

# LADRILHOS E REVESTIMENTOS HIDRÁULICOS DE ALTO DESEMPENHO

Thiago Catoia<sup>1</sup> & Jefferson Benedicto Libardi Liborio<sup>2</sup>

## Resumo

*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 tem 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.*

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas EESC-USP, tcatoia@sc.usp.br

<sup>2</sup> Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento EESC-USP, liborioj@sc.usp.br

## 1 INTRODUÇÃO

Os ladrilhos hidráulicos são revestimentos produzidos com aglomerantes hidráulicos (cimentos Portland), definido pela NBR 9457:1986 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.

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.

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.

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 do trabalho, que pretendeu 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.

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar a possibilidade de produção de 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.

## **2 DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS**

### **2.1 Seleção dos materiais**

Como fator relevante para a escolha dos agregados miúdos além de ser utilizada a granulometria foi levado em conta a disponibilidade comercial dos agregados, e a morfologia das partículas que os compõem, pois agregados mais arredondados possuem menor área superficial, o que pode reduzir a quantidade de água no produto final podendo aumentar a resistência mecânica e refinar a porosidade. As areias selecionadas foram as areias quartzosas (AM1 e AM2) de origens diversas com mesma massa específica ( $2,63 \text{ kg/dm}^3$ ).

Um dos agregados miúdos utilizados se trata de um agregado bem mais fino que os agregados geralmente utilizados na construção civil (AM3), de origem quartzosa com massa específica de  $2,63 \text{ kg/dm}^3$ , foi escolhida por apresentar partículas que promovem um bom empacotamento na composição dos agregados miúdos que são utilizados convencionalmente na construção civil.

Na escolha dos cimentos para fabricação de ladrilhos e revestimentos hidráulicos não basta levar em conta somente a resistência mecânica e química, mas também as características decorativas. No presente trabalho, 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.

As adições foram escolhidas visando a reatividade pozolânica e o efeito microfiller para o refinamento dos poros. Considerando também as características decorativas, foi escolhida a metacaulinita branca, que foi utilizada conjuntamente com o cimento CPB 40 para compor uma mistura clara, para realçar a coloração dos pigmentos, e a sílica ativa utilizada juntamente com o cimento CP V ARI RS compondo uma mistura mais escura compatível com pigmentos mais escuros.

O uso de aditivo superplastificante é justificado pela necessidade de redução de água de amassamento e refinamento da porosidade, que beneficia tanto os fatores de resistência quando os de durabilidades. O desempenho e a compatibilidade de alguns aditivos superplastificantes com os cimentos e adições selecionados foram medidos experimentalmente.

Os pigmentos comercialmente disponível no mercado, utilizados para colorir a argamassa, atribuíram características decorativas aos revestimentos elaborados.

### **2.2 Empacotamento de partículas dos agregados**

O empacotamento de partículas visa minimizar os vazios existentes na mistura tornando o produto final mais compacto e conseqüentemente mais resistente. No estudo do empacotamento dos agregados convencionais selecionados (AM1 AM2) utilizaram-se três modelos para encontrar a melhor composição entre os agregados miúdos que foram comparados através da massa unitária no estado compactado seco (NBR 7810:1983).

#### **2.2.1 Modelo 1**

O modelo 1, indicado por Helene e Terzian (1992), consiste na comparação da massa unitária no estado compactado seco de diferentes combinações de

proporções dos dois componentes em que se deseja obter o melhor empacotamento. Para determinar a melhor proporção entre os agregados miúdos (AM1 e AM2), estabeleceram-se diversas combinações com variação de 10 %, em seguida mediu-se a massa unitária no estado compactado seco de cada combinação como indicado na Figura 1.

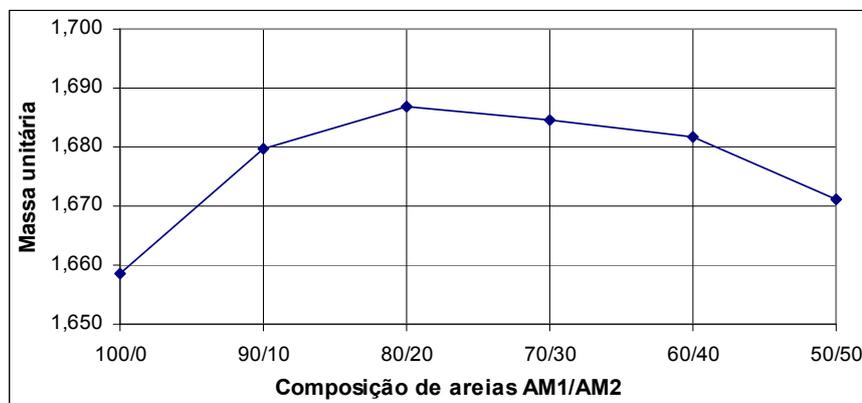


Figura 1 - Variação da massa unitária nas diversas proporções entre as areias.

