

**DESENVOLVIMENTO DE LADRILHO HIDRÁULICO PISO TÁTIL  
PELO PROCESSO DE VIBRAÇÃO USANDO RESÍDUO DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

**ANDRÉ ZOTELLE DESTEFANI**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF**

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

SETEMBRO – 2013

**DESENVOLVIMENTO DE LADRILHO HIDRÁULICO PISO TÁTIL  
PELO PROCESSO DE VIBRAÇÃO USANDO RESÍDUO DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

**ANDRÉ ZOTELLE DESTEFANI**

“Tese de Doutorado apresentado  
ao Centro de Ciência e  
Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro, como parte das  
exigências para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia e  
Ciência dos Materiais”

**Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda**

**Co-orientador: Prof. Jonas Alexandre**

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

SETEMBRO – 2013

**DESENVOLVIMENTO DE LADRILHO HIDRÁULICO PISO TÁTIL  
PELO PROCESSO DE VIBRAÇÃO USANDO RESÍDUO DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

**ANDRÉ ZOTELLE DESTEFANI**

“Tese de Doutorado apresentado  
ao Centro de Ciência e  
Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro, como parte das  
exigências para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia e  
Ciência dos Materiais”

Aprovada em 5 de setembro de 2013.

**Comissão Examinadora:**

---

**Prof. José Nilson França de Holanda (D.Sc.) – UENF**  
Orientador

---

**Prof. Jonas Alexandre (D.Sc) – UENF**  
Co-orientador

---

**Prof. Ana Lúcia Diegues Skury (D.Sc.) – UENF**

---

**Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti (D.Sc.) – UFV**

**Dedico este trabalho a Deus e  
toda a minha família**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por proporcionar a realização de mais um objetivo e alcançar mais uma etapa na minha vida.

Agradeço minha família, em especial aos meus pais e minhas irmãs que estiveram ao meu lado nessa trajetória, dando apoio e carinho.

Agradeço aos professores D. Sc. José Nilson França de Holanda e D. Sc. Jonas Alexandre, pela orientação, dedicação e amizade em todo o período do doutoramento.

Aos professores D. Sc. Gustavo Xavier e D. Sc. Fernando Saboya, pelo esforço e colaboração quando solicitado, além da amizade.

Aos técnicos do LECIV, em especial ao Milton Pereira Soares do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual Norte Fluminense, pelo apoio durante a realização dos ensaios.

Agradeço à empresa Decolores Mármore e Granitos, pelo fornecimento do resíduo e utilização de suas dependências e máquinas.

Agradeço ao Instituto Federal Fluminense pela utilização de suas dependências, laboratórios e equipamentos para a realização de ensaios e em especial aos professores deste instituto, D. Sc. Marcellus Serejo Ribeiro, M. Sc. Otávio Fernandes, M. Sc. Sandra Gomes da Silva e M. Sc. Cláudia Barroso.

Agradeço aos amigos D. Sc. Leonardo Gonçalves Pedroti, D. Sc. Alexandre Viana Bahiense, D. Sc. Vinícius Carlesso, Marcus Vinícius de Abreu, Olímpio Nobrega, Diego Albani Furlan, M. Sc. Mário Lucas, M. Sc. Renato Aguiar e M. Sc. Davi Fernandes, pelo companheirismo e dedicação nesses anos.

Agradeço a FAPERJ e a UENF pelo apoio financeiro para desempenho deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a efetiva realização deste trabalho.

Resumo da tese apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

## **DESENVOLVIMENTO DE LADRILHO HIDRÁULICO PISO TÁTIL PELO PROCESSO DE VIBRAÇÃO USANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

**André Zotelle Destefani**

**05 de setembro de 2013**

**Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda**

**Co-orientador: Prof. Jonas Alexandre**

### **RESUMO**

No Brasil a indústria de rochas ornamentais encontra-se em crescente expansão, a qual contribui para o desenvolvimento social e econômico nacional. No entanto, as atividades da indústria de rochas ornamentais geram enormes quantidades de resíduos sólidos poluentes. Na atualidade, o grande desafio desta indústria é compatibilizar os benefícios econômicos gerados e os impactos ambientais negativos originados, principalmente no processo do beneficiamento das rochas ornamentais. O reaproveitamento de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como material de construção constitui uma alternativa importante para mitigar tais impactos ambientais, bem como contribui para a sustentabilidade da indústria de rochas ornamentais. Este trabalho tem como objetivo avaliar o reaproveitamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em misturas para produção de um novo ladrilho hidráulico piso tátil pelo processo de vibração. As diversas proporções dos agregados constituintes foram avaliadas via Planejamento de Experimentos em Rede Simplex, visando alcançar um desempenho satisfatório das propriedades tecnológicas analisadas (módulo de ruptura à flexão e absorção de água). Os resultados experimentais indicaram uma máxima densidade seca dos agregados para a incorporação de 20 % do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em relação à massa seca dos agregados. O novo ladrilho hidráulico piso tátil vibrado produzido nesta pesquisa apresentou módulo de ruptura à flexão de 5 MPa e absorção de água de 6 %, os quais atendem às especificações técnicas brasileiras para esta tipologia de material de construção.

Abstract of thesis presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Doctor Degree in Materials Engineering and Science.

**DEVELOPMENT OF HYDRAULIC TACTILE FLOOR TILES BY THE  
PROCESS OF VIBRATION USING ORNAMENTAL ROCK PROCESSING  
RESIDUE**

**André Zotelle Destefani**

**September 5, 2013**

**Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda**

**Co-advisor: Prof. Jonas Alexandre**

**ABSTRACT**

In Brazil the ornamental rock industry lies in growing expansion, which contributes to the national economic and social development. However, the ornamental rock industry activities generate huge amounts of solid waste pollutants. In actuality, the great challenge of this industry is making the economic benefits generated and the negative environmental impacts originate, mainly in the processing process of ornamental rocks. The reuse of residue from the processing of ornamental rocks and construction material constitutes an important alternative to mitigate these environmental impacts, as well as contributes to the sustainability of the ornamental rock industry. This work aims to evaluate the reuse of residue from the processing of ornamental rocks in mixtures for the production of a new hydraulic tactile floor tiles by the process of vibration. The various proportions of the constituent aggregates were evaluated via design of experiments in Network Simplex, aiming to achieve a satisfactory performance of the technological properties analyzed (bending rupture module and water absorption). The experimental results indicated a maximum dry density of aggregates for the incorporation of 20% of the residue of the ornamental rock processing in relation to the dry mass of the aggregates. The new hydraulic tile tactile floor vibrated this research produced presented bending rupture module of 5 MPa and water absorption of 6 %, which meet the Brazilian technical specifications for this type of building material.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1996).....	12
Figura 3.2	Representação esquemática da umidade do agregado (Neville, 1997).....	16
Figura 3.3	Sistema de partículas (Oliveira, 2000).....	21
Figura 3.4	Ladrilhos hidráulicos do teatro José de Alencar em Fortaleza/CE (Marques, 2012).....	27
Figura 3.5	Mozaico Bizantino (Marques, 2012).....	28
Figura 3.6	Camadas do ladrilho hidráulico.....	30
Figura 3.7	Etapas do processo de fabricação do ladrilho hidráulico (ABCP, 2012).....	30
Figura 3.8	Faixas de utilização da calçada (SMPDS, 2012).....	34
Figura 3.9	Composição de sinalização tátil de alerta e direcional em rota acessível.....	34
Figura 3.10	Calçada com a utilização do ladrilho hidráulico piso tátil.....	35
Figura 3.11	Processo de serragem dos blocos de granito (Destefani, 2013).....	36
Figura 3.12	Lama gerada do beneficiamento de rochas ornamentais (Destefani, 2009).....	37
Figura 3.13	Processo da geração de resíduos da indústria de rochas ornamentais (Reis, 2008).....	38
Figura 3.14	Volume de agregado graúdo adequado (Nunes, 2001).....	43
Figura 3.15	Quantidade de agregado fino (Nunes, 2001).....	44
Figura 3.16	Ensaio em argamassas: (a) espalhamento e (b) fluidez (Nunes, 2001).....	45
Figura 3.17	Ensaio de espalhamento do concreto (Nunes, 2001).....	46
Figura 3.18	Avaliação da auto-adensabilidade dos concretos.....	47
Figura 3.19	Esquema do fluxograma do método de dosagem de Okamura (Nunes, 2001).....	47
Figura 3.20	Relação entre $G_m$ e $R_m$ para diferentes valores de $S_p/f$ e $V_w/V_f$ (Nunes, 2001).....	49

Figura 3.21	Relações lineares obtidas para diferentes materiais finos e superplastificantes (Nunes, 2001).....	49
Figura 3.22	Relação entre $G_m$ e $R_m$ para diferentes valores de $Sp/f$ e $V_w/V_f$ (Nunes, 2001).....	50
Figura 3.23	Relações obtidas entre $V_w/V_f$ e $A$ para diferentes materiais (Nunes, 2001).....	51
Figura 4.1	Fluxograma do programa experimental.....	52
Figura 4.2	Processo de prensagem do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	53
Figura 4.3	Resíduo final pronto para o uso.....	53
Figura 4.4	Shimadzu EDX – 700.....	54
Figura 4.5	Agregados: (a) brita 0 e (b) Pó-de-pedra.....	55
Figura 4.6	Estratégia experimental (Montgomery, 1997).....	58
Figura 4.7	Representação gráfica da equação (3.1) para 2 e 3 componentes (Montgomery, 1997).....	59
Figura 4.8	Planejamento Simplex-lattice para $q = 3$ componentes e $m = 2$ .....	61
Figura 4.9	Nomenclatura de respostas para pontos da Rede Simplex $\{3,2\}$ e $\{3,3\}$ (Cornell, 1990).....	63
Figura 4.10	Modelo cúbico completo.....	64
Figura 4.11	Pontos experimentais utilizados para determinação da densidade aparente seca máxima.....	71
Figura 4.12	Aparato experimental para determinação da máxima densidade seca aparente.....	72
Figura 4.13	(a) Equipamento completo; (b) esquema detalhado do funil para o ensaio do cone de Marsh.....	74
Figura 4.14	Etapas de produção das argamassas.....	77
Figura 4.15	Tronco de cone de consistência.....	78
Figura 4.16	Ensaio de espalhamento das argamassas.....	79
Figura 4.17	Esquema de ensaio de exsudação em argamassas.....	79
Figura 4.18	Análise da exsudação das argamassas.....	80
Figura 4.19	Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos.....	80
Figura 4.20	Processo de cura dos corpos-de-prova.....	81

Figura 4.21	Ensaio de resistência à flexão dos corpos-de-prova.....	81
Figura 4.22	Condição do ensaio de resistência à flexão.....	82
Figura 4.23	Microscópio Confocal OLYMPUS.....	83
Figura 4.24	Equipamento utilizado na mistura dos materiais para produção do ladrilho hidráulico.....	84
Figura 4.25	Equipamentos utilizados na fabricação do ladrilho hidráulico piso tátil.....	85
Figura 4.26	Moldagem dos ladrilhos hidráulicos.....	85
Figura 4.27	Ladrilho hidráulico produzido.....	86
Figura 4.28	Cura dos ladrilhos produzidos.....	86
Figura 4.29	Ensaio de determinação do módulo de resistência à flexão dos pisos produzidos.....	87
Figura 5.1	Distribuição granulométrica dos agregados.....	89
Figura 5.2	Aspectos morfológicos das partículas do resíduo de rochas ornamentais.....	92
Figura 5.3	Planejamento em rede simplex do modelo cúbico completo com pontos centrais e valores médios de densidade máxima seca.....	93
Figura 5.4	Valores observados versus valores previstos pelo modelo.	94
Figura 5.5	Resíduos versus valores normais esperados.....	94
Figura 5.6	Diagrama de Pareto.....	96
Figura 5.7	Superfície de resposta do modelo para densidade aparente seca máxima ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).....	98
Figura 5.8	Superfície de respostas espacial do modelo para a densidade seca máxima ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).....	98
Figura 5.9	Comportamento da massa específica aparente e índice de vazios com adição do resíduo.....	99
Figura 5.10	Ensaio do cone de Marsh para pastas de cimento Portland.....	100
Figura 5.11	Dosagem do agregado miúdo (Nunes, 2001).....	102
Figura 5.12	Volume de finos (Nunes, 2001).....	103
Figura 5.13	Evolução da dosagem do superplastificante para argamassas com $V_w/V_f = 1,10$ .....	107

Figura 5.14	Diâmetro médio do espalhamento das argamassas.....	107
Figura 5.15	Evolução do parâmetro de Gm das argamassas produzidas com adição do RBRO.....	108
Figura 5.16	Análise da exsudação nas argamassas produzidas com adição do RBRO.....	109
Figura 5.17	Evolução do MRF das misturas analisadas.....	112
Figura 5.18	Comparativo dos resultados do MRF aos 28 dias de cura exigidos pela NBR 9457 para ladrilhos hidráulicos.....	113
Figura 5.19	Comparativo dos resultados da absorção de água aos 28 dias de cura exigidos pela NBR 9457 para ladrilhos hidráulicos.....	115
Figura 5.20	(a) Ruptura dos corpos-de-prova após realização do ensaio mecânico; (b) seção transversal da peça cortada e polida.....	115
Figura 5.21	Imagem do concreto, matrix cimentícia, ampliação 216x....	116
Figura 5.22	Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 216x...	117
Figura 5.23	Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 430x...	117
Figura 5.24	Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 1290x.	118
Figura 5.25	Ruptura do piso hidráulico tátil após ensaio.....	119
Figura 5.26	Sinalização tátil de alerta (NBR 9050/2004).....	121
Figura 5.27	Avaliação dimensional do piso hidráulico tátil.....	121
Figura 5.28	Avaliação dimensional do piso hidráulico tátil.....	122
Figura 5.29	Ladrilhos hidráulicos tátil com pigmentação.....	124
Figura 5.30	Pisos hidráulico tátil – (a) Destefani (2013), (b) Reis (2008) e (c) Empresa X.....	124
Figura 5.31	Comparativo do módulo de resistência à flexão (MRF) dos pisos analisados.....	125
Figura 5.32	Comparativo da absorção de água (AA) dos pisos analisados.....	126
Figura 5.33	Consumos de cimento Portland para as dosagens estudadas por Cavalli e Valduga (2006), Reis (2008) e Destefani (2013).....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição dos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002)..	11
Tabela 3.2	Substâncias nocivas.....	18
Tabela 3.3	Tamanho da amostra e limites exigidos pela NBR 9457/1986 para ladrilhos hidráulicos (Reis, 2008).....	31
Tabela 3.4	Estimativa da produção de resíduo.....	36
Tabela 4.1	Ensaio de caracterização do resíduo.....	54
Tabela 4.2	Ensaio de caracterização do agregado.....	55
Tabela 4.3	Caracterização do aglomerante hidráulico.....	56
Tabela 4.4	Características do SP utilizado.....	56
Tabela 4.5	Composição das misturas para o planejamento Simplex ( $q = 3$ e $m = 2$ ).....	60
Tabela 4.6	Modelos e equações polinomiais (Montgomery, 1997).....	61
Tabela 4.7	Número de termos polinomiais (Montgomery, 1997).....	62
Tabela 4.8	Análise de variância (ANOVA).....	69
Tabela 4.9	Composição das misturas.....	71
Tabela 4.10	Relação entre resistências à compressão, à flexão e à tração do concreto (Mehta, 1994).....	75
Tabela 4.11	Proporções típicas de materiais em dosagens de diferentes resistências (Mehta, 1994).....	76
Tabela 4.12	Propriedades e limites da norma referente aos ladrilhos hidráulicos.....	87
Tabela 5.1	Caracterização dos agregados.....	90
Tabela 5.2	Análise química do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	91
Tabela 5.3	Parâmetros e intervalos de confiança do modelo cúbico completo.....	95
Tabela 5.4	Análise de variância (ANOVA) do modelo.....	97
Tabela 5.5	Composição da argamassa AR1 com adição do RBRO.....	105
Tabela 5.6	Composição da argamassa AR2 com adição do RBRO.....	105
Tabela 5.7	Composição da argamassa AR3 com adição do RBRO.....	106

Tabela 5.8	Dosagem ótima de superplastificantes para as argamassas.....	108
Tabela 5.9	Composição do concreto C1 com adição do RBRO.....	110
Tabela 5.10	Composição do concreto C2 com adição do RBRO.....	110
Tabela 5.11	Composição do concreto C3 com adição do RBRO.....	110
Tabela 5.12	Resultados do MRF do concreto C1.....	111
Tabela 5.13	Resultados do MRF do concreto C2.....	111
Tabela 5.14	Resultados do MRF do concreto C3.....	112
Tabela 5.15	Evolução do MRF com a idade dos concretos produzidos – comparação com a bibliografia para a resistência à compressão (cimento Portland CP III).....	113
Tabela 5.16	Resultados da AA dos concretos aos 28 dias de cura.....	114
Tabela 5.17	Composição do piso hidráulico tátil.....	118
Tabela 5.18	Propriedades tecnológicas do piso hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	119
Tabela 5.19	Propriedades tecnológicas do piso hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	120
Tabela 5.20	Formatos e dimensões nominais dos ladrilhos (NBR 9459/1986).....	120
Tabela 5.21	Dimensões do piso tátil de alerta (NBR 9050/2004).....	121
Tabela 5.22	Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico tátil.....	122
Tabela 5.23	Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico tátil.....	122
Tabela 5.24	Pigmentos de óxidos mais importantes.....	123
Tabela 5.25	Comparativo das propriedades tecnológicas dos pisos hidráulicos tátil avaliados.....	125
Tabela 5.26	Dosagem do ladrilho hidráulico (Cavalli e Valduga, 2006)...	127
Tabela 5.27	Dosagem do ladrilho hidráulico piso tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (Reis, 2008).....	128
Tabela 5.28	Consumos de cimento Portland para as dosagens estudadas.....	129

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
2.1	Objetivo geral.....	4
2.2	Objetivos específicos.....	4
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
3.1	Concretos de cimento Portland.....	6
3.1.1	Materiais constituintes.....	6
3.1.1.1	Cimento Portland.....	6
3.1.1.1.1	Composição.....	7
3.1.1.1.2	Principais tipos.....	10
3.1.1.2	Agregados.....	12
3.1.1.2.1	Classificação.....	13
3.1.1.2.2	Características dos agregados.....	14
3.1.1.3	Água.....	19
3.1.1.4	Aditivos minerais.....	20
3.1.1.5	Aditivos.....	22
3.1.2	Propriedades do concreto fresco.....	23
3.1.3	Propriedades do concreto endurecido.....	25
3.2	Ladrilho hidráulico.....	27
3.2.1	Materiais e processos de fabricação.....	29
3.2.2	Propriedades a serem avaliadas no ladrilho hidráulico.....	31
3.2.3	Estudo com ladrilhos hidráulicos.....	31
3.2.4	Ladrilho hidráulico piso tátil.....	32
3.3	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	34
3.3.1	Resíduos gerados do beneficiamento de rochas ornamentais.....	35
3.3.2	Utilização dos resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais.....	38
3.3.2.1	Utilização do resíduo em concretos.....	38
3.3.2.2	Utilização do resíduo em argamassas.....	38
3.3.2.3	Utilização do resíduo em materiais cerâmicos.....	39
3.3.2.4	Utilização do resíduo em tijolos de solo-cimento.....	40

3.3.2.5	Utilização do resíduo em concreto asfáltico.....	41
3.3.2.6	Utilização do resíduo na indústria cimenteira.....	41
3.4	Método de Okamura et al.....	42
3.4.1	Etapas do método.....	42
3.4.2	Dosagem do superplastificante na propriedade das argamassas: avaliação do efeito relação água/finos.....	47
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS DE ANÁLISES.....</b>	<b>51</b>
4.1	Amostragem dos materiais.....	52
4.1.1	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	52
4.1.1.1	Caracterização física.....	53
4.1.1.2	Caracterização química e mineralógica.....	54
4.1.2	Agregados: brita 0 e pó-de-pedra.....	54
4.1.3	Aglomerante hidráulico.....	55
4.1.4	Aditivo.....	56
4.1.5	Água.....	56
4.2	Modelagem numérica: otimização do esqueleto granular....	57
4.2.1	Considerações iniciais.....	57
4.2.2	Experimento com misturas.....	58
4.2.2.1	Planejamento em rede simplex.....	59
4.2.3	Parâmetros dos polinômios.....	63
4.2.4	Representação matricial.....	64
4.2.5	Modelos matemáticos.....	64
4.2.6	Programa Statística.....	65
4.2.7	Análises estatísticas: avaliação dos modelos.....	65
4.2.7.1	Significância estatística da regressão.....	67
4.2.7.2	Falta de ajuste e erro puro.....	68
4.2.7.3	Porcentagem de variação explicada pela regressão.....	69
4.3	Determinação do esqueleto granular: planejamento experimental em rede simplex.....	70
4.3.1	Produção dos corpos-de-prova.....	72
4.4	Estudo da pasta.....	72
4.5	Dosagem dos concretos.....	74
4.5.1	Restrições experimentais.....	74

4.6	Estudo das argamassas.....	76
4.6.1	Preparo das argamassas.....	76
4.6.2	Dosagem ótica do sp.....	78
4.6.3	Estudo da exsudação.....	79
4.7	Estudo dos concretos.....	80
4.7.1	Produção dos corpos-de-prova.....	80
4.7.2	Resistência do módulo de ruptura à flexão (MRF).....	81
4.7.3	Absorção de água.....	82
4.7.4	Caracterização microestrutural e de fases.....	83
4.8	Produção do ladrilho hidráulico.....	84
4.8.1	Verificação das propriedades do ladrilho hidráulico.....	86
4.9	Comparativo com outros pisos hidráulicos tátil.....	88
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>
5.1	Caracterização dos materiais utilizados.....	89
5.1.1.	Caracterização física.....	89
5.1.2	Composição química e mineralógica.....	91
5.2	Planejamento experimental – Densidade aparente seca.....	92
5.2.1	Análise do modelo.....	92
5.2.1.1	Modelo cúbico completo.....	93
5.2.1.2	Intervalos de confiança.....	95
5.2.1.3	Análise do modelo.....	96
5.2.1.4	Superfície de resposta.....	98
5.3	Estudo da pasta.....	99
5.3.1	Dosagem do aditivo superplastificante.....	99
5.4	Dosagem dos concretos.....	100
5.4.1	Dosagem do agregado graúdo (brita 0).....	100
5.4.2	Dosagem do agregado miúdo (pó-de-pedra).....	101
5.4.3	Dosagem dos finos.....	103
5.5	Estudo das argamassas.....	106
5.5.1	Dosagem do superplastificante.....	106
5.5.2	Estudo da exsudação das argamassas.....	109
5.6	Estudo dos concretos.....	110
5.6.1	Produção dos concretos.....	110

5.6.2	Módulo de resistência à flexão (MRF).....	111
5.6.3	Absorção de água.....	114
5.6.4	Análise da microestrutura.....	115
5.7	Produção do ladrilho hidráulico piso tátil.....	118
5.7.1	Módulo de ruptura à flexão (MRF) e absorção de água.....	119
5.7.2	Avaliação dimensional.....	120
5.7.3	Pigmentação do ladrilho hidráulico tátil.....	123
5.7.4	Comparativo com outros pisos hidráulicos tátil.....	124
5.7.4.1	Propriedades tecnológicas.....	124
5.7.4.2	Consumo de cimento Portland.....	127
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>127</b>
6.1	Conclusões.....	127
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	128
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>130</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O concreto de cimento Portland é o principal material de engenharia utilizado pelo homem. Desde a antiguidade, misturas contendo água, agregados e compostos aglomerantes têm sido empregadas na construção de estruturas, que resistem, mesmo após milhares de anos, a ações intempéricas diversas. A elevada resistência mecânica, aliada a fatores como custo relativamente baixo, versatilidade de formas e rapidez na construção, garante o uso do concreto em aplicações diversificadas, como edificações, pontes, viadutos, túneis, barragens e pavimentos (Gartner, 2004).

Há, no entanto, um desafio a ser enfrentado pela indústria do concreto nos dias atuais, que consiste na coexistência do desenvolvimento tecnológico e da preservação do meio ambiente, principalmente em função dos problemas associados ao cimento Portland, seu principal constituinte. A produção de uma tonelada de cimento consome cerca de 5 GJ de energia (Struble e Godfrey, 2004) e requer aproximadamente 1,7 toneladas de matéria-prima, basicamente composta de calcário e argila. A indústria cimenteira mundial é responsável, ainda, pela emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por tonelada de clínquer produzido, além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ , em proporções menores (Mehta, 2002). Malhotra (2002) estima que cerca de 7% de todo  $\text{CO}_2$  antrópico emitido no mundo é devido à produção de cimento Portland, o que representa aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas por ano.

Dentro deste contexto, a utilização de resíduos gerados de processos industriais na indústria do concreto, merece destaque no Brasil, principalmente em razão dos grandes montantes gerados.

Um dos principais problemas que afetam a qualidade de vida nos grandes centros urbanos é o volume de resíduos gerados diariamente. E assim, aspectos técnicos e científicos envolvidos nessa questão assumem significativa importância para a minimização dos problemas ambientais. Os

resíduos de atividades urbanas e industriais constituem um dos maiores problemas para as empresas e administrações públicas, visto que o gerenciamento correto destes resíduos acarretam custos elevados. Nas grandes cidades, o problema é ainda mais grave, devido à quantidade de resíduos gerados e à falta de áreas adequadas, próximas e disponíveis para deposição destes materiais (Cassa, 2001).

A busca, pelo meio técnico, de alternativas para a substituição total do agregado miúdo natural (AMN) tem aumentado significativamente, para fazer frente a escassez crescente de oferta e do decorrente aumento de preço do agregado miúdo no mercado (Buest, 2006).

O uso de diferentes agregados com distribuição granulométrica variada favorece o melhor empacotamento dos grãos de agregado, diminuindo o consumo de cimento e reduzindo o volume de vazios na peça. Conseqüentemente, aumenta-se a resistência mecânica e diminui-se a absorção de água (Maia, 2004).

O uso do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais pode ser viável na produção de concretos. Lisboa (2004) utilizou o resíduo do beneficiamento de mármore e granito para a produção de concreto auto-adensável e seus estudos indicaram pela viabilidade técnica da utilização do resíduo na produção destes concretos. Rocha (2008) avaliou a potencialidade da utilização de resíduos do corte de rochas como adições minerais com características de fíler e pozolana, respectivamente, na fabricação de concretos de resistência convencional. Os resultados indicaram que é possível a produção de concretos com resistência convencional (20 MPa a 40 MPa).

Segundo dados do INET (2001), na operação de serragem se perdem 15% do bloco se este for rocha carbonatada, 25% se for granito e 20% se for ardósia e xisto. Figueiredo et al. (2000) estimou que as operações de serragem, corte e polimento produzem cerca de 0,10 m<sup>3</sup> de lama por tonelada de rocha beneficiada, sendo 0,08 m<sup>3</sup> no processo de serragem do bloco e 0,02 m<sup>3</sup> nas operações de polimento e cortes das chapas.

De acordo com a estimativa da ABIROCHAS (2008), a produção brasileira de rochas ornamentais e de revestimento totalizou cerca de 8,0 milhões de toneladas no ano de 2007, sendo exportado 1,18 milhão de

toneladas de rochas brutas e 6,82 milhões de toneladas de rochas beneficiadas no país.

Considerando a produção de cerca de 0,10 m<sup>3</sup> de resíduo por tonelada de rocha beneficiada (Figueiredo et al., 2001), tem-se uma produção de resíduo de 682 mil m<sup>3</sup>, o que em massa (considerando massa específica do resíduo de 2,7 ton/m<sup>3</sup>) equivale a aproximadamente 1,8 milhão de toneladas de resíduo em 2007 no Brasil (Reis, 2008).

Portanto, o estudo da adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de concreto pode contribuir para um maior empacotamento dos materiais utilizados na produção de piso hidráulico tático. Isso pode favorecer um aumento da resistência mecânica e menor consumo de cimento, gerando a redução de custos e impactos ambientais.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1 – Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um novo ladrilho hidráulico piso tátil vibrado usando o resíduo de beneficiamento de rocha ornamental como aditivo mineral.

### 2.2 – Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja atendido, os seguintes objetivos específicos devem ser realizados:

- Levantamento bibliográfico referente à produção e propriedades do concreto de cimento portland;
- Levantamento bibliográfico do desenvolvimento científico e tecnológico na área da caracterização e utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Levantamento bibliográfico sobre ladrilho hidráulico e ladrilho hidráulico piso tátil;
- Caracterização dos materiais utilizados para a produção dos concretos;
- Caracterização física, química, mineralógica e ambiental do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Estudo e planejamento experimental da dosagem dos materiais utilizados na produção dos concretos para confecção do ladrilho hidráulico piso tátil;

- Produção dos corpos-de-prova e verificação das propriedades físicas e mecânicas; e
- Produção do ladrilho hidráulico piso tátil (protótipo) e verificação das propriedades físicas e mecânicas.

### **2.3 – Ineditismo**

Este trabalho refere-se a um modelo de ladrilho hidráulico em camada única vibrado que incorpora resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado, para uso na construção civil para pavimentação. A preparação desse ladrilho envolve o uso de matérias-primas não usuais, o desenvolvimento de uma camada única com características adequadas de granulometria e mistura entre as matérias-primas para confecção do ladrilho hidráulico piso tátil.

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

### 3.1 – Concretos de cimento Portland

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual são mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados (Mehta e Monteiro, 1994). No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

Além de cimento, água e agregados, o concreto pode conter aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais freqüentes nos concretos atuais. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento, condições estas que variam caso a caso (Schumacher, 2007).

#### 3.1.1 – Materiais constituintes

##### 3.1.1.1 – Cimento Portland

O cimento portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam aproximadamente de 3% a 5% em massa, e eventuais adições ativas facultativas, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação (Isaia, 2010).

A denominação cimento portland se deve a Joseph Aspdin que, em 1824, recebeu na Inglaterra a patente do cimento obtido a partir da queima, em elevadas temperaturas, de calcário e argila finamente moídos e misturados. Aspdin denominou esse aglomerante de cimento portland em razão de sua semelhança, uma vez enrijecido, com rochas calcárias da Península de portland, localizada no sul da Inglaterra (Cordeiro, 2006).

Atualmente, o cimento portland é o principal material de construção empregado pelo homem. O concreto, material composto basicamente de cimento portland, agregados naturais e água em diferentes composições e formas, representa, em conjunto com o aço, a base da engenharia estrutural moderna. Segundo dados do OFICEMEN (2005), a produção mundial de cimento portland em 2004 foi de 2.188,6 milhões de toneladas. Os principais produtores, em ordem decrescente, foram China, Índia, Estados Unidos e Japão, que produziram aproximadamente 57% de todo cimento utilizado no planeta.

O Brasil produziu, no ano de 2004, cerca de 34,4 milhões de toneladas (SNIC, 2005). Quanto ao consumo regional, a região Sudeste concentrou 47,6% da produção. A região Nordeste produziu, no mesmo ano de 2004, 19,9% do total, enquanto as regiões Sul, Centro-oeste e Norte produziram 17,0%, 11,8% e 3,6%, respectivamente. As cinco principais unidades produtoras da Federação foram Minas Gerais (22,2%), São Paulo (15,1%), Paraná (11,8%), Rio de Janeiro (6,9%) e o Distrito Federal (6,1%) (SNIC, 2005).

