova cilíndricos:**

O módulo de elasticidade foi determinado seguindo recomendações da NBR 8522:1984, solicitando corpos-de-prova cilíndricos de argamassa a compressão axial simples com velocidade de carregamento de 0,6 Mpa/s até 80 % da carga de ruptura, obtida em ensaio de compressão axial simples, e realizando medições de deslocamento a cada 5 segundos através de extensômetros elétrico de base removível fixos em lados opostos do corpo-de-prova. Na Figura 3.9 é demonstrado um corpo-de-prova de argamassa com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm sendo solicitado à compressão axial simples com extensômetros posicionados para medições de deslocamento.



**Figura 3.9** – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade

Após obtenção das cargas solicitantes e seus respectivos deslocamentos calculou-se as tensões e as deformações seguindo fórmulas a seguir:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

onde:  $\sigma$  = tensão de compressão (MPa);

F = carga (N);

A = área da seção transversal do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>);

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

onde:  $\varepsilon$  = deformação específica;

$\Delta \ell$  = deslocamento (mm);

$\ell$  = altura da haste do extensômetro (mm);

Com as tensões e respectivas deformações traçou-se o gráfico tensão-deformação e determinou-se o módulo de elasticidade através da expressão abaixo, em um trecho retilíneo do gráfico.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \cdot 10^{-3}$$

onde: E = módulo de elasticidade (GPa);

$\Delta \sigma$  = intervalo de tensão (MPa);

$\Delta \varepsilon$  = intervalo de deformação específica;

O módulo de elasticidade em cada idade de ensaio foi determinado através da média aritmética dos resultados dos dois ensaios realizados em cada idade.

### 3.10. Moldagem e cura de ladrilhos hidráulicos:

A NBR 9459:1986 padroniza os formatos e dimensões dos ladrilhos hidráulicos mais comumente disponíveis no mercado, sendo os quadrados com dimensões de 20 cm, 25 cm e 33 cm,



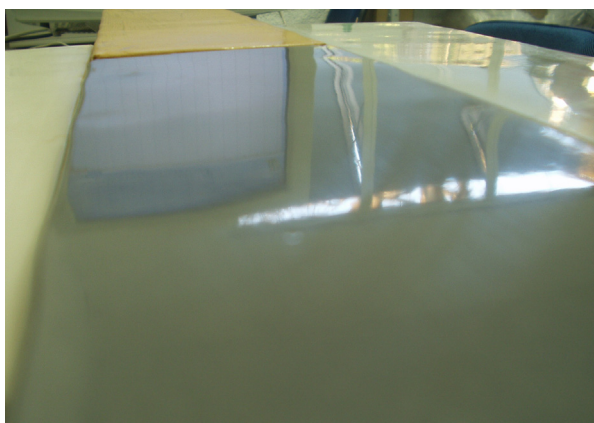
e os retangulares com dimensão de 44 X 40 cm. Entretanto a norma permite a produção de ladrilhos quadrados ou retangulares com diferentes dimensões das indicadas, pois se entende que muitas características dos revestimentos são as mesmas para diferentes dimensões.

Assim as características geométricas dos revestimentos foram determinadas de modo a permitir melhores condições para ensaios (módulo de flexão e desgaste por abrasão), entretanto isso não limita o conhecimento das características dos elementos a revestimentos com essas dimensões, podendo se estender inclusive a outros formatos.

A NBR 9457:1986 especifica a espessura dos ladrilhos hidráulicos em 20 mm, então serão testados revestimentos com 10 mm para verificar a possibilidade de produzir revestimentos com metade da espessura especificada pela referente norma, pois esta redução pode diminuir consumo de material, melhorar condições de transporte e sobrecarga, além de diminuir o custo.

Como os ladrilhos hidráulicos são produzidos mediante moldagem de peças de argamassa elaborada com aglomerantes hidráulicos, a especificação adequada do material utilizado na fabricação da fôrma das peças pode contribuir na obtenção dos efeitos desejados na superfície aparente, dispensando tratamento superficial após a desmoldagem ou assentamento das peças. No entanto o tipo de acabamento superficial é um fator que depende da aplicação dos revestimentos e do efeito que se deseja obter, pois quando os revestimentos forem destinados a paredes eles podem apresentar até mesmo ondulações e outros tipos de texturas que não se aplicam aos pisos.

Para definir o material da fôrma foram produzidos elementos hidráulicos, utilizando as argamassas com traço definido, com fôrmas de diferentes materiais, testando as fôrmas de aço, acrílico e plástico. Com o intuito de facilitar a caracterização dos ladrilhos hidráulicos e buscando a maior potencialidade desses revestimentos, definiu-se o plástico (poliestireno) como material da fôrma por ter possibilitado uma superfície lisa e brilhante, além da disponibilidade e viabilidade comercial. A Figura 3.10 tenta mostrar o bom acabamento superficial do elemento hidráulico produzido em fôrma plástica, sem qualquer tratamento da superfície após desfôrma.



**Figura 3.10** – Acabamento superficial obtido no elemento hidráulico

Após definição do material da fôrma que em contato com a argamassa possibilita o acabamento desejado do revestimento, produziram-se fôrmas metálicas que foram revestidas com uma placa de 1 mm de espessura com o material definido, conforme apresentado na Figura 3.11.



**Figura 3.11** – Fôrma para obtenção do ladrilho hidráulico

A base metálica possibilita uma rigidez adequada para moldagem, além de suportar um grande número de ciclos de moldagem e permitir uma fácil desmoldagem depois da retirada das cantoneiras laterais. O ângulo de 90 graus formado entre a chapa e as cantoneiras resulta em revestimentos com cantos vivos como os porcelanatos com laterais retificadas comercialmente encontrados atualmente. Para impedir a entrada de finos entre a chapa e as cantoneiras utilizou-se um adesivo de silicone que garantiu a estanqueidade da fôrma. Utilizou-se também desmoldante somente nas cantoneiras para impedir a aderência do aço com a argamassa.

Foram elaboradas fôrmas para produção de peças quadradas com dimensão de 20 cm e de peças retangulares de 20 x 100 cm, ambas com possibilidades de 10 e 25 mm de espessura possibilitada pela troca de cantoneiras com diferentes alturas. Essas possibilidades de dimensões e espessuras são necessárias para moldagem de revestimentos de diferentes dimensões requeridas para realização de diferentes tipos de ensaios.

A moldagem dos ladrilhos hidráulicos foi realizada com o auxílio de um vibrador de agulha regularizando, espalhando e compactando a argamassa na fôrma conforme ilustra a Figura 3.12.



**Figura 3.12** – Moldagem de ladrilhos hidráulicos com auxílio de vibrador

As argamassas de alta resistência geralmente adquirem altas resistências nas primeiras idades, pelo refinamento da porosidade e conseqüente hidratação acelerada das partículas. Assim a cura torna-se principalmente importante nas primeiras idades, até mesmo antes da desfôrma das peças, por isso com o intuito de impedir a perda de água da argamassa para o ambiente utilizou-se um plástico como mostra a Figura 3.13.



**Figura 3.13** – Cura dos ladrilhos hidráulicos antes da desfôrma

As peças foram desmoldadas aproximadamente 15 horas após a moldagem e em seguida encaminhadas para cura por imersão até as idades de ensaios. As idades de ensaio foram definidas em 3 dias para verificar o alto desempenho a pequenas idades, e 28 dias para se obter os resultados na idade de referência, essas idades também permitem relacionar os resultados da caracterização da argamassa com a caracterização dos ladrilhos hidráulicos.

### 3.11. Ensaio dimensional e visual de ladrilhos hidráulicos:

O ensaio dimensional de peças de revestimento cerâmico especificado pela NBR 13818:1997 (Anexo S) está diretamente ligado ao processo produtivo, pois avalia as dimensões, retitude e ortogonalidade dos lados, curvatura central e lateral, e empeno do produto final produzido. Entretanto na presente pesquisa não se pretende avaliar o processo produtivo dos revestimentos, e sim as características dos elementos de revestimentos, com isso os ensaios dimensional e visual consistiram em verificar se as peças coincidem com os moldes, se a qualidade da superfície aparente foi alcançada uniformemente e mantida durante a cura, e se as dimensões das peças variaram no intervalo de tempo entre a desmoldagem e o fim da cura.

Essa avaliação foi considerada suficiente, pois se as peças coincidirem com seus moldes, obtiverem e mantiverem acabamento superficial satisfatório e não apresentarem variações de dimensões indesejáveis durante o processo de cura, então se pode dizer que, no caso desses revestimentos hidráulicos moldados, as outras características avaliadas pela NBR 13818:1997 (Anexo S) estão diretamente ligadas com as características geométricas da fôrma.

Para realização dos ensaios dimensional e visual foram moldadas placas de 20 x 20 cm e 10 mm de espessura. O ensaio se iniciou durante a desmoldagem verificando a coincidência das peças com o molde, a análise visual das peças foi realizada após desmoldagem, quando foi observada a uniformidade do acabamento superficial e a qualidade da moldagem, verificando a existência de falhas ou argamassa impregnada na fôrma. Em seguida antes das peças serem encaminhadas para cura foram marcadas e medidas com o mesmo método de medida utilizado no ensaio de retração por secagem. Nas datas de 3 e 28 dias repetiu-se as medidas e a análise visual de superfície com peças saturadas com superfície seca.

A expansão das peças entre a desmoldagem e a retirada da cura foi determinada utilizando a equações a seguir:

$$EC = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100$$

onde: EC = teor de expansão por cura (%);

$l_0$  = medida de dimensão da peça após desmoldagem (mm);

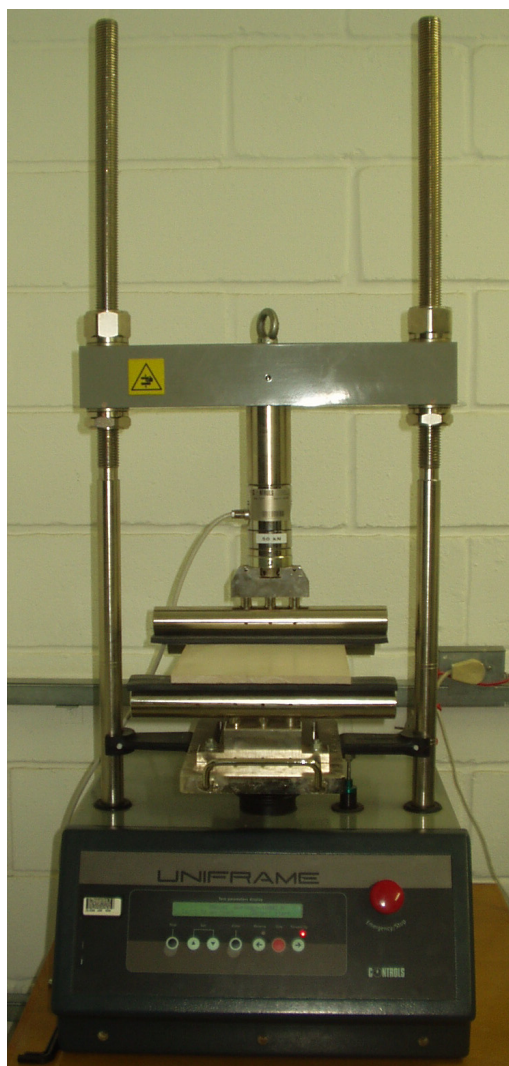
$l_1$  = medida de dimensão da peça saturada superfície seca (mm);

O valor da expansão durante a cura dos ladrilhos hidráulicos produzidos com argamassa clara e escura foi calculado através da média aritmética dos valores obtidos nos ensaios de 3 peças por idade.

### 3.12. Ensaio de flexão de ladrilhos hidráulicos:

Os ensaios de flexão em ladrilhos hidráulicos moldados com as argamassas de traços definidos foram realizados em prensa servo-elétrica até a ruptura, seguindo recomendações da NBR 13818:1997 (Anexo C), solicitando as placas a flexão por três apoios com velocidade de

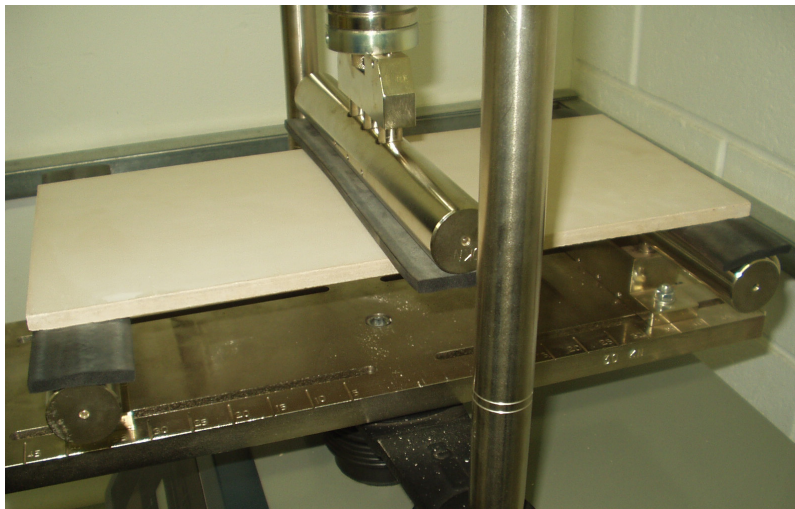
carregamento controlada e igual a 1,0 MPa/s. A Figura 3.14 mostra a prensa juntamente com o dispositivo, utilizado para submeter as placas a flexão, ajustado no pórtico de altura regulável.



**Figura 3.14** – Prensa servo-elétrica utilizada

As placas utilizadas nos ensaios de flexão foram moldadas em fôrmas retangulares de 20 x 100 cm e 10 mm de espessura, em seguida foram cortadas com disco diamantado com dimensões de 20 x 45 cm. Na Figura 3.15 apresenta-se o detalhe de uma placa de ladrilho hidráulico submetida a flexão com 25 mm de saliência em cada lado dos apoios inferiores e portanto 40 cm de comprimento entre apoios. Os apoios são barras cilíndricas com 38 mm de diâmetro, sendo que o apoio superior permite uma rotação em torno de um eixo transversal paralelo ao plano da placa, assim como uma dos apoios inferiores, o outro apoio inferior permite uma pequena rotação em torno do próprio eixo longitudinal, esses graus de liberdade permitem a flexão das placas sem a solicitação em outras direções.

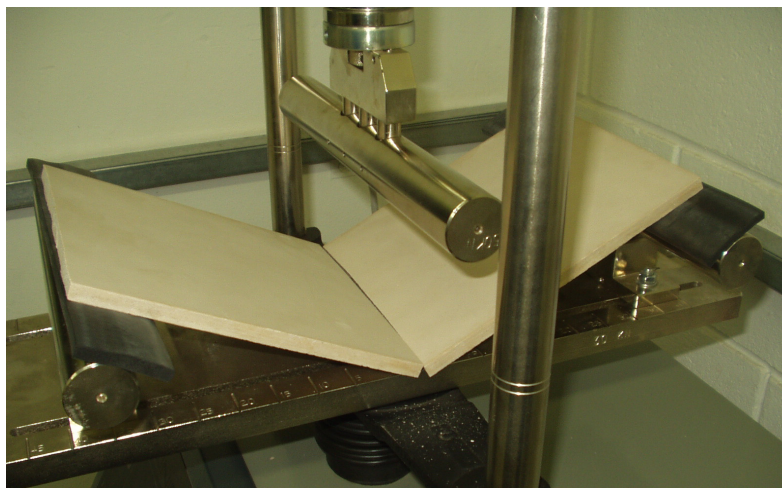




**Figura 3.15** – Ladrilho hidráulico solicitado à flexão

Tomou-se o cuidado de posicionar a parte acabada das peças para cima para simular a solicitação dos ladrilhos hidráulicos após assentamento, também se pode observar na Figura 3.15 o posicionamento de borrachas entre os apoios e a placa para possibilitar uma melhor transferência de carga, distribuindo-as uniformemente e minimizando possíveis erros de ensaios ocasionados por concentração de tensões.

A ruptura das placas no terço central mostrada na Figura 3.16 permitiu a validação dos ensaios das placas de revestimento hidráulicos submetidos a flexão, pois esse tipo de ruptura representa a correta solicitação das placas e confirma a ausência de falhas no processo de moldagem.



**Figura 3.16** – Ruptura no terço central dos ladrilhos hidráulicos solicitados à flexão

A carga de ruptura e o módulo de resistência à flexão foram calculados utilizando a força de ruptura obtida no ensaio, as disposições das peças e as equações a seguir:

$$CR = \frac{F \cdot L}{b}$$

onde: CR = carga de ruptura (N);

F = força de ruptura (N);

L = distância entre as barras de apoio (mm);

b = largura da placa ao longo da ruptura (mm)

$$\text{MRF} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot e_{\min}^2}$$

onde: MRF = módulo de resistência à flexão (MPa);

$e_{\min}$  = espessura mínima da placa (mm);

O módulo de resistência à flexão avalia o material que compõem as peças, já a carga de ruptura das peças submetidas à flexão está relacionada com as características geométricas das peças.