No modelo 1 conclui-se que a melhor proporção entre os agregados foi aquela composta por 80 % do agregado mais grosso (AM1) e 20 % do agregado mais fino (AM2), pois essa proporção apresentou a maior massa unitária no estado compactado seco ( $1,687 \text{ kg/dm}^3$ ) e proporcionou um maior preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de agregados.

### 2.2.2 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 unitária da mistura, compor um terceiro componente e assim sucessivamente, partindo do componente com partículas maiores para o com partículas menores.

Assim determinou-se a fração de cheios do agregado mais grosso (AM1) dividindo sua massa unitária no estado compactado seco ( $1,66 \text{ kg/dm}^3$ ) por sua massa específica ( $2,63 \text{ kg/dm}^3$ ), em seguida encontrou-se a fração de vazios subtraindo de 1 a fração de cheios. Com a fração de vazios existente nesse agregado determinou-se a quantidade de agregado mais fino (AM2) necessária para ocupar esses vazios, multiplicando a fração de vazios de AM1 pela massa unitária no estado compactado seco de AM2 ( $1,59 \text{ kg/dm}^3$ ). Determinando a proporção de cada areia obteve-se 74 % de AM1 e 26 % de AM2 que resultou uma massa unitária no estado compactado seco de  $1,689 \text{ kg/dm}^3$ .

### 2.2.3 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 1.

$$CPFT = \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

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) apud Oliveira et al (2000) assume o valor de 0,37 para os casos de máxima densidade de empacotamento.

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. Portanto utilizou-se  $D_L = 0,6$  mm,  $D_s = 0,037$  mm e  $q = 0,37$  para determinar a distribuição granulométrica teórica.

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 devidas proporções para se obter o agregado com a distribuição granulométrica calculada, em seguida foi realizado o ensaio para determinação da massa unitária no estado compactado seco que resultou em  $1,724$  kg/dm<sup>3</sup>.

### 2.2.4 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 Figura 2, também foram sobrepostas as distribuições granulométricas dos agregados miúdos selecionados assim como a distribuição granulométrica do modelo 3 e as curvas granulométricas da composição obtida através do modelo 1 (80 % de AM1 e 20 % de AM2), e do modelo 2 (74% de AM1 e 26 % de AM2).

O modelo 3 apesar de apresentar a maior massa unitária no estado compactado seco é um modelo de aplicação prática inviável, pois para se obter a distribuição contínua indicada foi preciso separar as partículas em diferentes dimensões para depois juntá-las na proporção adequada o que consumiria um tempo inexistente na produção de revestimentos hidráulicos.

Observando os resultados obtidos nos modelo 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, que utiliza cálculos e medições práticas, apresentou a melhor composição com um menor número de ensaios. Portanto a proporção entre os agregados adotada é de 74 % do agregado

miúdo mais grosso (AM1) e 26 % do agregado miúdo mais fino (AM2) obtida através do modelo 2.