#### **3.1.1.1.1 – Composição**

O cimento portland é composto de *clínquer* e de *adições*. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento (ABCP, 2002).

### a) Clínquer

O clínquer tem como matérias-primas *calcário* e *argila*, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450 °C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado *clínquer*, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó (ABCP, 2002).

O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante (ABCP, 2002).

### b) Adições

As adições são matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado. Essas matérias-primas são o *gesso*, as *escórias de alto-forno*, *materiais pozolânicos* e *materiais carbonáticos*.

#### Gesso

O gesso tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (ABCP, 2002).

### *Escórias de Alto Forno*

As *escórias de alto-forno* são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia (ABCP, 2002). Antigamente, as escórias de alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também tinham a propriedade de ligante hidráulico muito resistente. A escória de alto-forno reage em presença de água e desenvolve características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.

### *Materiais Pozolânicos*

Os *materiais pozolânicos* são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Da mesma forma que no caso da escória de alto-forno, pesquisas levaram à descoberta de que os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, se bem que de forma distinta. Isto porque não basta colocar os materiais pozolânicos, sob forma de pó muito fino, em presença de água, para que passem a desenvolver as reações químicas que os tornam primeiramente pastosos e depois endurecidos. A reação só vai acontecer se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença de mais um outro material. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana (ABCP, 2002).

Esse é o motivo pelo qual a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda

oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade, por exemplo, aos concretos e às argamassas (ABCP, 2002).

Outros materiais pozolânicos como as cinzas resultantes da queima de casca de arroz e sílica ativa, um pó finíssimo que sai das chaminés das fundições de ferro-silício e que, embora em caráter regional, já têm seu uso consagrado no Brasil (ABCP, 2002).

### *Materiais Carbonáticos*

Os *materiais carbonáticos* são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tal como o próprio calcário. Esta adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis. Os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro *lubrificante*. Quando presentes no cimento são conhecidos como *fíler calcário* (ABCP, 2002).

#### **3.1.1.1.2 – Principais Tipos**

Existem no Brasil vários tipos de cimento portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são (ABCP, 2002):

- cimento portland comum;
- cimento portland composto;
- cimento portland de alto-forno;
- cimento portland pozolânico.

Em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, seja pelas características especiais de aplicação os seguintes tipos de cimento:

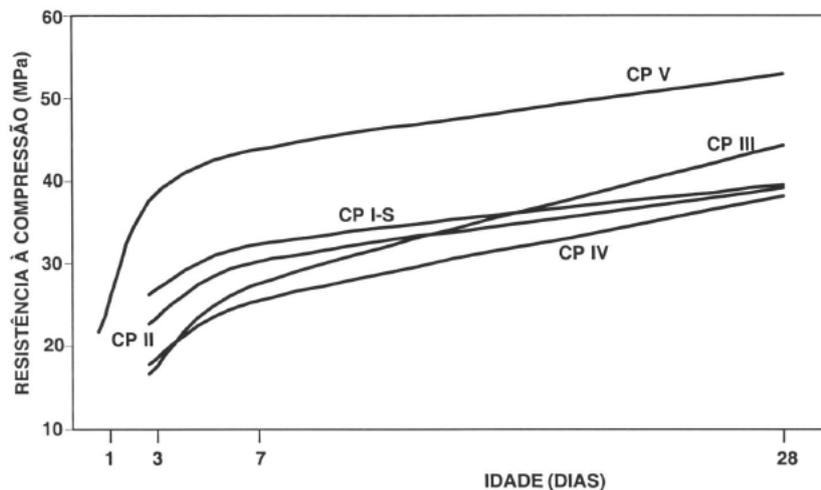
- cimento portland de alta resistência inicial;
- cimento portland resistente aos sulfatos;
- cimento portland branco;
- cimento portland de baixo calor de hidratação;
- cimento para poços petrolíferos.

A Tabela 3.1 apresenta a composição dos diferentes tipos de cimento.

**Tabela 3.1 – Composição dos tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).**

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clíquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

A Figura 3.1 apresenta a evolução da resistência à compressão para os diferentes tipos de cimento portland.



**Figura 3.1 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (ABCP, 1996).**

### 3.1.1.2 – Agregados

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os agregados são relativamente baratos e não entram em reações químicas complexas com a água. Portanto, tem sido usualmente tratado como um material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão do papel desempenhado pelos agregados na determinação de muitas propriedades importantes do concreto, este ponto de vista tradicional dos agregados como material inerte está sendo bastante questionado.

Neville (1997) salienta que pelo menos três partes do volume do concreto são ocupadas pelos agregados, sendo assim, de considerável importância. Com propriedades indesejáveis existentes nos agregados podem, não apenas produzir um concreto pouco resistente, como também comprometer a durabilidade e desempenho estrutural deste.

De acordo com Fortes (1995), os agregados não interferem significativamente nas interações concreto/aço e concreto/meio, mas têm influência em várias propriedades do concreto, como estruturais e permeabilidade.

### 3.1.1.2.1 – Classificação

#### a) Quanto à origem:

- naturais: são encontrados na natureza na forma de agregados: areia de mina, areia de rio, seixo rolado, pedregulho, etc; ou
- artificiais: necessitam de um trabalho para chegar a situação de uso como agregado: pedra britada, pedrisco, pó de pedra, argila expandida, poliestireno expandido, etc.

#### b) Quanto à massa:

- leves: massa inferior a 1 ton/m<sup>3</sup>: argila expandida, vermiculita, poliestireno expandido, etc; ou
- normais: massa de 1 a 2 ton/m<sup>3</sup>: areia, seixo, brita, etc;
- pesados: massa superior a 2 ton/m<sup>3</sup>: barita, magnetita, limolita, etc.

De acordo com a Norma Brasileira 7211 (2009 ), quanto ao tamanho:

- *agregado miúdo*: areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm;

- *agregado graúdo*: pedregulho ou a 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;

- *material pulverulento*: partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água presente nos agregados, definida na NM 46 (ABNT, 2003);

- *outros*: brita corrida e pedra de mão e pedra amarrada.

c) Quanto à obtenção:

- agregados naturais: extração direta do leito dos rios ou de minas. Devem ser lavados e classificados;
- agregados britados: obtidos pelo processo de britagem. Poderá haver também a necessidade de serem lavados; ou
- industrializados: são obtidos por processos industriais. Exemplos: poliestireno expandido escória britada, argila expandida, cinza leve, vermiculita, etc.

### **3.1.1.2.2 – Características dos agregados**

Segundo a Norma Brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados devem ser constituídos por grãos de minerais duros, compactos, duráveis e limpos. Não devem conter substâncias, de natureza e em quantidade, que possam afetar a hidratação do cimento ou dar origem a produtos expansivos. Devem apresentar, ainda, resistência à compressão superior a da pasta, boa forma e boa graduação.

Os agregados possuem diversas características e propriedades, cujo conhecimento e entendimento são fundamentais para a sua aplicação em concretos. Dentre elas, pode se destacar: composição granulométrica, massa específica, massa unitária, umidade, inchamento, impurezas, formas das partículas.

a) Composição granulométrica

Bauer (1980), explica que a composição granulométrica de um agregado é a proporção relativa, expressa em percentagem, em que se encontram os grãos de determinado agregado dos diferentes tamanhos, que constituem o material. Esta composição granulométrica tem grande influência nas propriedades futuras das argamassas e concretos confeccionados com este agregado.

Prudêncio (1999), no entanto, adverte que existem certos limites ou faixas granulométricas, em se tratando de agregado miúdo para concreto, onde se consegue resultados em termos de dosagem, quer sob o ponto de vista técnico ou econômico.

Devido a isso, sempre que possível, é viável que se façam composições de agregados miúdos, de modo que se obtenha um material com características granulométricas o mais próximo possível das especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009) - zona 3.

A composição granulométrica é determinada por peneiramento, através de peneiras utilizadas com malhas de forma quadrada, numa seqüência tal, que o lado de cada abertura tenha sempre o dobro do lado da abertura das malhas da peneira anterior. Essas peneiras e os limites granulométricos estão relacionados na NBR 7211 (ABNT, 2009).

Essa norma possui algumas ressalvas, dentre elas, de que podem ser utilizadas areias, cuja granulometria não se enquadre em qualquer uma das zonas indicadas, desde que sejam realizados estudos prévios de dosagem, ou então, que a faixa granulométrica seja de uso consagrado em determinada região.

#### a) Massa Específica

É a massa por unidade do volume, dos grãos dos agregados, incluindo o material sólido e os vazios permeáveis e impermeáveis. Pode ser determinado pelo frasco de *chapman* ou picnômetro. Seu valor é utilizado no cálculo do consumo de materiais em concretos e argamassas.

#### b) Massa Unitária

É a relação da massa total de um certo volume de agregados, e esse volume, considerado os vazios existentes entre os grãos do agregado. É por meio dela que se pode converter as composições das argamassas e concretos dados em massa para volume e vice-versa.

### c) Porosidade e Absorção do Agregado

A presença de poros internos nas partículas está relacionada com a massa específica do agregado. A porosidade, a permeabilidade e a absorção, influenciam propriedades como a aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, e a resistência ao congelamento e degelo (Schumacher, 2007).

Os poros do agregado variam muito de tamanho, sendo que os maiores podem ser visto ao microscópio ou mesmo a olho nu. Os menores, são maiores que os poros da pasta de cimento.

Quando os poros dos agregados estão preenchidos, diz-se que ele está saturado e com a superfície seca. Os níveis de secagem de um agregado estão representados na Figura 3.2.



**Figura 3.2 – Representação esquemática da umidade do agregado (Neville, 1997).**

O conhecimento do teor de umidade é de suma importância no estudo dos agregados, principalmente dos miúdos, devido ao fenômeno do inchamento. Além disso, a água contida em um agregado, influencia na quantidade de água a ser adicionada em um concreto, para proporcionar a trabalhabilidade adequada e a resistência estabelecida no processo de dosagem.

### d) Inchamento

De acordo com a Norma Brasileira NBR 6467 (ABNT, 2009), o inchamento é um "fenômeno da variação do volume aparente, provocado pela

*absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária...”.*

O coeficiente de inchamento é o quociente entre os volumes úmido e seco, de mesma massa de agregado. A umidade crítica é o teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio, sendo que o inchamento médio é o valor médio entre o coeficiente de inchamento máximo e aquele correspondente à umidade crítica.

Neville (1997) salienta que o inchamento é o aumento de volume de uma massa de areia, devido às películas de água, deslocando as partículas tentando separá-las. Embora não altere a quantificação dos materiais em massa, na quantificação em volume, o inchamento resulta numa menor massa de areia ocupando o mesmo volume em uma caixa de medida (padiola).

O valor do inchamento depende da porcentagem de umidade presente na areia e da sua finura. Adicionado-se mais água, as películas se fundem e a água se desloca para os vazios entre as partículas, de modo que o volume total da areia úmida passa a ser aproximadamente igual ao da seca, para o mesmo processo de preenchimento do recipiente. Foi observado que nas areias finas o inchamento é maior do que nas areias mais grossas. Para um mesmo teor de umidade, observamos que o agregado miúdo britado incha mais do que o natural.

Segundo Bauer (1980), tendo em vista que um agregado totalmente seco, ao ser posto em contato com a água, ocorrerá um preenchimento dos seus poros vazios. Uma correção na quantidade da água de amassamento do concreto deverá ser feita, de forma a ser mantida a quantidade de água, para proporcionar ao concreto as características desejáveis.

## e) Substâncias nocivas

A Tabela 3.2 apresenta as substâncias deletérias nos agregados.

**Tabela 3.2 – Substâncias nocivas.**

Tipos	Agregados	
	Miúdo	Graúdo
Torrões de argila, determinado de acordo com a NBR 7218	1,5	-
- em concretos cuja aparência é importante	-	1,0
- em concretos submetidos a desgaste superficial	-	2,0
- nos demais concretos	-	3,0
Material pulverulento, determinado de acordo com a NBR 7219	-	1,0
- em concretos submetidos a desgaste superficial	3,0	-
- os demais concretos	5,0	-
Materiais carbonosos, determinado de acordo com a ASTM C 123	-	-
- em concretos cuja aparência é importante	0,5	0,5
- nos demais concretos	1,0	1,0

**Nota:** para os agregados miúdos, estes limites podem ser aumentados para 5% e 7 % em massa, respectivamente, quando o material que passa pela peneira ABNT 0,075 mm for constituído totalmente de grãos gerados durante o britamento de rochas.(fonte NBR 7211/84)

- **Torrões de argila:** são assim denominadas todas as partículas de agregado desagregáveis sob pressão dos dedos (torrões friáveis). Sua presença é bastante nociva para a resistência de concretos, em certos casos, expansivos.

- **Materiais carbonosos:** são partículas de carvão, linhito, madeira e material vegetal sólido, presentes nos agregados. Além, de afetarem a resistência, prejudicam o concreto quando submetido à abrasão.

- **Material pulverulento:** em geral as areias contém impurezas que interferem com o processo de hidratação do cimento; películas que impedem a aderência afetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada.

As películas de argila, quando presentes na superfície do agregado, interferem na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, prejudicando a resistência e a durabilidade do concreto. Já as partículas finas, não devem estar presentes em grandes quantidades, pois aumentam a área superficial e, conseqüentemente, a demanda de água e o consumo de cimento.

As partículas não sãs e friáveis são aquelas que não conseguem manter a integridade, resultando em expansão ou desagregação, quando expostas ao congelamento ou à água.

#### f) Forma das partículas

Os grãos dos agregados podem ser arredondados, como os seixos, ou de forma angular e de arestas vivas, com faces mais ou menos planas, como os da pedra britada. Esta forma geométrica dos agregados tem grande influência na qualidade dos concretos.

Bauer (1980) salienta que, sempre que possível, devemos utilizar agregados em forma de grãos arredondados. As quantidades de água necessárias para mistura de um concreto com pedregulhos (arredondados) é menor que a para pedra britada, devido a forma. Contudo, com o emprego de pedra britada, devido a aderência entre os grãos e a argamassa, consegue-se um concreto mais resistente ao desgaste a tração do que fabricados com pedregulhos.

Os grãos de formato semelhante a uma agulha ou a um disco, fornecem concretos menos trabalháveis e requerem mais pasta de cimento. Hoje, existem máquinas que arredondam os grãos angulosos, e o custo desta operação, é repassado ao preço do produto.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009), especifica que os agregados para concreto têm, em média, uma relação entre o comprimento e a espessura do grão inferior a 3, isso quando determinada segundo a NBR 7809 (ABNT, 2008).

### **3.1.1.3 – Água**

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), via de regra, uma água imprópria para beber não é necessariamente imprópria para o amassamento do concreto. Do ponto de vista de resistência do concreto, água ácida, alcalina, salgada, salobra, colorida ou com mau cheiro não deve ser rejeitada imediatamente. Isto é importante, porque as águas recicladas da mineração e várias outras operações industriais podem ser usadas seguramente como água

de amassamento para o concreto. O melhor método para determinar a aptidão de uma água de desempenho desconhecido para o preparo do concreto é comparar o tempo de pega do cimento e a resistência de corpos-de-prova de argamassa feitos com água desconhecida e uma água limpa de referência.

Segundo Neville (1997), impurezas contidas na água podem influenciar negativamente, a resistência do concreto, causar manchas em sua superfície, ou ainda, resultar em corrosão da armadura. Por essas razões, deve-se dar atenção à qualidade da água para amassamento e para cura do concreto. Por via de regra, água deverá ter PH de 6,0 a 8,0 ou, possivelmente, até 9,0, sem sabor de salobras.

#### **3.1.1.4 – Aditivos minerais**

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define que o termo adições refere-se à produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características e aditivos à produto químico adicionado em pequenos teores às caldas, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características no estado fresco e/ou endurecido.

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais são usadas na construção civil desde a Antiguidade. Na Grécia, em 1500 a.C., adotava-se um material de origem vulcânica para execução de várias obras. Mais tarde, surgiram outros materiais usados como adição, como argila calcinada. Nos dias atuais, as adições minerais normalmente usadas são resíduos provenientes de outras indústrias.

De forma geral, as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais, podem ser atribuídas aos efeitos físicos e químicos. Os efeitos físicos podem ser divididos em três: diluição do cimento Portland, efeito fíler e nucleação.

A diluição do cimento é um efeito adverso proporcionado pela substituição de uma parcela do cimento pelo aditivo mineral, aumentando a relação água-cimento, e, conseqüentemente, proporcionando uma diminuição dos produtos formados pelas reações de hidratação (Lawrence et al. 2003).

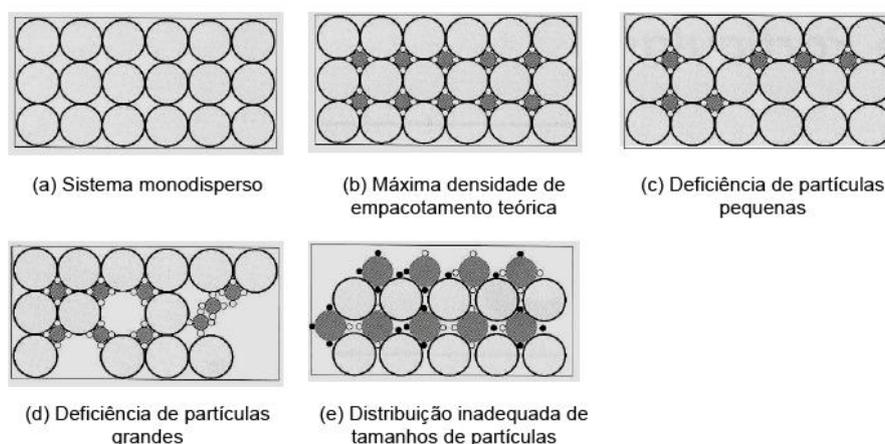
O efeito de nucleação ocorre devido ao aumento da superfície efetiva de contato com o meio aquoso, promovido pelo preenchimento dos interstícios dos cristais de clínquer por partículas extremamente pequenas adicionadas ao cimento Portland. A atividade cimentícia dos constituintes do clínquer é determinada por reações de superfície (topoquímicas) e está diretamente ligada com a área específica efetiva de contato com o meio aquoso, promovendo a aceleração das reações de hidratação dos compostos (Cordeiro, 2006).

O efeito químico trata-se da atividade pozolânica, quando compostos quimicamente ativos do aditivo mineral reagem com o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland, formando novos produtos hidratados.

Os fillers são agregados mais finos, constituídos de partículas minerais e dimensões inferiores a 0,075 mm. Os fillers têm grãos de dimensões da ordem dos de cimento Portland (Petrucci, 1998).

Segundo Neville (1997) o fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação, ativando a hidratação dos grãos de cimento. Calcáreo, pó de quartzo e pó de pedra são materiais considerados como fíler.

O efeito fíler (Figura 3.3) é consequência da maior compacidade conferida à mistura pela inclusão de partículas finas e ultrafinas do aditivo mineral (Oliveira, 2000).



**Figura 3.3 – Sistema de partículas (Oliveira, 2000).**

Os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, em grande parte, de acordo com seus comportamentos granulométrico, químico e morfológico, apresentam características satisfatórias para sua utilização como fíller (Destefani, 2009).

Reis (2008) utilizou o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como fíler na produção de ladrilhos hidráulicos de piso tátil.

### **3.1.1.5 – Aditivos**

De acordo com o ACI 212.3R (1996), os aditivos são materiais empregados em concretos e argamassas com o propósito de modificar suas propriedades, tornando-os mais adequados em termos de trabalho, manuseio, economia ou outros fins.

#### *Aditivos Superplastificantes*

Segundo Ramachandran et. al. (1998), superplastificantes são aditivos químicos capazes de manter a adequada trabalhabilidade do concreto fresco sob baixa relação água/cimento, por um período de tempo razoável, sem afetar as propriedades de pega e endurecimento. Estes aditivos são também conhecidos como redutores de água, devido à sua característica de reduzir a quantidade de água empregada na mistura mantendo a mesma fluidez, ou ainda de aumentar a fluidez sem um acréscimo de água (ACI 212.4R, 1996; Altin et. al., 1994). Em relação à estrutura química, os superplastificantes usados na indústria do concreto são basicamente surfactantes poliméricos com uma elevada massa molecular e um grande número de unidades moleculares que são repetidas em uma certa sequência (Roncero, 2000).

Segundo Isaia (2005) esses produtos são utilizados basicamente com um ou alguns destes objetivos:

- Maior trabalhabilidade: aumentando a trabalhabilidade do concreto e mantendo a mesma resistência;

- Incremento da resistência e durabilidade: reduzindo o fator água/cimento e mantendo a mesma trabalhabilidade; e
- Redução de custo: reduzindo simultaneamente o conteúdo de água e cimento para uma mesma resistência e trabalhabilidade do concreto.

Os aditivos redutores de água, em especial os superplastificantes, reduzem ligeiramente a viscosidade plástica, mas diminuem em grande medida a resistência ao fluxo (Zerbino e Barragán, 2007). Isso se deve ao fato de que as adições de superplastificante interagem com as partículas do cimento introduzindo uma camada de adsorção que evita a aproximação entre elas por meio de uma combinação de repulsões eletrostáticas, que confere as mesmas cargas e, portanto, provocando repulsão, além de um efeito denominado repulsão estéricas, que é produzido pela presença de cadeias longas, que agem como barreira entre as partículas de cimento e possuem um forte efeito dispersante; conseqüentemente, reduzindo a tensão de escoamento do material. Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade plástica (Castro, 2007).

### **3.1.2 – Propriedades do concreto fresco**

#### *a) Trabalhabilidade*

A trabalhabilidade do concreto é uma das mais importantes propriedades do concreto e é influenciada por fatores como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, traço, teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade representa características do concreto fresco, de difícil avaliação quantitativa. Esta propriedade é completamente relacionada com a consistência, coesão, exsudação e segregação.

A segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme (Neville, 1997). A exsudação é uma forma de segregação em que em que uma

parte da água da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém-aplicado (Neville, 1997). A incorporação de adições aumenta a viscosidade do concreto no estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendente da água.

As adições minerais exercem grandes influências nestas propriedades, devido às características físicas e à reatividade química. A finura das adições, quando incorporadas ao concretos, reduzem o tamanho e o volume de vazios, dando uma melhoria na coesão, diminuindo a segregação e exsudação (Kyhara, 1981).

A trabalhabilidade determina a facilidade com o qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva. Um concreto difícil de lançar e adensar aumenta o custo de manipulação e também terá resistência, durabilidade e aparência inadequadas. Uma das principais características do concreto que determina sua aptidão para ser manuseado é a sua consistência que pode ser definida como maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação da sua própria massa. O índice de consistência, medido pelo abatimento do tronco de cone é considerado um dos parâmetros adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco.

#### *b) Demanda de água*

Devido à finura das adições e elevada superfície específica, quando incorporadas ao concreto provocam um aumento na demanda de água para manter a mesma consistência. Porém, em alguns casos, dependendo das características da adição, este efeito pode ser adverso (Gonçalves, 2000).

#### *c) Hidratação*

De acordo com Neville (1997), a hidratação do cimento depende principalmente de sua finura. Na hidratação do C2S e C3S, há a suposição que o C3SH3 seja formado como o produto final, conforme as equações abaixo:





onde, C<sub>2</sub>S – silicato dicálcico; C<sub>3</sub>S – silicato tricálcico, C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> – silicato de cálcio hidratado.

A presença de adições minerais pode acelerar o processo de hidratação, pois as partículas da adição servem como pontos de nucleação dentro da mistura.

De acordo com Neville (1997), o calor de hidratação é a quantidade de calor, em joules por grama de cimento não hidratado, que se desprende até a hidratação completa a uma temperatura estabelecida. A hidratação dos compostos de cimento Portland é exotérmica, chegando a liberar até 500J/g de cimento.

Com a inclusão de adições minerais na mistura do concreto ocorrerá uma diminuição do calor de hidratação, pois ocorre uma diminuição do consumo de cimento (Gonçalves, 2000).

#### *d) Tempos de Pega e Cura*

O início e fim de pega dos concretos definem o limite de manuseio e o início do desenvolvimento da resistência (Mehta et al. 1994).

Como a hidratação está relacionada com o intertravamento dos produtos de hidratação e o preenchimento de espaços vazios e um conseqüente aumento da resistência, as pequenas partículas das adições influenciam bastante nos tempos de pega e cura dos concretos. Estes podem provocar uma diminuição dos tempos de pega devido à aceleração da hidratação provocada pelo efeito fíler, no concreto recém misturado (Gonçalves, 2000).

### **3.1.3 – Propriedades do concreto endurecido**

A fase denominada de concreto endurecido inicia-se com a hidratação do cimento e conseqüente endurecimento do concreto, estendendo-se por toda a vida da estrutura. Entre as principais propriedades mecânicas estão a

resistência à compressão e resistência à tração e entre as propriedades físicas está a massa específica (Schumacher, 2007).

### *Massa Específica*

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o concreto pode ser classificado em três categorias. O concreto de peso normal, contendo areia natural e seixo rolado, tem seu peso específico em torno de 2400 kg/m<sup>3</sup>. O concreto leve, usando-se certos agregados naturais ou processados termicamente possuem baixa densidade, aproximadamente 1800 kg/m<sup>3</sup> e os concretos pesados, produzidos a partir de agregados de altas densidades, possui densidade da ordem de 3200 kg/m<sup>3</sup>.

### *Resistência à Compressão*

Em projetos de estruturas de concretos a resistência à compressão é especificada e muitas outras propriedades estão diretamente relacionadas e podem ser deduzidas a partir da resistência à compressão. A resistência à compressão axial aos 28 dias é aceita como um índice geral da resistência mecânica do concreto.

Os fatores que afetam a resistência incluem propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura. A relação água/cimento (A/C) é o fator mais importante porque afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, além de controlar o processo de hidratação (Schumacher, 2007).

### *Resistência à Tração*

A maioria dos elementos de concreto não são projetados para resistir à tensões de compressão, já que a razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão é geralmente em torno de 0,07 a 0,11 (Mehta e Monteiro, 1994), sendo utilizadas armaduras de aço para absorver estas tensões.

### 3.2 – Ladrilho hidráulico

A NBR 9457 (ABNT, 2013) define o ladrilho hidráulico como uma placa de alta resistência ao desgaste, destinada ao acabamento de paredes e pisos, cuja superfície apresenta textura lisa ou em relevo, podendo ser colorida ou não, de diferentes formatos geométricos e espessura da ordem de 25 mm.

Segundo CAVALLI e VALDUGA (2006) pode-se definir o ladrilho hidráulico como sendo um revestimento composto de concreto prensado usado para revestir ambientes internos ou externos.

A norma vigente no Brasil que estabelece as características técnicas dos ladrilhos hidráulicos é a NBR 9457 (ABNT, 2013).

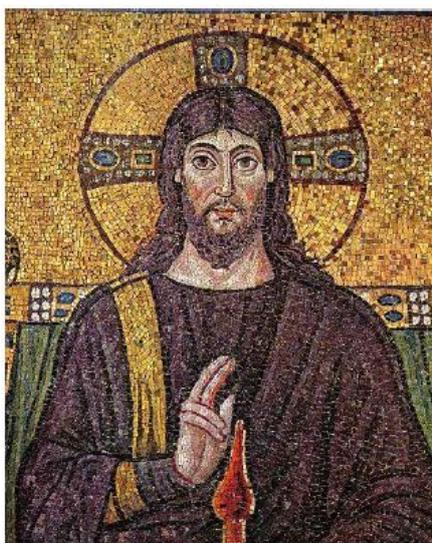


**Figura 3.4 – Ladrilhos hidráulicos do teatro José de Alencar em Fortaleza/CE (Marques, 2012).**

No Brasil, a história do ladrilho se confunde com a do país: as primeiras peças para piso chegaram importadas de Portugal, França e Bélgica, sendo que a produção brasileira vem do final do século passado, quando surgiram as primeiras fábricas, algumas delas existentes até hoje. Inicialmente com base de lajotões de barro – dos quais alguns remanescentes ainda podem ser vistos na *Igreja de São Francisco* - Vila dos Pescadores, próxima à cidade de São Sebastião, SP (Reis, 2008).

A chegada do ladrilho hidráulico proporcionou um novo meio para a reprodução de desenhos tradicionais ou um novo campo para a expressão dos artistas e o trabalho de artesãos (Machado, 2005).

O processo de produção dos ladrilhos hidráulicos data do século 18, sendo que não existiam referências claras da sua origem, supostamente árabe. Ainda assim, é possível afirmar que a raiz destes ladrilhos remonta aos antigos mosaicos bizantinos (Figura 3.5), isto se comparadas as formas e as estruturas das peças, pois o ladrilho, assim como o mosaico, além da função técnica como material para revestimento, pode trazer informação por meio de desenhos, cores e texturas (Marques, 2012).



**Figura 3.5 – Mozaico Bizantino (Marques, 2012).**

No século XX, o uso do ladrilho hidráulico passou a ter sua utilização ampliada, principalmente nas áreas “frias” das residências, substituindo o chamado cimentado “vermelhão”, tido como material muito pobre. Uma casa modesta, usava ladrilho liso ou com algumas peças com desenhos simples com uma ou duas cores, normalmente geométrico, formando “tapetes”; e em casas mais “abastadas”, o desenho era mais sofisticado e continha formas mais elaboradas e com mais cores (Machado, 2005).

O ladrilho hidráulico teve seu auge no Brasil nas décadas de 1930, 40 e 50 que, ficou comprometida comercialmente com o crescimento da indústria cerâmica com sua linha de produção automatizada, que afetaram as fábricas de ladrilhos hidráulicos (Carvalho, 2008).

No final do século XX, os arquitetos passam a valorizar os revestimentos hidráulicos, personalizando projetos, na busca de singularidade e design

intimista, associado ao estilo vintage encontrados nos ladrilhos hidráulicos (Catoia, 2007).

### **3.2.1 – Materiais e processos de fabricação**

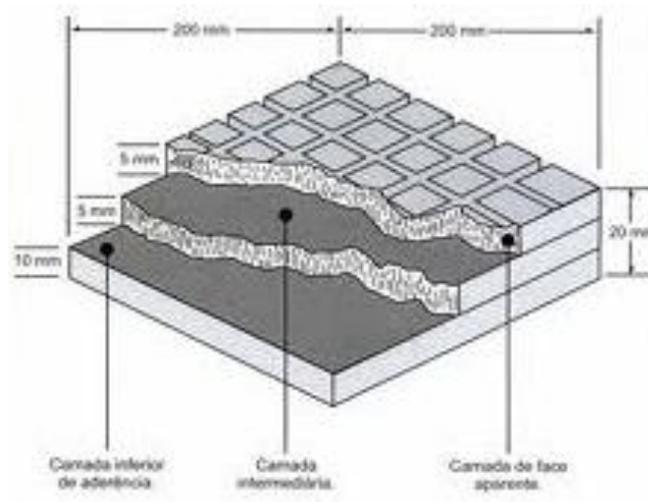
Segundo a NBR 9457 (ABNT, 2013) a fabricação do ladrilho hidráulico exige a utilização dos seguintes materiais:

- Cimento branco ou Portland CP 32 ou superior;
- Agregados com granulometria das peneiras nº 40 a 80;
- Agregados com granulometria das peneiras nº 14 a 40;
- Pigmentos inorgânicos (óxido de ferro, negro de fumo, etc) com utilização máxima de até 3% sobre o peso do cimento, na face aparente; e
- Água.