A carga de ruptura e o módulo de resistência à flexão para cada revestimento (claro e escuro) foram determinados através da média aritmética dos valores obtidos nos ensaios de 4 peças por idade.

### 3.13. Desgaste por abrasão de ladrilhos hidráulicos:

Para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão dos ladrilhos hidráulicos utilizou-se a NBR 12042:1992, o ensaio consiste em submeter corpos-de-prova da mesma amostra a desgaste em disco giratório de material duro, alimentado com abrasivo (areia quartzosa), o desgaste é indicado pela média da redução da espessura, em milímetros, de dois corpos-de-prova após um percurso equivalente a 1000 m. O equipamento utilizado é a máquina Amsler, também chamada de Tribômetro Amsler, apresentada na Figura 3.17.



**Figura 3.17** – Máquina Amsler utilizada no ensaio de desgaste por abrasão

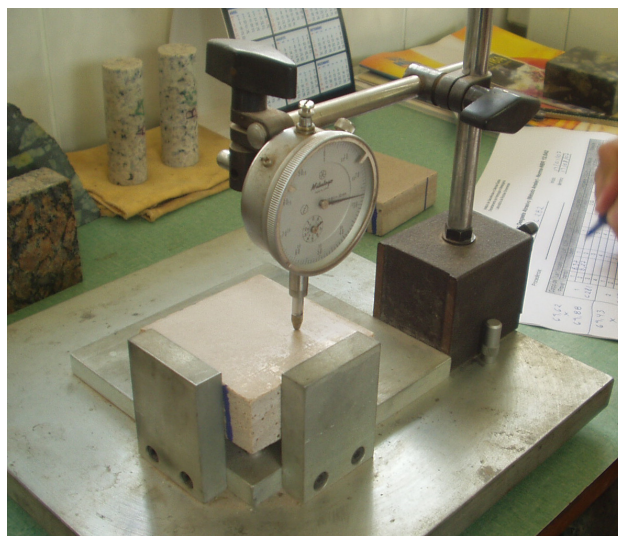
Após moldagem e desfôrma de peças de 20 x 20 cm com 25 mm de espessura foram cortadas peças com dimensões de 7 x 7 cm, mantendo a espessura, utilizando uma serra policorte

com disco rotativo diamantado, de 500 mm de diâmetro, refrigerado por jato de água. A Figura 3.18 ilustra o processo de corte das peças utilizadas no ensaio de desgaste por abrasão.



**Figura 3.18** – Corte de peça com serra policorte e disco rotativo diamantado ( $\varnothing$  500 mm)

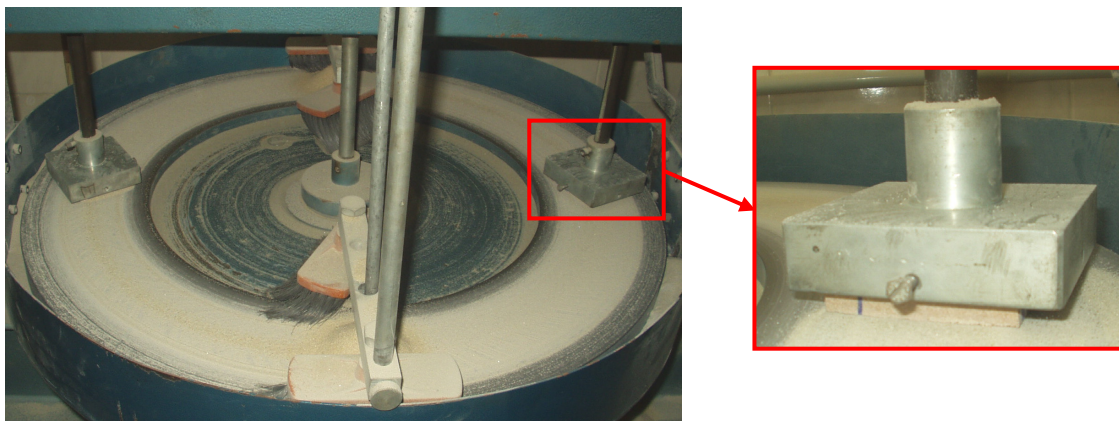
Inicialmente mediu-se a espessura das peças utilizando um relógio comparador com precisão de 0,01 mm e base fixa, em quatro pontos, nas diagonais, a 30 mm do vértice como ilustrado na Figura 3.19.



**Figura 3.19** – Medida de espessura com relógio comparador

Após as medidas os dois corpos-de-prova foram colocados na máquina Amsler, onde ficam dispostos diametralmente opostos, sob carga de 66 N em um disco de ferro fundido, com 2 m de perímetro no centro dos corpos-de-prova. A Figura 3.20 apresenta a disposição dos corpos-de-prova sobre o disco metálico durante o ensaio, além de detalhar um corpo-de-prova sendo solicitado à abrasão.





**Figura 3.20** – Ensaio de abrasão em máquina Amsler com detalhe do corpo-de-prova

O disco é alimentado com areia normal IPT 50 (areia quartzosa, passante na peneira de malha quadrada com abertura de 0,6 mm e retida na peneira de malha quadrada com abertura de 0,3 mm) com vazão de  $72 \text{ cm}^3/\text{min}$  e posto a girar com 30 rpm, enquanto os corpos-de-prova rotacionam a 0,6 rpm em torno de seu próprio eixo perpendicular a superfície de contato.

Após o equivalente a 500 m e 1000 m de percurso, os corpos-de-prova foram limpos com escova macia e sua espessura novamente registrada, nos mesmos quatro pontos, com o relógio comparador. Após os 500 m iniciais os dois corpos-de-prova foram recolocados na máquina, com as posições trocadas.

O desgaste em cada corpo-de-prova é determinado pela média dos desgastes nos quatro pontos medidos (diferença entre a medida inicial de espessura e a medida após percurso de 1000 m), e o desgaste dos revestimentos produzidos com argamassa clara e escura determinado pela média dos desgastes dos dois corpos-de-prova ensaiados em cada idade.

### **3.14. Absorção de água de ladrilhos hidráulicos:**

O ensaio para determinação da absorção de água dos ladrilhos hidráulicos foi realizado seguindo recomendações da NBR 9778:1987 e da NBR 13818:1997 (Anexo B). Inicialmente foram moldados ladrilhos hidráulicos com dimensões de 20 x 20 cm e espessura de 10 mm, após a desmoldagem as peças foram encaminhadas para cura por imersão, posicionadas verticalmente com o nível de água de aproximadamente 5 cm acima das placas. Na data do ensaio as peças foram retiradas da cura e após secagem de superfície com toalha absorvente foi determinada a massa saturada com superfície seca de cada peça em balança com resolução de 0,01 % da massa da peça, em seguida as peças foram encaminhadas para a estufa e mantidas por 24 horas a temperatura de  $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  onde atingiram constância de massa em pesagens com intervalo de 4 horas, então as peças foram retiradas da estufa e após equilíbrio térmico ( $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) foi determinada a massa seca de cada peça na mesma balança utilizada na medida anterior.

A absorção de água em cada peça de ladrilho hidráulico foi determinada utilizando as equações a seguir:

$$\text{Abs} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100$$

onde: Abs = teor de absorção de água (%);

$m_1$  = massa da peça saturada superfície seca (g);

$m_2$  = massa da peça seca em estufa a  $60 \pm 5$  °C (g);

O valor da absorção de água dos ladrilhos hidráulicos produzidos com argamassa clara e escura foi determinado através da média aritmética dos valores obtidos nos ensaios de 3 peças por idade.

### 3.15. Retração por secagem de ladrilhos hidráulicos:

O ensaio de retração por secagem foi realizado conjuntamente com o ensaio de absorção de água medindo as peças de revestimentos hidráulicos saturadas com superfície seca, nas duas direções com dimensões de 20 cm. O equipamento utilizado para medição foi uma torre eletrônica de medição com resolução de  $5 \times 10^{-6}$  m sobre base plane, onde as peças de ladrilhos hidráulicos foram apoiadas antes de serem medidas como se pode ver na Figura 3.21.



**Figura 3.21** – Medida de ladrilhos hidráulicos em torre eletrônica de medição

Como se buscava a determinação da variação de dimensão das peças por direção optou-se por apoiar uma das faces e através de medidas pontuais na face oposta, determinar a variação nessa direção. Então nas datas de ensaio foram marcados 3 pontos em cada direção, onde foram realizadas 3 medições por ponto antes a após a secagem das peças, a variação das médias das três

medições possibilitou determinação da retração por ponto, sendo a média das retrações dos 3 pontos a retração naquela direção, e a média da retração nas 2 direções de 20 cm a retração de cada peça.

Apesar da dificuldade de medida de variações consideravelmente pequenas comparadas com as dimensões das peças, as médias aritméticas de um grande número de medidas possibilitou a determinação da retração por secagem dos ladrilhos hidráulicos.

Visando resultados de ensaios representativos à utilização desses revestimentos as peças foram aquecidas somente até 60° C que simula a temperatura alcançada por esses revestimentos expostos a insolação, também se tomou o cuidado em determinar primeiramente a massa e dimensões da peça saturada, pois o aquecimento das peças pode simular uma cura térmica e alterar as características do revestimento pela aceleração do processo de hidratação do cimento, por esse mesmo motivo foram moldadas e ensaiadas diferentes peças para as idades de 3 e 28 dias, para o aquecimento das peças durante a secagem na primeira idade não alterar as medidas de absorção e retração por secagem na idade posterior.

A retração por secagem foi determinada utilizando a equações a seguir:

$$RS = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot 100$$

onde: RS = teor de retração por secagem (%);

$l_1$  = medida de dimensão da peça saturada superfície seca (mm);

$l_2$  = medida de dimensão da peça seca em estufa a  $60 \pm 5$  °C (mm);

Como no ensaio de absorção foram ensaiados 3 peças por idade de ensaio, o valor da retração por secagem dos ladrilhos hidráulicos produzidos com argamassa clara e escura foi determinado através da média aritmética desses 3 valores.

### **3.16. Resistência ao ataque químico de ladrilhos hidráulicos:**

O ensaio de ataque químico aos ladrilhos hidráulicos desenvolvidos, simula a ação de produtos químicos que normalmente entram em contato com esses revestimentos, como é o caso de produtos de limpeza e produtos para tratamento de água de piscina. A ação de outros produtos químicos está diretamente relacionada com o local de aplicação deste revestimento, sendo necessário um estudo direcionado para utilização destes ladrilhos em locais específicos.

Os reagentes utilizados foram o cloreto de amônia e o hipoclorito de sódio com aproximadamente 10 % de cloro ativo, indicados pela NBR 13818:1997 (Anexo H). A solução que simula a ação de produtos químicos domésticos é composta de 100 g/L de cloreto de amônia, e a que simula a ação química de produtos para tratamento de água de piscina é composta de 20 mg/L de hipoclorito de sódio.

O ensaio consiste em submeter os revestimentos desenvolvidos à ação dos reagentes e analisar através de avaliação visual a olho nu, ou com auxílio de óculos caso sejam usados habitualmente, qualquer alteração na superfície das peças.

Como mostra a Figura 3.22 foi utilizada uma serra policorte com disco rotativo diamantado de 110 mm de diâmetro e refrigeração por jato de água, para cortar peças de 20 x 20 cm e 10 mm de espessura em peças menores de aproximadamente 10 x 10 cm.



**Figura 3.22** – Corte de peça com serra policorte e disco rotativo diamantado ( $\varnothing$  110 mm)

Na data dos ensaios as peças foram imersas verticalmente nas soluções definidas, contidas por recipientes de vidro (Becker), onde permaneceram por 12 dias a uma profundidade de  $25 \pm 2$  mm, a temperatura de  $25 \pm 5$  °C. As análises visuais foram realizadas antes da imersão e após a retirada das peças das soluções, mediante lavagem e permanência das peças a temperatura e umidade ambiente por 24 horas.

Segundo a NBR 13818:1997 (Anexo H), para a classe de reagentes dos produtos químicos domésticos, tendo o cloreto de amônia como agente agressivo, e dos produtos para tratamento de água de piscina, tendo o hipoclorito de sódio como agente agressivo, este ensaio representa um tempo previsto de ataque químico de 24 horas.

Antes da imersão das peças foi determinado o pH de cada solução utilizando papel indicador de pH, a solução de cloreto de amônia apresentou pH 8, e a solução de hipoclorito de sódio apresentou pH 7.

Foram submetidas à ação química e analisadas 3 peças por ensaio, sendo avaliados os revestimentos produzidas com argamassas clara e escura nas duas idades de ensaio definidas (3 e 28 dias).

---

## 4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

---

Este item contém as etapas do procedimento experimental realizado, que visa a produção e avaliação de ladrilhos hidráulicos. Iniciou-se caracterizando os agregados e os demais materiais empregados na pesquisa, em seguida é apresentado um estudo de dosagem com base no estudo de empacotamento de partículas, e a caracterização das argamassas elaboradas. É apresentada também uma avaliação completa dos revestimentos hidráulicos desenvolvidos, além de relatar alguns testes práticos e o cálculo do custo dos materiais que compõem esses revestimentos.

### 4.1. Seleção dos materiais:

Nesse item serão apresentados os materiais selecionados para elaboração da argamassa (base para produção dos revestimentos), suas características, e justificativas de escolha. Algumas características foram obtidas com os fabricantes e outras foram determinadas como descrito na metodologia.

#### 4.1.1. Agregados miúdos:

Como fator relevante para a escolha dos agregados além de ser utilizada a granulometria foi levado em conta a disponibilidade comercial dos agregados na região da cidade de São Carlos, e a morfologia das partículas que os compõem, pois agregados mais arredondados possuem menor área superficial e supostamente necessitam de menos água para molhá-los, o que pode reduzir a quantidade de água no produto final podendo aumentar a resistência mecânica e refinar a porosidade.

Os ladrilhos hidráulicos por se tratar de um revestimento com pequena espessura, comparado com revestimentos em que são empregados micro-concretos e argamassas, necessitam de um maior refinamento no estudo granulométrico de seus agregados. Por essa razão na distribuição granulométrica dos agregados selecionados, assim como na determinação do módulo de finura e da dimensão máxima do agregado foram consideradas duas peneiras adicionais (0,075 mm e 0,037 mm) que não são comumente utilizadas no estudo de agregados (NBR 7217:1987) destinados à argamassa e concretos.

Os agregados convencionais que serão utilizados neste estudo são:

- areia Itaporanga: areia quartzosa de cava retirada de uma jazida próxima a cidade de São Carlos proveniente da mineradora Itaporanga;
- areia Descalvado: areia quartzosa proveniente de uma mineradora situada na cidade de Descalvado na região de São Carlos.

Os ensaios com as areias Itaporanga e Descalvado conduziram aos resultados demonstrados a seguir:

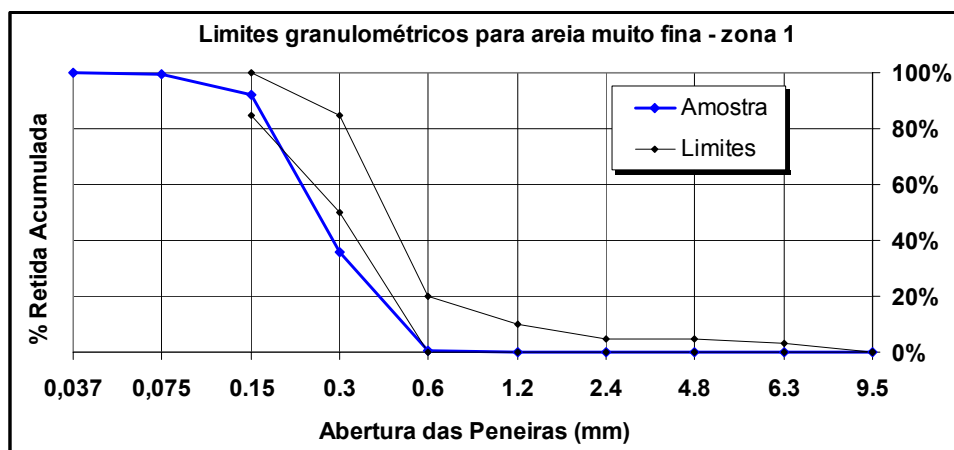
#### Areia Itaporanga:

A distribuição granulométrica e a curva granulométrica da areia Itaporanga estão demonstradas na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 respectivamente, constando também na Figura 4.1 os limites granulométricos da areia muito fina (zona 1).