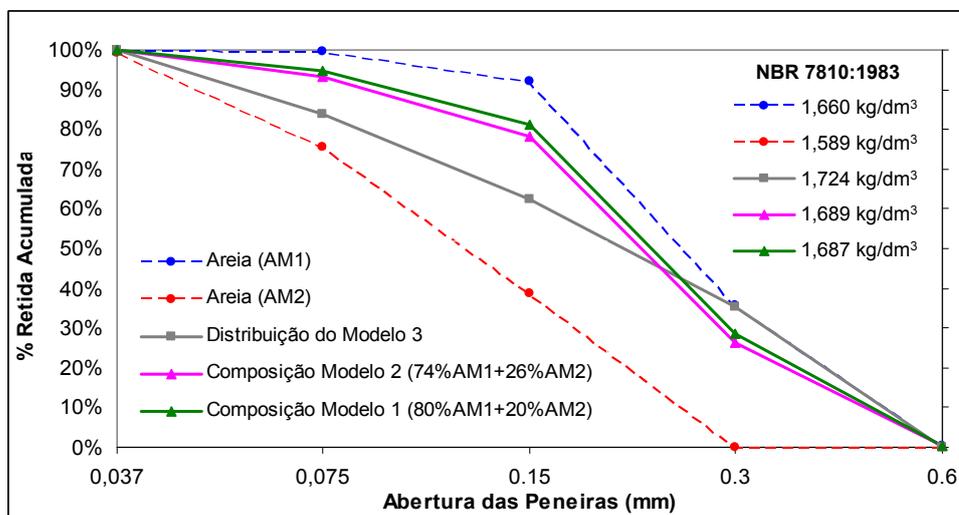


Figura 2 - Sobreposição das curvas granulométricas.

### 2.3 Empacotamento de partículas do traço

Para melhorar o empacotamento das partículas do traço utilizou-se um agregado (AM3) com partículas menores que as partículas que compõe 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, além de melhorar o acabamento superficial dos ladrilhos, fator importante na produção de revestimentos.

A quantidade aproximada desse agregado foi determinada pelo modelo 3, pela inviabilidade em determinar a massa unitária no estado compactado de partículas muito finas, estendendo o diâmetro das partículas até 25  $\mu\text{m}$  (abertura da peneira que passa a grande maioria das partículas de AM3, 99,3 %) 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 AM3 dividindo os 90 % restantes de acordo com a proporção indicado no empacotamento das partículas dos agregados (74 % de AM1 e 26 % de AM2). Portanto o novo empacotamento de partículas é composto de 67 % de AM1, 23 % de AM2 e 10 % de AM3.

Para verificar a eficiência do novo empacotamento, compôs-se dois traços semelhantes de argamassa, comparando o empacotamento de partículas dos agregados com o empacotamento de partículas do traço, assim o traço em que foi empregado AM3 apresentou aproximadamente 10 % de resistência a compressão axial simples a mais que o traço em que foi somente utilizado as areias AM1 e AM2, comprovando o preenchimento dos vazios e o refinamento dos poros da argamassa.

## 2.4 Traço da argamassa

Ponderando os fatores de custo, calor de hidratação, e refinamento da porosidade, e tentando preencher os vazios existentes entre as partículas de agregados com partículas de cimento, fixou-se o traço em massa em 1:2, com incorporação das adições feita em substituição volumétrica com o intuito de manter o volume final da mistura.

O teor de sílica ativa adotado foi 10 % em substituição volumétrica ao cimento, 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, 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. Adotou-se o teor de metacaulinita, em substituição volumétrica, de 10 % da massa do cimento, pois segundo Lacerda (2005) a sílica ativa e a metacaulinita podem apresentar atuações semelhantes quando utilizadas como adição.

A trabalhabilidade da argamassa está diretamente relacionada à dificuldade de lançamento e moldagem das peças de revestimento, uma trabalhabilidade baixa pode ocasionar falha na moldagem ou necessitar de uma energia de adensamento muito elevada, e uma trabalhabilidade elevada pode prejudicar o refinamento da porosidade, pelo aumento da relação água/aglomerante, ou pelo uso antieconômico do aditivo superplastificante. Associando-se o parâmetro trabalhabilidade ao parâmetro consistência, foi determinada uma consistência ( $250 \pm 20$  mm) medida em ensaio de consistência em mesa cadente apresentado na Figura 3, como forma de resolver a problemática, possibilitando boas condições de lançamento e moldagem dos elementos de revestimento, levando em conta a relação água/aglomerante e o teor de aditivo superplastificante.



Figura 3 - Medida de consistência de argamassa em mesa cadente.

A ordem de mistura dos materiais para execução da argamassa está diretamente relacionada com a reologia da mistura e com a atuação dos componentes, assim foram testadas três diferentes ordens de mistura, e a que refletiu um melhor desempenho da mistura foi a que se misturaram inicialmente os aglomerantes e a água, em seguida foi acrescentado o aditivo em duas partes e por fim foram inseridos os agregados.

Após a seleção de todos os materiais e determinação do traço das argamassas verificou-se a compatibilidade do aditivo superplastificante com o pigmento, não se constatando qualquer incompatibilidade entre esses materiais.

## 2.5 Caracterização da argamassa

A caracterização das argamassas é importante para conhecer as características do material que irá constituir os ladrilhos hidráulicos, além de possibilitar a relação dos resultados da avaliação das argamassas com a avaliação dos revestimentos.