A NBR 9457 (ABNT, 2013) ainda especifica que o ladrilho hidráulico é composto de três camadas:

- Camada superior: superfície ao ladrilho com textura lisa ou em relevo, colorido ou não, com 5 mm de espessura;
- Camada inferior: parte do ladrilho que contém a superfície destinada ao seu assentamento, com 10 mm de espessura; e
- Camada intermediária: parte do ladrilho que fica entre as camadas superior e inferior, com 5 mm de espessura.

As três camadas do ladrilho hidráulico possuem características tais como: a camada superior é bastante fluida e é a camada de impressão do desenho; a camada intermediária, denominada secante, tem como função absorver a água em excesso da camada superior e fixar o desenho; e a camada inferior é uma argamassa seca, que deve ser constituída de material poroso e deve favorecer a aderência do ladrilho (Spnelli, 2001).



**Figura 3.6 – Camadas do ladrilho hidráulico.**

As etapas de fabricação do ladrilho hidráulico são apresentadas na Figura 3.7.



**(a) Moldagem da camada superior; (b) moldagem da camada intermediária.**



**(c) Moldagem da camada inferior; (d) processo prensagem manual.**



(e) Estocagem após prensagem; (f) cura.

**Figura 3.7 – Etapas do processo de fabricação do ladrilho hidráulico.**

Verifica-se que o processo de fabricação dos ladrilhos hidráulicos é bastante complexo e artesanal. A literatura diverge muito com relação ao processo de fabricação do ladrilho hidráulico devido ao caráter artesanal do mesmo (Cavalli e Valduga, 2006).

Dentro deste contexto, o presente trabalho busca a dosagem de um traço com o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, visando a fabricação do ladrilho hidráulico em uma única camada e por processo de vibração, facilitando a produção deste produto e, conseqüentemente reduzindo custos.

### **3.2.2 – Propriedades a serem avaliadas no ladrilho hidráulico**

Estão definidas na NBR 9457 (ABNT, 2013) as características técnicas dos ladrilhos que devem ser comprovadas e controladas por testes de laboratório após 28 dias de sua fabricação. O tamanho da amostra (n), ou seja, a quantidade de corpos-de-prova é considerada para caracterização de lote de ladrilho hidráulico com 12.500 peças. A Tabela 3.3 apresenta o tamanho da amostra e os limites exigidos pela NBR 9457 (ABNT, 2013).

**Tabela 3.3 – Tamanho da amostra e limites exigidos pela NBR 9457/2013 para ladrilhos hidráulicos.**

Características		Limites	Tamanho amostra
Ensaio destrutivo	Absorção de água	Máximo de 8%	5 pç
	Resistência ao desgaste por abrasão	Máximo de 3 mm em 1000 m	10 pç
	Módulo de ruptura à flexão (MRF)	Valor médio da amostra 5 MPa Valor individual mínimo 4,6 MPa	5 pç
Ensaio não destrutivo	Espessura	Tolerância de +/- 10%	20 pç
	Comprimento e Largura	Tolerância de +/- 0,2%	20 pç

### 3.2.3 – Estudo com ladrilhos hidráulicos

Moura et al. (2002) inseriu o resíduo de corte de mármore e granito em argamassa para produção de ladrilho hidráulico, chamado no trabalho de “lajota de piso”. Foram produzidos ladrilhos hidráulicos com argamassa de traço 1:0,5:0,5 (cimento:resíduo:areia siltosa) nas dimensões 20 cm x 20 cm x 1,5 cm em uma prensa manual. Verificou-se um resultado positivo na aparência dos pisos produzidos com resíduo e facilidade da mistura dos materiais.

Reis (2008) adicionou o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais nos teores de 20% a 31% em relação à massa anidra dos ladrilhos hidráulicos. Os ladrilhos foram produzidos em três camadas e compactados em prensa hidráulica semi-industrial. Os resultados encontrados apresentaram alta resistência à flexão, porém, quanto aos limites da norma, referentes à absorção de água e à resistência ao desgaste por abrasão, não são passíveis de serem atendidos a partir de dosagens viáveis economicamente.

### 3.2.4 – Ladrilho hidráulico piso tátil

O ladrilho hidráulico piso tátil é o ladrilho hidráulico usado em piso caracterizado pela diferenciação de textura e cor em relação ao piso adjacente.

O objetivo do ladrilho hidráulico piso tátil é servir de sinalização tátil para o deficiente visual, ou seja, ser perceptível por pessoas com deficiência visual. A textura do piso pode ser destinada a constituir tipo de alerta ou direcional.

A sinalização tátil no piso pode ser do tipo de alerta ou direcional. Ambas devem ter cor contrastante com a do piso adjacente, e podem ser sobrepostas ou integradas ao piso existente.

A textura da sinalização tátil de alerta consiste em um conjunto de relevos tronco-cônicos conforme exigências descritas na NBR 9050 (ABNT, 2005). A modulação do piso deve garantir a continuidade de textura e o padrão de informação.

Na NBR 9050 (ABNT, 2005) estabelece as diretrizes para acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.

A Lei 10.098/00 estabelece as normas gerais e os critérios básicos para a promoção da acessibilidade mediante a supressão de barreiras e obstáculos nas vias e espaços públicos, no mobiliário urbano, na construção e na reforma de edifícios e nos meios de transporte e de comunicação.

Municípios como Curitiba, Recife, Florianópolis, Rio de Janeiro, São Paulo, Vitória, entre outras, realizam estudos e execuções de obras de adaptação das calçadas, buscando a adequação aos padrões de acessibilidade, em atendimento à legislação federal e legislações estaduais e municipais.

No Rio de Janeiro, o Ministério Público Estadual (MPE) tem utilizado o Termo de Ajuste de Conduta (TAC) para obrigar os municípios a cumprirem o que dispõe a legislação vigente, o qual determina as intervenções que o município deve realizar e estabelece prazos de conclusão para essas intervenções (Mota, 2008).

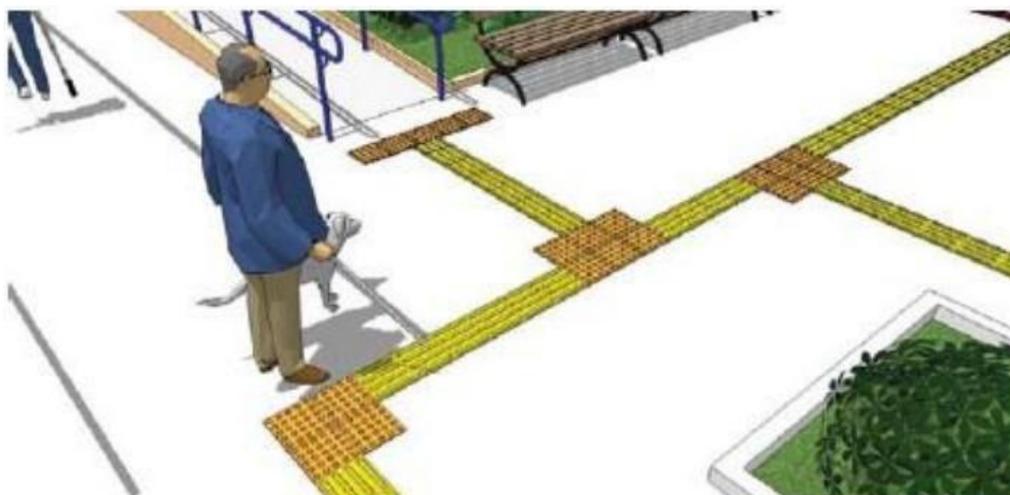
Segundo Mota (2008) alguns municípios tem firmado os TAC e o Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio de Janeiro (CREA-RJ) tem atuado como parceiro do MPE, participando de audiências públicas, ministrando seminários e desenvolvendo cartilhas para orientação quanto ao plano de ação dos municípios, bem como na conscientização.

As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam um guia para a projetos de calçada acessível de espaços públicos, com a finalidade de padronizar e garantir

acesso a todos, elaborada pela secretaria municipal de planejamento e desenvolvimento sustentável do município de Seropédica/RJ.



**Figura 3.8 – Faixas de utilização da calçada (SMPDS, 2012).**



**Figura 3.9 – Composição de sinalização tátil de alerta e direcional em rota acessível (SMPDS, 2012).**

O padrão de acessibilidade previsto nas calçadas contém: faixas de percurso seguro, faixas de serviço (piso tátil de alerta), ilhas de serviço para implantação de mobiliário urbano e rampas com sinalização tátil para garantir e facilitar a circulação, principalmente de pessoas com deficiência. A Figura 3.10 apresenta calçadas com a utilização do ladrilho hidráulico piso tátil.



**Figura 3.10 – Calçada com a utilização do ladrilho hidráulico piso tátil.**

### **3.3 – Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**

As rochas são classificadas cientificamente de acordo com suas composições químicas e mineralógicas e também, com base em sua textura.

As rochas ornamentais e de revestimento, também chamadas como rochas dimensionadas (dimension stones), abrangem tipos litológicos que podem ser extraídos em forma de blocos, transformados em placas, cortadas e beneficiadas (Silva, 1998). Frascá (2007) define as rochas ornamentais como sendo todos os materiais rochosos aproveitados pela sua aparência estética e usados como elemento decorativo, em trabalhos artísticos e como materiais para a construção.

O granito é uma rocha plutônica ou intrusiva granular, formada essencialmente por quartzo e feldspato, acessoriamente por biotita e moscovita. É resultante do lento processo de resfriamento e solidificação do magma (ABNT 6502/1995).

O mármore é uma rocha metamórfica contendo mais de 50% de carbonatos (calcita ou dolomita) formados pela recristalização de uma rocha carbonatada (Guerreiro, 2000).

A China foi a maior produtora mundial em 2007, com 26,5 milhões de toneladas. O segundo maior produtor foi a Índia, com 13 milhões de toneladas, tendo-se ainda Brasil, Turquia e Itália, com uma produção próxima de 8 milhões de toneladas. A China foi responsável por 25% do total do volume físico das exportações mundiais em 2007 e, em sequência, a Índia (12,1%), Turquia (10,2%), Itália (7,2%), Espanha (5,7%) e Brasil (5,4%) (MME, 2009).

O mercado de rochas ornamentais e de revestimento compreende os mármore e granitos que perfazem cerca de 90% da produção mundial, estando o Brasil entre os cinco maiores produtores mundiais de rochas ornamentais (ME, 2007).

O Espírito Santo dispõe de um parque industrial com cerca de 1.000 empresas e representa 65% das exportações brasileiras (Sedes, 2012). O município de Cachoeiro de Itapermirim é conhecido nacionalmente pela produção de rochas ornamentais, destacando-se pelo pioneirismo no setor (ME, 2012).

### 3.3.1 – Resíduos gerados do beneficiamento de rochas ornamentais

O resíduo utilizado neste trabalho foi gerado do beneficiamento de blocos de rochas ornamentais para a transformação em chapas e posterior acabamento e polimento.

A Figura 3.11 (a) mostra a vista lateral/transversal de um tear em funcionamento e a Figura 3.11 (b) mostra a parte frontal com suas lâminas penduradas em um pórtico.



(a) (b)  
**Figura 3.11 – Processo de serragem dos blocos de granito (Destefani, 2009).**

De acordo com estudos realizados por diversos autores, o processo de serragem dos blocos de rochas ornamentais gera enormes quantidades de resíduos (Figura 3.12) descritos na Tabela 3.4.



**Figura 3.10 – Lama gerada do beneficiamento de rochas ornamentais (Destefani, 2009).**

**Tabela 3.4 – Estimativa da produção de resíduo.**

Autores	Estimativa de resíduos gerados (% em volume em relação ao bloco)
Freire e Mota (1995) e Souza (2001)	20% a 25%
Gonçalves (2000) e Cavalcanti (2006)	25% a 30%
Silva (1998) e Vieira (2004)	30%
Gobbo et al. (2004) e Mello et al. (2006)	30% a 40%
Almeida, Branco e Santos (2007); Acchar e Dantas (2007)	40%
Almeida e Pontes (2001)	40% a 50%
Villaschi e Sabadini (2000)	25% a 30%
INET (2001)	25%

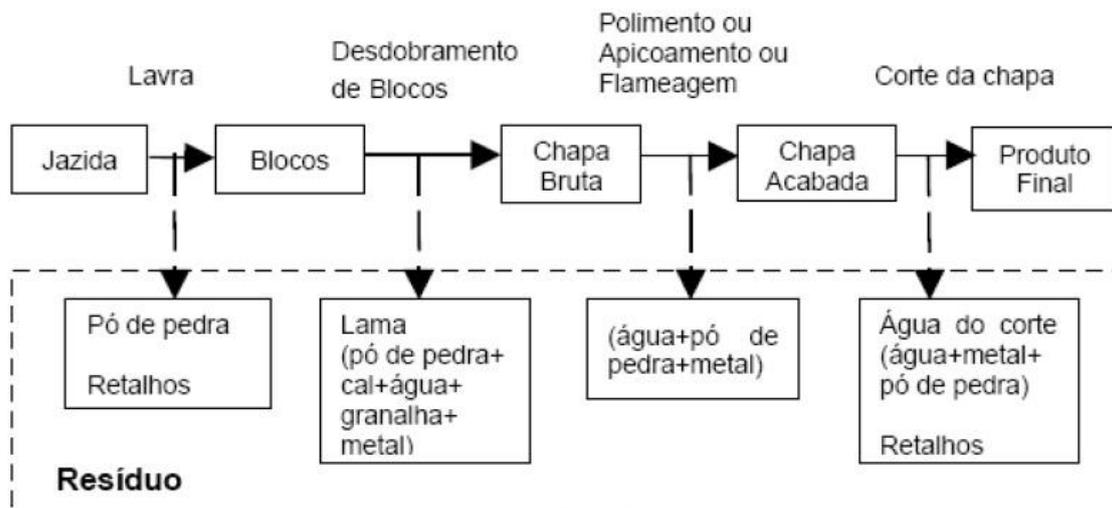
O beneficiamento de rochas ornamentais é dividido em:

- Extração dos blocos;
- Desdobramento dos blocos;
- Polimento;
- Cortes e acabamentos finais.

O s resíduos gerados nestes processos são:

- Pó de pedra e retalhos;
- Lama (pó de pedra + cal + água + granalha metálica);

A Figura 3.13 mostra todas as etapas do processo de beneficiamento das rochas ornamentais.



**Figura 3.13 – Processo da geração de resíduos na indústria de rochas ornamentais (Reis, 2008).**

O resíduo gerado e utilizado neste trabalho difere do resíduo resultante do processo de beneficiamento ilustrado na Figura 3.13, pois o desdobramento dos blocos é feito através de fios diamantados, eliminando a presença de gralalha e metal nos resíduos resultantes deste processo.

### **3.3.2 – Utilização dos resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais**

Através da revisão bibliográfica realizada, verificou-se vários trabalhos propondo a aplicação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em segmentos da construção civil.

Apesar de haver um grande número de pesquisas no Brasil, poucos estudos acadêmicos se tornaram inovações tecnológicas, ou seja, a utilização propriamente dita do resíduo ainda é pequena (Reis, 2008).

### **3.3.2.1 – Utilização do resíduo em concretos**

Lisboa (2004) utilizou o resíduo do beneficiamento de mármore e granito para a produção de concreto auto-adensável e seus estudos indicaram pela viabilidade técnica da utilização do resíduo na produção destes concretos.

Lameiras (2004) utilizou o resíduo do beneficiamento de chapas de granito na produção de concretos. O resíduo não interferiu nos módulos de elasticidade dos concretos. Substituindo o cimento de 10% em massa pelo resíduo, houve perda de resistência, porém, substituindo parte do agregado miúdo por estes resíduos, houve aumento da resistência à compressão da ordem de 26%, para os concretos com relação a/c igual a 0,65 e 30% de resíduo em substituição ao agregado.

Rocha (2008) avaliou a potencialidade de utilização de resíduos do corte de rochas (RCR) como adições minerais com características de fíler e pozolana, respectivamente, na fabricação de concretos de resistência convencional (25 MPa). Os resultados indicaram que é possível a produção de concretos com resistência convencional a partir do RCR.

### **3.3.2.2 – Utilização do resíduo em argamassas**

Freire e Mota (1995) constatou que o resíduo de rochas ornamentais, por apresentar fina granulometria e composição química com a presença de óxidos, tais como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e é compatível com o uso em argamassas na construção civil.

Calmon et. al. (1997a) empregaram o resíduo do beneficiamento das rochas ornamentais em argamassas de assentamento com dosagens em volume 1:2:8 e 1:1:6 (cimento:cal:areia), substituindo-se a cal por 25%, 50%, 75% e 100% de resíduo em massa. O uso do resíduo mostrou-se viável substituindo a cal em 100%.

Silva (1998) mostra, com base nos resultados da caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito que, devido às suas propriedades físicas, mecânicas, etc., o resíduo é potencialmente viável para a aplicação na fabricação de argamassas de assentamento.

Bahiense (2007) usou o planejamento de experimentos com aplicação da metodologia de rede simplex de misturas para avaliar o comportamento de argamassas em função dos teores de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais em diferentes teores de incorporação. O modelo matemático que mais se ajustou aos experimentos foi o Modelo Cúbico Completo, apresentando resultados bastante satisfatórios para as propriedades analisadas, capacidade de retenção de água e resistência à compressão.

### **3.3.2.3 – Utilização do resíduo em materiais cerâmicos**

Menezes (2002) avaliou a possibilidade de adição do resíduo do beneficiamento de granito em massas cerâmicas para a confecção de blocos e revestimentos cerâmicos. Com base nos resultados verificou-se que os resíduos apresentam características físicas e mineralógicas semelhantes as das matérias-primas cerâmicas convencionais e que corpos cerâmicos formulados com resíduo apresentam características dentro das especificações da normalização brasileira tanto para blocos como para revestimentos cerâmicos.

Moreira *et al.* (2003) utilizaram um resíduo do beneficiamento da serragem de granito do Estado do Espírito Santo, como aditivo na fabricação de produtos cerâmicos para construção civil. Foram utilizadas misturas contendo até 10% em peso de resíduo, e sinterizadas em sete diferentes temperaturas entre 850 °C e 1150 °C. Os resultados revelaram que o resíduo é um material polimineral não plástico constituído basicamente por sílica, feldspatos, mica e calcita. Através dos resultados, concluíram que os corpos sinterizados contendo resíduo de serragem de granito têm uso provável em cerâmica vermelha, contribuindo para minimização de resíduos e desenvolvimento auto-sustentável.

Neves *et al.* (1999) usaram o resíduo do beneficiamento de granito na confecção de tijolos cerâmicos, misturados com 40%, 50% e 60% de argila, prensados manualmente e queimados. Os resultados mostraram que a mistura de 50% de resíduo com 50% de argila conduziu aos melhores valores de absorção e de porosidade aparente e ao aumento da resistência à

compressão. Foi recomendado o teor de 40% de argila e 60% de resíduo e temperatura de 1100 °C na confecção dos tijolos cerâmicos.

Xavier *et al.* (2003) observaram, através do Planejamento Experimental Fatorial, a melhoria das propriedades físicas e mecânicas das misturas de resíduo do corte de granito na massa cerâmica vermelha moldada através de sistema de prensagem. As misturas argilosas foram preparadas com diferentes teores de resíduo, queimadas e analisadas. Conclui-se, através do tratamento estatístico, que o uso de 5% de resíduo a 950°C resultaram em peças cerâmicas de baixa absorção de água, menor peso e menores variações dimensionais.

#### **3.3.2.4 – Utilização do resíduo em tijolos de solo-cimento**

Calmon *et al.* (1998) e SILVA (1998) estudaram o uso do resíduo de corte de granito na produção de tijolos de solo-cimento. Foi utilizada a proporção 1:14 (cimento:solo), em volume, realizando substituições de 10%, 30%, 50% e 70% de resíduo em relação à massa de solo. A resistência à compressão dos tijolos diminui com o aumento do teor de resíduo, porém, atenderam aos valores exigidos por norma. Conclui-se que a adição de 50% atende a todas as propriedades analisadas. Também foi realizada a caracterização ambiental do produto final (tijolo com adição de resíduo) e foi observado que este não apresenta riscos ao meio ambiente.

Miranda *et al.* (2007) estudaram a aplicação do resíduo do beneficiamento de mármore e granitos em tijolos de solo-cimento produzidos por prensagem manual. O resíduo foi adicionado nos teores de 0%, 10%, 15% e 30% e o cimento, nos teores 5%, 10% e 15%. Verificou-se que o resíduo pode diminuir o consumo de cimento nestes tijolos.

#### **3.3.2.5 – Utilização do resíduo em concreto asfáltico**

Souza (2001) e Souza *et. al* (2004) avaliaram o uso do resíduo da serragem de rochas graníticas como fíler em concretos asfálticos usinados a quente. O resíduo age como fíler, preenchendo os vazios e aumentando a

viscosidade do asfalto. Foi comprovado que o uso do resíduo, substituindo produtos convencionais no teor de 6%, atendeu aos métodos de misturas asfálticas do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNER), para um teor de 5,5% de cimento asfáltico.

Carvalho *et. al.* (2006) verificaram o potencial do uso do resíduo mineral granítico em substituição aos agregados usados em pavimentação, tendo o resíduo se enquadrado nas normas do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT) quanto à distribuição granulométrica, à densidade, à resistência à abrasão e à resistência à compressão (com teor mínimo de CAP de 4,5%). A resistência mecânica apresentou valores superiores a 80%, estabelecido pelo DNIT.

No trabalho de Correia *et.al.* (2005) foi avaliado o uso do resíduo de serrarias de rochas ornamentais em substituição total ou parcial ao agregados minerais, na composição do asfalto. Os resíduos apresentaram alto poder de adsorção com o CAP, similar à de um agregado mineral padrão.

Ribeiro *et. al.* (2005) concluíram que o resíduo do corte de gnaiss milonitizado em pavimentação atendem às normas do DNIT, além do resíduo interagir a altos valores de adsorção (4,5 mg/g) com o CAP. Apresentou resistência mecânica superior a 80%, podendo ser usado em pavimentação.

### **3.3.2.6 – Utilização do resíduo na indústria cimenteira**

Gobbo *et. al.* (2004) apresentaram alternativa de uso do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de revestimentos na fabricação de cimento Portland. Foram realizadas análises granulométrica e química do resíduo, incorporados à formulação das farinhas (matéria-prima que contém calcários, argila e minério de ferro) em 1% em massa, a fim de obter módulos químicos ideais para fabricar o clínquer. Concluiu-se que a granulometria do resíduo é favorável ao seu uso em cimento, e representa redução no consumo de energia na fabricação do clínquer.

### 3.4 – Método de Okamura et al.

#### 3.4.1 – Etapas do método

As características dos concretos auto-adensáveis são extremamente influenciadas pelas proporções e características dos materiais utilizados em sua composição. No método de Okamura et al. (1997) as quantidades de agregados graúdo e miúdo são fixadas, conseguindo-se uma auto-adensabilidade ajustando apenas a razão água/finos ou a dosagem de superplastificante. De acordo com Okamura et al. (1997) os principais passos a serem seguidos para a composição do concreto são os seguintes:

i. *Determinação do volume de ar ( $V_{ar}$ ):* definido pela quantidade de ar incorporado no concreto para aumentar a resistência à ação do gelo-degelo, quando necessário.

ii. *Determinação do volume agregado graúdo (VG):* equivalente a 50% do volume no estado compactado, excluindo o volume de ar previsto para a composição (Figura 3.14).

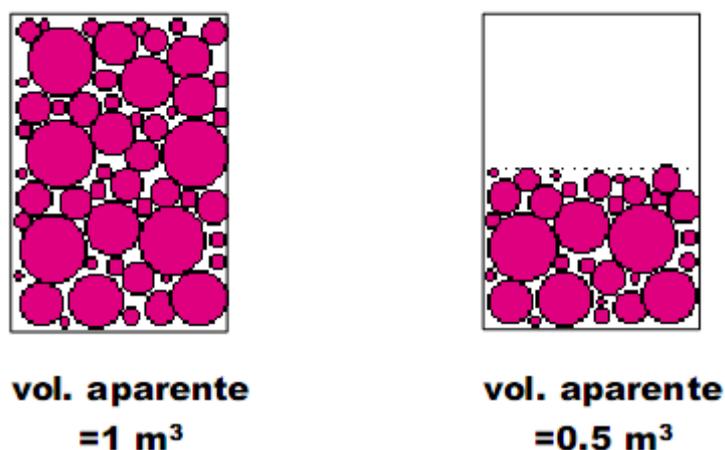


Figura 3.14 – Volume de agregado graúdo adequado (Nunes, 2001).

O valor máximo limite do volume de agregado graúdo ( $V_{g,lim}$ ), equivalente a um volume aparente de 1 m<sup>3</sup>, é numericamente igual a razão

entre o valor da massa específica aparente (estado compactado) e da massa específica do agregado.

$$V_g = 0,5V_{g,lim}(1 - V_a)$$

A quantidade de agregado graúdo utilizado na composição depende das características físicas tais como forma das partículas e distribuição granulométrica. Quanto mais contínua for a granulometria do agregado, maior será a compactidade e conseqüentemente, menor será o volume de vazios.

i. *Determinação do volume de agregado miúdo ( $V_m$ ):* é fixado em 40 % do volume de argamassa e considera-se apenas as partículas cuja dimensão esteja compreendida entre 0,09 e 5 mm. Deve-se observar, através da distribuição granulométrica do agregado miúdo a porcentagem de partículas incluídas nestas restrições, por unidade de volume, designada neste trabalho por  $V_f$ . O volume total do agregado miúdo é calculado através da Expressão 3.1.

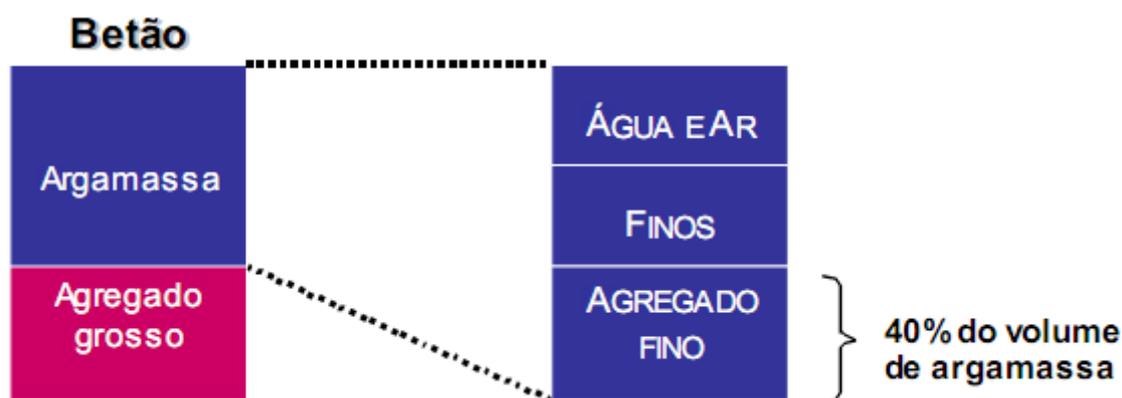
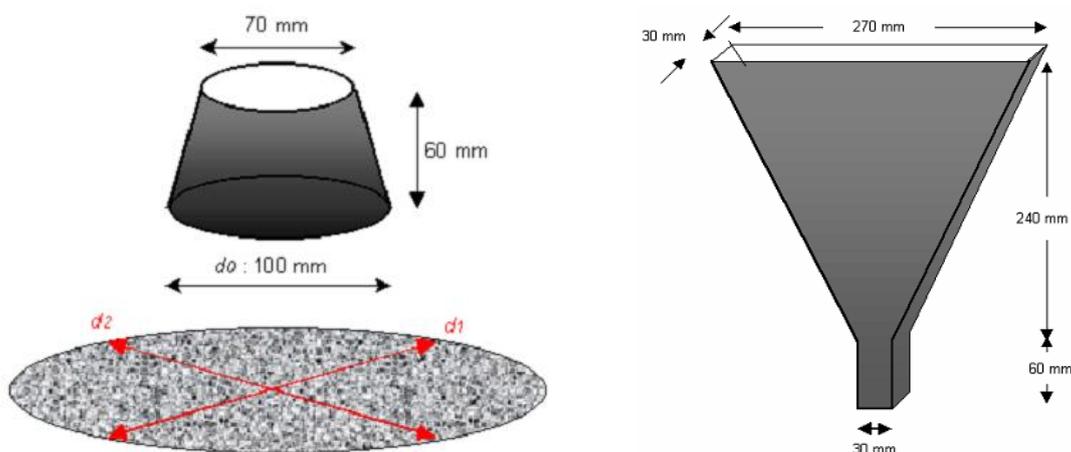


Figura 3.15 – Quantidade de agregado fino (Nunes, 2001).

$$V_m = \frac{0,4x(1 - V_a - V_G)}{1 - V_f} \quad (3.1)$$

O valor de  $V_f$  é utilizado na Expressão 3.1 para assegurar a porcentagem fixada de agregado fino relativo ao volume de argamassa.

ii. *Determinação da razão volumétrica água/finos e da dosagem de superplastificante:* em dosagens de concretos convencionais, a relação água/cimento é fixada em função da resistência pretendida. Porém, no concreto auto-adensável deve ser definida tendo como parâmetro a auto-adensabilidade do concreto, característica bastante sensível à variação da relação água/finos. Assim, na maioria dos casos a definição da razão água/cimento não é determinante na resistência exigida, isto porque a relação água/finos, em geral, é suficientemente baixa para conferir a resistência adequada para os concretos. No caso da utilização de adições de materiais finos inerte, como é o caso do resíduo utilizado neste trabalho, isto pode acontecer. As propriedades físicas e químicas destes materiais finos influencia de forma decisiva na relação volumétrica água/finos ( $a/f$ ). A definição desta relação é definida realizando ensaios em argamassas, através do “ensaio de espalhamento de argamassas” (Figura 3.16a), juntamente com o ensaio de “fluidez da argamassa” (Figura 3.16b), realizado com um funil de faces planas.



**Figura 3.16 – Ensaio em argamassas: (a) espalhamento e (b) fluidez (Nunes, 2001).**

O diâmetro médio, calculado pela Expressão 3.2, do espalhamento é utilizado para calcular o índice de deformabilidade  $G_m$  (área de espalhamento relativa), de acordo com a Expressão 3.3.

$$d = \frac{(d1 + d2)}{2} \quad (3.2)$$

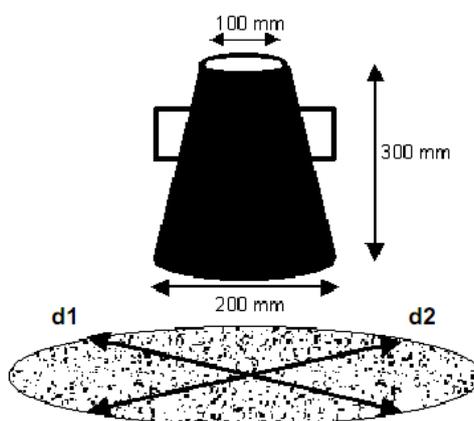
$$G_m = \left(\frac{d}{d_0}\right) - 1 \quad (3.3)$$

O tempo de escoamento, determinado no ensaio de fluidez, é utilizado para determinar o índice de viscosidade  $R_m$  (tempo de escoamento relativo), calculado de acordo com a Expressão 3.4.

$$R_m = \frac{10}{t}, t \text{ em segundos} \quad (3.4)$$

Segundo Takada et al. (1998, apud Nunes, 2001), uma argamassa adequada para se chegar a um concreto auto-adensável deve ter  $G_m = 5,0$  e  $R_m = 1,0$ .