**Tabela 4.1 – Composição granulométrica da areia Itaporanga**

Peneiras ABNT		Massa retida (g)	Massa acumulada (g)	Teor retido (%)	Teor acumulado (%)
Malha #	Abertura (mm)				
4	4,8	0,0	0,0	0	0
8	2,4	0,0	0,0	0	0
16	1,2	0,4	0,4	0	0
30	0,6	1,9	2,3	0	0
50	0,3	176,1	178,4	35	36
100	0,15	282,0	460,4	56	92
200	0,075*	37,3	497,7	7	100
400	0,037*	2,1	499,8	0	100
Fundo	< 0,037	0,2	500,0	0	100
Total		500,0		100	

\* Peneiras adicionais



**Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia Itaporanga**

Pode-se considerar que a areia Itaporanga se enquadra na zona 1 (areia muito fina);

Demais resultados:

- módulo de finura = 3, 28 (NBR 7217:1987 considerando peneiras adicionais)
- dimensão máxima do agregado = 0,6 mm (NBR 7217:1987 considerando peneiras adicionais)
- massa específica = 2,63 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 9776:1987);
- massa unitária no estado solto = 1,47 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 7251:1982);

- massa unitária no estado compactado seco = 1,66 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 7810:1983);
- número de angulosidade médio = 3,8 (BS 812:1975 Part 1).

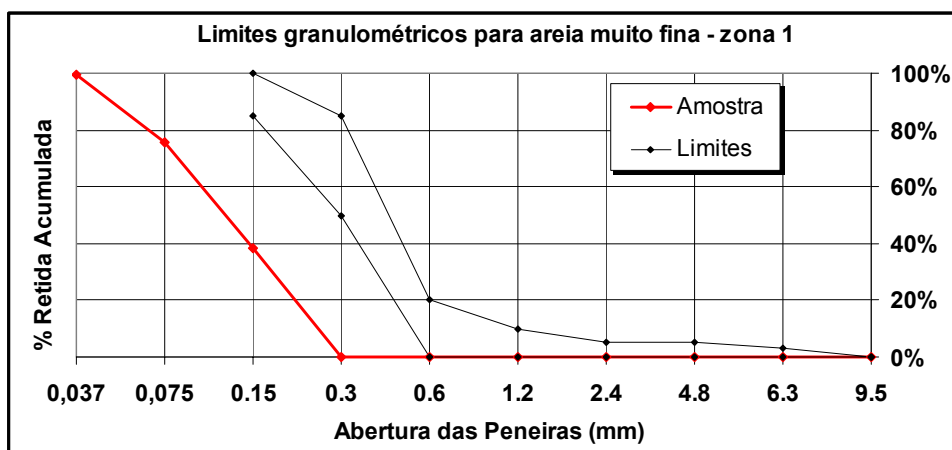
#### Areia Descalvado:

A distribuição granulométrica e a curva granulométrica da areia Descalvado estão demonstradas na Tabela 4.2 e na Figura 4.2 respectivamente, constando também na Figura 4.2 os limites granulométricos da areia muito fina (zona 1).

**Tabela 4.2 – Composição granulométrica da areia Descalvado**

Peneiras ABNT		Massa retida (g)	Massa acumulada (g)	Teor retido (%)	Teor acumulado (%)
Malha #	Abertura (mm)				
4	4,8	0,0	0,0	0	0
8	2,4	0,0	0,0	0	0
16	1,2	0,0	0,0	0	0
30	0,6	0,0	0,0	0	0
50	0,3	0,0	0,0	0	0
100	0,15	192,6	192,6	39	39
200	0,075*	185,2	377,8	37	76
400	0,037*	118,9	496,7	24	99
Fundo	< 0,037	2,9	499,6	1	100
	Total	499,6		100	

\* Peneiras adicionais



**Figura 4.2 – Curva granulométrica da areia Descalvado**

A curva granulométrica da areia Descalvado fica abaixo da zona 1 (areia muito fina);  
Demais resultados:

- módulo de finura = 2, 14 (NBR 7217:1987 considerando peneiras adicionais)
- dimensão máxima do agregado = 0,3 mm (NBR 7217:1987 considerando peneiras adicionais)
- massa específica = 2,63 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 9776:1987);
- massa unitária no estado solto = 1,38 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 7251:1982);



- massa unitária no estado compactado seco = 1,59 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 7810:1983);
- número de angulosidade médio = 6,5 (BS 812:1975 Part 1).

#### **Areia Jundu:**

O agregado denominado nesse trabalho de areia Jundu, se trata de um agregado bem mais fino que os agregados geralmente utilizados na construção civil, é uma areia quartzosa comercializada pela Mineração Jundu Ltda, que foi escolhida por apresentar partículas menores que as partículas presentes nas demais areias utilizadas (Itaporanga e Descalvado). A areia Jundu foi utilizada para melhorar o empacotamento das partículas do traço, melhorando a continuidade das dimensões das partículas dos agregados com a dos aglomerantes, além de melhor preencher os vazios existentes entre as partículas maiores de agregado e melhorar o acabamento superficial dos ladrilhos, fator importante na produção de revestimentos.

Algumas características da areia Jundu estão a seguir, sendo sua composição química apresentada na tabela seguinte:

- massa específica = 2,63 kg/dm<sup>3</sup> (NBR 9776:1987);
- teor de material retido na malha 500 (abertura de 25 µm) = 0,7 %
- perda ao fogo = 0,08 %.

**Tabela 4.3 – Composição química da areia Jundu**

<b>Elementos</b>	<b>Valores médios (%)</b>
Sílica amorfa (SiO <sub>2</sub> )	> 99,00
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	< 0,50
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	< 0,05
Titânio (TiO <sub>2</sub> )	< 0,04

#### **4.1.2. Cimento:**

Na escolha dos cimentos para fabricação de ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho não basta levar em conta somente a resistência do material ou o desempenho frente a meios agressivos, mas também as características decorativas e o processo de produção. Mesmo levando em conta todos esses fatores é possível utilizar vários tipos de cimento na produção desses revestimentos dependendo das características principais que se deseja atribuir ao revestimento e das necessidades a serem atendidas em cada aplicação.

Na presente pesquisa, visando atender ao maior número possível de aplicações, foram selecionados dois tipos de cimentos estruturais, O CPB 40 Estrutural e o CP V ARI RS. Ambos os cimentos possuem altas resistências iniciais de forma a beneficiar o processo produtivo, podem atribuir características decorativas aos revestimentos com auxílio de pigmentos, e podem alcançar altas resistências mecânicas e químicas com o uso de adições.



**CPB 40 Estrutural:**

O CPB 40 Estrutural, é um cimento Portland branco com classe de resistência de 40 MPa, composto por clínque branco + sulfatos de cálcio (75 a 100 %) e calcário (0 a 25 %) segundo a NBR 12989:1993. Este cimento foi escolhido principalmente pela vantagem estética buscando vantagens decorativas.

As informações técnicas do CPB 40 Estrutural, produzido e comercializado pela Votorantim Cimentos estão expressas na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Dados técnicos do CPB 40 Estrutural**

Característica		Valores médios	Unidade
Massa específica (NBR NM 23:1998)		3,10	kg/dm <sup>3</sup>
Área específica (BET)		500	m <sup>2</sup> /kg
Perda ao fogo		9,97	%
Teor retido na peneira # 325		1,50	%
Teor de MgO		3,50	%
Teor de SO <sub>3</sub>		3,35	%
Teor de resíduo insolúvel		1,11	%
Brancura		80,44	%
Tempo de Pega	Início	153	minutos
	Fim	200	minutos
Resistência à compressão	3 dias	30,4	MPa
	7 dias	35,6	MPa
	28 dias	43,0	MPa

Apesar de não denominado como alta resistência inicial (ARI) este cimento possui altas resistências a poucas idades.

**CP V ARI RS:**

O CP V ARI RS é um cimento Portland de alta resistência inicial, composto por clínque + sulfatos de cálcio (95 a 100 %) e calcário (0 a 5 %) segundo a NBR 5733:1991 e como é resistente a sulfatos possui adição de escória segundo a NBR 5737:1992. Este cimento foi escolhido pela alta resistência inicial e também por possuir escória em sua composição, pois a escória além de atribuir resistência a sulfatos diminui o calor de hidratação comparado com o cimento ARI sem escória. Outro fator importante na escolha do CP V ARI RS está relacionado a mistura produzida, pois nesse caso tem-se a possibilidade de substituir a adição (escória) e usando o CP V ARI Plus como base adaptar a mistura a resistir a outro agente agressivo, essa substituição de adição causaria menos alterações no produto do que se fosse escolhido o cimento ARI sem adição e fosse necessário inserir adições.

As informações técnicas do CP V ARI RS, produzido e comercializado pela Holcim Brasil S.A. estão expressas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Dados técnicos do CP V ARI RS**

Característica	Valores médios	Unidade	
Massa específica (NBR NM 23:1998)	3,08	kg/dm <sup>3</sup>	
Área específica (BET)	350	m <sup>2</sup> /kg	
Perda ao fogo	2,68	%	
Teor retido na peneira # 325	8,00	%	
Teor de CO <sub>2</sub>	2,49	%	
Teor de SO <sub>3</sub>	2,49	%	
Teor de resíduo insolúvel	0,79	%	
Teor de escória de alto forno	30	%	
Tempo de Pega	Início	170	minutos
	Fim	260	minutos
Resistência à compressão	1 dia	18,0	MPa
	3 dias	31,0	MPa
	7 dias	38,0	MPa
	28 dias	46,4	MPa

#### 4.1.3. Adição:

Na escolha das adições levou-se em conta a disponibilidade do produto no mercado, além da reatividade e refinamento das partículas que as compõe, visando o efeito microfíler e a reação pozolânica. O efeito filer ou microfíler é o preenchimento dos vazios existente entre as partículas de cimento por partículas menores de adição. A reação pozolânica é a reação química entre o hidróxido de cálcio (C-H), gerado durante a hidratação do cimento portland (elemento frágil produzido durante a hidratação do cimento), e as partículas de adição, produzindo um composto bem mais resistente e bem menos solúvel, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), morfologicamente diferente do C-S-H produzido durante a hidratação do cimento. Com isso o uso de adições pozolânicas traz os seguintes benefícios à argamassa, que neste trabalho será base dos revestimentos hidráulicos:

- Estado fresco:
  - redução ou eliminação da exsudação;
  - redução ou eliminação da segregação;
- Estado endurecido:
  - aumento da impermeabilidade;
  - aumento das resistências mecânicas (compressão, abrasão e tração);
  - proteção contra ataques químicos;
  - melhor acabamento das peças;
  - maior durabilidade.

Considerando também as características decorativas que os revestimentos hidráulicos devem possuir, foram escolhidos como adições a metacaulinita branca (MB), que será utilizada

juntamente com o cimento CPB 40 Estrutural (branco) compondo uma mistura clara, e a sílica ativa de ferro silício (SFS), que será utilizada juntamente com o cimento CP V ARI RS (acinzentado) compondo uma mistura mais escura. Produzindo uma mistura clara e outra mais escura pretende-se utilizar a mistura clara (CPB 40 + MB) para realçar a coloração dos pigmentos, principalmente os mais claros, e combinar a mistura mais escura (CP V ARI RS + SFS) com pigmentos mais escuros ou ainda elaborar outra tonalidade com os pigmentos mais claros.

Cabe ressaltar que esta escolha foi direcionada a realização da presente pesquisa, entretanto os diversos tipos de adições podem propiciar muitas combinações com os cimentos comercializados disponibilizando um grande número de possibilidades para diferentes tipos de aplicações.

#### **Metacaulinita:**

A metacaulinita utilizada é produzida e comercializada pela Metacaulim do Brasil Ltda, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.6 e algumas de suas características estão a seguir:

- massa específica = 2,60 kg/dm<sup>3</sup>;
- área específica = 30.000 m<sup>2</sup>/kg (BET);

**Tabela 4.6 – Composição química da metacaulinita**

<b>Elementos</b>	<b>Valores médios (%)</b>
Sílica amorfa (SiO <sub>2</sub> )	51,00
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	41,00
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	< 3,00
Titânio (TiO <sub>2</sub> )	< 1,00
Cálcio (Cão)	< 0,50
Potássio (K <sub>2</sub> O)	< 0,50
Magnésio (MgO)	< 0,40
Sódio (Na <sub>2</sub> O)	< 0,10
Enxofre (SO <sub>3</sub> )	< 0,10

#### **Sílica ativa de Fe-Si:**

A sílica ativa utilizada é comercializada pela Elkem Materials South America Ltda, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.7 e algumas de suas características estão a seguir:

- massa específica = 2,10 kg/dm<sup>3</sup>;
- área específica = 20.000 m<sup>2</sup>/kg (BET);

**Tabela 4.7 – Composição química da sílica ativa de Fe-Si**

<b>Elementos</b>	<b>Valores médios (%)</b>
Sílica amorfa (SiO <sub>2</sub> )	95,25
Potássio (K <sub>2</sub> O)	1,33
Magnésio (MgO)	0,49
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,35
Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,22
Cálcio (CaO)	0,17
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,17
Manganês (MnO)	0,11
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,04

#### 4.1.4. Aditivo:

O uso de aditivo superplastificante é justificado pela necessidade de redução de água de amassamento na argamassa para refinamento da porosidade, que beneficia tanto os fatores de resistência quanto os de durabilidades, e também pelo uso de agregados e aglomerantes muito finos, fundamentais para o bom acabamento superficial, que demandam mais água que os materiais utilizados em argamassas convencionais.

Entre os aditivos superplastificantes existentes no mercado, dois foram pré-escolhidos para verificação de compatibilidade e teste de desempenho com os cimentos utilizados no presente trabalho. Estes aditivos são tradicionalmente utilizados no mercado de concreto e argamassa e vem apresentando bom resultados em ensaios realizados no LMABC, são eles o ADVA Cast e o GLENIUM 51.

O uso dos aditivos superplastificantes traz benefícios à argamassa, base da produção dos revestimentos hidráulicos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido citados a seguir:

- Estado fresco:
  - alta taxa de redução de água (40% aproximadamente);
  - melhor aderência e textura da superfície;
  - melhor coesão e trabalhabilidade;
  - redução da exsudação.
- Estado endurecido:
  - alta resistência à compressão axial inicial e final;
  - aumento do módulo de elasticidade;
  - redução da permeabilidade;
  - redução da porosidade.

**ADVA Cast:**

O aditivo superplastificante ADVA Cast é comercializado pela Grace Brasil Ltda, cujos dados técnicos apresentam-se na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 – Dados técnicos do aditivo ADVA Cast**

Função principal	Superplastificante de 3ª geração
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Bege claro
Densidade	1,08 kg/dm <sup>3</sup>
Teor de sólidos (NBR 10908:1990)	30 %
Viscosidade	Baixa

**GLENIUM 51:**

O aditivo superplastificante GLENIUM 51 é comercializado pela MBT Brasil Indústria e Comércio Ltda, cujos dados técnicos apresentam-se na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9 – Dados técnicos do aditivo GLENIUM 51**

Função principal	Superplastificante de 3ª geração
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Bege
Densidade	1,09 kg/dm <sup>3</sup>
Teor de sólidos (NBR 10908:1990)	31 %
Viscosidade	Baixa

**4.1.5. Pigmento:**

Os pigmentos serão utilizados para colorir a argamassa, atribuindo aos revestimentos, produzidos com essa argamassa, características decorativas. O produto selecionado foi o RHEOCOLOR, comercializado pela Degussa Construction Chemicals Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. A principal vantagem desse produto está relacionado a prévia dispersão dos pigmentos, podendo melhorar a homogeneidade da mistura quando aplicado.







RHEOCOLOR são dispersões de corantes prontas para colorir concreto e argamassa cimentícea, que proporciona os seguintes benefícios:

- Estado fresco:
  - mínima alteração das características do traço desenvolvido;
  - consistência de cores;
  - rápida dispersão na mistura.

- Estado endurecido:
  - alta durabilidade da coloração;
  - melhora nas características de acabamento;
  - realce na coloração.

O pigmento líquido RHEOCOLOR, de aspecto pastoso, tem como função principal a coloração e como base química a dispersão de pigmentos inorgânicos (óxidos de ferro). Algumas características e as cores disponíveis do produto estão apresentadas na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10 – Características dos pigmentos RHEOCOLOR**

Pigmento	Cores referenciais		Teor de sólidos (%) (NBR 10908:1990)	Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )
3987	Charcoal		66,3	2,33
C32	Quarry Red		65,4	2,38
C21	Adobe Tan		66,6	2,27
C26	Antique Cork		63,5	2,23
C12	Mesa Beige		68,4	2,25
C20	Amarelo		67,5	2,13

As cores podem ser utilizadas para se criar um leque de opções de cores, desde as descritas no catálogo de cores até as desenvolvidas in loco.