### 2.5.1 Moldagem, preparo e cura de corpos-de-prova cilíndricos

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de argamassa com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm de acordo com a NBR 7215:1991. A cura dos corpos-de-prova se iniciou logo após a moldagem, isolando a superfície exposta dos corpos-de-prova com filme plástico para impedir a perda de umidade da argamassa, pois uma parte significativa do processo de hidratação do cimento ocorre antes da mistura estar pronta para o desmolde. 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 (topo e base) de acordo com a NBR 5738:1994, por meio de um faceador de corpos-de-prova com disco diamantado mostrado na Figura 4, com o intuito de promover a regularização das superfícies que terão contato com os pratos da prensa servo-hidráulica.



Figura 4 - Faceador para corpos-de-prova com detalhe do disco.

### 2.5.2 Resistência à 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 5 mostra-se um corpo-de-

prova de argamassa sendo solicitado à compressão axial simples. Foi possível comprovar a validade dos ensaios de compressão axial simples através da ocorrência de ruptura cônica dos corpos-de-prova, apresentada na Figura 5, que representa a correta distribuição de tensões durante as solicitações.



Figura 5 - Corpo-de-prova solicitado à compressão axial simples com ruptura cônica.

### 2.5.3 Resistência à tração na compressão diametral

O ensaio de tração na compressão simples 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. Exemplifica-se na Figura 6 um corpo-de-prova de argamassa sendo solicitado à compressão simples diametral. Utilizou-se um aparato para manter o corpo-de-prova corretamente posicionado durante o ensaio. Foi possível comprovar a validade dos ensaios de compressão simples diametral através da ocorrência de ruptura colunar central dos corpos-de-prova, demonstrada na Figura 6.



Figura 6 - Corpo-de-prova solicitado à compressão diametral com ruptura colunar.

#### 2.5.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado seguindo recomendações da NBR 8522:1984, solicitando os corpos-de-prova à compressão axial simples com velocidade de carregamento de 0,6 MPa/s até 80 % da carga de ruptura, e realizando-se medições de deslocamento a cada 5 segundos através de extensômetros elétricos de base removível, posicionados em lados opostos do corpo-de-prova. Na Figura 7 é mostrado a realização do ensaio em um corpo-de-prova.



Figura 7 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade.

#### 2.5.5 Resultados

Para melhor apresentar as características de cada mistura estudada elaborou-se a Tabela 1 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.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam alta resistência mecânica da argamassa logo nas primeiras idades, os valores de resistência à compressão simples e do módulo de elasticidade são valores dificilmente alcançados na produção de argamassa, estando compatível com a produção de ladrilhos hidráulicos de alto desempenho.

Tabela 1 - 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	Éster policarboxílico	Éster policarboxílico	
Traço	1:m	1:2	1:2	
	Teor de adição (%)	10	10	
	Relação a/a	0,30	0,30	
	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	AM1 (67%)	957,72	964,08
		AM2 (23%)	328,77	330,95
AM3 (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	

### 3 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS HIDRÁULICOS

#### 3.1 Produção dos ladrilhos hidráulicos

Para definir o material da fôrma foram produzidos elementos hidráulicos, com fôrmas de diferentes materiais, tal que possibilitasse uma superfície lisa e brilhante. A Figura 8 mostra o bom acabamento superficial do elemento hidráulico produzido, sem qualquer tratamento da superfície após a desforma.



Figura 8 - Acabamento superficial obtido no elemento hidráulico.

A utilização de uma fôrma com base metálica possibilita uma rigidez adequada para moldagem, além de suportar um grande número de ciclos de moldagem. Na Figura 9 apresenta-se a fôrma revestida com o material selecionado. Tomou-se o cuidado de se iniciar a cura logo após a moldagem, com a utilização de um filme plástico mostrado também na Figura 9. Após a desforma, a cura foi prosseguida por imersão em água, até as datas de ensaios.



Figura 9 - Fôrma, moldagem e cura dos ladrilhos hidráulico.

## 3.2 Avaliação dos ladrilhos hidráulicos

A avaliação dos revestimentos produzidos com as argamassas (clara e escura) visou estabelecer as características dos revestimentos hidráulicos, da desmoldagem à situações de utilização.