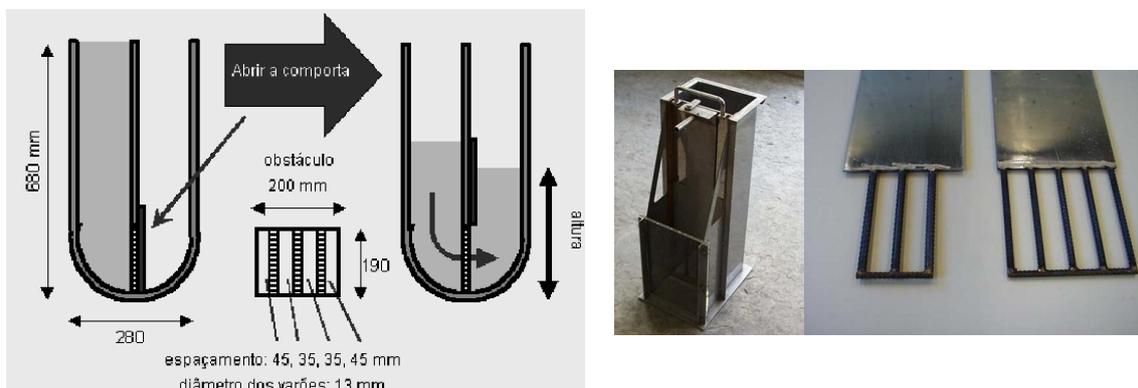
A dosagem de superplastificante é estimada na realização dos ensaios em argamassas. Porém, o efeito do superplastificante nos concretos é diferente do efeito observado nas argamassas. Assim, a dosagem do superplastificante também deve ser corrigida em ensaio realizado com o concreto. Na Figura 3.17 é mostrado o “ensaio de espalhamento em concreto”.



**Figura 3.17 – Ensaio de espalhamento do concreto (Nunes, 2001).**

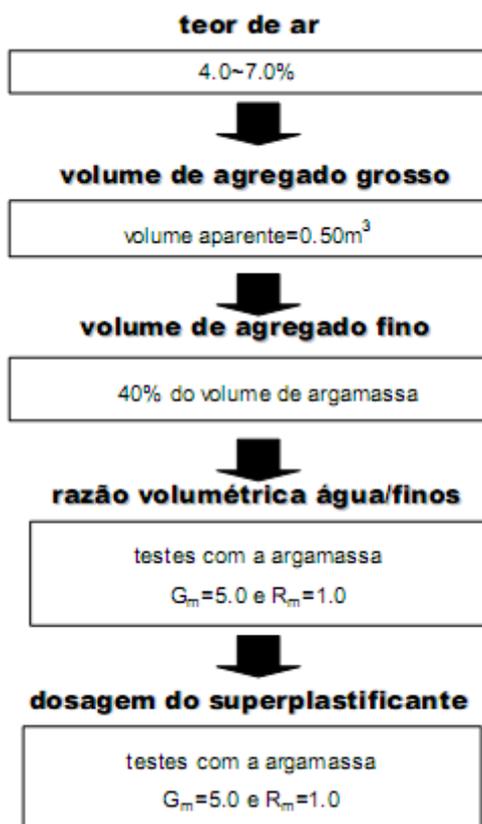
iii. Avaliação da auto-adensabilidade: nos concretos auto-adensáveis, após a realização da dosagem do superplastificante, são realizados ensaios de auto-adensabilidade nos concretos produzidos. Busca-se avaliar a capacidade de enchimento do concreto, sendo proposto para estas avaliações o “Ensaio da caixa-U” ou o “Ensaio da Caixa” (Figura 3.18). Este

ensaios são semelhantes, onde é avaliada o enchimento de um recipiente, através da altura atingida e a passagem de obstáculos.



**Figura 3.18 – Avaliação da auto-adsensibilidade dos concretos.**

A Figura 3.19 apresenta resumidamente o fluxograma para a dosagem de um concreto auto-adsensível de acordo com Okamura (Nunes, 2001).



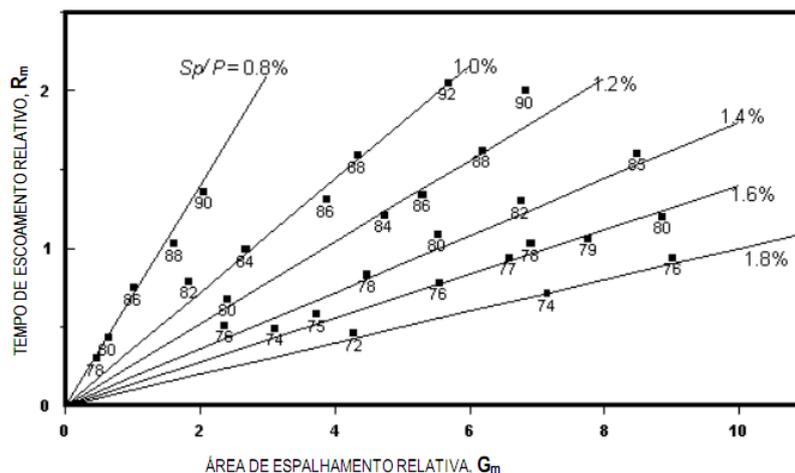
**Figura 3.19 – Esquema do fluxograma do método de dosagem de Okamura (Nunes, 2001).**

### 3.4.2 – Dosagem do superplastificante na propriedades das argamassas: avaliação do efeito da relação água/finos

Okamura et al. (2000) estudaram as composições de argamassas e avaliaram as relações de suas propriedades na produção de concretos auto-adensáveis, que contribuem de forma racional no ajuste da relação água/finos e dosagem dos superplastificantes.

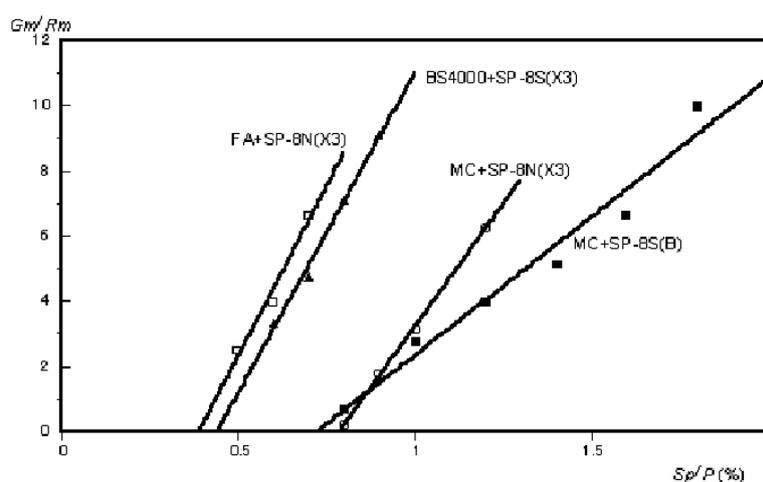
A adição de materiais em argamassas promovem mudanças nas características do concreto fresco, o que torna fundamental a influência destes materiais nas propriedades das argamassas. Neste trabalho pretende-se avaliar a dosagem do superplastificante nas argamassas, bem com a influência da adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na relação água/finos de forma racional através de um planejamento experimental.

Na Figura 3.20 são apresentados alguns resultados experimentais do estudo da relação entre deformabilidade e viscosidade, fazendo variar a quantidade de superplastificante e a razão água/finos. O material fino utilizado foi constituído apenas por cimento de calor de hidratação moderado e a percentagem de areia na argamassa foi de 40 %. Nesta figura, o número associado a cada ponto corresponde ao valor da razão água/finos, em percentagem, para dosagens de superplastificante iguais a 0,8 %, 1,0 %, 1,2 %, 1,4 % e 1,8 % da quantidade de finos. Verificou-se que existe uma relação aproximadamente linear entre  $G_m$  e  $R_m$ , mantendo constante a dosagem de superplastificante  $Sp/f$  (%). Adicionalmente, a reta  $G_m-R_m$  passa praticamente na origem do referencial. Assim, pode assumir-se que o declive da recta  $G_m-R_m$  é função apenas de  $Sp/P$ . Neste estudo, os autores definem o declive da reta  $G_m-R_m$ , dado pela razão  $G_m/R_m$ , como um indicador do efeito do superplastificante, independente da razão água/finos. Valores superiores de  $G_m/R_m$  indicam um maior efeito do superplastificante, isto é, maior deformabilidade ( $G_m$ ) sem diminuir a viscosidade ( $1/R_m$ ) (Nunes, 2001).



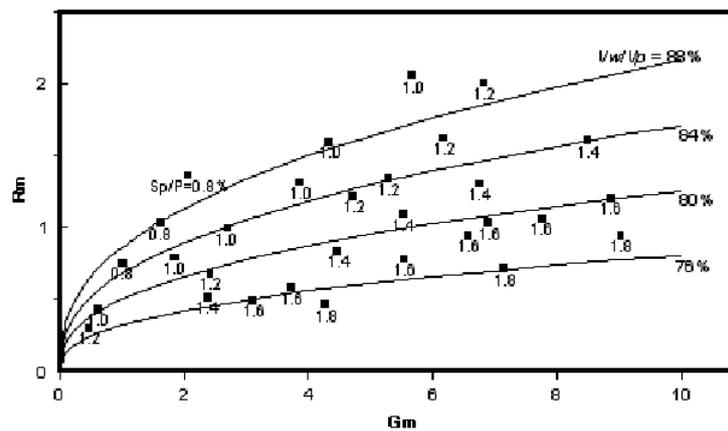
**Figura 3.20 – Relação entre  $G_m$  e  $R_m$  para diferentes valores de  $Sp/f$  e  $V_w/V_f$  (Nunes, 2001).**

A relação entre  $Sp/P$  e  $G_m/R_m$  é muito afectada pela combinação do superplastificante e dos materiais finos (Figura 3.21). MC corresponde a um cimento de calor de hidratação moderado, BS4000 corresponde a escórias de alto-forno cuja superfície específica Blaine é de  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , BRC corresponde a um cimento rico em belite (C2S) e FA corresponde a cinzas volantes. A cada uma destas siglas encontra-se associada uma segunda, SP-8N(...) ou SP-8S(...), que corresponde ao tipo superplastificante. Assim, esta relação não pode ser estimada sem ensaios sobre a argamassa devido à interacção química entre o superplastificante e os finos utilizados.



**Figura 3.21 – Relações lineares obtidas para diferentes materiais finos e superplastificantes (Nunes, 2001).**

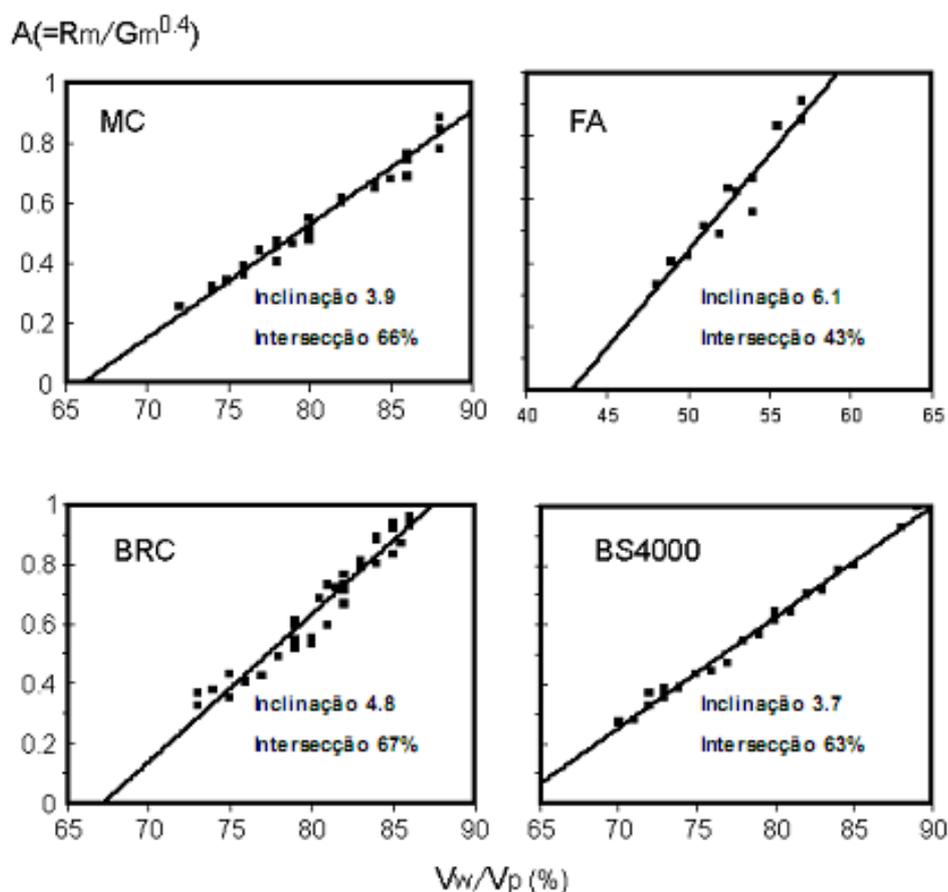
A relação entre  $G_m$  e  $R_m$  fazendo variar  $Sp/P$ , para um dado valor de  $V_w/V_p$ , foi também investigada, tal como se apresenta na Figura 3.22. Nesta figura, cada linha corresponde a um valor da razão água/finos e o número associado a cada ponto corresponde à dosagem de superplastificante (em percentagem do peso dos finos).



**Figura 3.22** Relação entre  $G_m$  e  $R_m$  para diferentes valores de  $Sp/f$  e  $V_w/V_f$  (Nunes, 2001).

A Expressão 3.5 apresenta a relação obtida, onde se introduz uma variável  $A$ , de tal forma que, existe uma relação linear entre  $A$  e  $V_w/V_p$ . Fazendo variar o tipo de materiais finos obtêm-se diferentes inclinações da reta, ver Figura 3.23.

$$R_m = A \cdot G_m^{0,4}, \text{ com } A = K \cdot \left(\frac{V_w}{V_f}\right) \text{ e } K = \text{constante} \quad (3.5)$$



**Figura 3.23 – Relações obtidas entre  $V_w/V_f$  e  $A$  para diferentes materiais (Nunes, 2001).**

Tal como se pode constatar na Figura 3.23 obteve-se uma inclinação máxima para argamassas com cinzas volantes. Para materiais finos correntes, apresentando uma superfície específica Blaine=3000 a 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$ , a inclinação ficou próxima de 4.0. Verificou-se também que a inclinação daquela reta é independente do tipo de superplastificante utilizado (Okamura et al., 2000).

# Capítulo 4

## Materiais e Métodos de Análises

A Figura 4.1 apresenta os procedimentos experimentais seguidos neste trabalho de doutorado.

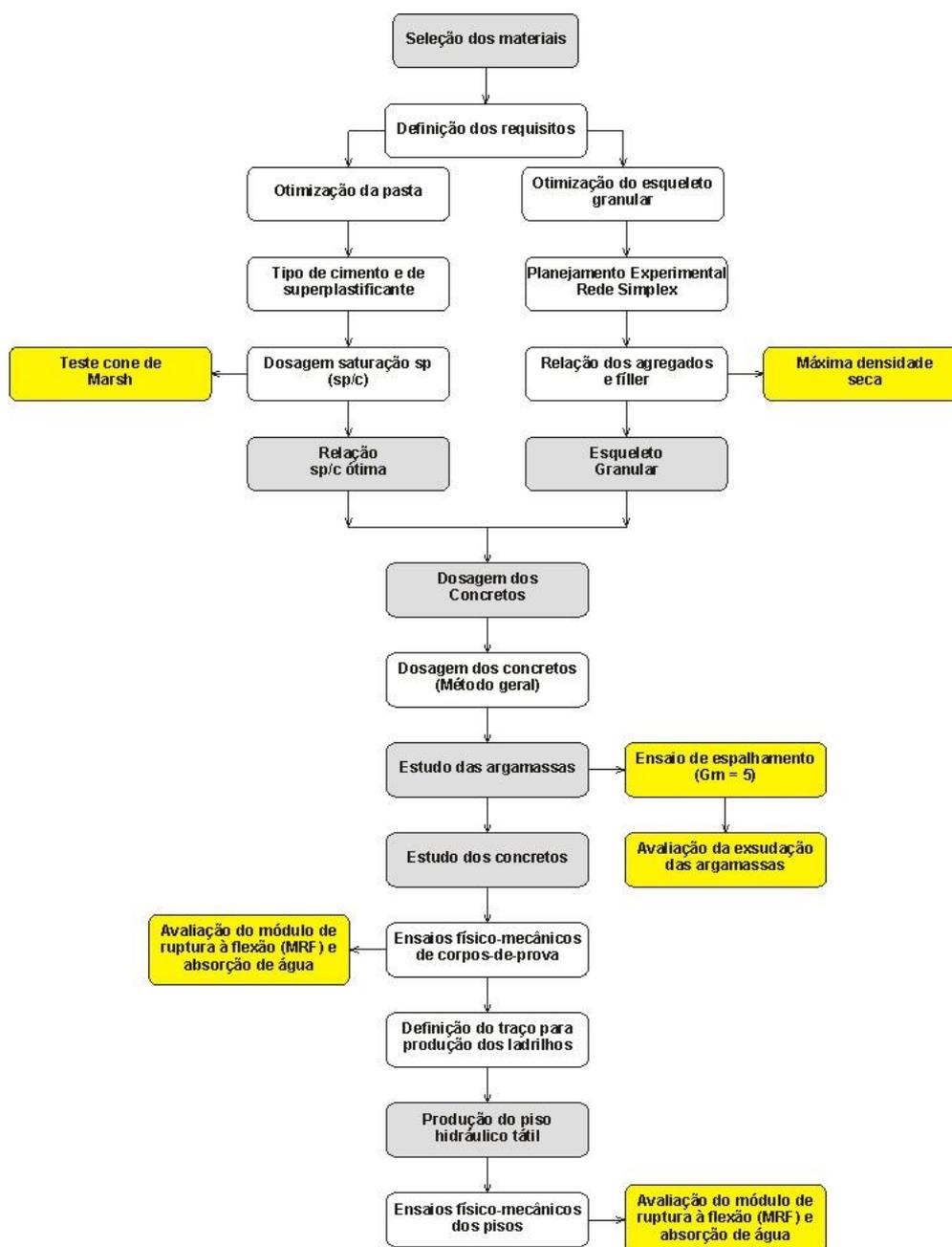


Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental.

Para a avaliação das propriedades tecnológicas do concreto com a adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para a produção do ladrilho hidráulico piso tátil vibrado foi necessário fazer um estudo criterioso sobre a dosagem dos constituintes do concreto.

Adotou-se o método proposto pelo professor Okamura (Okamura, 1997), pois permite um estudo da composição do concreto de forma mais científica e realização de ensaios de fácil execução do ponto de vista técnico.

O estudo experimental foi realizado de maneira que fosse possível a fabricação em escala piloto de ladrilhos hidráulicos piso tátil com a adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, avaliando assim, as propriedades técnicas exigidas pelas normas técnicas brasileiras.

#### **4.1 – Amostragem dos materiais**

##### **4.1.1 – Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais utilizado neste trabalho é proveniente da região sul do Estado do Espírito Santo, mais especificamente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim e foi coletado na empresa Decolores Mármore e Granitos. A coleta do resíduo foi realizada seguindo os procedimentos prescritos pela NBR 10007 (ABNT, 2004).

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foi coletado em estado seco ao ar, após passar por um filtro prensa (Figura 4.2) – equipamento usado para retirar o excesso de água da lama abrasiva, reutilizando-a para o processo do beneficiamento das rochas, conforme lei ambiental do Estado do Espírito Santo (IEMA, 2005). A umidade do resíduo após passagem pelo filtro-prensa é de aproximadamente 30%, estabelecida pelo IEMA (2005), para a disposição final do resíduo em aterros.



**Figura 4.2 – Processo de prensagem do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.**

Após a coleta do resíduo na empresa, este foi seco ao ar, e depois seguiu para o processo de destorroamento em um triturador marca MAN. Após o processo de destorroamento do material, este foi seco em estufa por um período de 24 horas e ensacado para sua utilização, de modo a não absorver umidade do ar. A Figura 4.3 apresenta o resíduo final pronto para o uso.



**Figura 4.3 – Resíduo final pronto para o uso.**

#### **4.1.1.1 – Caracterização física**

Para a caracterização física de algumas propriedades do resíduo estudado, foram realizados ensaios para a determinação da massa específica dos grãos, massa unitária e granulometria. A Tabela 4.1 apresenta os ensaios de caracterização realizados com o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e suas respectivas normas técnicas.

**Tabela 4.1 – Ensaio de caracterização do resíduo.**

Ensaio	Norma Técnica
Massa específica	NBR NM 23/2001
Massa unitária no estado solto	NBR NM 45/2006
Massa unitária no estado compactado	NBR NM 45/2006
Granulometria	NBR 7181/1984

#### 4.1.1.2 – Caracterização química e mineralógica

A determinação da composição química semiquantitativa do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, em forma de óxidos, foi obtida por meio da técnica de análise química por fluorescência de raios X, de energia dispersiva (EDX), em um equipamento Shimadzu, modelo EDX-700 (Figura 4.4). Os seguintes óxidos foram determinados:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ .



**Figura 4.4 – Shimadzu EDX-700 instalado no LECIV/UENF.**

#### 4.1.2 – Agregados: brita 0 e pó-de-pedra

Neste trabalho foram utilizados como agregados a brita 0 e o pó-de-pedra provenientes da empresa Itereré, localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ. A brita 0 e o pó-de-pedra, passaram, previamente por um processo de lavagem em peneira ABNT de 200 mesh (0,075mm) e posteriormente por secagem em estufa à temperatura de 105 °C por um período de 24 horas. A Figura 4.5 apresenta os agregados utilizados na produção dos ladrilhos hidráulicos.



(a) (b)  
**Figura 4.5 – Agregados: (a) brita 0 e (b) Pó-de-pedra.**

Os ensaios realizados para a caracterização física do agregado miúdo e respectivas normas técnicas estão descritos na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Ensaios de caracterização do agregado.**

Ensaio Físico	Norma Técnica
Módulo de finura	NBR 7211/2005
Massa unitária no estado solto	NBR NM 45/2006
Massa unitária no estado compactado	NBR NM 45/2006
Massa específica	NBR NM 52/2003
Análise granulométrica	NBR NM 248/2003

#### 4.1.3 – Aglomerante hidráulico

Foi utilizado como aglomerante o cimento Portland Composto CP-III 40-RS da marca Nassau, cujas exigências descritas pela NBR 5735 (ABNT, 1991), foram fornecidas pelo fabricante e estão descritos na Tabela 4.3. Este cimento é encontrado com facilidade no mercado e bastante utilizado devido ao seu custo ser inferior aos demais cimentos comercializados.

**Tabela 4.3 – Caracterização do aglomerante hidráulico.**

Ensaio	Norma	Resultado
Água da pasta de consistência normal	NBR NM 43/2003	31,0 %
Superfície específica Blaine	NBR NM 76/1998	400 m <sup>2</sup> /kg
Tempo de início de pega	NBR NM 65/2003	250 min
Tempo de fim de pega	NBR NM 65/2003	300 min
Massa específica	NBR NM 23/2001	2,98 g/cm <sup>3</sup>
Finura na #200	NBR 11579/1991	0,1 %
Resistência à compressão axial	NBR 7215/1996	3 dias – 17 MPa 7 dias – 30 MPa 28 dias – 45 MPa
Expansibilidade de Le Chatelier	NBR 11582/1991	0,5 mm

#### 4.1.4 – Aditivo

Neste trabalho foi também utilizado aditivo superplastificante com base em cadeia de éter carboxílico e suas principais características foram fornecidas pelo fabricante e estão descritas na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Características do SP utilizado.**

Descrição	Característica
Tipo	Éter carboxílico
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	1.210
Teor de sólidos (%)	32,6
pH	6,2

#### 4.1.5 – Água

A água utilizada na produção do corpos-de-prova e do piso hidráulico tátil foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ.

## **4.2 – Modelagem numérica: otimização do esqueleto granular**

### **4.2.1 – Considerações iniciais**

Segundo Montgomery (1997) em qualquer área de pesquisa, está-se sempre interessado em saber quais variáveis são importantes em algum estudo que se esteja realizando, assim como limites inferior e superior de valores dessas variáveis.

A partir desses resultados, técnicas estatísticas devem ser utilizadas de modo a se concluir algo em relação à dependência da resposta com as variáveis analisadas. O planejamento experimental é uma dessas técnicas, que atualmente vem sendo usada em grande escala. Através dela, pesquisadores podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultado:

1. redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos;
2. redução do tempo do processo;
3. redução do custo operacional;
4. melhoria no rendimento do processo.

Antes de começar a realizar os experimentos, os objetivos e os critérios devem estar bem claros, de modo a dar subsídios para a escolha:

5. das variáveis envolvidas no experimento;
6. da faixa de variação das variáveis selecionadas;
7. dos níveis escolhidos para essas variáveis;
8. da variável de resposta;
9. do planejamento experimental.

A análise dos resultados é feita através de métodos estatísticos que guiam à uma tomada objetiva de decisão, ilustrada na Figura 4.6.

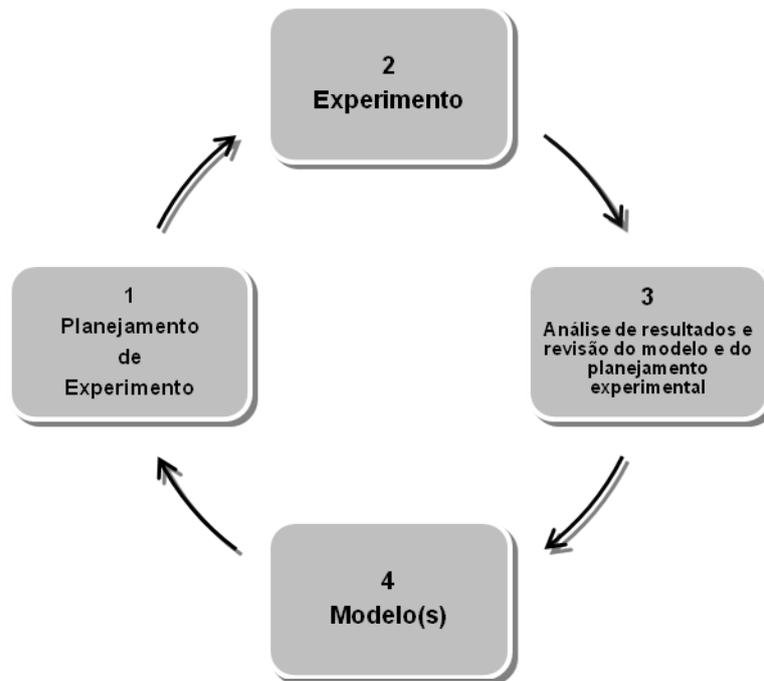


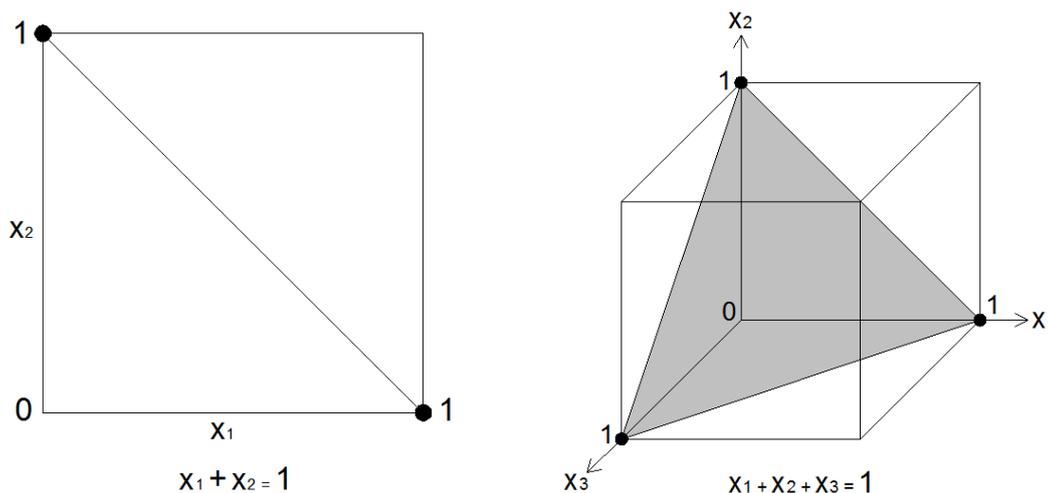
Figura 4.6 – Estratégia experimental (Montgomery, 1997).

#### 4.2.2 – Experimento com misturas

No experimento de misturas, qualquer variação que haja nos componentes, espera-se uma variação proporcional na resposta. Isto é, se as quantidades de todos os componentes da mistura forem triplicadas, a mistura também será triplicada. As proporções dos diversos componentes de uma mistura não são independentes, e, obedecem à Equação 4.1.

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1 a letra  $q$  representa o número de componentes da mistura (ou fatores). A representação gráfica desta equação é apresentada na Figura 4.7 (Montgomery, 1997).



**Figura 4.7 – Representação gráfica da equação (3.1) para 2 e 3 componentes (Montgomery, 1997).**

Observa-se na Figura 4.7 que, para 2 componentes, a linha central (diagonal) contém todas as combinações para as proporções de  $x_1$  e  $x_2$ . O espaço da mistura para 3 componentes é um triângulo equilátero, onde, vértices deste triângulo correspondem aos componentes “puros” e os lados às misturas binárias.

#### 4.2.2.1 – Planejamento em rede simplex

O ajuste de dados coletados em pontos de um programa experimental são associados à equações polinomiais (Cornell, 1990).

Para acomodar uma equação polinomial que represente uma superfície de resposta sobre uma região simplex, uma escolha natural seria um plano cujos pontos consistindo em uma distribuição uniforme sobre uma superfície simplex é conhecido como *lattice* (rede) (Alexandre, 2000).

No planejamento *Simplex-lattice* são testadas para cada fator ou componente no modelo,  $m + 1$  proporções igualmente espaçadas. Estas proporções são obtidas através da Equação 4.2.

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (4.2)$$

Por exemplo, em um experimento com três componentes ou fatores ( $q = 3$ ), onde optou-se por um modelo do segundo grau ( $m = 2$ ) para representar a

superfície de resposta ter-se-ia as seguintes proporções para cada componente:

$$x_i = \left(0, \frac{1}{2}, 1\right) \quad (4.3)$$

Onde a combinação destes fatores resultaria em uma matrix de acordo com a Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Composição das misturas para o planejamento Simplex (q = 3 e m = 2).**

X1	X2	X3
1	0	0
0	1	0
0	0	1
1/2	1/2	0
0	1/2	1/2
1/2	0	1/2

O número de pontos em uma rede simplex é obtido através da Equação 4.4.

$$\frac{(q + m - 1)}{m!(q - 1)!} \quad (4.4)$$

A Figura 4.8 representa a rede simplex para a exemplificação de três componentes e o modelo quadrático analisado.