## 4.2. Dosagem da argamassa:

### 4.2.1. Empacotamento das partículas dos agregados:

No estudo do empacotamento dos agregados convencionais selecionados utilizaram-se os três modelos indicados para encontrar a melhor composição entre as areias Itaporanga e Descalvado, que serão comparados através da massa unitária no estado compactado seco.

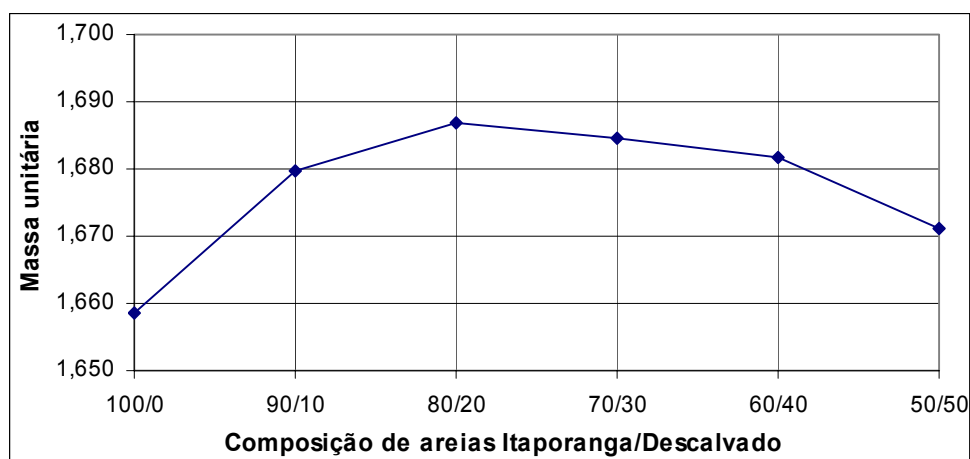
#### Modelo 1:

Para determinar a melhor proporção entre as areias Itaporanga e Descalvado, estabeleceram-se diversas combinações de proporções com variação de 10 %, em seguida mediu-se a massa unitária no estado seco (NBR 7810:1983) de cada combinação como indicado na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11** – Composição das areias Itaporanga e Descalvado - Modelo 1

Proporção entre os agregados miúdos Itaporanga / Descalvado (% / %)	Quantidade de areia Itaporanga (kg)	Quantidade de areia Descalvado (kg)	Incremento de areia Descalvado (kg)	Massa total da mistura em 3 litros (kg)	Massa unitária no estado compactado seco (kg/dm <sup>3</sup> )
100/0	6,0	0,0		4,976	1,659
90/10	6,0	0,667	+ 0,67	5,039	1,680
80/20	6,0	1,500	+ 0,83	5,061	1,687
70/30	6,0	2,571	+ 1,07	5,054	1,685
60/40	6,0	4,000	+ 1,43	5,046	1,682
50/50	6,0	6,000	+ 2,00	5,014	1,671

Na Figura 4.3 pode-se observar a variação da massa unitária no estado compactado seco de acordo com as diferentes combinações entre as areias Itaporanga e Descalvado.

**Figura 4.3** – Variação da massa unitária nas diversas proporções entre as areias

No Modelo 1, de acordo com a Figura 4.3 pode-se concluir que a melhor proporção entre as areias é a composta por 80 % de areia Itaporanga e 20 % de areia Descalvado, pois foi essa a proporção que apresentou maior massa unitária no estado compactado seco (1,687 kg/dm<sup>3</sup>) e consequentemente proporcionou um maior preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de agregado. Entretanto não se conhece o comportamento da massa unitária no intervalo entre as diversas proporções, que se desejado poderia ser refinado principalmente no intervalo entre as combinações 80/20 e 70/30 onde pode estar localizado o pico da curva.

### Modelo 2:

Para determinar a proporção entre as areias Itaporanga e Descalvado pelo Modelo 2, seguiu-se a marcha de cálculos a seguir:

- Determinação da fração de cheios  $F_{ch}$ :

$$F_{ch} = \frac{\gamma_{(Itaporanga)comp.}}{\rho_{Itaporanga}} = \frac{1,66}{2,63} = 0,631$$

- Determinação da fração de vazios a ser ocupada pelo agregado menor  $F_{vz}$ :

$$F_{vz} = 1 - F_{ch} = 1 - 0,631 = 0,369$$

- Determinação da massa de cada areia para ocupar um volume de  $V = 3 \text{ dm}^3$  (fixado para possibilitar o ensaio de determinação da massa unitária no estado compactado seco):

- areia Itaporanga:  $m_{\text{Itaporanga}} = \gamma_{(\text{Itaporanga})\text{comp.}} \times V = 1,66 \times 3 = 4,98 \text{ Kg}$

- areia Descalvado:  $m_{\text{Descalvado}} = F_{vz} \times \gamma_{(\text{Descalvado})\text{comp.}} \times V = 0,369 \times 1,59 \times 3 = 1,76 \text{ Kg}$

- composição de areias:  $m_{\text{total}} = m_{\text{Itaporanga}} + m_{\text{Descalvado}} = 4,98 + 1,76 = 6,74 \text{ Kg}$

- Determinação da proporção de cada areia que estabelece a composição entre as areias Itaporanga e Descalvado pelo Modelo 2:

- areia Itaporanga:  $\frac{m_{\text{Itaporanga}}}{m_{\text{total}}} \times 100 = \frac{4,98}{6,74} \times 100 = 74 \%$

- areia Itaporanga:  $\frac{m_{\text{Descalvado}}}{m_{\text{total}}} \times 100 = \frac{1,76}{6,74} \times 100 = 26 \%$

Após os cálculos obteve-se a composição, 4,98 kg de areia Itaporanga e 1,76 kg de areia Descalvado, e determinou-se a massa unitária no estado compactado seco (NBR7810:1983) que resultou em  $1,689 \text{ kg/dm}^3$ .

Apesar desse método ser baseado no preenchimento dos vazios e o cálculo da massa de cada agregado, na determinação da composição, ser determinado de modo a ocupar o volume de  $3 \text{ dm}^3$  (para possibilitar o ensaio de determinação da massa unitária no estado compactado seco) observa-se que a massa da composição de areias não ocupa exatamente o volume de  $3 \text{ dm}^3$ , na verdade sobra material após o preenchimento do recipiente para determinação da massa unitária no estado compactado seco. Isso porque as partículas menores não ocupam exatamente o vazio entre as partículas maiores, existindo ainda um espaço entre partículas.

### Modelo 3:

Neste modelo foi determinada uma distribuição granulométrica utilizando a equação proposta por Alfred com os diâmetros das partículas correspondentes aos diâmetros com quantidade mais significativas no estudo da granulometria dos agregados selecionados, de forma a obter uma curva granulométrica possível de ser montada utilizando os agregados selecionados, e compatível com os outros modelos do estudo de empacotamento dos agregados. Na Tabela 4.12 encontra-se os resultados da equação de Alfred com os parâmetros  $D_L = 0,6 \text{ mm}$ ,  $D_S = 0,037 \text{ mm}$  e  $q = 0,37$ , assim como a distribuição granulométrica.



**Tabela 4.12 – Composição granulométrica do Modelo 3**

$D_p$ (mm)	CPFT (%)	Teor individual (%)	Peneiras ABNT		Teor retido (%)	Teor acumulado (%)
			Malha #	Abertura (mm)		
4,8	0,0	0,0	8	2,4	0	0
2,4	0,0	0,0	16	1,2	0	0
1,2	0,0	0,0	30	0,6	0	0
0,6	100,00	35,26	50	0,3	0	0
0,3	64,74	27,29	100	0,15	35	35
0,15	37,45	21,11	200	0,075	27	63
0,075	16,34	16,34	400	0,037	21	84
0,037	0,0	0,0	Fundo	< 0,037	16	100
< 0,037	0,0	0,0			0	100
Total		100		Total	100	

Na Tabela 4.4 o valor das porcentagens por diâmetro da partícula ( $D_p$ ) não corresponde ao valor por abertura das peneiras, pois para aplicar a equação corretamente, o diâmetro da partícula equivale ao diâmetro que passa pela abertura da peneira e não o diâmetro das partículas que ficam retidas na peneira, por isso os valores estão defasado de um diâmetro.

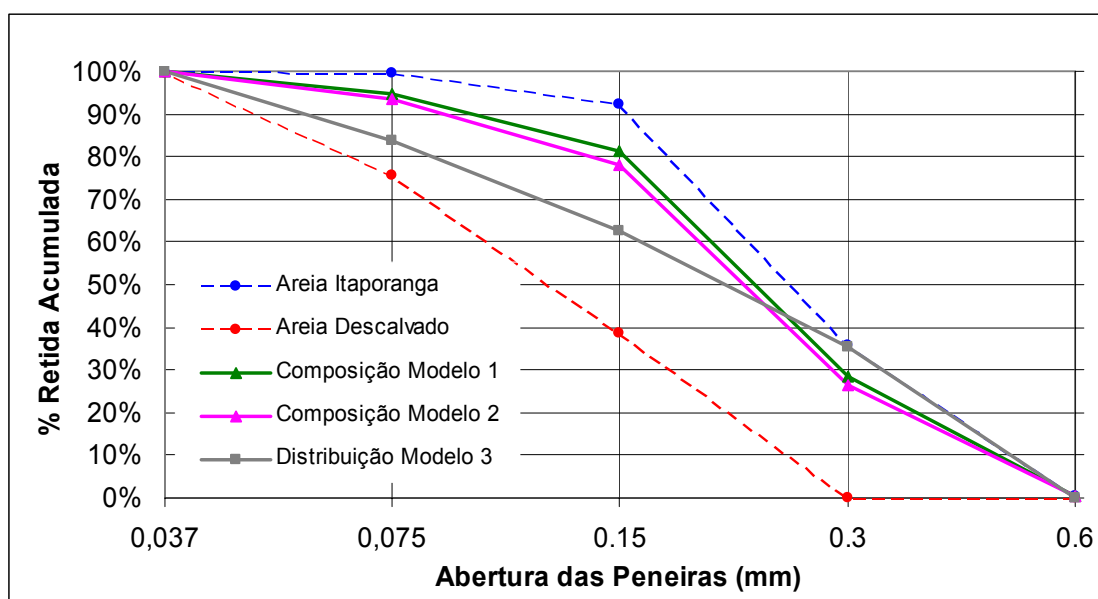
Após a determinação da distribuição granulométrica do Modelo 3 foram separadas as partículas de acordo com o diâmetro das peneiras e em seguida misturadas nas proporções indicadas na Tabela 4.12 para se obter um agregado com a distribuição granulométrica calculada, em seguida foi realizado o ensaio para determinação da massa unitária no estado compactado seco que resultou em  $1,724 \text{ kg/dm}^3$ .

#### **Comparação dos Modelos:**

Visando melhor comparar os três modelos de empacotamento de agregados apresentados foram reunidos os valores da massa unitária no estado compactado seco das areias e das diferentes composições na Tabela 4.13, também foram sobrepostas as distribuições granulométricas das areias Itaporanga e Descalvado assim como a distribuição granulométrica do Modelo 3 e as curvas granulométricas da composição obtida através do Modelo 1 (80 % de areia Itaporanga e 20 % de areia Descalvado), e do Modelo 2 (74% de areia Itaporanga e 26 % de areia Descalvado), apresentados na Figura 4.4.

**Tabela 4.13** – Valores da massa unitária no estado compactado seco (NBR 7810:1983)

Componente ou composição	Massa unitária no estado compactado seco (kg/dm <sup>3</sup> )
Areia Itaporanga	1,660
Areia Descalvado	1,589
Composição Modelo 1	1,687
Composição Modelo 2	1,689
Distribuição Modelo 3	1,724

**Figura 4.4** – Sobreposição da curvas granulométricas

Na comparação entre os três modelos do estudo de empacotamento de partículas apresentados não se deve somente levar em conta a massa unitária no estado compactado seco (NBR 7810:1983), mas também a dificuldade e possibilidade de obter as composições ou distribuições granulométricas desejadas.

O Modelo 3 apesar de apresentar o melhor preenchimento de vazios e conseqüente maior massa unitária no estado compactado seco é um modelo de aplicação prática inviável, pois para se obter a distribuição contínua indicada na Figura 4.4 foi preciso separar as partículas em diferentes dimensões para depois juntá-las na proporção adequada o que consumiria um tempo inexistente para essa etapa na produção de revestimento hidráulicos, entretanto a análise foi válida pois além de se obter um valor de massa unitária no estado compactado seco de referência ainda poderia ser possível montar uma distribuição granulométrica semelhante apenas compondo proporções das areias selecionadas, mas com esses agregados as curvas granulométricas de composições que mais se aproximam correspondem as curvas das composições indicadas pelos outros dois modelos.

Observando os resultados obtidos nos modelos 1 e 2, pode-se dizer que apesar desses modelos poderem alcançar valores semelhantes, eles apresentam diferenças significativas no trabalho e no tempo de realização de ensaios. O Modelo 1 poderia atingir o mesmo resultado que o

Modelo 2 se após a determinação da massa unitária das proporções pré-definidas fosse refinada as medições entre as proporções que alcançaram melhor resultado. Entretanto o Modelo 2 utilizando cálculos e medições práticas apresentou a melhor composição com um menor numero de ensaios. Portanto a proporção entre as areias Itaporanga e Descalvado adotada é de 74 % de areia Itaporanga e 26 % de areia Descalvado obtida através do Modelo 2.

Analisando as curvas granulométricas da Figura 4.4 e os valores da massa unitária no estado compactado seco da Tabela 4.13, percebe-se nitidamente a importância do estudo de empacotamento dos agregados, pois as curvas granulométricas dos agregados estão nos extremos das distribuições granulométricas das composições e apresentam valor da massa unitária (no estado compactado seco) inferior aos das composições, portanto a composição das areias minimiza os vazios existentes entre as partículas de agregado, aumentando a massa unitária no estado compactado seco. Com a minimização dos vazios que seriam preenchidos com as partículas de cimento (aglomerantes) ocorrerá a redução do consumo de aglomerantes no traço da argamassa que será utilizada na produção dos revestimentos hidráulicos.

#### **4.2.2. Empacotamento de partículas do traço:**

Para melhorar o empacotamento das partículas do traço utilizou-se um agregado (areia Jundu) com partículas menores que as partículas que compõem o empacotamento dos agregados convencionais, com o intuito de preencher os vazios ainda existentes entre as partículas maiores de agregado e aproximar as dimensões entre as partículas de agregados e aglomerantes.

O método para determinação da massa unitária no estado compactado seco indicado pela NBR 7810:1983, e utilizado nos modelos de empacotamento 1 e 2 e como parâmetro para comparação entre os três modelos indicados, é destinado a medida desse parâmetro dos agregados convencionais, não sendo aplicado a partículas mais finas como as partículas que compõem a areia Jundu. Com isso utilizou-se o Modelo 3 para determinar uma quantidade aproximada de areia Jundu a ser incorporada como agregado.

A quantidade aproximada de areia Jundu determinada pelo Modelo 3 foi realizada estendendo o diâmetro das partículas até 25 µm (abertura da peneira que passa a grande maioria das partículas da areia Jundu) que resultou em um teor próximo a 9 %. Como o empacotamento de partículas dos agregados não possui a distribuição granulométrica do Modelo 3, e conseqüentemente apresenta uma quantidade de vazios maior a ser preenchido, adotou-se um teor de 10 % de areia Jundu dividindo os 90 % restantes de acordo com a proporção indicado no empacotamento das partículas dos agregados (74 % de areia Itaporanga e 26 % de areia Descalvado). Portanto o novo empacotamento de partículas é composto de 67 % de areia Itaporanga, 23 % de areia Descalvado e 10 % de areia Jundu.

Para verificar se este novo empacotamento melhora as características da mistura final foram realizados dois traços de argamassas, um deles utilizando o novo empacotamento de partículas e o outro utilizando o empacotamento determinado no empacotamento de partículas dos agregados sem a utilização da areia Jundu. Como parâmetro de comparação será utilizada a

resistência a compressão axial simples das argamassas por ser um parâmetro de fácil medida e uma das principais características das argamassas e concretos.

Nos traços variou-se apenas a composição dos agregados, fixando o restante das variáveis para possibilitar a verificação do desempenho do novo empacotamento através da comparação direta com o anterior. O traço 1:m (aglomerante:agregado) foi fixo em 1:2 utilizando 10 % de sílica ativa de ferro silício em substituição volumétrica do cimento (CP V ARI RS) selecionado, a relação água aglomerante utilizada foi 0,32 sem considerar a quantidade de água do aditivo superplastificante ADVA Cast utilizado em 0,8 % referente a massa de aglomerante. Na Tabela 4.14 está indicada as características de cada traço assim como o resultado dos ensaios de compressão axila simples realizados as idades de 3, 7 e 28 dias.