### 3.2.1 Variação dimensional

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. Foram utilizadas peças de 20 x 20 cm e 10 mm de espessura, as medições foram realizadas em torre eletrônica de medição com resolução de 5 x 10<sup>-6</sup> m sobre base plana, e a análise visual foi realizada em peças saturadas superfície seca, após desmoldagem e nas idades de 3 e 28 dias.

### 3.2.2 Resistência à flexão

O ensaio de flexão em ladrilhos hidráulicos foi realizado em prensa servo-elétrica até a ruptura, seguindo recomendações da NBR 13818:1997, solicitando as placas à flexão por três apoios com velocidade de carregamento controlada e igual a 1,0 MPa/s.

As placas utilizadas nos ensaios de flexão foram moldadas em fôrmas retangulares de 20 x 100 cm e 10 mm de espessura, em seguida cortadas nas dimensões de 20 x 45 cm. Na Figura 10 apresenta-se, o detalhe de uma placa de ladrilho hidráulico submetida à flexão com comprimento entre apoios de 40 cm, e a ruptura da placa no terço central permitindo a validação dos ensaios representando a correta solicitação da placa.



Figura 10 - Ladrilho hidráulico solicitado à flexão com ruptura no terço central.

Os apoios são barras cilíndricas com 38 mm de diâmetro com graus de liberdade que permitem a flexão das placas sem a solicitação em outras direções, foram também utilizadas borrachas entre os apoios e as placas para possibilitar uma melhor transferência de carga, distribuindo-as uniformemente.

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 2 e 3.

$$CR = \frac{F \cdot L}{b} \quad (2)$$

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).

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

Onde: MRF = módulo de resistência a flexão (MPa);

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

A carga de ruptura está relacionada com as dimensões da placa, enquanto o módulo de resistência a flexão está ligado ao material que constitui o revestimento.

### 3.2.3 Desgaste por abrasão

Para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão dos ladrilhos hidráulicos utilizou-se a NBR 12042:1992, peças com dimensões de 7 x 7 cm foram cortadas a partir de peças de 20 x 20 cm com 25 mm de espessura. Após as medidas de espessura, dois corpos-de-prova foram colocados em uma máquina Amsler, onde ficaram dispostos diametralmente opostos, sob carga de 66 N em um disco de ferro fundido com 2 m de perímetro, alimentado com areia normal com vazão de 72 cm<sup>3</sup>/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. O desgaste foi indicado pela média da redução da espessura, em milímetros, dos corpos-de-prova após um percurso equivalente a 1000 m. A Figura 11 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.

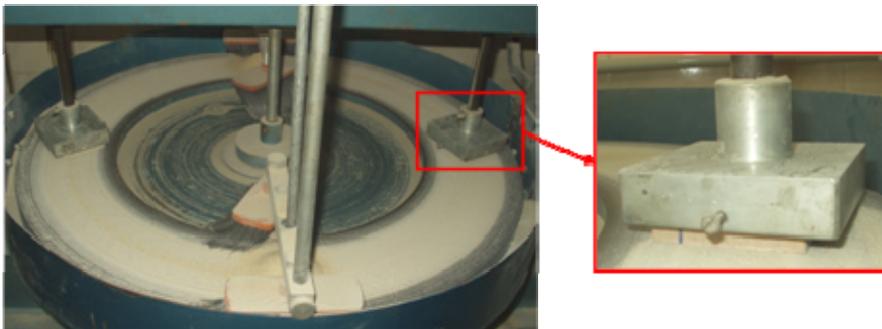


Figura 11 - Ensaio de abrasão em máquina Amsler com detalhe do corpo-de-prova.

### 3.2.4 Absorção de água

O ensaio para determinação da absorção de água dos ladrilhos hidráulicos foi realizado seguindo recomendações da NBR 9778:1987 e da NBR 13818:1997. Foram utilizadas peças com dimensões de 20 x 20 x 1 cm, imersas verticalmente com o nível de água de aproximadamente 5 cm acima delas. 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 ± 5 °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 ± 5 °C) foi determinada a massa seca

de cada peça. O teor de absorção de água é porcentagem da diferença entre a peça saturada e a peça seca em relação à peça seca.

### 3.2.5 Retração por secagem

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 plana, onde as peças de ladrilhos hidráulicos foram apoiadas e medidas como se pode ver na Figura 12.



Figura 12 - Medida de ladrilhos hidráulicos em torre eletrônica de medição.