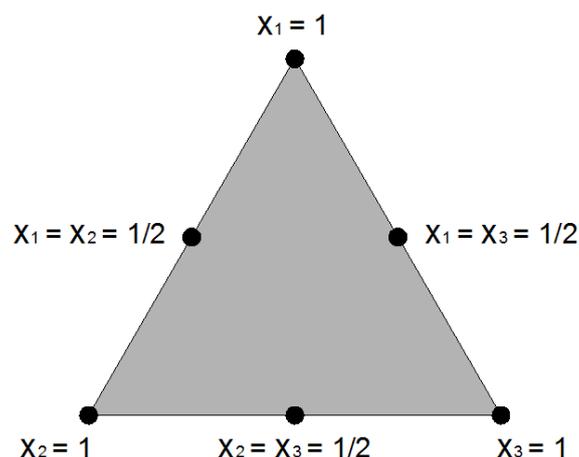


Figura 4.8 – Planejamento Simplex-lattice para  $q = 3$  componentes e  $m = 2$ .

No planejamento de misturas, os modelos matemáticos usualmente utilizados são:

Tabela 4.6 – Modelos e equações polinomiais (Montgomery, 1997).

Modelo	Equação
Linear	$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i$
Quadrático	$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j$
Cúbico Especial	$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k$
Cúbico Completo	$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i<j<k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k$

Os parâmetros  $\beta_i$  representam as respostas esperadas para os componentes puros, o termo  $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$  representa a porção linear da mistura. Quando houver uma curvatura aparecendo da mistura não linear entre os pares dos componentes, os parâmetros  $\beta_{ij}$  que representam a mistura *sinérgica* se o sinal for positivo, ou, *antagônica* se o sinal for negativo, serão diferentes de zero.

O número de termos de um polinômio de  $q$ , componentes ou fatores e  $m$ , grau do polinômio, é igual ao número de pontos associados à rede simplex obtido pela Equação 4.4, para os mesmos parâmetros ( $q;m$ ).

A Tabela 4.7 apresenta o número de termos em um polinômio de  $q$  componentes para os modelos: linear, quadrático, cúbico especial e cúbico completo.

**Tabela 4.7 – Número de termos polinomiais (Montgomery, 1997).**

Número de componentes ( $q$ )	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico Completo
2	2	3	-	-
3	3	6	7	10
4	4	10	14	20
.				
.				
.				
$q$	$q$	$\frac{q(q+1)}{2}$	$\frac{q(q+5)}{6}$	$\frac{q(q+1)(q+1)}{6}$

A resposta dos componentes é representada da seguinte forma:

- Para componentes puros:  $y_i$
- Para misturas binárias com proporções iguais:  $y_{ij}$
- Para misturas ternárias com proporções iguais:  $y_{ijk}$

A Figura 4.9 apresenta a nomenclatura utilizada para as respostas dos pontos experimentais.

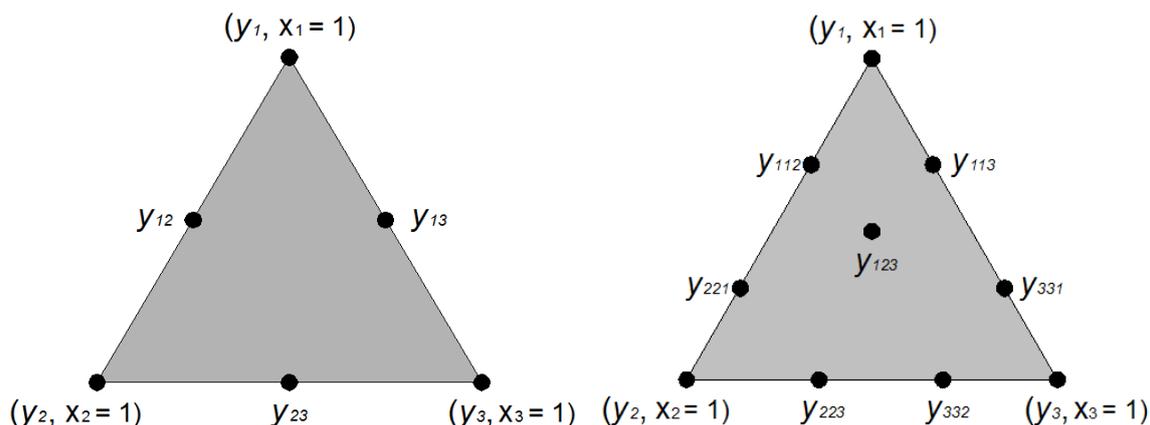


Figura 4.9 – Nomenclatura de respostas para pontos da Rede Simplex {3,2} e {3,3} (Cornell, 1990).

#### 4.2.3 – Parâmetros dos polinômios

Os parâmetros de um modelo polinomial são obtidos resolvendo-se o sistema de  $\frac{(q+m-1)}{m}$  equações. O número de equações do sistema corresponde ao número de parâmetros da equação polinomial, ao número de pontos da Rede Simplex e, conseqüentemente, ao número de respostas observadas.

Para o caso deste trabalho, por exemplo, onde foram analisados três componentes ou fatores ( $q = 3$ ) e, adotando o modelo quadrático, a equação polinomial é:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (4.5)$$

onde:

$$y_1 = \beta_1; y_2 = \beta_2; y_3 = \beta_3;$$

$$y_{12} = \beta_1(1/2) + \beta_2(1/2) + \beta_{12}(1/4);$$

$$y_{13} = \beta_1(1/2) + \beta_3(1/2) + \beta_{13}(1/4);$$

$$y_{23} = \beta_2(1/2) + \beta_3(1/2) + \beta_{23}(1/4).$$

#### 4.2.4 – Representação matricial

Quando o número de componentes de uma rede é elevado, ou o polinômio tem grau maior que dois, torna-se difícil a representação do sistema de equações. Assim, representa-se o modelo polinomial por uma única equação matricial:

$$y = X\beta \quad (4.6)$$

Sendo,

$y$  – matriz das respostas observadas em função das misturas;

$X$  – matriz das misturas feitas (variáveis controladas);

$\beta$  – parâmetros do modelo a partir das respostas observadas.

#### 4.2.5 – Modelos matemáticos

Para a determinação da superfície de respostas da propriedade analisada (densidade aparente seca) foi adotado o modelo cúbico completo (10 pontos) com pontos centrais, totalizando 16 pontos experimentais. A Figura 4.10 ilustra geometricamente os pontos necessários para a obtenção do modelo matemático analisado.

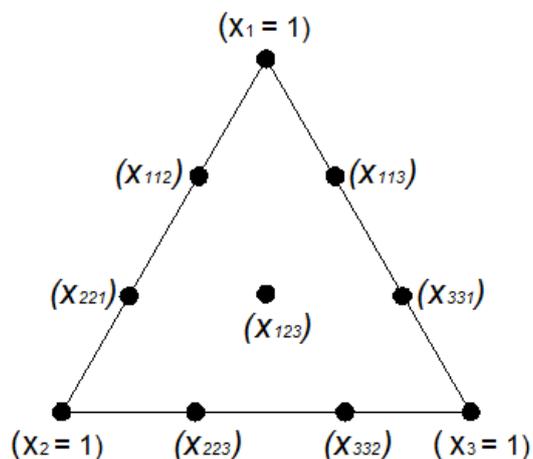


Figura 4.10 - Modelo cúbico completo.

#### 4.2.6 – Programa *Statística*

Foi utilizado o software *Statística* para a geração de gráficos estatísticos e superfícies de respostas dos modelos matemáticos.

Criado pela Statsoft, o software *Statística* é utilizado especificamente para o planejamento de experimentos. O módulo do software empregado neste estudo foi o Experimental Design, com a opção Mixture Design Triangular Surfaces, adequado especificamente para misturas ternárias e geração de superfícies de respostas.

#### 4.2.7 – Análises estatísticas: avaliação dos modelos

Para testar a eficiência dos modelos alguns testes estatísticos podem ser empregados, de acordo com a filosofia de planejamento e otimização de experimentos (Barros Neto, 1995).

O modelo ideal para representar um planejamento experimental é aquele que não deixaria resíduo algum, sendo assim, os resultados observados nos experimentos seriam idênticos aos estimados pelo modelo.

A observação do resíduo (o quanto o modelo se afasta dos valores observados) é fundamental na avaliação da eficiência de qualquer modelo. A avaliação dessa eficiência começa pela análise dos desvios das observações em relação à média global (Barros Neto, 2010).

O desvio de um valor observado em relação à média de todas as observações ( $y_i - \bar{y}$ ) pode ser decomposta em duas parcelas (Equação 4.7).

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (4.7)$$

O termo  $(\hat{y}_i - \bar{y})$  da equação representa o afastamento da previsão global do modelo para o ponto  $\hat{y}_i$ , em relação à média global,  $\bar{y}$ .

A diferença entre o valor observado e o valor previsto pelo modelo é obtida por  $(y_i - \hat{y})$ . O modelo que melhor se ajusta ao experimento é aquele em que essa diferença for a menor possível, conduzindo a valores próximos para os desvios  $(y_i - \bar{y})$  e  $(\hat{y}_i - \bar{y})$ , assim, as previsões estariam próximas das observações realizadas no experimento.

A comparação entre os desvios é quantificada de acordo com a Equação 4.8, obtendo o somatório sobre todos os pontos, considerando que o somatório dos produtos é igual a zero.

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.8)$$

As somas quadráticas  $[SQ_T]$ , Equação 4.9, referem-se às somas dos quadrados dos desvios.

$$[SQ_T] = [SQ_R] + [SQ_r] \quad (4.9)$$

Onde:

$[SQ_T]$  = Soma quadrática em torno da média;

$[SQ_R]$  = Soma quadrática devido à regressão;

$[SQ_r]$  = Soma quadrática residual.

A Equação 4.9 quer dizer que, uma parte da variação total dos valores observados no experimento ( $y_i$ ), em torno da média, é (em parte) devida à regressão e o restante aos resíduos. Quanto maior for a parcela descrita pela regressão, melhor será o ajuste do modelo, quantificada pela Equação 4.10.

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T}$$

(4.10)

Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$ , menor será a parcela descrita pelos resíduos, e, a variação em torno da média será explicada por uma maior contribuição da regressão.

Associado às somas quadráticas, tem-se um determinado número de graus de liberdade, que indica quantos valores independentes envolvendo as  $n$  observações  $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$  são necessárias para determiná-las. O número de graus de liberdade para a soma quadrática total dos  $n$  desvios em relação à média é  $(n-1)$ .

O número de graus de liberdade da soma quadrática devido à regressão  $[SQ_R]$  é igual ao número de parâmetros menos um  $(p-1)$  e o devido aos resíduos é a diferença entre o número de observações e o número de parâmetros  $(n-p)$ .

As médias quadráticas são obtidas dividindo as somas quadráticas pelos respectivos graus de liberdade.

#### 4.2.7.1 – Significância estatística da regressão

Se os erros seguem uma distribuição normal, pode-se testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa, através da análise de variância, usando as médias quadráticas.

A razão entre as médias quadráticas  $MQ_R$  e  $MQ_r$ , quando não existe uma relação entre  $X$  e  $y$  ( $\beta = 0$ ), segue uma distribuição  $F$ .

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} \cong F_{n_1, n_2} \quad (4.11)$$

Onde:

$n_1$  = graus de liberdade da média quadrática devido à regressão;

$n_2$  = graus de liberdade da média quadrática devido aos resíduos.

Quando  $MQ_R / MQ_r > F_{n1,n2}$ , significa que a possibilidade de  $\beta = 0$  deve ser descartada, isto é, caso exista uma evidência estatística suficiente de relação linear entre  $X$  e  $y$ , pode acontecer que uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste  $F$ , não seja útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa pequena dos fatores estudados.

Para que uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa, mas também útil para preditivos, o valor de  $MQ_R / MQ_r$  deve ser comparado com no mínimo quatro a cinco vezes o valor de  $F_{n1,n2}$ .

#### 4.2.7.2 – Falta de ajuste e erro puro

Quando se trata de observações repetidas, podem ocorrer erros aleatórios, quaisquer que seja o modelo analisado, pois ele não pode passar ao mesmo tempo por todas as observações, deixando resíduos que, em parte, poderão ser atribuídos aos erros aleatórios. Assim, o resíduo total decorrente do modelo analisado, poderá ser decomposto em duas partes: uma devida à falta de ajuste do modelo e outra devido aos erros. Pode-se reduzir os erros devidos à falta de ajuste através do aperfeiçoamento do modelo, o que não ocorre para o erro puro.

$$SQ_r = SQ_{ep} + SQ_{faj} \quad (4.12)$$

Onde:

$SQ_r$  = Soma quadrática do resíduo;

$SQ_{ep}$  = Soma quadrática devido ao erro puro;

$SQ_{faj}$  = Soma quadrática devido à falta de ajuste.

O número de graus de liberdade devido ao erro puro é  $(n - m)$  e, devido à falta de ajuste é  $(n - p)$ .

Onde:

$n$  = número total de observações;

$m$  = número de níveis da variável independente;

$p$  = número de parâmetros do modelo.

#### 4.2.7.3 – Porcentagem de variação explicada pela regressão

As somas quadráticas, os graus de liberdade e as médias quadráticas são normalmente reunidas em uma tabela que é chamada de Tabela de Análise de Variância (ou ANOVA, Analysis of Variance), como apresentado na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 – Análise de variância (ANOVA).**

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = SQ_R / (p - 1)$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_i - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = SQ_r / (n - p)$
Falta de ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = SQ_{faj} / (m - p)$
Erro puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = SQ_{ep} / (n - m)$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	

% de variação explicada:  $SQ_R / SQ_T$

% máxima de variação explicável:  $(SQ_T - SQ_{ep}) / SQ_T$

Onde:

$y$  = valores observados;

$\hat{y}$  = valores previstos pelo modelo;

$\bar{y}$  = valores médios observados.

Para avaliar se o modelo está ou não bem ajustado, basta realizar um teste F da razão  $MQ_{faj}/MQ_{esp}$ . Os valores de F são encontrados em tabelas de livros estatísticos e são obtidos usando-se como entrada os graus de liberdade e os níveis de segurança propostos.

### **4.3 – Determinação do esqueleto granular: planejamento experimental em rede simplex**

Com o objetivo de elaborar um traço com maior compacidade (empacotamento) que o dosado tradicionalmente, utilizou-se o planejamento experimental em rede simplex para a adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como filler na composição das matérias-primas (agregados) para produção dos concretos.

Esse ensaio segue as orientações da norma ASTM C29/C29M. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com certa relação areia/brita. A partir dos dados dos dois materiais, densidade e peso de cada componente, obtém-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar à relação entre eles em que apresenta a maior densidade e menor volume de vazios (Helene e Terzian, 199; Gomes, 2002).

Neste trabalho as relações dos materiais utilizados para a realização dos ensaios foi definida através do planejamento experimental em rede simplex, para misturas, com três componentes (brita 0, pó-de-pedra e RBRO). Foram definidos pontos experimentais através do planejamento em rede simplex, e a partir desses pontos, definidas a densidade aparente seca máxima para os pontos experimentais.

Os pontos experimentais que foram utilizados na composição das misturas e determinação da superfície de resposta para a densidade aparente seca máxima são ilustrados na Figura 4.11 e apresentados na Tabela 4.9.

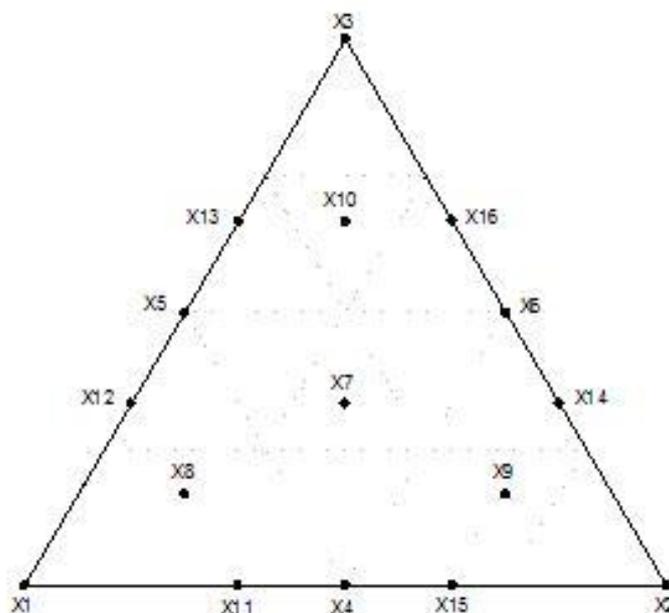


Figura 4.11 – Pontos experimentais utilizados para determinação da densidade aparente seca máxima.

Tabela 4.9 – Composição das Misturas.

Respostas	Componentes originais		
	$x'_1$	$x'_2$	$x'_3$
$x_1$	1	0	0
$x_2$	0	1	0
$y_3$	0	0	1
$x_4$	1/2	1/2	0
$x_5$	1/2	0	1/2
$x_5$	0	1/2	1/2
$x_7$	1/3	1/3	1/3
$x_8$	2/3	1/6	1/6
$x_9$	1/6	2/3	1/6
$x_{10}$	1/6	1/6	2/3
$x_{11}$	2/3	1/3	0
$x_{12}$	2/3	0	1/3
$x_{13}$	1/3	2/3	0
$x_{14}$	0	2/3	1/3
$x_{15}$	1/3	0	2/3
$x_{16}$	0	1/3	2/3

### 4.3.1 – Produção dos corpos-de-prova

Os corpos de prova foram confeccionados com o molde especificado pela NBR 12023 (ABNT, 2012), com as misturas de brita 0, pó-de-pedra e resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, referente aos dezesseis pontos experimentais adotados. O aparato experimental é mostrado na Figura 4.12

A mistura foi lançada no molde e realizada vibração em um equipamento da marca Bertel, com vibração de 57 hertz alternando-se o tempo de vibração até que a densidade da mistura fosse constante. Após a vibração do corpo-de-prova com a mistura, foi realizado o razamento com uma régua metálica e pesado para a determinação da densidade máxima aparente.



**Figura 4.12 – Aparato experimental para determinação da máxima densidade seca aparente.**

Após a realização do estudo de compacidade das misturas dos agregados, foi realizada análise através do planejamento experimental em rede simplex e definido a superfície de resposta e os parâmetros do modelo adotado.

### 4.4 – Estudo da pasta

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações  $a/c$  (água/cimento) e  $sp/c$  (superplastificante/cimento). A dosagem do superplastificante foi determinada através do ensaio do cone de Marsh, de acordo com as recomendações da EN 445 (Norma Européia – grautes para bainhas de protendidos. Método de Ensaio, 1996).

Para a produção das pastas foi utilizado aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilato, com teor determinado pelo ensaio de cone de Marsh.

Um ponto importante que deve ser definido no uso de superplastificantes relaciona-se à sua dosagem. Observa-se que existe um teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez. Este teor é denominado de ponto de saturação, e pode ser definido a partir de ensaios em pasta e argamassa. Os ensaios são realizados através do Cone de Marsh, que consiste em um funil pelo qual a mistura escoar, determinando-se o tempo de duração do escoamento.

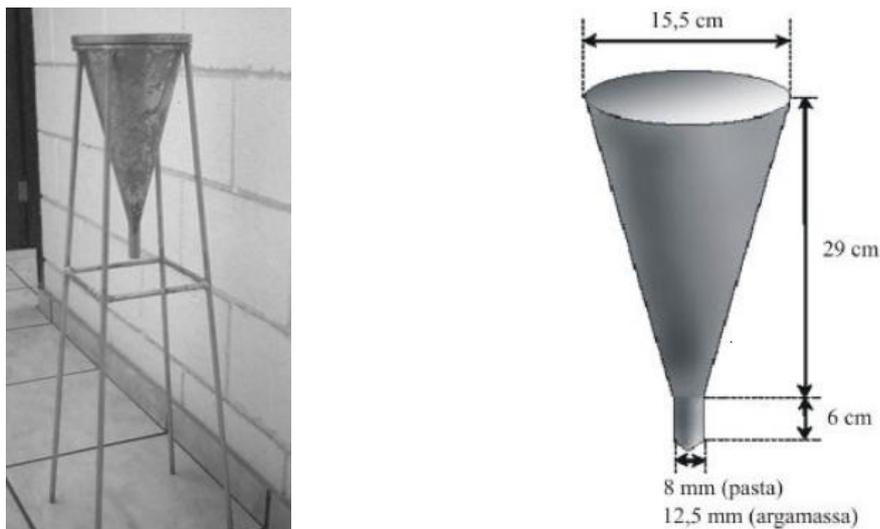
O cone de Marsh é um ensaio bastante simples que tem sido usado no estudo da fluidez de pastas de cimento e argamassas e na determinação do teor de superplastificante para misturas de concreto de alta resistência.

O método é baseado na medida do tempo gasto para que um certo volume de material escoar através do cone. Assim, o tempo de escoamento é considerado como o inverso de uma medida relativa da fluidez dos grautes e pastas, isto é, quanto menor o tempo de escoamento, maior a fluidez do material.

O cone de Marsh (Figura 4.13) consiste de um cone plástico ou metálico com cavidade invertida, aberto na parte superior e com uma pequena abertura variável na parte inferior. Um certo volume ( $V$ ) de material é colocado dentro do cone e o tempo gasto para que um volume pré-estabelecido ( $v$ ) escoar através do mesmo é monitorado. A saturação ocorre quando o aumento do teor de aditivo não promove mais alterações nos resultados dos ensaios (Al TCIN et. al., 1994).

O diâmetro ( $d$ ) da abertura inferior pode variar entre 5 mm e 12,5 mm e o volume de pasta ou de argamassa inicial utilizado pode variar entre 800 ml e 2000 ml.

No Brasil, este ensaio é regulamentado pela NBR 7681 (ABNT, 2013) – Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez.



**Figura 4.13 – (a) Equipamento completo; (b) esquema detalhado do funil para o ensaio do cone de Marsh.**

Após a realização dos estudos do esqueleto granular e do superplastificante, foi realizado o estudo de dosagem dos concretos e realizadas análises nas argamassas e posteriormente nos concretos definidos para a produção dos ladrilhos hidráulicos.

#### **4.5 – Dosagem dos concretos**

Para a dosagem dos concretos produzidos neste trabalho foi utilizada a proposta do professor Okamura, Método Geral (Okamura, 1997). Neste método, de acordo com o capítulo 3, faz-se necessário a realização de experimentos com argamassas como o estudo da relação água/finos e a dosagem do superplastificante, para a determinação do concreto desejável.

##### **4.5.1 – Restrições experimentais**

As resistências à compressão e à tração são intimamente relacionadas. Entretanto, não há proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma taxa decrescente (Tabela 4.10). Em outras palavras, a razão entre a resistência à compressão e resistência à tração depende do nível geral da

resistência à compressão. Quanto mais alta a resistência à compressão, menor a razão (Mehta, 1994).

**Tabela 4.10 – Relação entre resistências à compressão, à flexão e à tração do concreto (Mehta, 1994).**

Resistência do concreto (MPa)		
Compressão	Módulo de ruptura (tração na flexão)	Tração direta
7	2	1
14	3	1
21	3	2
<b>28</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
<b>34</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
41	5	3
48	6	4
55	6	4
62	7	4

De acordo com a Tabela 4.10 e o limite exigido pela ABNT para o módulo de ruptura na Flexão (4,5 MPa), a priori, optou-se por trabalhar com concretos dosados para a resistência à compressão entre 28 MPa e 34 MPa, referentes aos limites de 4 MPa e 5 MPa para o módulo de ruptura por tração na flexão.

Devido a granulometria do resíduo utilizado neste trabalho (80 % silte), o consumo de água aumenta com o acréscimo da adição do resíduo para uma dada trabalhabilidade. Com isso, optou-se por utilizar aditivo superplastificante na dosagem dos concretos, com o objetivo de reduzir a relação água/cimento e, conseqüentemente, obter ganhos de resistência.

De acordo com Mehta (1994) o concreto pode ser classificado em três categorias gerais com base na resistência à compressão:

- Concreto de baixa resistência: abaixo de 20 MPa;
- Concreto de resistência moderada: de 20 MPa a 40 MPa;
- Concreto de alta resistência: acima de 40 MPa.

Proporções típicas de materiais para a produção de concretos de baixa, moderada e alta-resistência com agregados normais são apresentados na Tabela 4.11 (Mehta, 1994). A influência do teor de pasta de cimento e da relação água/cimento na resistência do concreto é óbvia.

**Tabela 4.11 – Proporções típicas de materiais em dosagens de diferentes resistências (Mehta, 1994).**

	Baixa resistência (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência Moderada (kg/m <sup>3</sup> )	Alta resistência (kg/m <sup>3</sup> )
cimento	255	356	510
água	178	178	178
agregado miúdo	801	848	890
agregado graúdo	1169	1032	872
proporção de pasta de cimento			
percentual em massa	18	22,1	28,1
percentual em volume	26	29,3	34,3
água/cimento em massa	0,7	0,5	0,35
resistência (MPa)	18	30	60

De acordo com a Tabela 4.10 e Tabela 4.11, foi definida as seguintes restrições:

- Teores de consumo de cimento máximo e mínimo: 350 kg/m<sup>3</sup> e 450 kg/m<sup>3</sup>;

## **4.6 – Estudo das argamassas**

### **4.6.1 – Preparo das argamassas**

A mistura das argamassa foi realizada de acordo com a utilizada por um grupo de investigadores da Universidade de Delft, que aplicaram com sucesso o Método Geral na concepção do concreto auto-adensável (Nunes, 2001). A sequência do preparo da argamassa é descrita a seguir:

- 1) Na baixa velocidade misturam-se o agregado miúdo (pó-de-pedra), finos (cimento e RBRO), parte da água, durante 1 minuto;
- 2) Em seguida, deslocam-se os materiais aderentes às paredes e à pá, com ajuda de uma colher;
- 3) Reinicia-se a mistura por mais 1 minuto;
- 4) Adiciona-se a água restante onde previamente se introduziu o superplastificante misturando-se mais 1 minuto;
- 5) Em seguida, deslocam-se os materiais aderentes às paredes e à pá, com ajuda de uma colher;
- 6) Mistura-se mais 30 segundos;
- 7) Pára-se o movimento durante 1 minuto;
- 8) Finalmente mistura-se mais 1 minuto com velocidade alta;

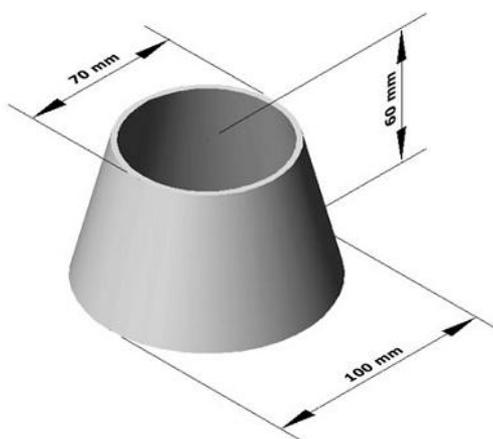
A Figura 4.14 ilustra o processo de mistura das argamassas e o equipamento utilizado.



**Figura 4.14 – Etapas de produção das argamassas.**

#### 4.6.2 – Dosagem ótima do sp

Foi realizado estudo nas argamassas com o objetivo de avaliar o ponto de saturação da argamassa com adição do RBRO, determinado na composição do esqueleto granular. Neste estudo, procura-se observar sinais de segregação e exsudação na argamassa espalhada, que ocorre logo em seguida ao ponto de saturação. Para a realização do ensaio foi utilizado tronco de cone de consistência, descrito pela norma NM 43 (ABNT, 2003). A Figura 4.15 detalha os instrumentos utilizados para a realização dos ensaios.



**Figura 4.15 - Tronco de cone de consistência.**

Para a realização dos ensaios nas argamassas, foi mantida fixa a porcentagem de agregado miúdo e filler (RBRO) e modificada a quantidade de superplastificante e a razão água/finos até se obter valores adequados de  $G_m$  (índice de deformabilidade) e  $R_m$  (índice de viscosidade), ou seja, 5,0 e 1,0 respectivamente, segundo proposta de Okamura et al. (1997). Com isso, definiu-se a dosagem de superplastificante  $sp/c$  e a razão água/finos ( $a/f$ ) adequados.

A Figura 4.16 mostra a realização do ensaio de espalhamento das argamassas.



Figura 4.16 – Ensaio de espalhamento das argamassas.

#### 4.6.3 – Estudo da exsudação

A avaliação da exsudação das argamassas foi realizada enchendo-se um recipiente de forma contínua e sem compactação, registrando-se a altura inicial e a massa. Para determinados intervalos de tempo, foram registradas a altura de água exsudada. As Figuras 4.17 e 4.18 ilustram o processo de realização do ensaio.

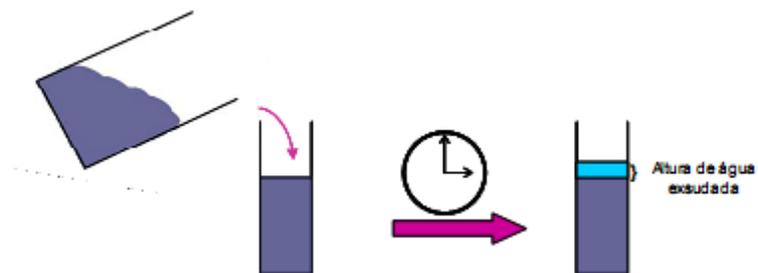


Figura 4.17 – Esquema de ensaio de exsudação em argamassas.



Figura 4.18 – Análise da exsudação das argamassas.

## 4.7 – Estudo dos concretos

### 4.7.1 – Produção dos corpos-de-prova

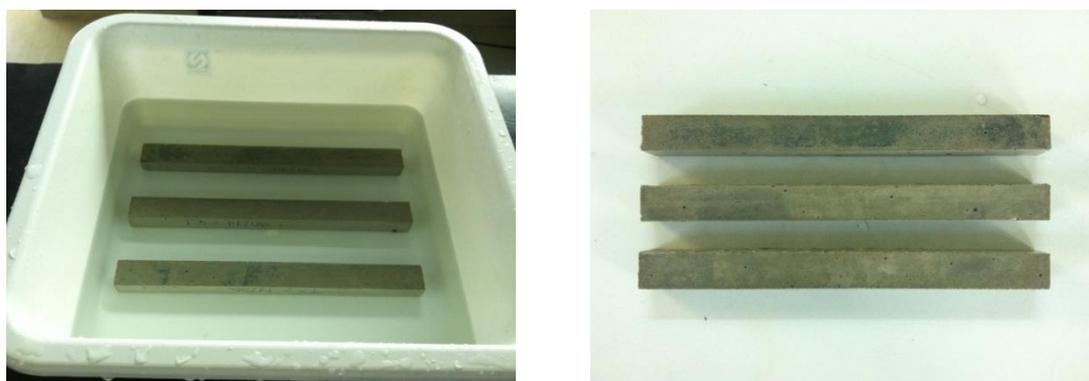
Após os estudos de espalhamento e exsudação das argamassas, foram definidas as dosagem dos concretos a serem produzidos e avaliadas as propriedades de resistência à tração na flexão e absorção de água. A Figura 4.19 mostra o molde utilizado para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

Foram produzidos corpos-de-prova prismáticos com as dimensões 30,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm.