**Tabela 4.14 – Traços com e sem areia Jundu**

Areia Jundu		Ausente	Presente (10%)	
Traço	1:m	1:2	1:2	
	Teor de SFS (%)	10	10	
	Relação a/a	0,32	0,32	
	Teor de aditivo SP (%)	0,8	0,8	
Consumo de materiais por m <sup>3</sup> (kg)	CP V ARI RS	646,44	646,44	
	Sílica Ativa Fe-Si	44,08	44,08	
	Água	220,96	220,96	
	Aditivo SP ADVA Cast	5,52	5,52	
	Areia	Itaporanga	1055,54 (74%)	955,69 (67%)
		Descalvado	370,87 (26%)	328,07 (23%)
Jundu		(0%)	142,64 (10%)	
Resistência à compressão axial simples (MPa)	3 dias	53,8	62,9	
	7 dias	79,8	88,4	
	28 dias	100,7	109,5	

De acordo com os resultados dos ensaios mecânicos apresentados na Tabela 4.14 pode-se concluir que a substituição de 10 % dos agregados (areias Itaporanga e Descalvado) pela areia Jundu melhorou ainda mais o empacotamento da mistura, aumentando a resistência à compressão simples da argamassa em aproximadamente 10 %. Além do aumento de resistência mecânica também se pôde verificar, durante o processo de mistura dos materiais, a melhora da coesão da argamassa sem perda significativa de consistência. Portanto será adotado o novo empacotamento, composto por 67 % de areia Itaporanga, 23 % de areia Descalvado e 10 % de areia Jundu.

### 4.2.3. Traço da argamassa:

O traço 1:m representa a proporção aglomerante:agregado que compõe a mistura, a letra m representa o total de agregados que nesse caso refere-se a composição de areias selecionadas. O traço pode ser representado em massa ou em volume, no presente trabalho optou-se pela representação do traço em massa apesar da incorporação das adições ser feita em substituição volumétrica com o intuito de manter o volume final da mistura.

Na determinação da proporção aglomerante: agregado deve-se levar em conta: o refinamento da porosidade, relacionado as características de resistência mecânica e durabilidade; o custo do produto final, já que os aglomerantes representam a maior parcela do custo dos materiais; e o risco de fissuração, pois uma maior quantidade de aglomerante pode ocasionar um maior calor de hidratação da mistura aumentando o risco de microfissurações por retração.

Na determinação da proporção aglomerante:agregado não se utilizou os modelos de empacotamento de partículas apresentados, pois devido a finura das partículas que compõe os aglomerantes torna-se difícil o conhecimento da granulometria dos aglomerantes e a determinação da massa unitária compactada, além de não levarem em conta os fatores de custo e calor de hidratação.

Ponderando os fatores de custo, calor de hidratação, e refinamento da porosidade, tentando preencher os vazios existentes entre as partículas de agregados com partículas de cimento e seus produtos de hidratação, fixou-se o traço em 1:2. Os fatores de calor de hidratação e de resistências mecânicas puderam ser avaliados no teste inicial representando na Tabela 4.14, utilizado também para verificar a melhora do empacotamento.

O traço 1:2 apresenta um consumo de aglomerante satisfatório para a aplicação considerada, e não é alto para argamassa, o calor de hidratação não causou fissuração por retração nos corpos-de-prova que alcançaram altas resistências mecânicas. Na aplicação que será destinada à argamassa, dificilmente serão necessárias resistências mecânicas à compressão axial simples, maiores que as atingidas no traço 1:2.

O teor de sílica ativa adotado foi 10 % do cimento em substituição volumétrica, pois segundo Melo (2000) um teor de sílica ativa de aproximadamente 10 % é capaz de contribuir de modo eficiente para o ganho de resistência e o refinamento da porosidade, já que teores de sílica abaixo de 10 % não indicam incremento na resistência mecânica, e teores de sílica acima de 10 % apesar de indicarem um significativo ganho de resistência nas primeiras idades, alcançam as mesmas resistências que menores teores de sílica nas idades avançadas.

Como teor de metacaulinita adotou-se também 10 % do cimento em substituição volumétrica, pois Lacerda (2005) demonstra a semelhança da sílica ativa e da metacaulinita utilizadas como adição, comparando os ensaios realizados em concretos com mesmos teores de sílica ativa e de metacaulinita.

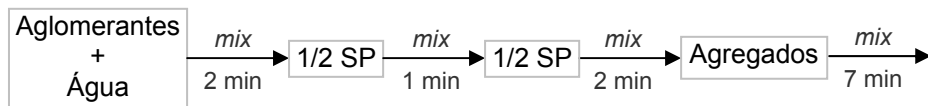
#### 4.2.4. Ordem de mistura dos materiais:

A padronização de uma ordem de mistura dos materiais para execução da argamassa é importante para se obter características semelhantes ao misturar mesmos materiais, pois alterando a ordem de mistura dos materiais podem-se alterar as características da misturas, principalmente as relacionadas à reologia.

Foram testadas diferentes ordens de mistura buscando o melhor desempenho dos aditivos superplastificantes, que podem apresentar diferentes rendimentos e funções dependendo de como são inseridos na mistura. Para avaliar o desempenho dos aditivos superplastificante nas diferentes ordens de mistura dos materiais foi utilizado o ensaio de consistência em mesa cadente, avaliando a plasticidade obtida em cada mistura.

Definiram-se três ordens de misturas, executadas em misturador mecânico recomendado pela NBR 7215:1991 em velocidade de mistura baixa, descritas e esquematizadas a seguir:

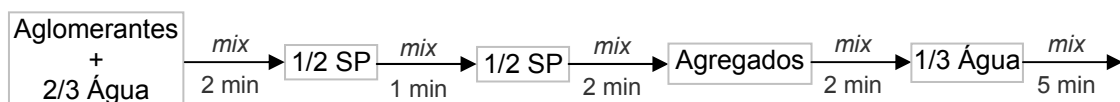
- Ordem de mistura 1: Inicialmente são misturados os aglomerantes e a água seguidos por 2 minutos de mistura, em seguida acrescenta-se o aditivo superplastificante em duas partes com 1 minuto de mistura de intervalo, então se adiciona os agregados após 2 minutos de mistura, por fim misturam-se por 7 minutos todos os materiais juntos.



- Ordem de mistura 2: Inicialmente são misturados os aglomerantes e os agregados seguidos por 1 minuto de mistura, então se acrescenta a água e mistura-se por mais 2 minutos, em seguida acrescenta-se o aditivo superplastificante em duas partes com 1 minuto de mistura de intervalo, e por fim misturam-se por 9 minutos todos os materiais juntos.



- Ordem de mistura 3: Inicialmente são misturados os aglomerantes e parte da água seguidos por 2 minutos de mistura, em seguida acrescenta-se o aditivo superplastificante em duas partes com 1 minuto de mistura de intervalo, após 2 minutos de mistura adiciona-se os agregados, então se acrescenta o restante da água depois de 2 minutos de mistura, por fim mistura-se por 5 minutos todos os materiais juntos.



Tomou-se o cuidado em padronizar o tempo entre o contato dos aglomerantes com a água e a medida de consistência (12 minutos), para garantir que o tempo de hidratação do cimento não influa no desempenho do aditivo.

Cada ordem de mistura foi testada tanto utilizando aglomerantes claros (CPB 40 + MB), quanto aglomerantes escuros (CP V ARI RS + SFS) com cada um dos dois aditivos pré-selecionados (ADVA Cast e GLENIUM 51). Em ambas misturas (clara e escura) e com os dois aditivos utilizados, a ordem de mistura que proporcionou o maior espalhamento em mesa cadente foi a ordem de mistura 1, proporcionando o melhor desempenho dos aditivos. Portanto a ordem de mistura adotada é a ordem de mistura 1.

#### **4.2.5. Consistência da argamassa:**

A consistência da argamassa está diretamente relacionada à dificuldade de lançamento da argamassa e moldagem das peças de revestimento, uma consistência baixa pode ocasionar falhas na moldagem ou necessitar de uma energia de adensamento muito elevada, e uma consistência elevada pode ser obtida prejudicando o refinamento da porosidade, pelo aumento da relação água/aglomerante, ou pelo uso antieconômico do aditivo superplastificante. Portanto foi determinada uma consistência de forma a possibilitar boas condições de lançamento da argamassa e moldagem dos elementos de revestimento, levando em conta a relação água/aglomerante e o teor de aditivo superplastificante.

Julgou-se que uma argamassa com medida de consistência em mesa cadente de 250 mm com variação de 20 mm, possui características de plasticidade suficientes para permitir seu lançamento adequado e possibilitar uma correta moldagem dos elementos de revestimentos. Sendo possível alcançar essa consistência com uma relação água/aglomerante baixa, de forma a garantir o refinamento da porosidade, e um teor de aditivo compatível com a produção de elementos de revestimentos.

Outro fator importante, relacionado à linha de produção dos elementos de revestimento, é o tempo em que a mistura deve apresentar a plasticidade adequada. Segundo Liborio (2006) um tempo de aproximadamente 20 minutos permite o lançamento e moldagem dos revestimentos em linha de produção (informação verbal)<sup>12</sup>.

Para a escolha do aditivo, entre os dois previamente selecionados (ADVA Cast e GLENIUM 51), e determinação do teor de aditivo necessário para obter a plasticidade desejada, fixou-se a relação água/aglomerante em 0,30, acreditando que esta relação garanta o refinamento da porosidade, para o alto desempenho do revestimento, e requeira um teor de aditivo adequado para a aplicação da argamassa. Em seguida realizou-se o ensaio de consistência em mesa cadente nas diferentes misturas (clara e escura), com cada um dos aditivos, nos tempos de 10, 20 e 30 minutos, para medir a atuação de cada aditivo em cada mistura até o tempo máximo de lançamento da argamassa.

Os teores de aditivos pré-selecionados para cada mistura (clara e escura) foram diferentes (2,00, 2,25 e 2,50 % para a mistura clara e 1,25, 1,50 e 1,75 para a mistura escura), visando comparar o desempenho dos aditivos em um intervalo de valores de consistência próximo a

---

<sup>12</sup> Informação fornecida por LIBORIO, J.B.L. em São Carlos/SP em junho de 2006.

consistência especificada, facilitando a determinação do teor do melhor aditivo. Os teores de aditivo referem-se a massa de aglomerante (cimento + adição).

#### Mistura clara (CPB 40 Estrutura + MB):

Os resultados dos ensaios de consistência em mesa cadente realizados na mistura clara, argamassa composta por aglomerantes claros, estão demonstrados nos gráficos a seguir, onde é apresentado o desempenho dos teores de aditivos ao longo do tempo. A Figura 4.5 refere-se ao uso do GLENIUM 51 e a Figura 4.6 ao uso do ADVA Cast.

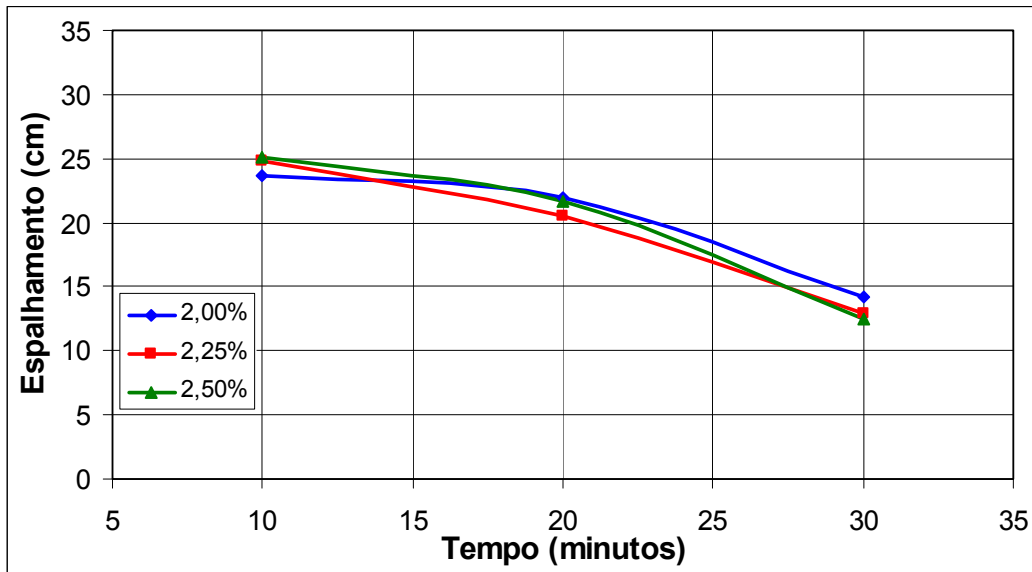


Figura 4.5 – Espalhamento da mistura clara (CPB 40 + MB) com GLENIUM 51

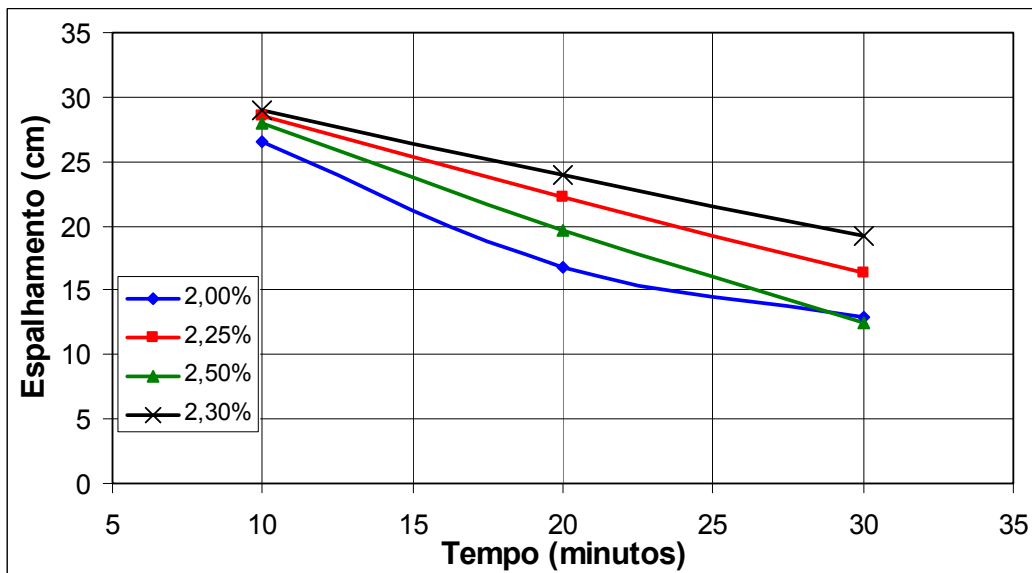


Figura 4.6 – Espalhamento da mistura clara (CPB 40 + MB) com ADVA Cast

Comparando os teores 2,00, 2,25 e 2,50 % de aditivo das Figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar, pelos espalhamentos atingidos, que o aditivo superplastificante ADVA Cast apresentou melhor desempenho na mistura clara. Na Figura 4.5 o aumento do teor do aditivo superplastificante



GLENIUM 51 não apresentou aumento significativo no espalhamento, indicando a saturação do aditivo na mistura. Na Figura 4.6 a mistura com teor de aditivo superplastificante ADVA Cast igual a 2,50 % apresentou um espalhamento menor que a mistura com teor de 2,25 %, indicando também a saturação do aditivo, entretanto este aditivo apresentou um aumento significativo de espalhamento comparando os teores de 2,00 % e 2,25 %.

Buscando melhorar a plasticidade da mistura obtida com a utilização do teor de 2,25 % de ADVA Cast, testou-se o teor de 2,30 %, que apesar de não apresentar melhora na primeira medida (10 minutos) aumentou o espalhamento nas medidas restantes, atingindo a consistência adotada.

Portanto para atingir a consistência desejada na confecção da argamassa composta pelo cimento CPB 40 Estrutural juntamente com a Metacaulinita Branca, adotou-se o aditivo superplastificante ADVA Cast em 2,30 % da massa de aglomerante, com relação água/aglomerante de 0,30.

#### Mistura escura (CP V ARI RS + SFS):

Os resultados dos ensaios de consistência em mesa cadente realizados na mistura escura, argamassa composta por aglomerantes escura, estão demonstrados nos gráficos a seguir, onde é apresentado o desempenho dos teores de aditivos ao longo do tempo. A Figura 4.7 refere-se ao uso do GLENIUM 51 e a Figura 4.8 ao uso do ADVA Cast.