Utilizando diferentes peças para cada data de ensaio, as peças foram medidas antes e após a secagem, tomando o cuidado de aquecer as peças somente até  $60^{\circ}$  C, que simula a temperatura alcançada por esses revestimentos expostos à insolação, determinou-se a retração por secagem calculando a porcentagem de retração dos revestimentos pela diferença da peça seca com a saturada em relação à peça saturada.

### 3.2.6 Resistência ao ataque químico

O ensaio de ataque químico simula a ação de produtos químicos que normalmente entram em contato com esses revestimentos. Os reagentes utilizados foram o cloreto de amônia e o hipoclorito de sódio com aproximadamente 10 % de cloro ativo, indicados pela NBR 13818:1997. 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 à ação dos reagentes e analisar, através de avaliação visual a olho nu, qualquer alteração na superfície das peças. Na data dos ensaios as peças foram imersas verticalmente nas soluções definidas, 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 secagem a temperatura e umidade ambiente.

### 3.2.7 Resultados

Para melhor apresentar as características dos revestimentos produzidos com cada mistura elaborou-se a Tabela 2, onde são apresentados os materiais utilizados e os resultados dos ensaios realizados nas idades de 3 e 28 dias.

Analisando os resultados dos ensaios de avaliação dos revestimentos desenvolvidos e comparando com alguns limites estabelecido pela NBR 9457:1986, como 8 % de absorção de água e 5 MPa de módulo de resistência a flexão, pode-se observar o elevado desempenho dos ladrilhos hidráulicos estudados.

Tabela 2 - 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	Éster policarboxílico	
	Agregado Miúdo	AM1 (67 %)	
		AM2 (23 %)	
		AM3 (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

Cabe ressaltar também 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 13 ilustra a variedade de cores obtidas utilizando a argamassa escura e clara sem e com pigmentos.



Figura 13 - Diversidade de ladrilhos hidráulicos moldados com e sem pigmento.

### 3.3 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, e posicionados na fôrma ocupando metade do espaço, por fim a metade

vazia das fôrmas foi preenchida com argamassa composta com outros pigmentos para facilitar a análise da interface.

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 14 apresenta os elementos após a junção, demonstrando a boa qualidade da interface de união.



Figura 14 - Elementos hidráulicos após junção de argamassas em diferentes idades.

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 desenhos ou efeitos, dispondo as peças de figuras na fôrma final para em seguida moldar o elemento em sua dimensão final.

### 3.4 Restauração dos revestimentos

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, submeteram-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 15 mostra os ladrilhos hidráulicos, produzidos com argamassa clara e escura, após recuperação de superfície pelo processo descrito. 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.



Figura 15 - Ladrilhos hidráulicos após restauração de superfície.

### 3.5 Custo de 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.

Tabela 3 - 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
Aditivo Superplastificante	20 Kg	200,00	10,00	16,17	161,70	0,162	1,62
Areia (AM1)	5 m <sup>3</sup>	64,00	0,01	957,72	8,34	9,577	0,08
Areia (AM2)	5 m <sup>3</sup>	70,00	0,01	328,77	3,34	3,288	0,03
Areia (AM3)	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

Nessa análise inicial não foram consideradas as perdas de argamassa, o custo de fôrmas, ou qualquer custo produtivo como mão-de-obra, maquinário, infraestrutura 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 3 e na Tabela 4 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.

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.

Tabela 4 - 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
Aditivo Superplastificante	20 Kg	200,00	10,00	11,15	111,50	0,112	1,12
Areia (AM1)	5 m <sup>3</sup>	64,00	0,01	964,08	8,39	9,641	0,08
Areia (AM2)	5 m <sup>3</sup>	70,00	0,01	330,95	3,36	3,310	0,03
Areia (AM3)	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

#### 4 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.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelos apoios concedidos.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (1994). **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1994). **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (1991). **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1994). **NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1983). **NBR 7810 – Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1984). **NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação**. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1986). **NBR 9457 – Ladrilhos hidráulicos – Especificação**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1987). **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1992). **NBR 12042 – Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1997). **NBR 13818 – Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro.

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

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

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**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC / IFSC – Universidade de São Paulo.

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

LACERDA, C.S. (2005). **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, F.; CAPPI, T.; PALHAIS, M. (2003). **Ladrilhos hidráulicos: nasce um clássico**. *Revista Casa e Jardim*, n. 578. São Paulo: Globo, mar. 2003.

MELO, A. B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC / IFSC – Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, I. R. et al. (2000). **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 195p.