**Figura 4.19 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos.**

Após a moldagem dos corpos-de-prova, estes foram desmoldados após 24 horas e permanecerem em cura imersa em água (Figura 4.20) até às idades dos ensaios, 7, 14 e 28 dias.



**Figura 4.20 – Processo de cura dos corpos-de-prova.**

#### 4.7.2 – Resistência do módulo de ruptura à flexão (MRF)

O módulo de ruptura à flexão determinado via ensaio de resistência à tração na flexão foi feito de acordo com as especificações da Norma Brasileira NBR 12142 (ABNT, 2010).

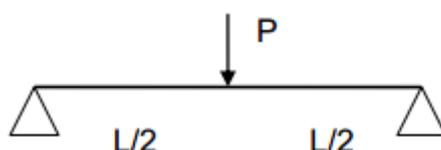
Foram moldados corpos-de-prova prismáticos de 30,5 cm x 2,4 cm x 2,5 cm e submetidos ao ensaio de tração na flexão aos 7 dias, 14 dias e 28 dias de cura.

O ensaio de determinação do módulo de resistência à flexão (MRF) dos corpos-de-prova foi realizado em uma prensa da marca EMIC com capacidade de 10 toneladas, apresentada na Figura 4.21.



**Figura 4.21 – Ensaio de resistência à flexão dos corpos-de-prova.**

A condição do ensaio é mostrada na Figura 4.22 e o módulo de resistência à flexão (MRF) dos corpos-de-prova são calculados de acordo com as Equações 4.13 à 4.15.



**Figura 4.22 – Condição do ensaio de resistência à flexão.**

$$M_{\text{máx}} = \frac{FxL}{4} \quad (4.13)$$

$$W = \frac{b x h^2}{6} \quad (4.14)$$

$$MRF = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W} \quad (4.15)$$

Onde:

$M_{m\acute{a}x}$  = momento fletor;

$W$  = m\u00f3dulo de resist\u00eancia

$MRF$  = m\u00f3dulo de resist\u00eancia \u00e0 flex\u00e3o;

$F$  = for\u00e7a de ruptura (N);

$L$  = dist\u00e2ncia entre as barras de apoio (mm);

$b$  = largura do corpo de prova (mm);

$h$  = altura do corpo-de-prova.

#### 4.7.3 – Absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua

A absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua dos concretos produzidos, foi determinada de acordo com as especifica\u00e7\u00f5es da NBR 12142 (ABNT, 2010).

Foram moldados corpos-de-prova prism\u00e1ticos de 30,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm e submetidos ao ensaio de absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua aos 28 dias de cura.

A absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua dos corpos-de-prova s\u00e3o calculados usando a massa do corpo-de-prova seco em estufa at\u00e9 a const\u00e2ncia de massa e o valor da massa do corpo-de-prova saturad, seguindo a Equa\u00e7\u00e3o 4.16.

$$AA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4.16)$$

Onde:

$AA$  = absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua (%);

$M_u$  = massa do corpo-de-prova saturado (g);

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa (g).

#### 4.7.4 – Caracterização microestrutural e de fases

Para a análise microestrutural dos concretos produzidos, foi utilizado o microscópio de varredura a laser, Confocal (marca OLYMPUS, modelo LEXTOLS4000 3D), operando com um laser de 405 nm e um conjunto ótico, gerando aumentos da ordem de até 17091X.



Figura 4.23 – Microscópio Confocal OLYMPUS.

#### 4.8 – Produção do ladrilho hidráulico

Após a avaliação das propriedades dos concretos definidos à partir do planejamento em rede simplex e o método de dosagem geral, definiu-se o traço que apresentou as melhores características para a produção do ladrilho hidráulico piso tátil.

A mistura dos materiais constituintes dos concretos foi realizada de acordo com os seguintes procedimentos mecânicos: i) o agregado graúdo e metade da quantidade de água total são introduzidos no misturador e misturados por um minuto; ii) o cimento é adicionado no misturados e misturado por um minuto; iii) por fim são adicionados o agregado miúdo (pó-de-pedra) e o filler (resíduo), juntamente com o restante da água e o aditivo plastificante. A Figura 4.24 apresenta o misturador utilizado na produção dos concretos.



**Figura 4.24 – Equipamento utilizado na mistura dos materiais para produção do ladrilho hidráulico piso tátil.**

Em seguida, o concreto é lançado em moldes de plástico com o desenho do piso tátil e por processo de vibração o concreto é adensado utilizando uma mesa vibratória com frequência de vibração de 57 Hz durante um tempo de 2 minutos (Figura 4.25).

Após 24 horas da moldagem dos corpos-de-prova, estes são delmoldados e curados imersos em água até a idade dos ensaios.



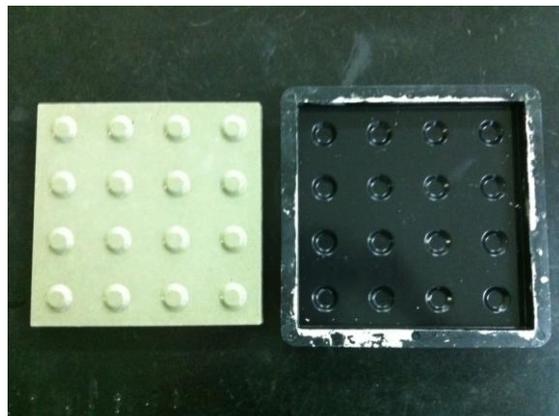
**Figura 4.25 – Equipamentos utilizados na fabricação do ladrilho hidráulico piso tátil.**

A Figura 4.26 ilustra o processo de produção dos pisos pelo processo de vibração e cobertura para evitar a perda da umidade até a desforma após 24 horas.



**Figura 4.26 – Moldagem dos ladrilhos hidráulicos.**

Após 24 horas da moldagem do piso tátil, promoveu-se a desforma (Figura 4.27) e dado início ao processo de cura.



**Figura 4.27 – Ladrilho hidráulico produzido.**

Após a produção dos ladrilhos, estes permaneceram em cura imersa (Figura 4.28) em água até a idade de 28 dias para a análise das propriedades física e mecânica de acordo com as normas técnicas para este produto.



**Figura 4.28 – Cura dos ladrilhos produzidos.**

#### 4.8.1 – Verificação das propriedades do ladrilho hidráulico

Os ladrilhos hidráulicos piso táteis confeccionados foram submetidos à avaliação de suas propriedades, na idade de 28 dias, para atendimento da norma NBR 9457 (ABNT, 2013), descritas na Tabela 4.12.

**Tabela 4.12 – Propriedades e limites da norma referente aos ladrilhos hidráulicos.**

Propriedades	Normas dos ensaios	Limites da NBR 9457/2013
Absorção de água	NBR 13818/1997 – anexo B	Máximo de 8%
Módulo de ruptura à flexão (MRF)	NBR 13818/1997 – anexo C	Valo médio da amostra 5 MPa Valor individual mínimo 4,6 MPa
Avaliação dimensional	NBR 13818/1997 – anexo S	-
Espessura	NBR 9457/2013	Tolerância de $\pm 10\%$
Comprimento e largura	NBR 9457/2013	Tolerância de $\pm 0,2\%$

Os ensaios de absorção de água nos ladrilhos hidráulicos foram realizados segundo a NBR 13818 (ABNT, 1997) – anexo B, usada para ensaios em placas cerâmicas.

Os ensaios de flexão nos ladrilhos hidráulicos foram realizados de acordo com a NBR 13818 (ABNT, 1997) – anexo C, aos 28 dias de cura úmida.

O ensaio de determinação do módulo de resistência à flexão (MRF) foi realizado em uma prensa da marca EMIC com capacidade de 10 toneladas, apresentada na Figura 4.29.



**Figura 4.29 – Ensaio de determinação do módulo de resistência à flexão dos pisos produzidos.**

Foram realizadas verificações dimensionais para o atendimento das especificações da norma NBR 9050 (ABNT, 2005).

#### **4.9 – Comparativo com outros pisos hidráulicos tátil**

Os resultados das propriedades tecnológicas (absorção de água e módulo de resistência à flexão) obtidas para o ladrilho hidráulico proposto neste trabalho foram comparados com os valores obtidos nos ensaios realizados com pisos encontrados no mercado da construção civil. Além disso, os resultados foram também comparados com os ladrilhos hidráulicos com incorporação do resíduo do beneficiamento de rohas ornamentais produzidos por Reis (2008), por meio de prensagem e com um produto produzido por uma empresa localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, localizado no Estado do Espírito Santo.

# Capítulo 5

## Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios desenvolvidos nos materiais utilizados, corpos-de-prova e piso hidráulico tático produzidos neste trabalho.

### 5.1 – Caracterização dos materiais utilizados

#### 5.1.1 – Caracterização física

A Figura 5.1 apresenta as curvas de distribuição de tamanho de partículas dos materiais utilizados, obtidas via ensaios de sedimentação e peneiramento.

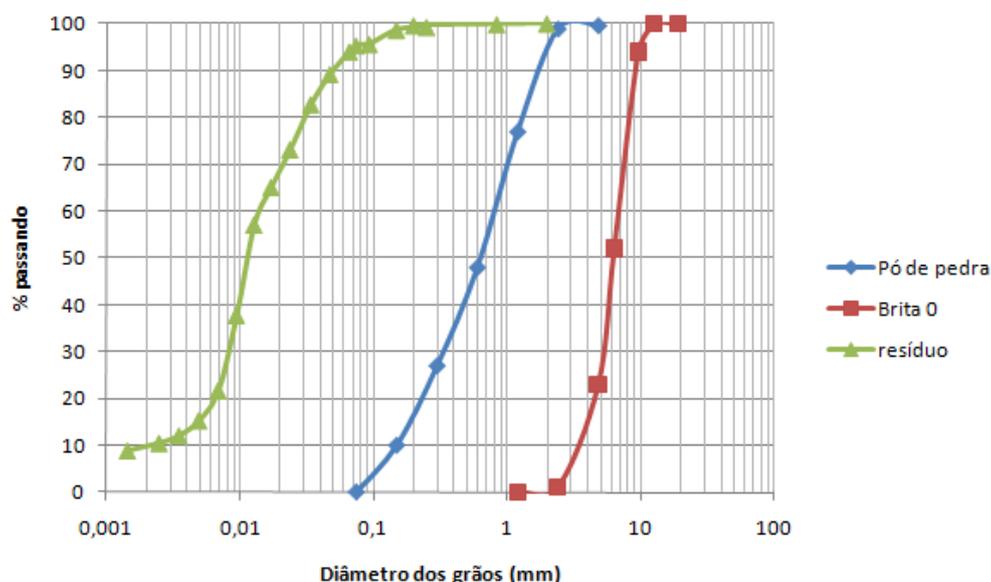


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica dos agregados.

Em termos de tamanho de partículas, os materiais agregados são bastante diferentes. Verifica-se que o resíduo do beneficiamento de rochas

ornamentais apresentou granulometria mais fina, o qual pode ser usado como um material filler ( $< 75 \mu\text{m}$ ). Este resultado é importante devido às partículas mais finas do resíduo, em princípio, poderem preencher os vazios entre as partículas maiores. Isto pode contribuir para otimizar o empacotamento das partículas e, portanto, maximizar a densidade seca aparente dos materiais agregados na produção dos concretos convencionais.

A Tabela 5.1 apresenta as características físicas dos materiais utilizados na composição das misturas.

**Tabela 5.1 – Caracterização dos agregados.**

Ensaio	Norma	Brita 0	Pó-de-pedra	RBRO
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52/2003	2,77	2,72	2,65
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45/2006	1,44	1,48	0,98
Diâmetro máximo característico (DMC) (mm)	NBR NM 248/2003	9,50	2,40	0,0075

Os materiais apresentaram valores de massa específica real relativamente próximos na faixa entre 2,65 – 2,77 g/cm<sup>3</sup>. Pode-se observar que em termos de massa unitária no estado solto, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais apresenta o menor empacotamento das partículas. Isto se deve fundamentalmente a sua granulometria mais fina, como observado na Figura 5.1. Em termos de diâmetro máximo característico os materiais são bem diferentes, sendo que a brita 0 é classificada como agregado graúdo e o pó de pedra como agregado miúdo. Já o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais pode ser classificado como um material filler.

### 5.1.2 – Composição química e mineralógica

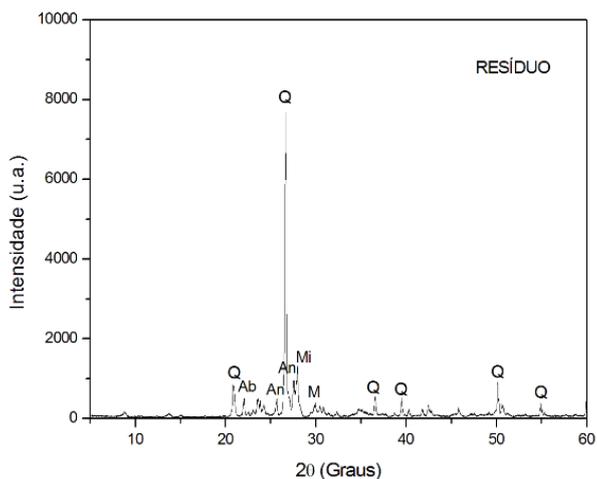
A composição química para o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é apresentada na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Análise química do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.**

Óxidos	%
SiO <sub>2</sub>	67,638
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,416
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,994
K <sub>2</sub> O	7,552
SO <sub>3</sub>	1,425
TiO <sub>2</sub>	0,424
CaO	3,337
MnO	0,050
PF	1,34

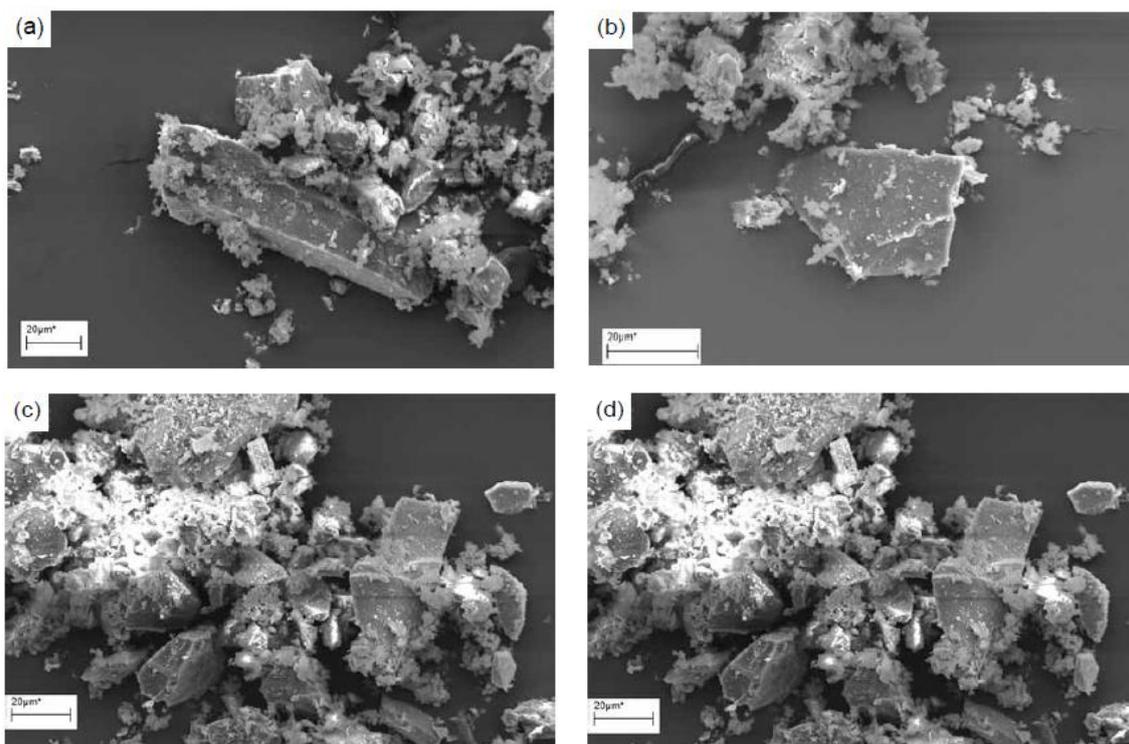
Os constituintes determinantes são sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), nessa ordem. O alto teor de sílica indica que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é oriundo de rochas silicatas ácidas, provavelmente granitos e gnaisses. Além disso, as presenças de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de cálcio (CaO) no resíduo estudado estão fundamentalmente relacionados ao processo de polimento das rochas ornamentais em que são utilizados abrasivos.

A Figura 5.2 apresenta o difratograma de raios-X do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.



**Figura 5.2 – Difratoograma de raios-X do resíduo. Q = quartzo; Ab = Albita; An = Anortita; Mi = microclina; M = mica muscovita.**

Na Figura 5.3a-d são representados os aspectos morfológicos das partículas do resíduo de rocha ornamental utilizado neste trabalho.



**Figura 5.3 – Aspectos morfológicos das partículas do resíduo de rochas ornamentais.**

Na Figura 5.3a são observados detalhes dos cristais de feldspato com seu típico hábito prismático. Na Figura 5.3b observa-se um cristal de mica com seu típico hábito planar. Na Figura 5.3c são observados detalhes do cristal de

quartzo com a presença de fraturas conchoidais. Na Figura 5.3d têm-se aglomerados de minerais com as presenças de quartzo, feldspato e mica.

## 5.2 – Planejamento experimental – Densidade aparente seca

### 5.2.1 - Análise do modelo

Para a determinação da superfície de resposta foi utilizado o modelo numérico cúbico completo com pontos centrais. A resposta experimental analisada foi a densidade seca máxima, de acordo com método de ensaio no ítem 4.5 do capítulo 4.

#### 5.2.1.1 – Modelo cúbico completo

Para a análise do planejamento experimental foram utilizados 16 pontos experimentais na determinação da densidade aparente seca máxima das misturas. Na Figura 5.4 estão representados os pontos experimentais utilizados na composição das misturas e determinação da superfície de resposta.

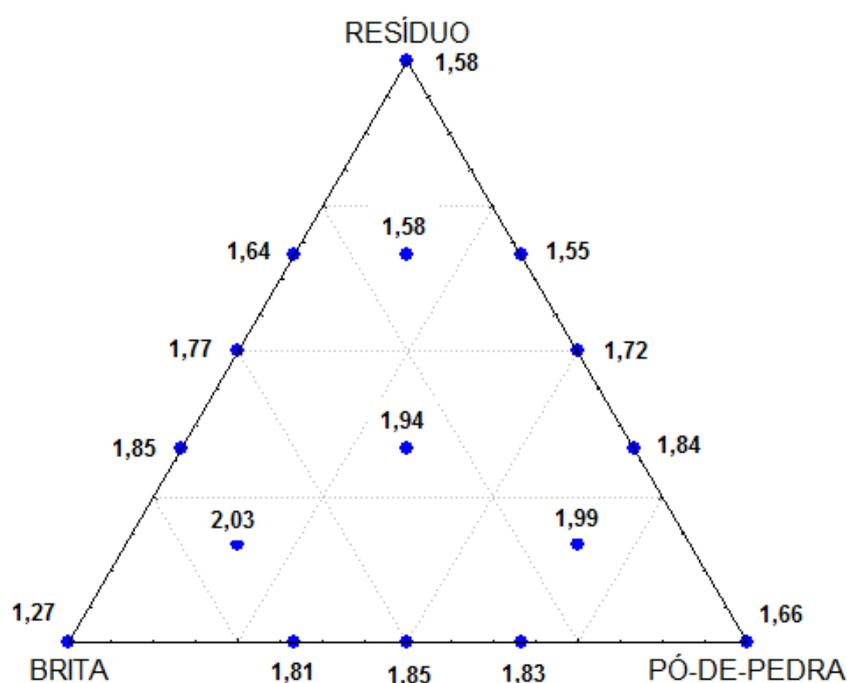


Figura 5.4 – Planejamento em rede simplex do modelo cúbico completo com pontos centrais e valores médios de densidade máxima seca.

A Equação 5.1 representa todos os pontos da região experimental estimados pelo modelo cúbico completo.

$$\hat{y} = 1,58 x'_1 + 1,66 x'_2 + 1,28 x'_3 + 0,92 x'_1 x'_2 + 1,41 x'_1 x'_3 + 1,00 x'_2 x'_3 + 2,76 x'_1 x'_2 x'_3 + 1,20 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) + 1,30 x'_2 x'_3 (x'_2 - x'_3) \quad (5.1)$$

Onde:

$x'_1 = \text{teor de brita 0}$

$x'_2 = \text{teor de pó - de - pedra}$

$x'_3 = \text{teor de RBRO}$

Nas Figuras 5.5 e 5.6 é apresentado o comportamento estatístico para a densidade aparente seca máxima. Na Figura 5.5 tem-se a relação entre os valores previstos versus valores observados. Verifica-se uma relação praticamente linear, o qual caracteriza um ajuste satisfatório. Na Figura 5.6 tem-se o comportamento dos resíduos estatísticos para o modelo adotado. Observa-se que a curva dos resíduos no gráfico de probabilidade normal se aproxima de uma linha reta, o que indica a suposição de normalidade para o modelo está satisfeita.

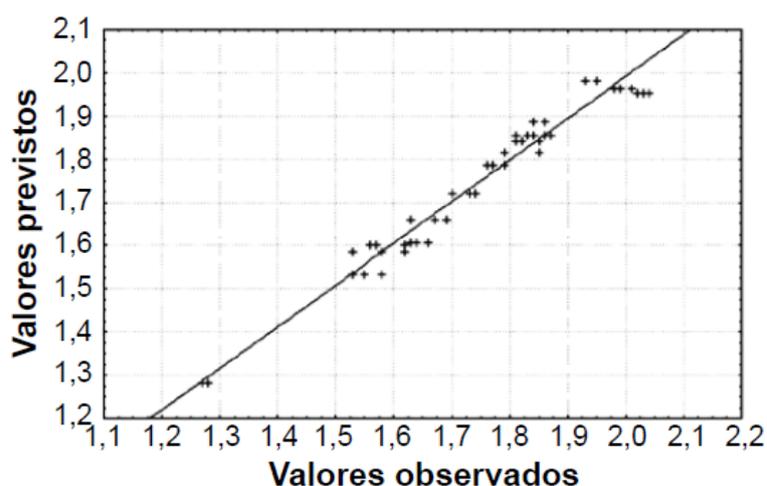


Figura 5.5 – Valores observados versus valores previstos pelo modelo.

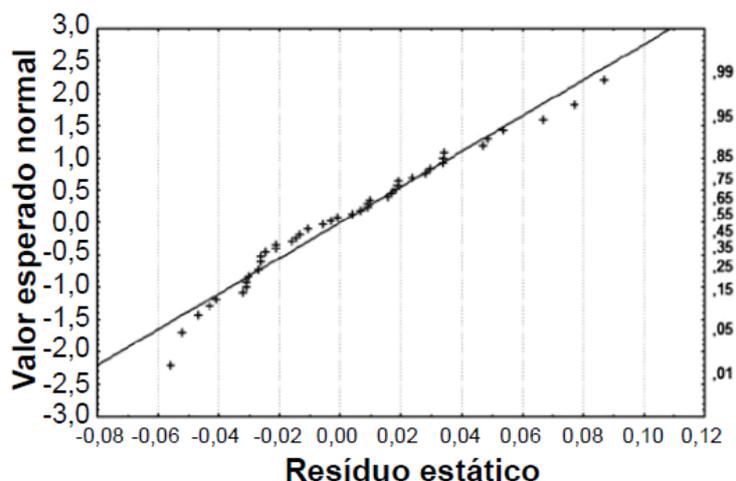


Figura 5.6 – Resíduos versus valores normais esperados.

### 5.2.1.2 – Intervalos de confiança

Foi admitido que os erros se distribuem normalmente, assim, empregou-se a distribuição de Student para testar a significância dos parâmetros  $b_i$  do modelo ao nível de 95% de confiança.

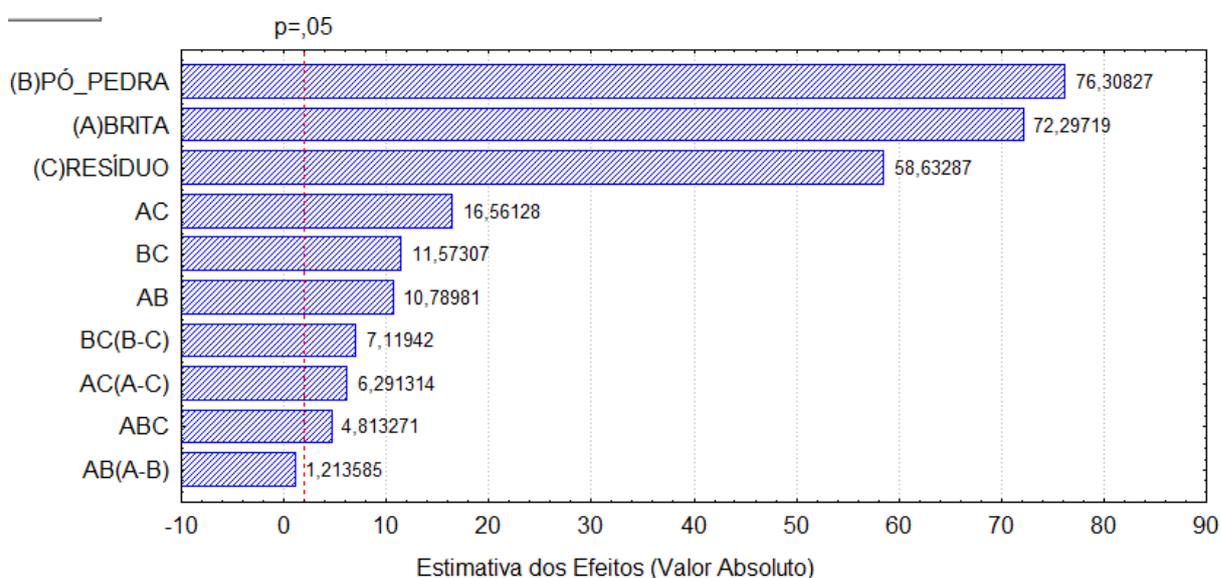
A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros do modelo e os respectivos intervalos de confiança.

Tabela 5.3 – Parâmetros e intervalos de confiança do modelo cúbico completo.

Respostas		Intervalos de Confiança 95% Student	
$b_1$	1,58	1,54	1,62
$b_2$	1,67	1,62	1,71
$b_3$	1,28	1,24	1,32
$b_{12}$	0,92	0,75	1,10
$b_{13}$	1,42	1,25	1,59
$b_{23}$	0,99	0,82	1,17
$b_{123}$	2,76	1,60	3,92
$b_{1212}$	<b>0,23</b>	<b>-0,15</b>	<b>0,60</b>
$b_{1313}$	1,18	0,80	1,56
$b_{2323}$	1,33	0,95	1,71

Observa-se na Tabela 5.3 que o parâmetro  $b_1$  do modelo não é significativo para o modelo, pois este, dentro dos intervalos de confiança, pode ser considerado o valor nulo.

O diagrama de Pareto, apresentado na Figura 5.7, comprova graficamente a significância dos parâmetros do modelo analisado. Os valores ao lado dos retângulos são relativos ao teste  $t$ , de forma que os valores que se encontram ao lado direito da linha de  $p = 0,05$  de probabilidade são significativos.



**Figura 5.7 – Diagrama de Pareto.**

Sendo assim, a nova equação para o modelo analisado é descrito pela Equação 5.2.

$$\hat{y} = 1,58 x'_1 + 1,66 x'_2 + 1,28 x'_3 + 0,92 x'_1 x'_2 + 1,41 x'_1 x'_3 + 1,00 x'_2 x'_3 + 2,76 x'_1 x'_2 x'_3 + 1,20 x'_1 x'_3 (x'_1 - x'_3) + 1,30 x'_2 x'_3 (x'_2 - x'_3) \quad (5.2)$$

### 5.2.1.3 – Análise do modelo

A partir dos resultados obtidos pelo modelo cúbico completo e os resultados obtidos experimentalmente, foi realizada avaliação estatística por meio do método dos mínimos quadrados ou análise de regressão de variância

(ANOVA), considerando treze pontos experimentais, com três repetições. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos.

**Tabela 5.4 – Análise de variância (ANOVA) do modelo.**

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	1,62	8	0,20
Resíduos	0,06	39	0,00
Falta de ajuste	0,04	7	0,01
Erro puro	0,02	32	0,00
Total	1,68	47	0,04

% de variação explicada: 96,43%

Verifica-se na Tabela 5.4 que o valor de  $R^2$  do modelo analisado é de 96,43%, mostrando um ajuste satisfatório para o planejamento experimental.

### ***Critério de Fisher***

Adotando-se 95% de confiança pelo critério de Fisher, tem-se para  $F_{8,49} = 2,18$ .

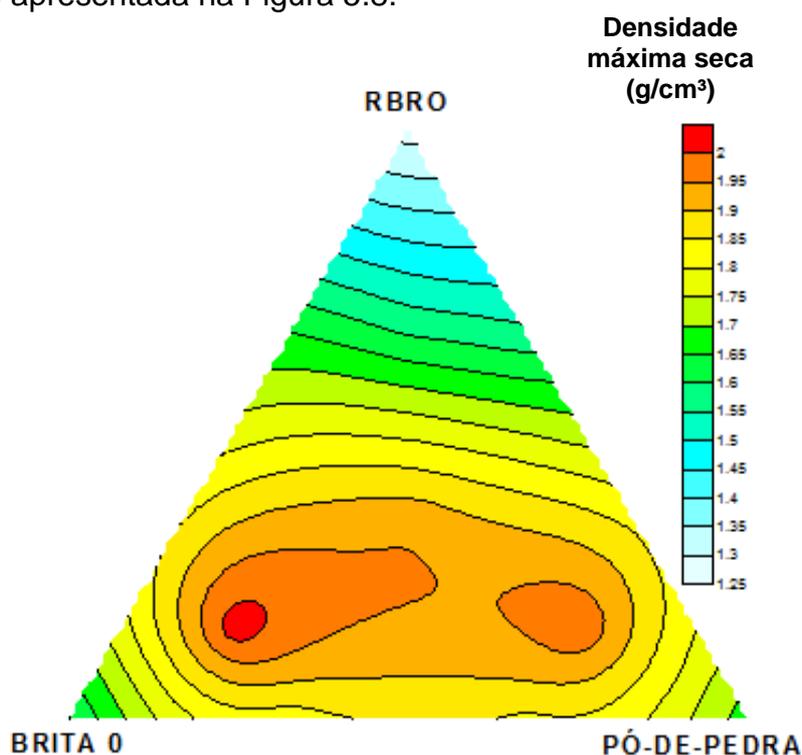
Considera-se que se a razão entre as médias quadráticas (regressão e resíduos) for maior que o valor do teste F tabelado, então existe relação linear entre as variáveis  $y$  e  $x$ . Para que uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa, mas também útil para preditivos, o valor da relação entre as médias quadráticas (regressão e resíduos) deve ser comparado com no mínimo quatro a cinco vezes o valor do teste F tabelado (Barros Neto, 2003). Neste trabalho a relação  $MQ_R/MQ_r$  é dado por:

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} > 5F_{tab} \rightarrow \frac{0,2024}{0,0015} = 134,93 > 5 \times (2,18) = 10,90 \quad (5.3)$$

Assim, a razão  $M_{Q_R}/M_{Q_r}$  obtida é muito maior que o produto  $5x F_{tab}$ , comprovando a evidência estatística da regressão.