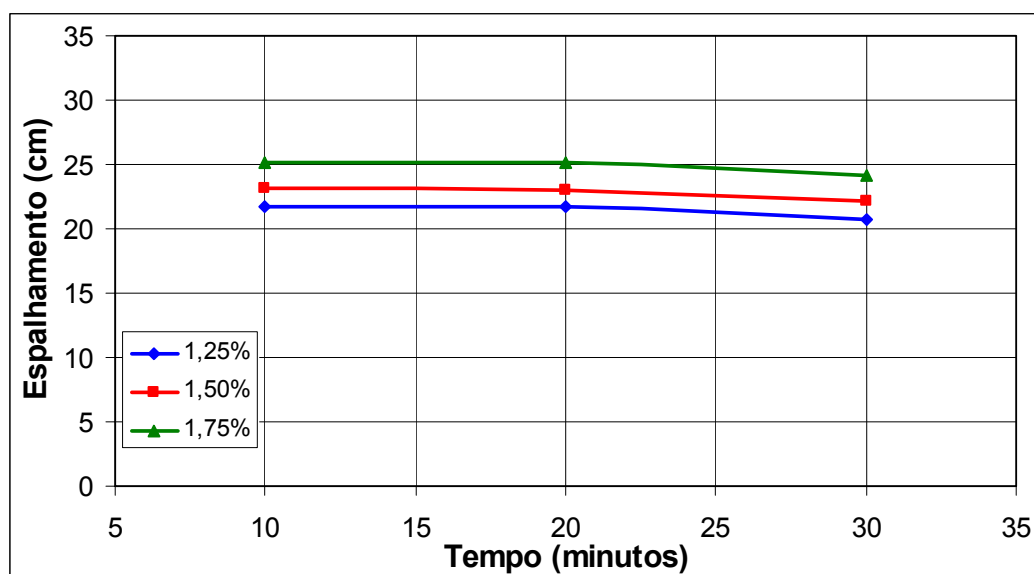
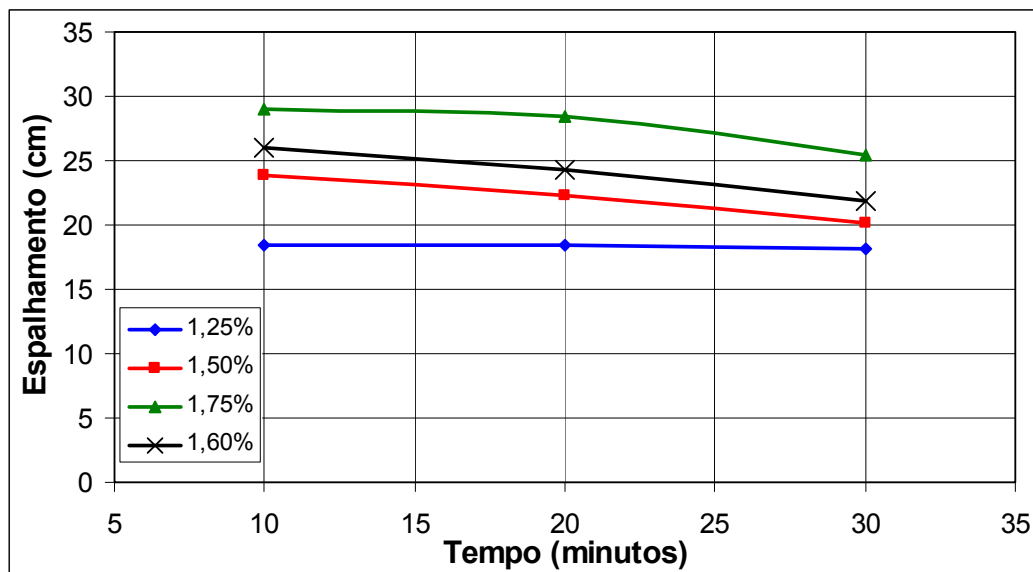


Figura 4.7 – Espalhamento da mistura escura (CP V ARI RS + SFS) com GLENIUM 51



**Figura 4.8** – Espalhamento da mistura escura (CP V ARI RS + SFS) com ADVA Cast

Comparando os teores 1,25, 1,50 e 1,75 % de aditivo das Figuras 4.7 e 4.8, observa-se que o aditivo GLENIUM 51 apresentou melhor desempenho no menor teor (1,25 %) e o aditivo ADVA Cast apresentou melhor desempenho no maior teor (1,75 %). No teor intermediário (1,50 %) o aditivo ADVA Cast se apresentou melhor na primeira medida (10 min), já na última medida (30 min) foi o aditivo GLENIUM 51, igualando os espalhamentos aos 20 min. Para definir o aditivo compararam-se os teores que proporcionaram medidas de consistência mais próximas à consistência desejada, deste modo o aditivo que apresentou o melhor desempenho na argamassa escura, foi o aditivo superplastificante ADVA Cast.

Na Figura 4.8 apresenta-se também os resultados das medidas de espalhamento em mesa cadente da argamassa com teor igual a 1,60 %, que foi testado tentando obter o teor mínimo de aditivo que apresente a consistência especificada.

Portanto na confecção da argamassa composta pelo cimento CP V ARI RS juntamente com a Sílica de Ferro Silício, adotou-se o aditivo superplastificante ADVA Cast em 1,60 % da massa de aglomerante, com relação água/aglomerante de 0,30.

Cabe ressaltar que os dois aditivos superplastificantes testados apresentaram bom rendimento e que a avaliação aqui apresentada, de modo algum, representa que um aditivo é melhor que o outro, pois a avaliação dos aditivos depende dos materiais selecionados e das características desejadas.

Apesar do teor de aditivo ser maior que o geralmente utilizado na produção de concretos e argamassa, deve-se levar em conta a aplicação final dessa argamassa, pois esses maiores teores de aditivo não acarretam mudança significativa no custo final dos elementos de revestimento.

A necessidade do emprego de um maior teor de aditivo superplastificante na mistura clara para atingir a mesma plasticidade da mistura escura, deve-se a maior área específica dos aglomerantes claros (CPB 40: 500 m<sup>2</sup>/kg; MB: 30000 m<sup>2</sup>/kg) em comparação com os aglomerantes escuros (CP V ARI RS: 350 m<sup>2</sup>/kg; SFS: 20000 m<sup>2</sup>/kg), pois seria necessária uma maior quantidade

de água para “molhar” uma quantidade maior de superfície, mas como fixou-se a água foi necessário mais aditivo.

#### **4.2.6. Caracterização da argamassa:**

A caracterização das argamassas (clara e escura) desenvolvidas, foi realizada ensaiando corpo-de-prova (5 X 10 cm) à compressão simples, à tração na compressão diametral e determinando o módulo de elasticidade, além de determinar as características de cada traço. Essa caracterização é importante para conhecer os materiais que serão utilizados na produção dos revestimentos.

Para determinar a quantidade de materiais na execução dos traços para avaliação das argamassas fixou-se a relação aglomerante:agregado em 1:2, em seguida após determinação da quantidade de aglomerante obteve-se a quantidade de agregado por esta relação. A quantidade de cada areia foi determinada diretamente pela proporção obtida no empacotamento (67% de areia Itaporanga, 23 % de areia Descalvado e 10 % de areia Jundu).

A quantidade de adição foi determinada pela substituição volumétrica de 10 % do cimento, primeiramente subtraiu-se 10 % da massa inicial de aglomerante, determinando assim a massa de cimento, em seguida para determinar a massa de adição (SFS ou MB) que corresponda a 10 % do volume do cimento multiplicou-se a massa equivalente aos 10 % da massa inicial de aglomerante pela relação entre a massa específica da adição e a massa específica do cimento ( $\rho_{\text{adição}}/\rho_{\text{cimento}}$ ) obtendo a massa da adição. A quantidade dos demais materiais foi determinada em referência à quantidade de aglomerantes (cimento + adição).

Para melhor apresentar as características de cada mistura estudada elaborou-se a Tabela 4.15 onde são apresentados os materiais selecionados, o consumo de materiais por metro cúbico, as características da argamassa fresca, e os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

**Tabela 4.15** – Características das misturas estudadas e resultados dos ensaios

Mistura		Clara	Escura	
Materiais	Cimento	CPB 40 Estrutural	CP V ARI RS	
	Adição	Metacaulinita	Sílica Ativa	
	Aditivo Superplastificante	ADVA Cast	ADVA Cast	
Traço	1:m	1:2 (1:2,033)	1:2 (1:2,066)	
	Teor de adição (%)	10	10	
	Relação a/a	0,30 (0,32)	0,30 (0,31)	
	Teor de aditivo (%)	2,3	1,6	
Consistência em mesa cadente (mm)		250 ± 20	250 ± 20	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		2255	2275	
Consumo de materiais por m <sup>3</sup> (kg)	Cimento	648,78	652,11	
	Adição	54,41	44,46	
	Água	210,96	208,97	
	Aditivo	16,17	11,15	
	Areia	Itaporanga (67%)	957,72	964,08
		Descalvado (23%)	328,77	330,95
Jundu (10%)		142,94	143,89	
Resistência à compressão axial simples (MPa)	3 dias	60,2	79,8	
	7 dias	74,1	98,8	
	28 dias	91,5	127,4	
	63 dias	96,6	141,0	
	91 dias	97,2	142,9	
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3 dias	3,1	3,5	
	7 dias	3,2	3,9	
	28 dias	3,4	4,0	
	63 dias	3,5	4,0	
	91 dias	3,5	4,0	
Módulo de elasticidade (GPa)	3 dias	27,4	31,9	
	7 dias	33,3	37,2	
	28 dias	34,8	42,2	
	63 dias	35,1	44,0	
	91 dias	36,9	45,4	

Os resultados dos ensaios mecânicos apresentados na Tabela 4.15 indicaram a alta resistência mecânica da argamassa logo nas primeiras idades, os valores de resistência a compressão simples e do módulo de elasticidade são valores dificilmente alcançados na produção de argamassa.

Pode-se observar que os valores de resistência mecânica das argamassas se estabilizaram próximo aos 63 dias, assim ainda houve um incremento de resistência mecânica das argamassas após a idade de referência (28 dias), principalmente na argamassa escura devido a reação da escória do CP V ARI RS que ocorre próximo aos 28 dias..

A consideração da quantidade de líquido do aditivo superplastificante adicionado à mistura foi calculada através do teor de sólidos do aditivo e o valor corrigido da relação água/aglomerante está indicado entre parênteses na Tabela 4.15.

Para calcular o consumo de materiais por metro cúbico, inicialmente determinou-se o traço corrigido dividindo a quantidade de aglomerante e de agregado pela quantidade de aglomerante, os traços corrigidos estão entre parênteses na Tabela 4.15. A correção do traço é pequena, mas foi apresentada para possibilitar que o traço seja refeito. O consumo de aglomerante foi determinado através da fórmula a seguir:

$$C_{agl} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{agl}} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{SP}{\rho_{SP}} + a/a}$$

onde:  $C_{agl}$  = Consumo de aglomerante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_{agl}$  = massa específica dos aglomerantes ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$a$  = proporção corrigida de agregado do traço;

$\rho_a$  = massa específica dos agregados ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$SP$  = teor de aditivo superplastificante;

$\rho_{SP}$  = massa específica do aditivo superplastificante ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$a/a$  = relação água/aglomerante.

A massa específica dos agregados ( $\rho_a$ ) e aglomerantes ( $\rho_{agl}$ ) foi determinada pela média ponderada das massas específica com as proporções. Como os agregados possuem mesma origem mineral e possuem mesma massa específica, a massa específica do agregado foi a mesma das areias, entretanto os cimentos e as adições não possuem mesma massa específica, sendo a massa específica do aglomerante determinada de acordo com a fórmula que segue:

$$\rho_{agl} = CP \cdot \rho_{CP} + ad \cdot \rho_{ad}$$

onde:  $\rho_{agl}$  = massa específica dos aglomerantes ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$CP$  = teor de cimento Portland;

$\rho_{CP}$  = massa específica do cimento ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$ad$  = teor de adição;

$\rho_{ad}$  = massa específica da adição ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ).

O consumo por metro cúbico de agregado, aditivo e água, foram obtidos multiplicando as relações ou proporções pelo consumo de aglomerante, mas o cálculo do consumo do cimento foi determinado de acordo com a fórmula a seguir, considerando a substituição volumétrica. O consumo de adição foi calculado pela diferença entre o consumo de aglomerante e de cimento.

$$C_{CP} = \frac{C_{agl}}{1 + ad \cdot \frac{\rho_{ad}}{\rho_{CP}}}$$

onde:  $C_{CP}$  = Consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$C_{agl}$  = Consumo de aglomerantes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$ad$  = teor de adição;

$\rho_{ad}$  = massa específica da adição ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );

$\rho_{CP}$  = massa específica do cimento ( $\text{kg/dm}^3$ ).

Cabe ressaltar que o consumo de cimento por metro cúbico de argamassa é superior ao consumo de cimento por metro cúbico de concreto, devido a ausência de agregados graúdos, pois no concreto é possível determinar um teor de argamassa ideal que ocupe os vazios existentes entre as partículas de agregado graúdo, e assim reduzir a quantidade de argamassa e conseqüentemente o consumo de cimento por metro cúbico da mistura.

#### 4.2.7. Pigmentos na argamassa:

Após seleção de todos os materiais e determinação do traço das argamassas verificou-se a compatibilidade do aditivo superplastificante ADVA Cast com o pigmento RHEOCOLOR. Essa medida de compatibilidade foi realizada inicialmente pelo fato dos produtos serem produzidos por empresas diferentes (Grace e Degussa), entretanto também é importante para verificar o desempenho dos materiais conjuntamente.

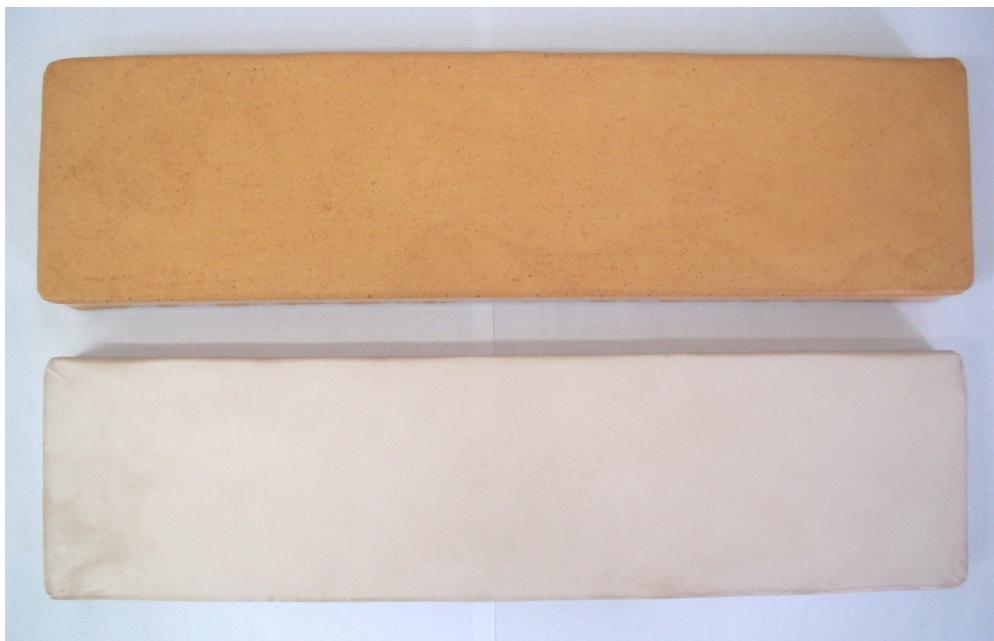
A compatibilidade foi verificada comparando os espalhamentos medidos em mesa cadente de traços semelhantes com e sem pigmentos. No traço da argamassa clara com 2,3 % de aditivo SP ADVA Cast foi incorporado o pigmento RHEOCOLOR C12 em 3 % da massa de aglomerante (CPB 40 Estrutural + MB), e no traço da argamassa escura com 1,6 % de aditivo SP ADVA Cast foi incorporado o pigmento RHEOCOLOR 3987 em 3 % da massa de aglomerantes (CP V ARI RS + SFS).

O teor de pigmento de 3 %, que é o limite máximo de incorporação de pigmentos inorgânicos indicado pela NBR 9457:1986, foi determinado de modo a incorporar uma quantidade significativa de pigmento para possibilitar uma medida de compatibilidade consistente, entretanto a quantidade de pigmento pode alterar a coloração do produto final. Foi tomado o cuidado de descontar a parte líquida do pigmento da água de amassamento para manter a relação a/a e não alterar as medidas de consistência em mesa cadente pelo acréscimo de água.

Comparando as medidas de consistência dos traços executados com pigmentos, com as medidas obtidas nos traços de referência, verificou-se que apesar das argamassas perderem um pouco de consistência, os aditivos atuaram corretamente fluidificando a mistura, e dessa forma não apresentando incompatibilidade com os pigmentos RHEOCOLOR.