#### 5.2.1.4 – Superfície de resposta

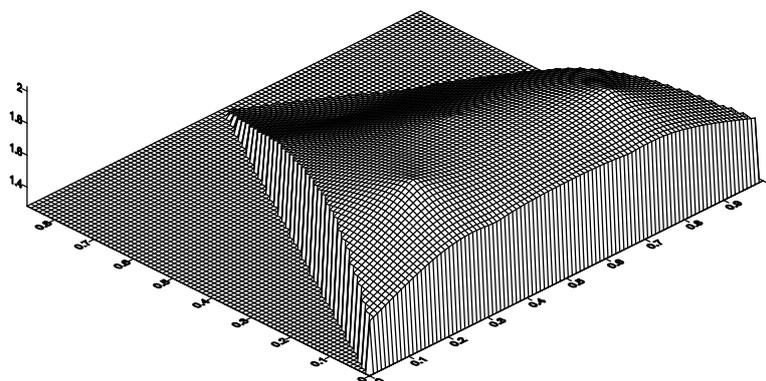
A superfície de respostas gerada pelo software surfer para o modelo analisado é apresentada na Figura 5.8.



**Figura 5.8 – Superfície de resposta do modelo para densidade aparente seca máxima (g/cm³).**

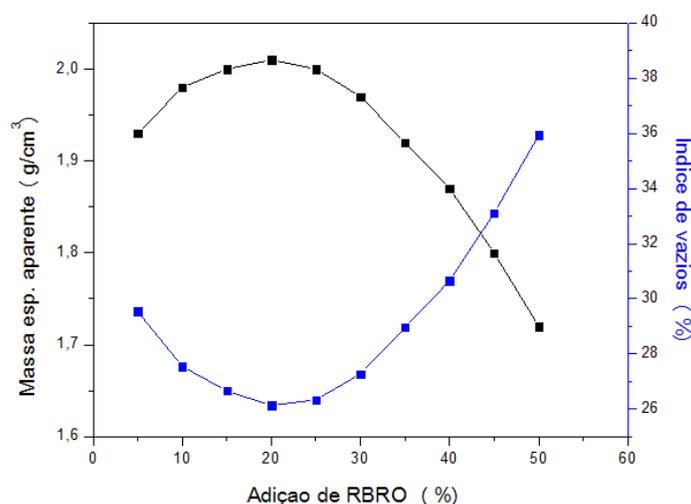
De acordo com as Figura 5.8 e 5.9, a região de maior compacidade corresponde ao valor para a densidade máxima aparente de 2,00 g/cm³. Para esta região, o traço com maior porcentagem do RBRO na mistura corresponde à composição:

*50% de brita 0, 30% de pó-de-pedra e 20% de RBRO*



**Figura 5.9 – Superfície de resposta espacial do modelo para a densidade aparente seca máxima (g/cm<sup>3</sup>).**

A Figura 5.10 apresenta o comportamento da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na massa específica aparente seca e índice de vazios, mantendo-se o agregado graúdo (brita 0) fixo em 50% da mistura dos agregados e substituindo o agregado miúdo (pó-de-pedra) pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.



**Figura 5.10 – Comportamento da massa específica aparente e índice de vazios com adição do resíduo.**

Pode-se observar que a adição do resíduo em 20% da massa do esqueleto granular atinge valor máximo da densidade aparente no estado compactado dos agregados e, conseqüentemente, um valor mínimo do índice de vazios, para a substituição do agregado miúdo.

### 5.3 – Estudo da pasta

#### 5.3.1 – Dosagem do aditivo superplastificante

As pastas de cimento Portland foram analisadas variando a dosagem de superplastificante, através do ensaio do cone de Marsh. Para a produção das pastas foi fixada a relação  $a/c = 0,48$  e analisada a fluidez da pasta aos 5, 30 e 60 minutos.

A Figura 5.11 apresenta o resultado do ensaio de cone de Marsh, utilizados na confecção das pastas. Verifica-se que o cimento Portland e o superplastificante são compatíveis. O valor ótimo da dosagem de saturação do superplastificante ( $sp/c$ ), neste caso, foi de 0,30% da massa de cimento.

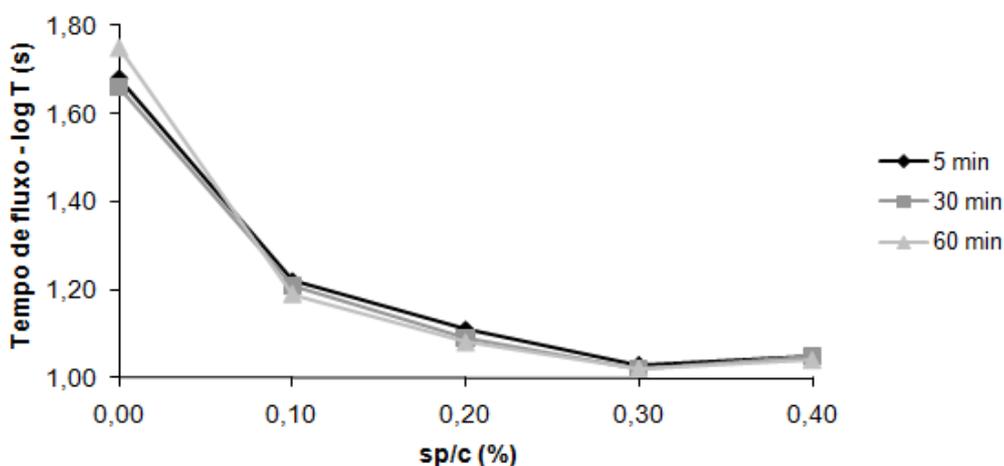


Figura 5.11 – Ensaio do cone de Marsh para pastas de cimento Portland.

### 5.4 – Dosagem dos concretos

Neste item são apresentados e analisados os resultados obtidos nas etapas que determinam a dosagem do concreto para a produção dos corpos-de-prova para avaliação das características físicas e mecânicas.

Foi definido como referência um concreto onde o esqueleto granular é composto de Brita 0, pó-de-pedra e RBRO, tendo a relação entre o consumo

dos três componentes, definidos no planejamento experimental definido pela máxima densidade seca.

Para o cálculo dos concretos produzidos neste trabalho foi utilizada a proposta do professor Okamura, Método Geral (Nunes, 2001). Neste método, descrito no capítulo 3, faz-se necessário a realização de experimentos com argamassas como o estudo da relação água/finos e a dosagem do superplastificante, para a determinação do concreto desejável.

#### 5.4.1 – Dosagem do agregado graúdo (brita 0)

Segundo o Método Geral, o volume de agregado graúdo ( $V_g$ ) é contabilizado em 50% do volume ocupado pelas partículas de agregado graúdo compactado na unidade de volume aparente de um metro cúbico, excluído o volume de ar previsto para a composição (Nepomuceno, 2005; Nunes, 2001; Skarendahl et al., 2000). O volume aparente é dado pela seguinte expressão:

$$V_{ap} = \frac{V_g}{\frac{\gamma_c}{\gamma_g} x (1 - V_v)} = 0,5 \quad (5.3)$$

Onde:

$V_{ap}$  – volume aparente de agregado graúdo compactado;

$V_g$  – volume de agregado graúdo

$\gamma_c$  – Massa aparente no estado compactado

$\gamma_g$  – massa específica do agregado graúdo

$V_v$  – volume de ar

Resolvendo a Equação 5.3 de acordo com a caracterização dos materiais utilizados neste trabalho, tem-se:

$$V_{ap} = \frac{V_g}{\frac{1580}{2740} x (1 - 0,02)} = 0,5 \rightarrow V_g = \mathbf{0,282 \text{ m}^3/\text{m}^3}$$

Uma vez que o volume de agregado graúdo foi definido, utilizou-se a relação entre os demais agregados de acordo com a obtida no planejamento experimental em rede simplex.

#### 5.4.2 – Dosagem do agregado miúdo (pó-de-pedra)

Segundo o Método Geral o volume de agregados finos ( $V_s$ ) é fixado em 40% do volume de argamassa resultante para o concreto. Para o cálculo do volume de agregados finos a partir do Método Geral foi utilizado o esquema da Figura 5.12, obtendo-se para o volume total de finos a Expressão 5.4.

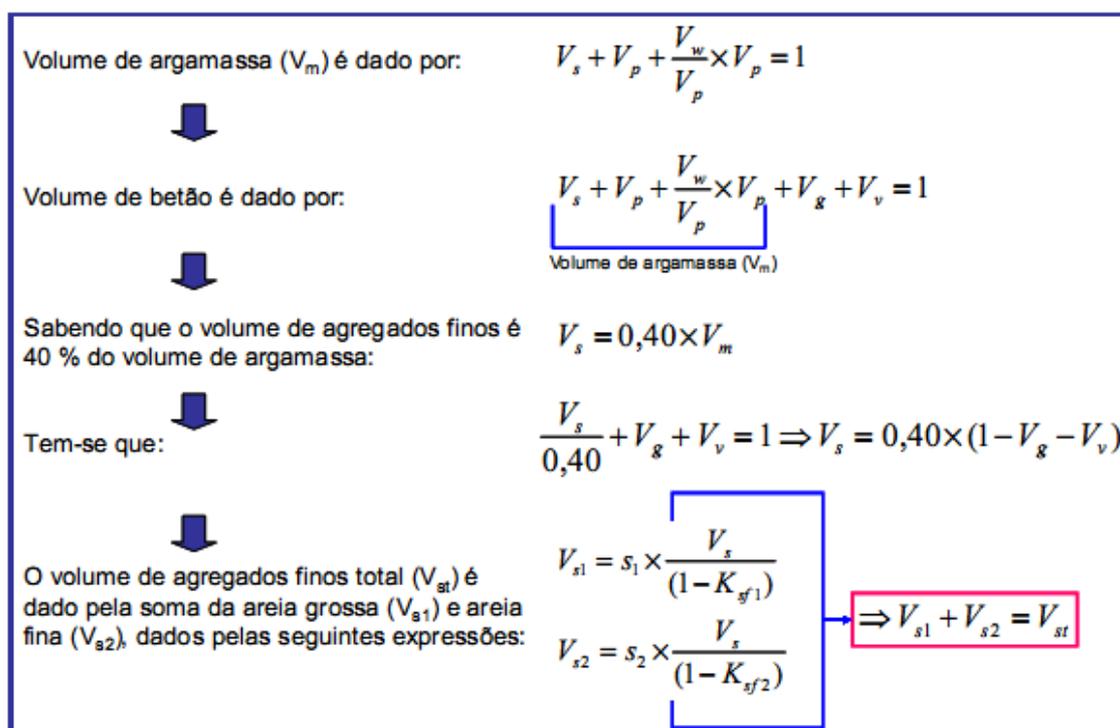


Figura 5.12 – Dosagem do agregado miúdo (Nunes, 2001).

Onde:

$V_m$  – volume de argamassa;

$V_s$  – volume de agregados finos;

$V_p$  – volume de finos;

$V_g$  – volume de agregado graúdo;

$V_v$  – volume de vazios.

A partir da análise granulométrica dos agregados finos (Figura 5.1) é possível determinar a porcentagem de partículas por unidade de volume de tamanho inferior a 0,09 mm,  $k_{sf}$  (Nepomuceno, 2005; Nunes, 2001; Skarendahl, et. Al., 2000). Para a simplificação deste processo alguns autores adotaram a dimensão 0,149 mm no lugar dos 0,09 mm, traduzindo numa poupança significativa em termos de materiais finos adicionais (Nunes, 2001). Neste trabalho foi considerado  $k_{sf}$  como a porcentagem de partículas de dimensão inferior a 0,09 mm.

$$V_s = 0,40x(1 - V_g - V_v) = 0,40x(1 - 0,282 - 0,02) = \mathbf{0,279 m^3/m^3} \quad (5.4)$$

Para os agregados miúdos sabemos que:

$$V_g - \text{volume de agregado fino} = 0,279 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$s - \text{porcentagem, em volume, de pó-de-pedra na composição} = 100\%$$

Para este valor do pó-de-pedra calculado e mantendo a relação obtida para os agregados no planejamento experimental em rede simplex, temos a seguinte condição:

$$V_s = \frac{0,30x0,282x2740}{0,50} \rightarrow V_s = \mathbf{0,171 m^3/m^3} \quad (5.5)$$

### 5.4.3 – Dosagem dos finos

A partir dos valores obtidos anteriormente para o volume de ar, brita, agregados finos e razão água/finos a expressão para o cálculo de finos obtém-se como mostrado no esquema da Figura 5.13.

Volume de betão:

$$V_s + V_p + \frac{V_w}{V_p} \times V_p + V_g + V_v = 1 \Leftrightarrow V_p \left(1 + \frac{V_w}{V_p}\right) = 1 - (V_s + V_g + V_v)$$

↓

A partir da expressão dada acima é possível calcular o volume de finos ( $V_p$ ):

$$V_p = \frac{1 - (V_s + V_g + V_v)}{1 + \frac{V_w}{V_p}}$$

**Figura 5.13 – Volume de finos (Nunes, 2001).**

O volume de finos pode ser obtido de acordo com a Equação 5.6.

$$V_p = \frac{1 - (0,279 + 0,282 + 0,02)}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \rightarrow V_p = \frac{0,419}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (5.6)$$

Para as argamassas com adição do RBRO temos:

$$V_p = \frac{1 - (0,171 + 0,282 + 0,02)}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \rightarrow V_p = \frac{0,527}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (5.7)$$

De acordo com a literatura (Nunes, 2001), verifica-se que a razão volumétrica água/finos no concreto auto-adensável está geralmente compreendida entre 0,80 e 1,20. Neste trabalho foram utilizadas para os cálculos das argamassas as razões volumétricas água/finos de 0,80, 1,00 e 1,20.

Para as argamassas com adição do RBRO temos:

$$V_p = \frac{0,527}{1 + 1,00} \rightarrow V_p = 0,264 \text{ m}^3/\text{m}^3 \rightarrow V_w = 0,264 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_p = \frac{0,527}{1 + 1,10} \rightarrow V_p = 0,251 \text{ m}^3/\text{m}^3 \rightarrow V_w = 0,276 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_p = \frac{0,527}{1 + 1,20} \rightarrow V_p = \mathbf{0,240m^3/m^3} \rightarrow V_w = \mathbf{0,288m^3/m^3}$$

Com o volume de RBRO obtido da relação entre o consumo do agregado graúdo, e, com os volumes de finos (RBRO + cimento) e água definidos, obtemos os consumos de cimento Portland através das Equações 5.8 a 5.10.

$$V_p = \frac{309}{2640} + \frac{C_c}{2980} = 0,264 \rightarrow C_c = \mathbf{438 kg/m^3} \quad (5.8)$$

$$V_p = \frac{309}{2640} + \frac{C_c}{2980} = 0,251 \rightarrow C_c = \mathbf{399 kg/m^3} \quad (5.9)$$

$$V_p = \frac{309}{2640} + \frac{C_c}{2980} = 0,240 \rightarrow C_c = \mathbf{366 kg/m^3} \quad (5.10)$$

Assim, optou-se por trabalhar inicialmente com os consumos de cimento de 366 kg/m<sup>3</sup> e 438 kg/m<sup>3</sup>, já que estão dentro das restrições experimentais propostas neste trabalho, de acordo com a Tabela 3.10.

Para as proporções dos agregados sugeridas neste trabalho, obtidas de acordo com o planejamento experimental em rede simplex, a proporção de agregados finos de 40%, de acordo o método de Okamura não é respeitado. Sendo assim, foram dosadas argamassas com adição do RBRO, mantendo o volume de finos e da razão volumétrica de água/finos, porém diminuindo o percentual dos agregados finos em relação ao volume total das argamassas.

As Tabelas 5.5 a 5.7 mostram os traços utilizados no estudo das argamassas, através dos ensaios de espalhamento e fluidez.

Tabela 5.5 – Composição da argamassa AR1 com adição do RBRO.

Argamassa AR1		
Parâmetros da Composição	$V_w/V_f$	1,00
	a/f	0,35
	a/c	0,60
	f (%)	37
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	437
	água	264
Superplastificante (Sp/f)	0,20	1,65
	0,25	1,86
	0,30	2,24
	0,35	2,61

Tabela 5.6 – Composição da argamassa AR2 com adição do RBRO.

Argamassa AR2		
Parâmetros da Composição	$V_w/V_f$	1,10
	a/f	0,39
	a/c	0,69
	f (%)	36
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	399
	água	276
Superplastificante (Sp/f)	0,20	1,42
	0,25	1,77
	0,30	2,12
	0,35	2,48

Tabela 5.7 – Composição da argamassa AR3 com adição do RBRO.

Argamassa AR3		
Parâmetros da Composição	$V_w/V_f$	1,20
	a/f	0,43
	a/c	0,79
	f (%)	34
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	366
	água	288
Superplastificante (Sp/f)	0,20	1,35
	0,25	1,69
	0,30	2,02
	0,35	2,36

Observam-se nas Tabelas 5.5 a 5.7 que a composição das argamassas mantiveram fixos os quantitativos dos agregados (pó-de-pedra e o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais), na proporção obtida do estudo da máxima densidade seca, através do planejamento experimental em rede simplex, modificando apenas os teores do aglomerante hidráulico (cimento Portland) e, conseqüentemente os consumos de água e aditivo superplastificante (sp).

## **5.5 – Estudo das argamassas**

### **5.5.1 – Dosagem do superplastificante**

A determinação da dosagem ótima do superplastificante foi obtida através dos ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas. Foram utilizados os teores de 0,1 a 0,5% de superplastificante em relação à massa de finos e obtidos dos valores de  $G_m$  e  $R_m$ , obtendo o parâmetro  $G_m = 5,0$ .

A Figura 5.14 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de espalhamento da argamassas com a razão  $V_w/V_f = 1,10$  e teor de superplastificante de 0,20% a 0,35% em relação à massa de finos.

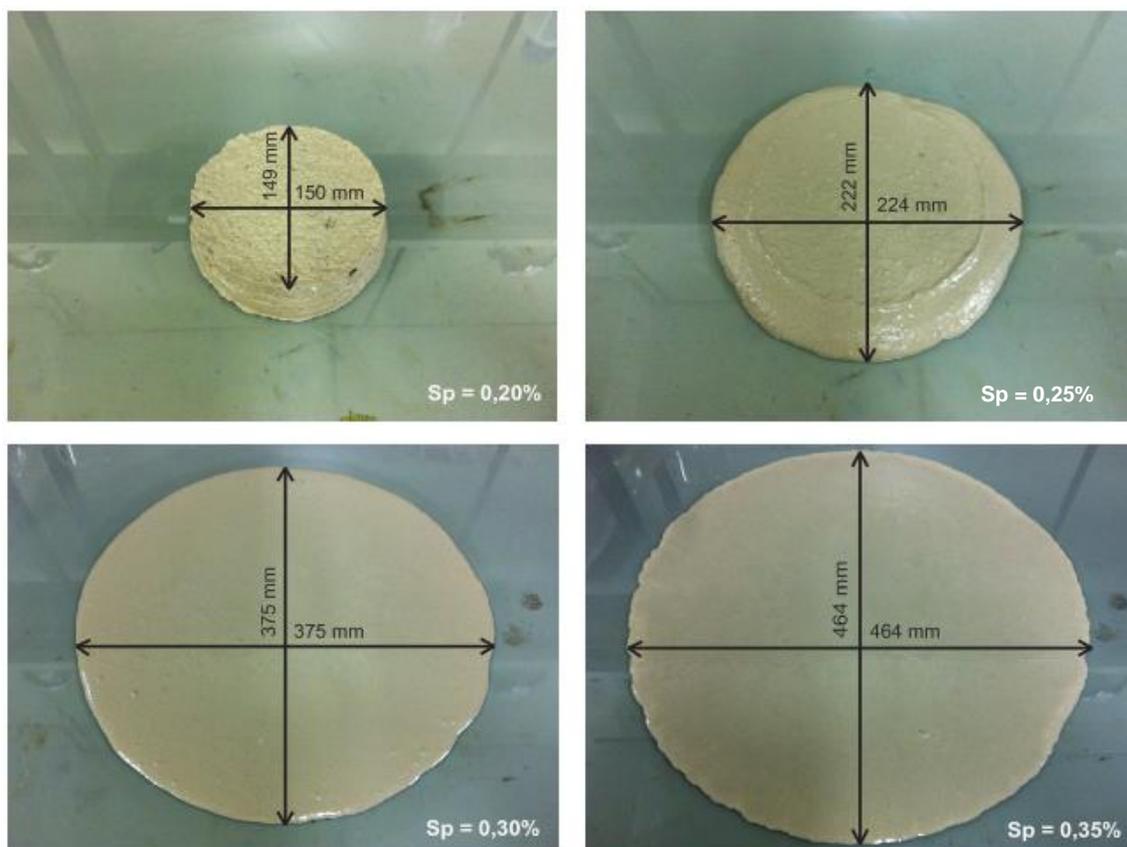


Figura 5.14 – Evolução da dosagem do superplastificante para argamassas com  $V_w/V_f = 1,10$ .

Na Figura 5.15 é apresentado o diâmetro médio do espalhamento das argamassas. Pode-se observar que as argamassas apresentam um diâmetro de espalhamento crescente com a dosagem do superplastificante.

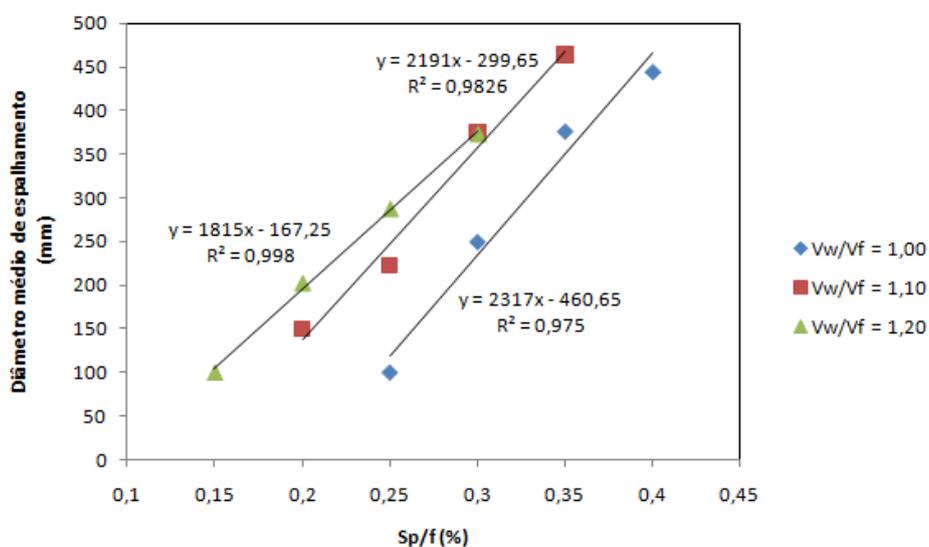
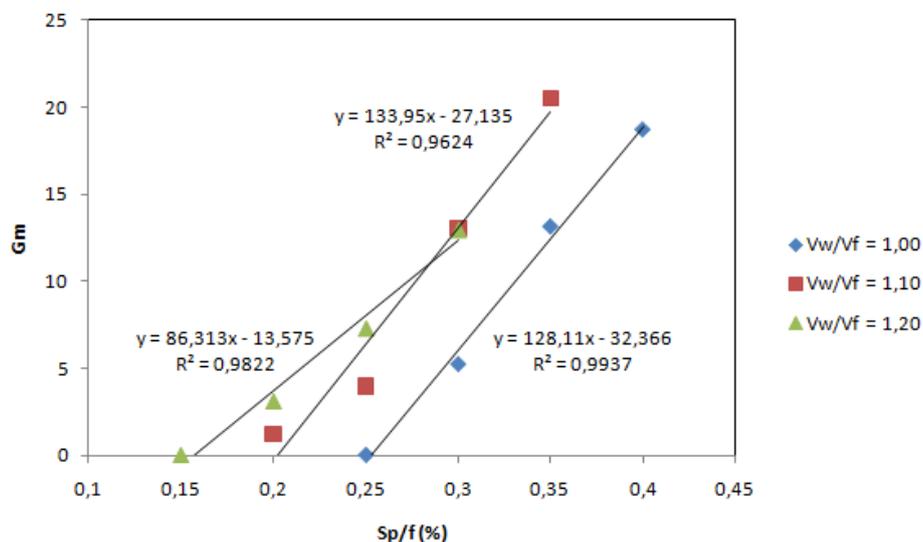


Figura 5.15 – Diâmetro médio do espalhamento das argamassas.

A Figura 5.16 apresenta os resultados obtidos na dosagem do superplastificante para as argamassas produzidas.



**Figura 5.16 – Evolução do parâmetro de Gm das argamassas produzidas com adição do RBRO.**

Verifica-se que as dosagens de superplastificante para as argamassas com adição do RBRO de 0,22%, 0,24% e 0,29% para as razões  $V_w/V_f$  iguais a 1,00, 1,10 e 1,20, respectivamente, obtém-se o parâmetro de Gm próximo de 5. Logo, segundo o Método Geral são os teores de superplastificante ótimo a serem usados nas argamassas com adição do RBRO. A Tabela 5.8 apresenta os teores ótimos de superplastificante utilizados na composição das argamassas para a produção dos corpos-de-prova.

**Tabela 5.8 – Dosagem ótima de superplastificantes para as argamassas.**

Argamassa	$V_w/V_v$	Sp/p
AR1	1,00	0,29
AR2	1,10	0,24
AR3	1,20	0,22

Após a realização do estudo da dosagem do superplastificante nas argamassas e definido o teor ótimo, foram produzidas as argamassas referentes aos traços sugeridos com seus respectivos teores de superplastificante ótimo e realizadas avaliações físicas no estado fresco.

No estado fresco das argamassas foram avaliadas a exsudação, densidade aparente e teor de ar incorporado.

### 5.5.2 – Estudo da exsudação das argamassas

A exsudação é a tendência da água de amassamento de vir à superfície do concreto recém lançado. Em consequência, a parte superior do concreto torna-se excessivamente unida, produzindo um concreto poroso e menos resistente (Almeida, 2002). A exsudação foi validada através da observação da ascensão da água de amassamento à superfície das argamassas produzidas.

A Figura 5.17 ilustra os resultados obtidos na avaliação da exsudação das argamassas produzidas.



**Figura 5.17 – Análise da exsudação nas argamassas produzidas com adição do RBRO.**

De acordo com os resultados obtidos, observa-se na Figura 5.17 que nenhuma das argamassas produzidas com a adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e com o teor ótimo de superplastificante apresentou o fenômeno da exsudação, ou seja, a ascensão da água de amassamento à superfície das argamassas.

## 5.6 – Estudo dos concretos

### 5.6.1 – Produção dos concretos

Após o estudo e definição das composições das argamassas, foram definidas as composições dos concretos, adicionando-se o agregado graúdo (brita 0), correspondendo à 50% da massa seca do agregados.

As Tabelas 5.9 a 5.11 apresentam as composições e características dos concretos produzidos neste trabalho.

**Tabela 5.9 – Composição do concreto C1 com adição do RBRO.**

Concreto C1		
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0	773
	Pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	437
	água	264
	Sp	2,16

**Tabela 5.10 – Composição do concreto C2 com adição do RBRO.**

Concreto C2		
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0	773
	Pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	399
	água	276
	Sp	1,70

**Tabela 5.11 – Composição do concreto C3 com adição do RBRO.**

Concreto C3		
Quantidades na Composição (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0	773
	Pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	cimento	366
	água	288
	Sp	1,48

Após definidos os traços de concretos a serem produzidos, foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos e estudadas suas características físico-mecânicas e comparadas com as normas técnicas.

### 5.6.2 – Módulo de resistência à flexão (MRF)

As Tabelas 5.12 a 5.14 apresentam os resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de ruptura à flexão (MRF) dos corpos-de-prova dos concretos produzidos.

**Tabela 5.12 – Resultados do MRF do concreto C1.**

<b>Idade (dias)</b>	<b>MRF (MPa)</b>	<b>MRF Médio (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
7	4,58	4,6	0,1
	4,70		
	4,46		
14	5,22	5,7	0,5
	5,90		
	6,12		
28	6,15	6,3	0,2
	6,53		
	6,28		

**Tabela 5.13 – Resultados do MRF do concreto C2.**

<b>Idade (dias)</b>	<b>MRF (MPa)</b>	<b>MRF Médio (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
7	4,37	4,0	0,4
	3,61		
	4,13		
14	5,35	5,1	0,4
	4,65		
	5,24		
28	5,89	5,9	0,1
	5,77		
	5,89		

Tabela 5.14 – Resultados do MRF do concreto C3.

Idade (dias)	MRF (MPa)	MRF Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
7	3,33	3,2	0,1
	3,12		
	3,22		
14	4,41	4,3	0,1
	4,34		
	4,27		
28	5,52	5,1	0,4
	4,78		
	4,92		

Comparando os resultados do MRF aos 28 dias de cura dos corpos-de-prova ao exigido pela NBR 9457 (ABNT, 2013), em que os valores individuais devem ser maiores que 4,6 MPa e o valor médio deve ser de 5 MPa, todos as dosagens do concreto atingiram a especificação técnica da norma brasileira. Ainda temos que as dosagens para os concretos C1 e C2 atingiram estes resultados já para os 14 dias de cura.

A Figura 5.18 apresenta a evolução do MRF para as três composições de concreto avaliadas neste trabalho.

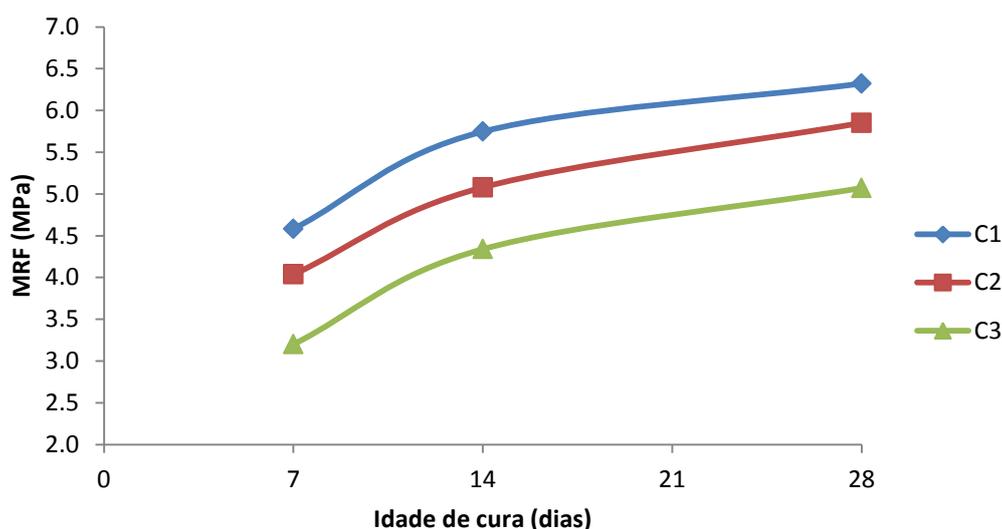


Figura 5.18 – Evolução do MRF das misturas analisadas.