A mistura clara, com a incorporação do pigmento C12, apresentou uma maior perda de plasticidade que a incorporação do pigmento 3987 na mistura escura. Isso devido ao formato das partículas dos sólidos que compõem os pigmentos (óxido de ferro), pois as partículas mais escuras apresentam formato mais regular, requerendo uma menor quantidade de água que as partículas mais claras que apresentam formato mais alongado.

O pigmento mais claro foi incorporado na mistura clara para realçar sua cor, como se pode ver na Figura 4.9, onde abaixo se encontra um elemento moldado com a mistura clara sem pigmento e acima está um elemento moldado com a mesma mistura com incorporação do pigmento C12.



**Figura 4.9** – Elementos (30 x 8 x 3 cm) com argamassa clara com e sem pigmento

Já o pigmento mais escuro foi incorporado na mistura escura, pois nesse caso a coloração do cimento não altera a coloração do pigmento, isso pode ser verificado na Figura 4.10 onde abaixo se encontra um elemento moldado com a mistura escura sem pigmento e acima está um elemento moldado com a mesma mistura com incorporação do pigmento 3987.



**Figura 4.10** – Elementos (30 x 8 x 3 cm) com argamassa escura com e sem pigmento

Devido a diversidade de pigmentos, suas combinações e os diferentes teores, torna-se inviável fixar um traço para cada caso, entretanto devido a baixa relação a/a fixada anteriormente, pode-se inserir uma pequena quantidade de água ao final da mistura composta com pigmentos, para obter a consistência desejada e ainda possibilitar o alto desempenho dos revestimentos.

### 4.3. Avaliação dos revestimentos:

A avaliação dos revestimentos produzidos com as argamassas (clara e escura) desenvolvidas foi realizada através dos ensaios apresentados na metodologia experimental. Essa avaliação visa conhecer as características dos revestimentos hidráulicos, da desmoldagem a situações de utilização.

Para melhor apresentar as características dos revestimentos produzidos com cada mistura elaborou-se a Tabela 4.16, onde são apresentados os materiais utilizados e os resultados dos ensaios realizados nas idades de 3 e 28 dias.

**Tabela 4.16 – Características e resultados dos ensaios de ladrilhos hidráulicos**

Revestimento Hidráulico		Claro	Escuro
Materiais	Cimento	CPB 40 Estrutural	CP V ARI RS
	Adição	Metacaulinita	Sílica Ativa
	Aditivo Superplastificante	ADVA Cast	ADVA Cast
	Agregado Miúdo	Areia Itaporanga (67 %)	
		Areia Descalvado (23 %)	
		Areia Jundu (10 %)	
Análise visual	3 dias	inalterada	inalterada
	28 dias	inalterada	inalterada
Expansão por cura (%)	3 dias	0,022	0,012
	28 dias	0,016	0,008
Carga de ruptura à flexão (N)	3 dias	455	480
	28 dias	520	573
Módulo de resistência à flexão (MPa)	3 dias	6,83	7,20
	28 dias	7,80	8,60
Desgaste por abrasão (mm)	3 dias	7,58	4,62
	28 dias	4,64	3,26
Absorção de água (%)	3 dias	3,19	2,79
	28 dias	1,63	1,27
Retração por secagem (%)	3 dias	0,064	0,072
	28 dias	0,063	0,048
Resistência ao ataque químico	Produtos químicos domésticos	3 dias	alta
		28 dias	alta
	Produtos para tratamento de água de piscina	3 dias	alta
		28 dias	alta

O ensaio visual teve início na desmoldagem das peças, quando se verificou a coincidência das peças com o molde, sem ocorrência de falhas de moldagem ou existência de argamassa impregnada na fôrma após desmoldagem. A superfície aparente esperada foi alcançada



uniformemente e manteve-se inalterada aos 3 e 28 dias de cura em ambos revestimentos (claro e escuro).

Os valores de expansão durante o processo de cura dos dois revestimentos, medidos da desmoldagem às idades de ensaio, se apresentaram compatível com os valores de retração por secagem, indicando que a cura por imersão não é um fator de variação de dimensões significativo. Esses valores de dimensões ainda diminuíram aos 28 dias devido ao processo de hidratação das partículas dos cimentos.

O módulo de resistência a flexão dos revestimentos claros e escuros já aos 3 dias ultrapassou o limite mínimo de 5 MPa especificado pela NBR 9457:1986, alcançando valores ainda maiores na idade referência (28 dias). Os valores de carga de ruptura e módulo de resistência à flexão, obtidos nos ensaios de flexão dos revestimentos claros e escuros, são valores elevados para placas de argamassas sem a incorporação de qualquer tipo de armadura.

Os valores obtidos nos ensaios de desgaste por abrasão realizados na idade de referência (28 dias) apesar de estarem próximo ao limite da NBR 9457:1986 ultrapassaram o valor limite de 3 mm. Entretanto a norma não especifica o método de ensaio, dificultando a análise dos valores obtidos nos ensaios realizados neste estudo.

Os valores de absorção de água obtidos nos ensaios realizados ficaram bem abaixo do limite estabelecido pela NBR 9457:1986 (8 %), indicando a boa qualidade dos revestimentos desenvolvidos, pois a baixa absorção de água está diretamente relacionada com o bom desempenho dos revestimentos pela baixa permeabilidade e pela desconexão dos poros. A absorção de água em ambos revestimentos (claro e escuro) foi reduzida consideravelmente durante o processo de cura (dos 3 aos 28 dias), devido a hidratação das partículas de cimentos e pela reação das adições (SFS e MB).

Os baixos valores de retração por secagem (relacionados com a baixa expansão por umidade) dos revestimentos claros e escuros permitem a utilização de rejuntas com espessura reduzida no assentamento desses revestimentos, proporcionando maior possibilidade na montagem de mosaicos e adornos pela continuidade das cores e efeitos dos ladrilhos.

A resistência ao ataque químico dos revestimentos hidráulicos produzidos com argamassa escura e clara, foi considerada alta nas duas idades de ensaio com ação dos dois reagentes pré-definidos, já que a superfície aparente dos revestimentos permaneceu inalterada após a ação química. Assim pode-se dizer que os revestimentos desenvolvidos são resistentes à ação química dos produtos químicos domésticos, representados pelo cloreto de amônia como agente agressivo, e à ação química dos produtos para tratamento de água de piscina, representados pelo hipoclorito de sódio como agente agressivo.

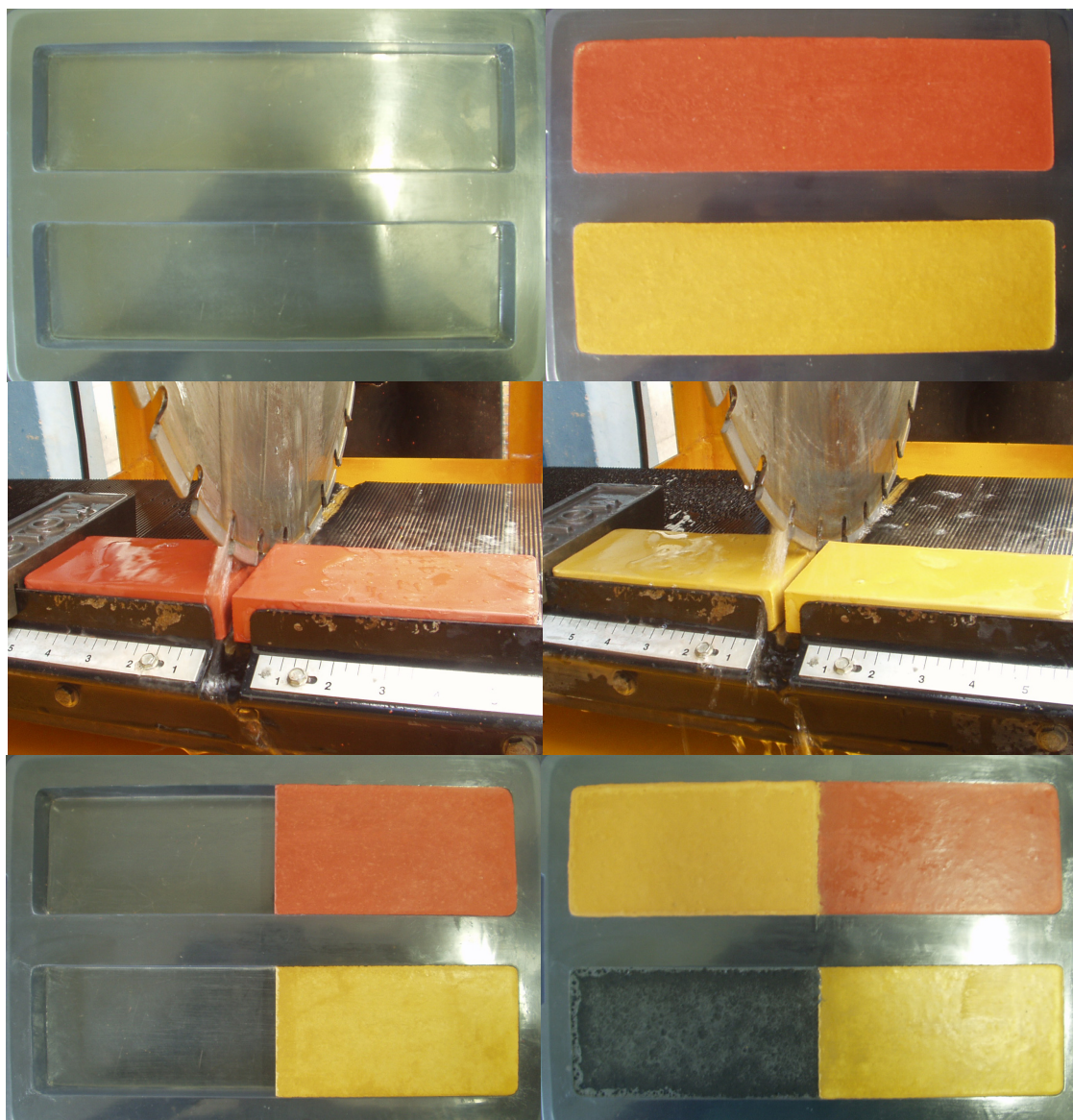
#### 4.4. Junção de peças:

Na produção atual dos ladrilhos hidráulicos, para se obter ladrilhos com figuras, as argamassas com diferentes pigmentos são misturadas ainda frescas com auxílio de moldes metálicos, isso torna a produção artesanal, pois as peças devem ser feitas uma a uma, exigindo profissionais ultra qualificados e tornando lenta a produção, que reflete no custo final do produto.

Uma alternativa para acelerar o processo produtivo desses revestimentos decorados, seria utilizar peças em forma de desenhos ou figuras, previamente moldados com argamassa. A união de argamassas de diferentes idades poderia minimizar o trabalho e possibilitar maiores alternativas na produção de peças com figuras decorativas, além de propiciar a obtenção de efeitos inovadores.

Esse processo de junção de peças de diferentes idades é facilitado pela utilização de adições aglomerantes, como é o caso da sílica ativa Fe-Si e da metacaulinita, e o conseqüente tratamento da zona de interface possibilitado pelo efeito micro-filer e pela reação pozolânica. Fagury (2002) demonstrou que a utilização de a sílica ativa Fe-Si possibilita o tratamento da zona de interface permitindo que a ligação de um concreto de alto desempenho (novo) com um concreto convencional (velho), seja mais resistente que o próprio concreto convencional.

Para verificar a possibilidade de junção de peças produzidas com a argamassa desenvolvida nessa pesquisa, inicialmente moldaram-se elementos hidráulicos em fôrma plástica com a argamassa clara e diferentes pigmentos, em seguida os elementos foram cortados com serra policorte com disco rotativo diamantado, de 500 mm de diâmetro, refrigerado por jato de água e, posicionados na fôrma ocupando metade do espaço, por fim a metade vazia das fôrmas foi preenchida com argamassa clara composta com outros pigmentos para facilitar a análise da interface. A Figura 4.11 apresenta as etapas do processo acima descrito.



**Figura 4.11** – Etapas da verificação da possibilidade de junção de peças

Após moldagem e cura, as peças foram desmoldadas, quando foi possível comprovar a possibilidade da junção dos elementos hidráulicos de diferentes idades, pois a interface entre a peça velha e a nova apresentou-se regular e contínua sem qualquer irregularidade ou falha de moldagem. A Figura 4.12 apresenta os elementos após a junção, demonstrando a boa qualidade da interface de união.



**Figura 4.12** – Elementos hidráulicos (30 x 8 x 3 cm) após junção

Portanto, peças de argamassa em forma de desenhos ou figuras, podem ser utilizadas na produção de ladrilhos decorados, unindo argamassas de diferentes idades para se obter a desenhos ou efeitos, dispondo as peças de figuras na fôrma final para em seguida moldar o elemento em sua dimensão final.

A junção de desenhos ou partes dos ladrilhos hidráulicos pode trazer os seguintes benefícios à produção:

- agilizar a produção das peças e possibilitar a produção em escala industrial;
- dispensar mão-de-obra ultra qualificada, pois a montagem das peças se torna bem mais simples;
- maior uniformidade dos desenhos, pois este método permite, através de fôrmas, uma produção mais regular do que misturar tintas ainda frescas;
- maior possibilidade de desenhos, pois com esse novo método tem-se um controle maior dos detalhes e das diferenças de cores.

A resistência mecânica da interface das peças unidas não foi analisada, entretanto já se conhece a potencialidade da resistência dessa ligação pela análise dos resultados do trabalho mencionado.

#### **4.5. Restauração dos revestimentos hidráulicos:**

Os ladrilhos hidráulicos são revestimentos moldados a frio que possuem toda a espessura, ou parte dela, composta pelo mesmo material (argamassa), diferente da maioria dos revestimentos cerâmicos que apresentam somente uma película esmaltada na superfície aparente. Essa característica possibilita que esses revestimentos hidráulicos sejam recuperados após o desgaste da superfície aparente.

Com o intuito de confirmar a possibilidade de recuperação da superfície aparente dos ladrilhos hidráulicos, submetem-se ladrilhos de 20 x 20 cm e 10 mm de espessura, ao processo de polimento semelhante ao utilizado em rochas ornamentais. Esse processo consiste em lixar, utilizando lixadeira elétrica, a superfície do revestimento como uma seqüência de lixas, partindo de uma lixa grossa até alcançar a lixa fina utilizada no polimento.

A Figura 4.13 mostra os ladrilhos hidráulicos, produzidos com argamassa clara e escura, após recuperação de superfície pelo processo descrito.



**Figura 4.13** – Ladrilhos hidráulicos após restauração de superfície

Através da análise da superfície restaurada do ladrilho é possível dizer que a vida útil desses revestimentos pode ser prolongada, utilizando um processo de polimento já difundido no mercado. Processos semelhantes ao descrito são utilizados em pisos de madeira, em rochas ornamentais e até mesmo em concretos polidos.

Portanto, quando os revestimentos hidráulicos chegam ao fim de sua vida útil, após um grande tempo de utilização, eles podem ser recuperados sem qualquer perda de suas características ornamentais e mecânicas, pois as características da argamassa são semelhantes em toda a espessura do revestimento.

#### **4.6. Custo dos materiais:**

Para uma análise inicial do custo dos revestimentos desenvolvidos nesse estudo, determinou-se o custo dos materiais que compõem os revestimentos produzidos com argamassa clara e escura. Primeiramente determinou-se o custo de material por metro cúbico de cada argamassa, em seguida considerou-se a espessura dos revestimentos igual a 10 mm para o cálculo do custo de material por metro quadrado de cada tipo de revestimento.

Nessa análise inicial não foram consideradas as perdas de argamassa, o custo de fôrmas, ou qualquer custo produtivo como mão-de-obra, maquinário, infra-estrutura ou impostos. Outro fator que não foi considerado foi o custo de pigmentos, devido a grande variedade de combinações e



teores possíveis. Portanto foi determinado o custo dos revestimentos caracterizados, produzidos com argamassa clara e escura.

Na Tabela 4.17 e na Tabela 4.18 que seguem, estão detalhados os materiais utilizados em cada mistura, seus respectivos preços por unidade de venda e por Kg, o consumo e custo de cada material por metro cúbico de argamassa e por metro quadrado de revestimento, além do custo total de materiais por metro cúbico de argamassa e por metro quadrado de revestimento.

**Tabela 4.17 – Custo dos materiais que compõem a mistura clara**

Material	Venda		Preço / Kg (R\$)	Consumo / m <sup>3</sup> (Kg)	Custo / m <sup>3</sup> (R\$)	Consumo / m <sup>2</sup> (Kg)	Custo / m <sup>2</sup> (R\$)
	Unidade	Preço (R\$)					
CPB 40 Estrutural	25 Kg	18,00	0,70	648,78	454,15	6,488	4,54
Metacaulinita Branca	20 Kg	12,00	0,60	54,41	32,65	0,544	0,33
ADVA Cast	20 Kg	200,00	10,00	16,17	161,70	0,162	1,62
Areia Itaporanga	5 m <sup>3</sup>	64,00	0,01	957,72	8,34	9,577	0,08
Areia Descalvado	5 m <sup>3</sup>	70,00	0,01	328,77	3,34	3,288	0,03
Areia Jundu	1 Ton	500,00	0,50	142,94	71,47	1,429	0,71
Custo de material /m <sup>3</sup> de argamassa e /m <sup>2</sup> de revestimento					731,64		7,32

**Tabela 4.18 – Custo dos materiais que compõem a mistura escura**

Material	Venda		Preço / Kg (R\$)	Consumo / m <sup>3</sup> (Kg)	Custo / m <sup>3</sup> (R\$)	Consumo / m <sup>2</sup> (Kg)	Custo / m <sup>2</sup> (R\$)
	Unidade	Preço (R\$)					
CP V ARI RS	40 Kg	12,00	0,30	652,11	195,63	6,521	1,96
Sílica Ativa de Fe-Si	25 Kg	20,00	0,80	44,46	35,57	0,445	0,36
ADVA Cast	20 Kg	200,00	10,00	11,15	111,50	0,112	1,12
Areia Itaporanga	5 m <sup>3</sup>	64,00	0,01	964,08	8,39	9,641	0,08
Areia Descalvado	5 m <sup>3</sup>	70,00	0,01	330,95	3,36	3,310	0,03
Areia Jundu	1 Ton	500,00	0,50	143,89	71,95	1,439	0,72
Custo de material /m <sup>3</sup> de argamassa e /m <sup>2</sup> de revestimento					426,40		4,26

Apesar do custo por metro cúbico de argamassa ser maior que o custo de concretos ou argamassa convencionais, ele não representa um custo elevado dos revestimentos devido a seu emprego final e a sua espessura reduzida. Também cabe ressaltar que apesar do custo da metacaulinita ser inferior ao da sílica ativa Fe-Si, o custo da argamassa clara é superior devido ao maior custo do cimento Portland branco estrutural e sua maior representatividade no custo final da argamassa.

---

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### 5.1. Conclusões:

Com base no desenvolvimento experimental e nos resultados dos ensaios realizados conclui-se que o objetivo de produzir revestimentos hidráulicos para pisos e paredes, de alto desempenho e alta resistência, a partir da tecnologia utilizada no desenvolvimento do concreto de alto desempenho, foi alcançado.

De maneira mais específica pode-se afirmar que os revestimentos hidráulicos produzidos com as argamassas de alto desempenho elaboradas, apresentam elevada resistência à compressão, elevado módulo de elasticidade, resistência à abrasão compatível, baixíssima absorção de água, alta resistência à ação química, baixa retração por secagem, elevada resistência à flexão, e bom acabamento superficial.

Além dessas características demonstrou-se: a possibilidade de restauração dos revestimentos utilizando técnicas simples e viáveis; a potencialidade de junção de peças de diferentes idades na produção de ladrilhos com desenhos; e a viabilidade econômica de produção pela análise do custo de materiais.

As características das argamassas são compatíveis com a produção de revestimentos hidráulicos de alto desempenho, pois as características alcançadas pelas argamassas, no estado fresco e endurecido, influem diretamente no processo de produção e nas características finais do produto.

Cabe ressaltar a possibilidade de produção de uma grande variedade de tipos, cores, formas e texturas de revestimentos, para diversas aplicações com diferentes necessidades específicas de utilização. A Figura 5.1 ilustra a variedade de cores obtidas utilizando a argamassa escura e clara sem pigmentos, com e sem polimento de superfície (lado direito), e utilizando a argamassa clara com quatro diferentes cores (3987-cinza, C32-vermelho, C12-laranja, C20-amarelo) de pigmentos (lado esquerdo).



**Figura 5.1** – Diversidade de ladrilhos hidráulicos moldados com e sem pigmento

## 5.2. Considerações finais:

Inicialmente foi utilizado o ensaio de Kantro para medir o desempenho e determinar o teor de aditivo superplastificante em cada mistura. O ensaio de Kantro consiste na realização de um ensaio de abatimento com uma pequena quantidade de pasta de cimento em um minitronco de cone, com o objetivo de analisar a variação de plasticidade da mistura em função do tempo, fixando-se a água e variando o teor de aditivo. Entretanto, após a medida do desempenho dos aditivos com cada composição de aglomerante e determinação dos respectivos pontos de saturação, verificou-se que os teores de saturação encontrados eram insuficientes para proporcionar as plasticidades desejadas.

Então após muitos testes e execução de traços com a tentativa de obter maiores plasticidades, percebeu-se que ao inserir os aditivos na mistura com agregados e aglomerantes, os aditivos continuaram aumentando a plasticidade da mistura mesmo com teores de aditivo maiores que os teores de saturação anteriormente determinados no ensaio de Kantro. Assim, optou-se por medir o desempenho dos aditivos diretamente na medida de consistência da argamassa em mesa cadente, possibilitando o conhecimento do comportamento do aditivo conjuntamente com o restante dos materiais selecionados.

O ensaio de Kantro é um importante método de medida do comportamento dos aditivos, apresentando-se eficaz quando aplicado a teores de aditivos mais comumente utilizados. Na presente pesquisa este ensaio não possibilitou a medida correta do comportamento dos aditivos devido aos maiores teores medidos, pois ao fixar a relação água/aglomerante, para realização do ensaio, não foi possível analisar o maior intervalo de valores dos teores, ultrapassando o valor limite de medida oferecido pelo ensaio.

Outras considerações importantes são apresentadas a seguir:



a) A utilização das adições e do aditivo conferiu uma alta coesão à argamassa que mesmo com uma baixa relação água/aglomerante apresentou a plasticidade desejada. A incorporação de finos como as adições, a areia Jundu e até mesmo os sólidos dos aditivos contribuíram para o bom acabamento superficial obtido.

b) Comparando a resistência à compressão simples das misturas com CP V ARI RS e SFS apresentadas nas Tabelas 4.14 e 4.15, pode-se observar que uma redução de 0,02 (0,32→0,30) na relação água/aglomerante e um aumento no teor de aditivo (0,8→1,6) resultou em um grande aumento de resistência (aproximadamente 10 MPa).

c) De acordo com os resultados dos ensaios mecânicos apresentados na Tabela 4.15, percebe-se que a argamassa clara apresenta resistência mecânica inferior à argamassa escura, e levando em conta o fato das cores dos pigmentos mais claros serem melhores realçados quando inseridos na mistura clara, e que esses pigmentos necessitam de mais água de amassamento que os pigmentos mais escuros devido a diferença no formato das partículas que os compõem, pode-se dizer que os revestimentos mais claros apresentarão resistências inferiores aos revestimentos mais escuros.

d) A alta resistência mecânica alcançada, já nas primeiras idades de ensaio, pelas argamassas caracterizadas, além de indicar o refinamento da porosidade da argamassa, pode possibilitar a desmoldagem rápida dos revestimentos, acelerando o processo de fabricação e permitindo o maior reuso das fôrmas.

e) A utilização de um processo de cura térmica poderia acelerar o processo de hidratação do cimento e reação das adições que compõem as argamassas, possibilitando a desmoldagem ainda mais rápida (horas) dos revestimentos, beneficiando a produção em escala industrial.

f) Os pigmentos utilizados dispersaram-se rapidamente na mistura, proporcionando uma boa homogeneidade da mesma no estado fresco, além de alcançar tons bem próximos aos indicados no catálogo das dispersões de pigmentos selecionados.

g) A implementação de fibras (metálicas ou não metálicas) nas argamassas desenvolvidas poderia aumentar consideravelmente a resistência à flexão dos revestimentos hidráulicos, possibilitando seu emprego a aplicações específicas. Mediante aumento da espessura e emprego de armadura seria possível utilizar esses revestimentos como pisos elevados.

h) Uma solução para aumentar a resistência dos revestimentos ao desgaste por abrasão seria utilizar agregados maiores na produção das argamassas (concreto), pois como o desgaste por abrasão em rochas como o granito é inferior a 1 mm, a utilização de agregados de rochas com esta resistência aumentaria consideravelmente a resistência ao desgaste da argamassa (concreto). Entretanto além da NBR 9457:1986 limitar os agregados a granulometria correspondente a peneira da ABNT nº 14, praticamente a dimensão das maiores partículas das areias convencionais selecionadas na pesquisa, a utilização de agregados maiores poderia deixá-los aparente após moldagem ou desgaste, prejudicando as características ornamentais dos ladrilhos hidráulicos, e inviabilizar o processo de restauração proposto.

i) A implementação de agregados graúdos na argamassa elaborada, produzindo concretos ou micro-concretos, possibilita produção de pavimentos.

j) No ensaio de ação químico tentou-se determinar a perda de massa por ataque químico, entretanto não foi possível avaliar esse parâmetro pelo ganho de massa das argamassas durante o processo de hidratação, verificado em corpos-de-prova de referência mantidos em cura por imersão no mesmo período de ação química. Esse ganho de massa das argamassas durante o processo de hidratação, diminui os vazios da mistura, refinando a porosidade e diminuindo a absorção de água, como verificado nos ensaios de absorção de água realizados em diferentes idades.

k) Os revestimentos hidráulicos, produzidos com a argamassa de alto desempenho elaborada, com 10 mm de espessura mostraram-se suficientes para atender as necessidades práticas, não sendo necessária espessura de 20 mm como especificada pela NBR 9457:1986.

l) Pela análise do estudo inicial de custo de material dos revestimentos, pode-se dizer que os revestimentos desenvolvidos apresentam potencialidade de competitividade no mercado, principalmente se forem levados em conta o desempenho obtido como fator de durabilidade e economia de manutenção.

m) Apesar dos revestimentos constituídos de argamassa produzida com CP V ARI RS apresentaram menor custo, são os revestimentos constituídos de argamassa produzida com CPB 40 Estrutural que apresentam maior procura no mercado, devido ao realce da coloração. Entretanto os revestimentos produzidos com argamassa escura podem ser destinados a ambientes com maiores áreas ou a aplicações onde o fator decorativo não é predominante entre as características especificadas.

n) Pigmentos mais caros, que não são empregados nos concretos pela inviabilidade econômica devido ao alto uso de material, podem ser empregados nesses revestimentos hidráulicos, pois devido a sua reduzida espessura tornam os pigmentos menos significativos no custo final do produto, aumentando ainda mais a variedade de cores.

o) Levando em conta o processo utilizado na moldagem dos revestimentos hidráulicos estudados, pode-se dizer que é possível estabelecer um processo de produção em escala industrial utilizando maquinário específico para automação da produção.

p) Os revestimentos hidráulicos podem ser produzidos por moldagem ou prensagem, como as argamassas neste estudo foram desenvolvidas para atender a fluidez necessária para uma boa condição de moldagem, é possível reduzir a relação água/aglomerante das argamassas se os revestimentos forem produzidos por prensagem, e assim melhorar ainda mais as características dos revestimentos.

q) Para correta avaliação e controle de qualidade dos ladrilhos hidráulicos é de fundamental importância a atualização das referentes normas, e detalhamento de métodos de ensaio específicos, pois alguns métodos de avaliação para revestimentos cerâmicos e rochas ornamentais não possibilitam uma boa avaliação dos revestimentos hidráulicos.

### 5.3. Prosseguimento da pesquisa:

Destaca-se a seguir algumas sugestões para prosseguimento da pesquisa:

- desenvolver um processo produtivo compatível com a escala industrial;
- estudar a resistência mecânica da interface da ligação de peças de diferentes idades;
- analisar a utilização de resíduos como pigmentos.
- estimar o custo final do produto considerando o custo de produção;
- estudar especificação e projeto de aplicação dos ladrilhos hidráulicos;
- desenvolver uma argamassa de assentamento para esses revestimentos;
- estudar revestimentos hidráulicos armados com fibras (metálicas e não metálicas);
- estudar a argamassa desenvolvida após implementação de agregados graúdos;
- caracterização aprofundada para usos específicos dos ladrilhos hidráulicos:
  - determinação do coeficiente de atrito;
  - determinação da resistência ao manchamento;
  - determinação da resistência ao congelamento;
  - determinação da resistência ao impacto;
  - determinação da resistência ao choque térmico;
  - determinação do coeficiente de dilatação térmica.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

AITCIN, P.C. (2000). **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 667p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C150**: Standard specification for Portland cements. Philadelphia, 1991.

\_\_\_\_\_. **ASTM C494**: Standard specification for chemical admixtures for concrete. Philadelphia, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5734**: Peneiras para ensaio – Especificação. Rio de Janeiro, 1980.

\_\_\_\_\_. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118 (NB-1)**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. São Paulo, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7810**: Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. São Paulo, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 9457**: Ladrilhos hidráulicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9458**: Assentamento de ladrilhos hidráulicos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9459**: Ladrilho hidráulico – Formatos e dimensões – Padronização. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 10908** (MB-2645): Aditivos para argamassa e concreto – Ensaios de uniformidade. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768** (EB-1763): Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12042**: Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12317** (NB-1401): Verificação do desempenho de aditivos para concreto. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12989**: Cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 13957**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 1998

BOMFIM, D.A. (2005). **Um novo método para dosagem de concretos estruturais de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE (BSI). **BS 812 Part 1**: Testing aggregates – Methods for determination of particle size and shape. London, 1975.

CASTELEIN, O. et al. (2001). The Influence of heating rate on the thermal behaviour and mullite formation from a kaolin raw material. **Ceramics International**, v.27, p.517-522.

FAGURY, S.C. (2002). **Concretos e pastas de elevado desempenho**: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC / IFSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GRZESZCZYK, G.; KUCHARSKA, L. (1990). Hydrative reactivity of cement and rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.20, n.2, p.165-174, Mar. 1990.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 349p.

HELENE, P.R.L. (2003). Record Mundial em el uso del concreto de alto desempeño – Edificio e-Tower. In: **Concreto Coloquia 2003**. São Carlos, São Paulo. ANAIS... CD-ROM.

KATTAR, J.E.; REGATTIERI, C.E. (1998). Influência dos tipos de cimento em algumas propriedades do concreto. In: **40º Congresso Brasileiro de Cimento**. Rio de Janeiro. ANAIS... CD-ROM.

KOHNERT, L. (1997). Colouring of concrete: instructions for the processing of pigments. In: **Concrete Precast Plant and Technology**. Jul. 1997. PROCEEDINGS...

LEWIS, P.A. (1987). **Pigment handbook**: properties and economics. Vol.1, 2nd ed. New York: Wiley-Interscience.

LACERDA, C.S. (2005). **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIBORIO, J.B.L. (1990). **Contribuição ao estudo das construções de argamassa armada existente no Brasil**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

LIBORIO, J.B.L. (1999). **Patologia nas construções**. Notas de aula (Disciplina de pós-graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIBORIO, J.B.L. (2002). Concreto de alto desempenho. In: **Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais**. Sobral, mar. 2002. ANAIS...

LIBORIO, J.B.L. (2004). Concreto de alto desempenho: uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis. In: **II Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais**, Sobral, set. 2004. ANAIS...

LOBO, C.L.; FERRARIS, C.F. (1998). Processing of HPC. **Concrete International**, p.61-64. Apr. 1998.

MACHADO, L.G. (2005). **Se esta rua fosse minha**. Exposição (Museu da Casa Brasileira), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, mai.-jul. 2005. ANAIS...

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. (1996). **Pozzolan and Cementitious Materials**. Canada: Gordon and Breach Publishers.

McGEARY, R.K. (1961). Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v.44, p.513-522.

MEDEIROS, F.; CAPPI, T.; PALHAIS, M. (2003). Ladrilhos hidráulicos: nasce um clássico. **Revista Casa e Jardim**, n.578. São Paulo: Globo, mar. 2003.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (1994). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 573p.

MELO, A.B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC / IFSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NEVILLE, A.M. (1997). **Propriedades do concreto**. Tradução Eng. Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, 828p.

OLIVEIRA, I.R. et al. (2000). **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 195p.

ORNATOS, empresa de ladrilhos hidráulicos. Foto disponível em <http://sampacentro.terra.com.br/textos.asp?id=374&ph=23>. Acesso em agosto de 2006.

PAULON, V.A. (1991). **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

SALTENSE, empresa de ladrilhos hidráulicos. Foto disponível em [www.ladrilhosaltense.com.br](http://www.ladrilhosaltense.com.br). Acesso em agosto de 2006.

SANTOS, P.S. (1966). Argilas para pozolanas. **Cerâmica**, v.12, n.47/48, p.294-311, set.-dez. 1966.

SILVA, I.J. (2000). **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC / IFSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

TAYLOR, H.F.W. (1997). **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing.

ZAMPIERI, V.A. (1989). **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.



---

ZAMPIERI, V.A. (1993). **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho.** Tese (Doutorado) – Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.