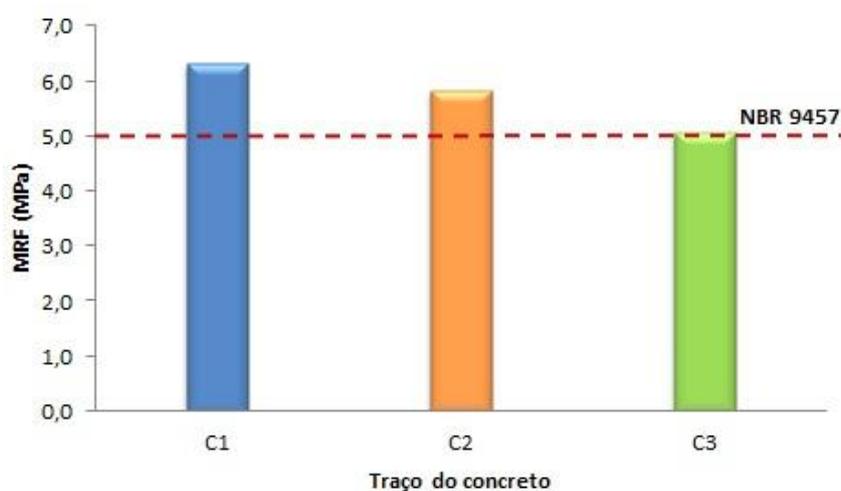
No que diz respeito à evolução do módulo de ruptura à flexão (MRF) dos concretos produzidos, todas as dosagens apresentaram um comportamento semelhante no ganho de resistência dos 7 aos 28 dias de cura. Na Tabela 5.15, faz-se uma comparação entre relações obtidas nos concretos estudados (C1, C2 e C3) e a indicada na bibliografia (Isaia, 2010) para a resistência à compressão, considerando a idade de 28 dias como sendo 100 % da resistência.

**Tabela 5.15 – Evolução do MRF com a idade dos concretos produzidos – comparação com a bibliografia para a resistência à compressão (cimento Portland CP III).**

Composição do concreto	Idade		
	7 dias	14 dias	28 dias
Isaia (2010)	0,68	0,85	1,00
C1	0,73	0,90	1,00
C2	0,68	0,86	1,00
C3	0,63	0,84	1,00

De acordo com a Tabela 5.15, verifica-se que os concretos produzidos nesta pesquisa apresentam ganhos de resistência compatíveis e consistentes com os valores encontrados na bibliografia.

A Figura 5.19 faz um comparativo entre os MRF obtidos aos 28 dias de cura para os concretos avaliados e as exigências da NBR 9457 (ABNT, 2013) referente aos ladrilhos hidráulicos.



**Figura 5.19 – Comparativo dos resultados do MRF aos 28 dias de cura exigidos pela NBR 9457 para ladrilhos hidráulicos.**

Observa-se na Figura 5.19 que todos as composições dos concretos produzidos e avaliados atenderam às exigências da NBR 9457 (ABNT, 2013) para o módulo de ruptura à flexão, sendo que o concreto (C1) com um maior consumo de cimento Portland apresentou uma maior resistência mecânica, o que era já era esperado.

### 5.6.3 – Absorção de água

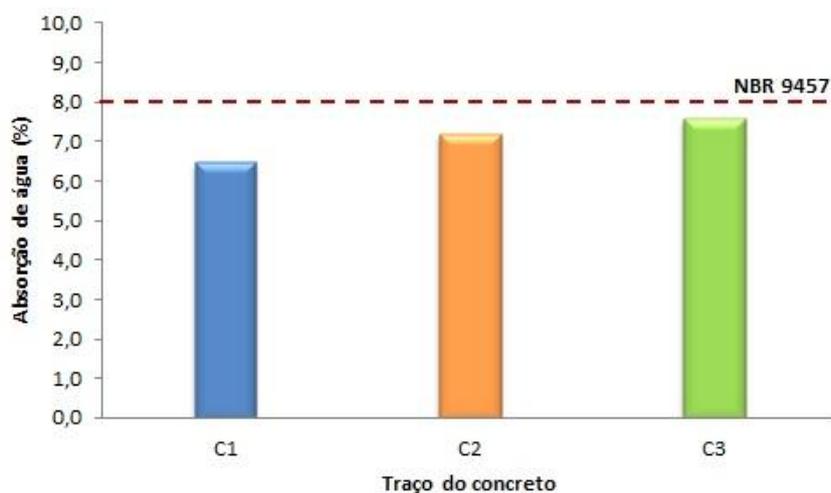
A Tabela 5.16 apresenta os resultados obtidos no ensaio de determinação da absorção de água (AA) dos corpos-de-prova dos concretos produzidos aos 28 dias de cura.

**Tabela 5.16 – Resultados da AA dos concretos aos 28 dias e cura.**

Concreto (dosagem)	AA (%)	AA Médio (%)	Desvio Padrão (%)
C1	6,50	6,7	0,3
	6,54		
	7,10		
C2	7,20	7,2	0,1
	7,26		
	7,15		
C3	7,40	7,6	0,2
	7,77		
	7,76		

A Tabela 5.16 indica que todos as composições dos concretos produzidos e avaliados atenderam às exigências da NBR 9457 (ABNT, 2013) para a absorção de água, sendo que, quanto maior o consumo de cimento Portland, menor é a absorção de água dos concretos, o que era já era esperado.

A Figura 5.20 apresenta os resultados da absorção de água para as três misturas de concreto avaliadas neste trabalho.

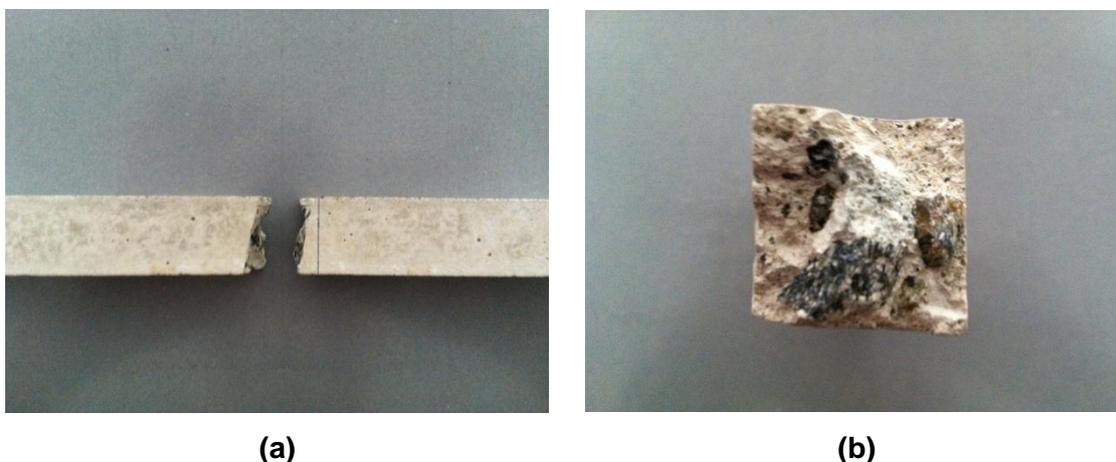


**Figura 5.20 – Comparativo dos resultados da absorção de água aos 28 dias de cura exigidos pela NBR 9457 para ladrilhos hidráulicos.**

Observa-se na Figura 5.19 que todos os traços avaliados atenderam às exigências da NBR 9457 (ABNT, 2013).

#### 5.6.4 – Análise da microestrutura

A Figura 5.21(a) mostra a ruptura do corpo-de-prova após a realização do ensaio de resistência à flexão e a Figura 5.21(b) a seção da peça cortada e polida para análise da macroestrutura do concreto. O corpo-de-prova, mostrado na Figura 5.21(b), foi cortado por meio de uma serra de corte com disco diamantado e polido para análise.



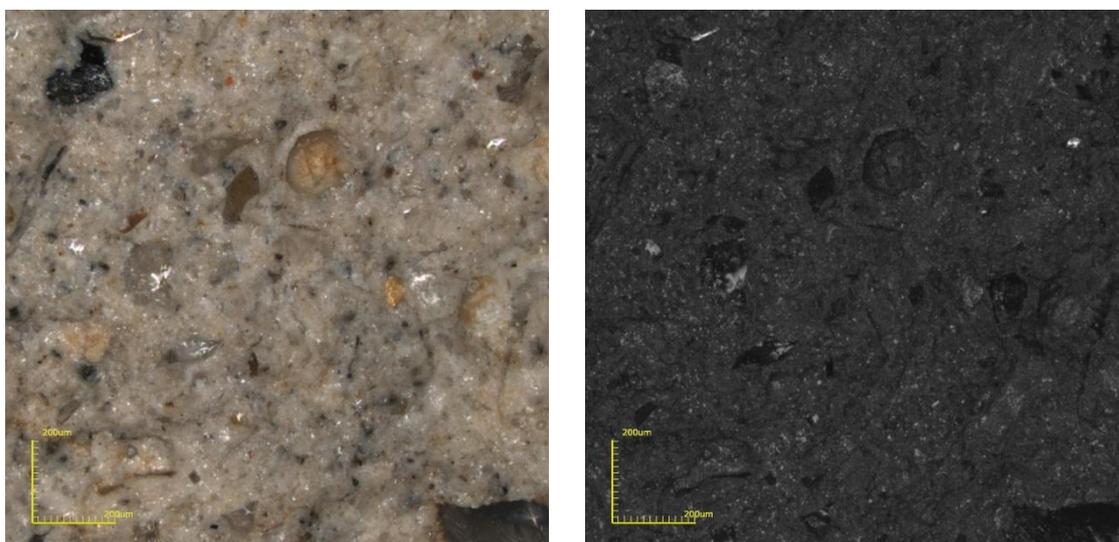
**Figura 5.21 – (a) Ruptura dos corpos-de-prova após realização do ensaio mecânico; (b) seção transversal da superfície de fratura.**

Observa-se na Figura 5.21(b) que a seção transversal da peça de concreto apresenta uma distribuição dispersa do agregado graúdo e da matrix cimentícia, comprovando a eficiência do processo de vibração na conformação dos corpos-de-prova.

No estudo da microestrutura do concreto, é importante a análise de três fases: agregado, matriz da pasta de cimento e uma interface bem definida entre estas, denominada interface pasta agregado ou zona de transição.

Após a realização do ensaio de determinação do módulo de ruptura à flexão, foram realizadas análises da microestrutura na fratura dos corpos-de-prova. As Figuras 5.22 à 5.25 apresentam micrografias, obtidas via microscópio de varredura a laser Confoca, com ampliações de 216x, 430x e 1290x, para o traço de concreto C3, que atendeu as propriedades de módulo de resistência à flexão e absorção de água.

A matriz cimentícia (Figura 5.22) apresenta um aspecto compacto e homogêneo, a presença de poros é pouco perceptível e não observa-se a presença de aglomeração do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Isto é importante uma vez que evita a diminuição da resistência mecânica do concreto.



**Figura 5.22 – Microestrutura da superfície de fratura da matrix cimentícia, ampliação 216x.**

A interface pasta-agregado é um ponto importante no estudo da microestrutura do concreto. Esta interface é o ponto fraco do concreto em

relação à resistência mecânica do concreto, e suas características e componentes são determinantes das características do concreto endurecido, em relação a resistência mecânica e durabilidade (Duarte, 2008).

Mehta (1994) define a zona de transição como sendo o elo fraco da corrente e como a fase limite de resistência do concreto.

As Figura 5.23 a 5.25 ilustram a zona de transição da peças de concreto.



Figura 5.23 – Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 216x.

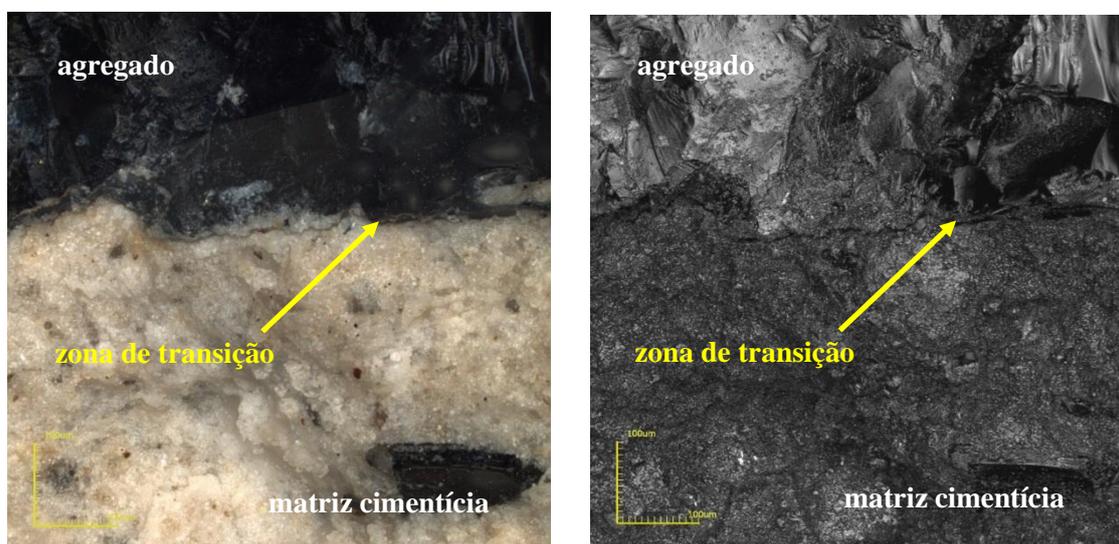
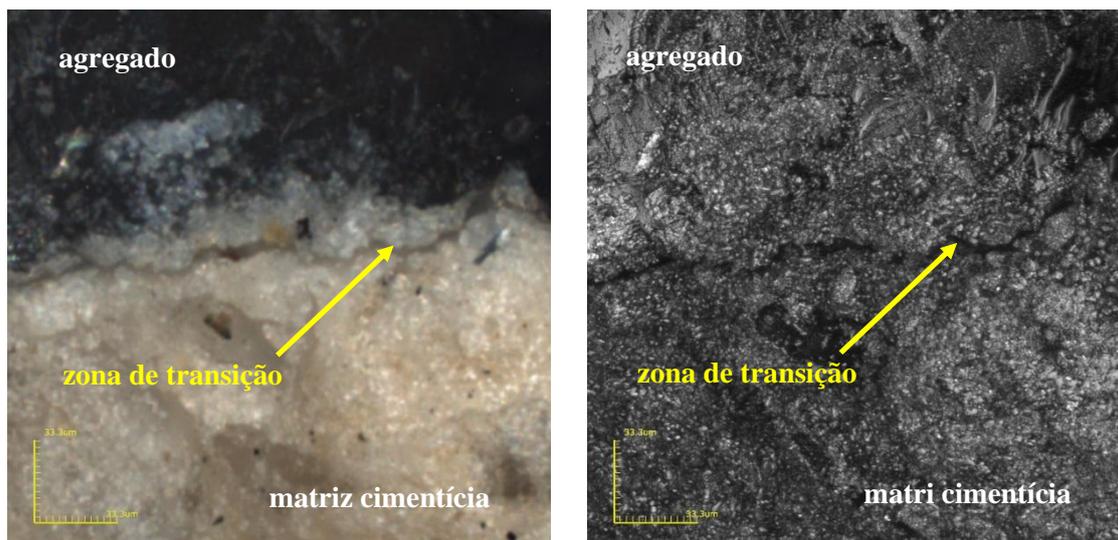


Figura 5.24 – Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 430x.



**Figura 5.25 – Imagem do concreto, zona de transição, ampliação 1290x.**

A zona de transição que cerca os agregados é uma região de maior porosidade, e, como a resistência às ações mecânicas de um material qualquer é diretamente proporcional à sua porosidade, o concreto rompe a níveis de tensão consideravelmente menores que a resistência da matriz e do agregado (Mehta e Monteiro, 1994).

### **5.7 – Produção do ladrilho hidráulico piso tátil**

Após o estudo da dosagem dos concretos e avaliação das propriedades físico e mecânica, foi definido o traço que atendesse às especificações da NBR 9457 (ABNT, 2013), com o menor consumo de cimento. Assim, definiu-se o traço para a produção do piso hidráulico tátil, de acordo com a Tabela 5.17.

**Tabela 5.17 – Composição do piso hidráulico tátil.**

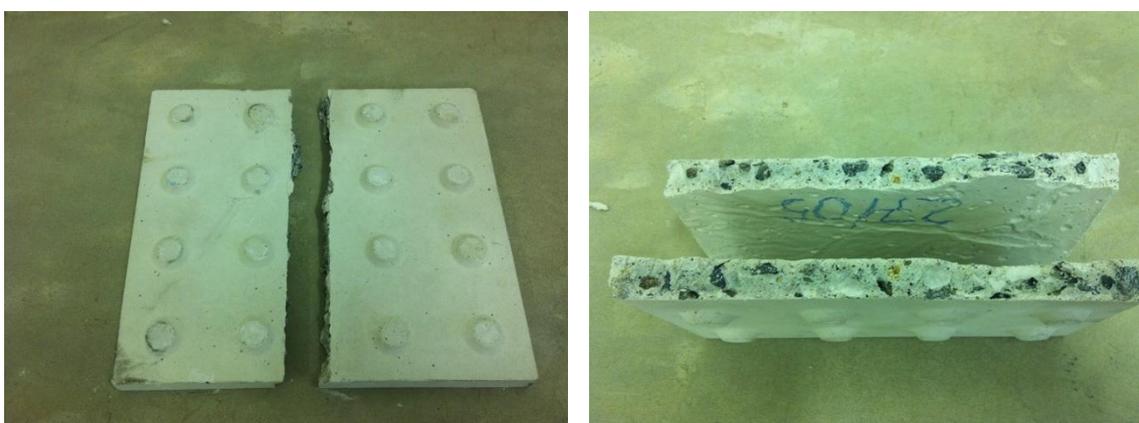
<b>Piso hidráulico tátil</b>		
<b>Consumo de materiais (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Cimento	366
	brita 0	773
	pó-de-pedra	464
	RBRO	309
	água	288
	sp	1,48

### 5.7.1 – Módulo de ruptura à flexão (MRF) e absorção de água

A qualidade do ladrilho hidráulico produzido em escala piloto foi avaliado em termos de resistência mecânica e absorção de água.

Os ensaios de módulo de ruptura à flexão (MRF) absorção de água nos ladrilhos hidráulicos foram realizados segundo a NBR 13818 (ABNT, 1997) – anexo B e C respectivamente, usada para ensaios em placas cerâmicas.

A Figura 5.26 mostra a ruptura do ladrilho hidráulico tátil e sua seção após a realização do ensaio de resistência à flexão.



**Figura 5.26 – Ruptura do piso hidráulico tátil após ensaio.**

Observa-se na Figura 5.26 que, assim como nos corpos-de-prova, a seção do ladrilho hidráulico piso tátil indica uma dispersão da distribuição dos agregados, comprovando a eficiência do processo de vibração na conformação destes produtos.

Os resultados das propriedades analisadas, módulo de ruptura à flexão (MRF) e absorção de água, estão apresentados na Tabela 5.18.

**Tabela 5.18 – Propriedades tecnológicas do piso hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.**

Piso n°	MRF (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão	AA (%)	Média (%)	Desvio padrão
1	5,0	<b>5</b>	0,2	5,7	<b>6</b>	0,4
2	5,0			6,4		
3	5,1			6,2		
4	4,8			6,6		
5	4,7			5,8		

**Tabela 5.19 – Propriedades tecnológicas do piso hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.**

Propriedades tecnológicas		Limites exigidos pela NBR 9457
MRF (MPa)	5,0 ± 0,2 MPa	5,0 (valor médio) 4,6 (individual mínimo)
AA (%)	6,0 ± 0,4 %	8,0 (máximo)

De acordo com os resultados obtidos para as propriedades tecnológicas do piso hidráulico tátil produzido neste trabalho, observa-se que os limites de módulo de ruptura à flexão e absorção de água exigidos pela norma técnica brasileira NBR 9457 (ABNT, 2013) são atendidos.

### 5.7.2 – Avaliação dimensional

Os ladrilhos hidráulicos têm formatos, com dimensões faciais definidas de acordo com as especificações da NBR 9457 (ABNT, 2013), descritas na Tabela 5.20.

**Tabela 5.20 – Formatos e dimensões nominais dos ladrilhos (NBR 9457/2013).**

Formatos	Tipo	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
quadrado	LQ20	200	200	20
	LQ25	250	250	25
	LQ33	330	330	25
retangular	LR44	440	440	25

A NBR 9457 (ABNT, 2013) estabelece como limite de tolerância para as dimensões dos ladrilhos, ±10% para a espessura e ±0,2% para o comprimento e a largura.

De acordo com a NBR 9050 (ABNT, 2005), a textura da sinalização tátil de alerta consiste em um conjunto de relevos troco-cônicos conforme a Tabela 5.21 e dispostos na Figura 5.27. A modulação do piso deve garantir a continuidade de textura e o padrão de informação.

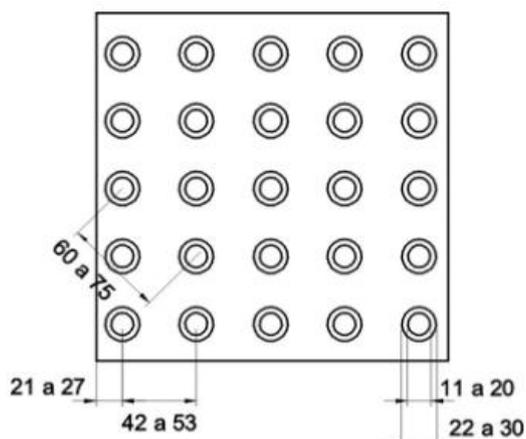


Figura 5.27 – Sinalização tátil de alerta (NBR 9050/2004).

Tabela 5.21 – Dimensões do piso tátil de alerta (NBR 9050/2005).

Avaliação dimensional	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Diâmetro de base do relevo	22	30
Distância horizontal entre centros de relevo	42	53
Distância diagonal entre centros de relevo	60	75
Altura do relevo	Entre 3 e 5	

Nota: distância do eixo da primeira linha de relevo até a borda do piso = 1/2 distância horizontal entre centros. Diâmetro do topo = 1/2 a 2/3 do diâmetro da base.

As Figura 5.28 e 5.29 ilustram as verificações dimensionais realizadas no ladrilho hidráulico tátil produzido neste trabalho.

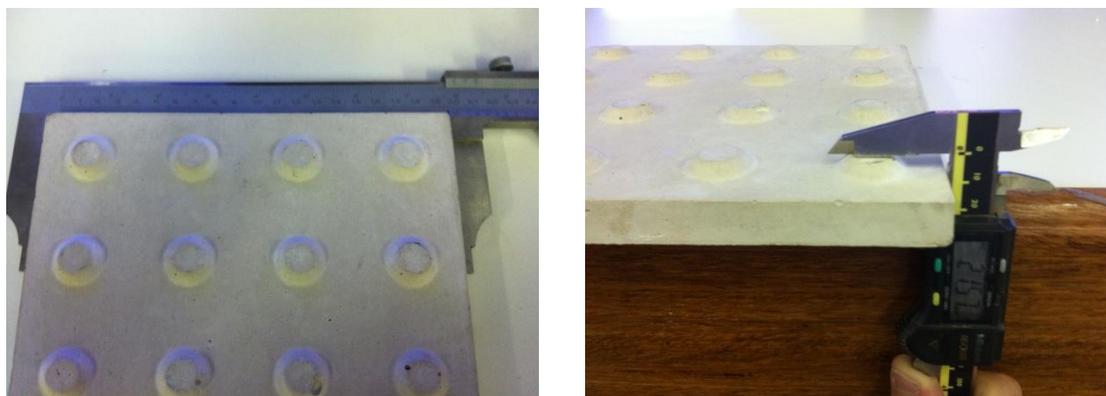
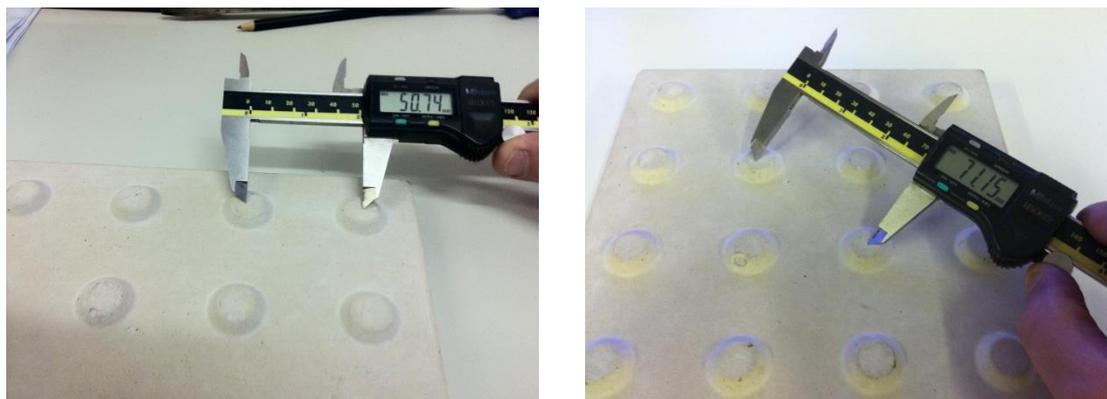


Figura 5.28 – Avaliação dimensional do piso hidráulico tátil.



**Figura 5.29 – Avaliação dimensional do piso hidráulico tátil.**

Os resultados da avaliação dimensional realizado no piso hidráulico tátil estão descritos nas Tabelas 5.22 e 5.23.

**Tabela 5.22 – Dimensões do ladrilho hidráulico tátil.**

<b>Avaliação dimensional</b>	<b>Valor médio (mm)</b>	<b>Desvio máximo (%)</b>	<b>Tolerância (%) (NBR 9457)</b>
Espessura	20,3	7,1	10
Largura	200,8	0,1	0,2
Comprimento	200,8	0,1	

**Tabela 5.23 – Avaliação dimensional do ladrilho hidráulico tátil.**

<b>Avaliação dimensional</b>	<b>Valor (mm)</b>
Diâmetro de base do relevo	23,1
Distância horizontal entre centros de relevo	50,3
Distância diagonal entre centros de relevo	70,9
Altura do relevo	4,6
Distância do eixo da primeira linha de relevo até a borda	25,2
Diâmetro do topo	14,9

De acordo com os resultados obtidos na avaliação dimensional do ladrilho hidráulico, descritos nas Tabelas 5.22 e 5.23, todos os parâmetros das NBR 9457 (ABNT, 2013) e NBR 9050 (ABNT, 2005) foram atendidos.

### 5.7.3 – Pigmentação do ladrilho hidráulico tátil

Foram produzidos ladrilhos hidráulicos tátil com pigmentação à base de óxido de ferro sintético fabricados pela Bayer S.A., denominado Bayferrox, que são vendidos em forma de pó em embalagens de 25 kg e 650 kg. Os ladrilhos foram produzidos apenas para efeito de ilustração aos produzidos comercialmente com pigmentação.

A quantidade de pigmento no ladrilho hidráulico produzido tradicionalmente, onde a 1ª camada recebe a pigmentação, pode variar de 1% a 7% em relação à massa de cimento. Os pigmentos de óxido mais importantes estão dispostos na Tabela 5.24.

**Tabela 5.24 – Pigmentos de óxidos.**

Cor	Nome
Preto	Óxido de ferro preto
Vermelho	Óxido de ferro vermelho
Amarelo	Óxido de ferro amarelo
Marrom	Óxido de ferro marrom
Verde	Óxido de cromo verde

Para todos os ladrilhos hidráulicos com pigmentação produzidos nesta pesquisa, foram utilizados 5 % de pigmento em relação à massa de cimento. Na Figura 5.30 são apresentados os seguintes ladrilhos: (a) sem pigmentação; (b) pigmento marrom; (c) pigmento verde e (d) pigmento amarelo.



**Figura 5.30 – Ladrilhos hidráulicos tátil com pigmentação.**

## 5.7.4 – Comparativo com outros pisos hidráulicos tátil

### 5.7.4.1 – Propriedades tecnológicas

Os resultados das propriedades tecnológicas do módulo de ruptura à flexão e absorção de água para o piso hidráulico tátil produzido neste trabalho foi comparado com mais dois produtos: o produzido por Reis (2008) com a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e um produto comercializado no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES, sendo ambos os produtos fabricados pelo método tradicional de três camadas e prensado. A Figura 5.31 mostra os pisos analisados.



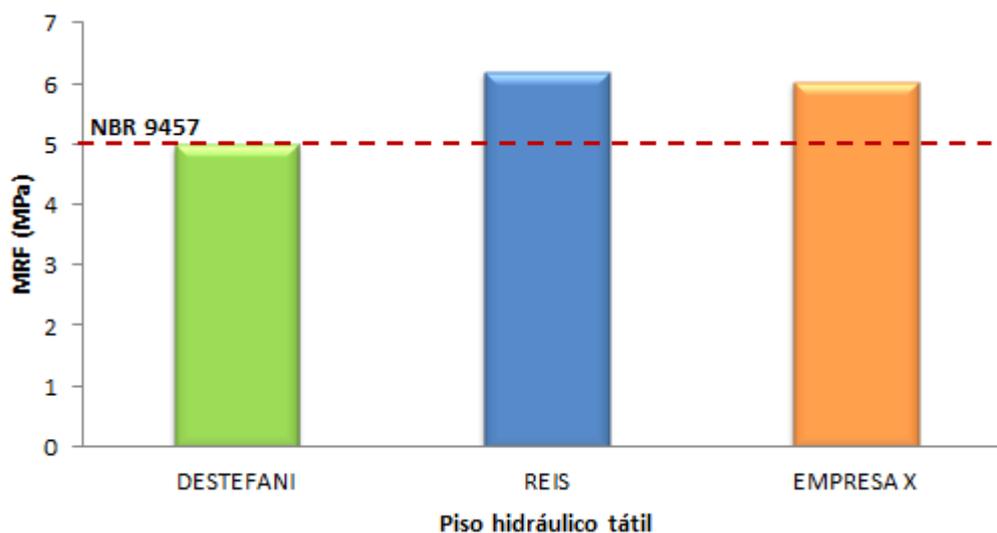
Figura 5.31 – Pisos hidráulico tátil – (a) Destefani (2013), (b) Reis (2008) e (c) Empresa X.

A Tabela 5.25 apresenta um comparativo do módulo de ruptura à flexão (MRF) e absorção de água (AA) para os pisos analisados. Os pisos produzidos por REIS (2008) e pela empresa X, foram produzidos em três camadas e pelo processo de prensagem, conforme os procedimentos tradicionais utilizados na produção dos ladrilhos hidráulicos.

Tabela 5.25 – Comparativo das propriedades tecnológicas dos pisos hidráulicos tátil avaliados.

Pisos hidráulico t	MRF (MPa)	AA (%)
Destefani (2013)	5,0	6,0
Reis (2008)	6,2	<b>13,1</b>
Empresa X	6,0	5,5

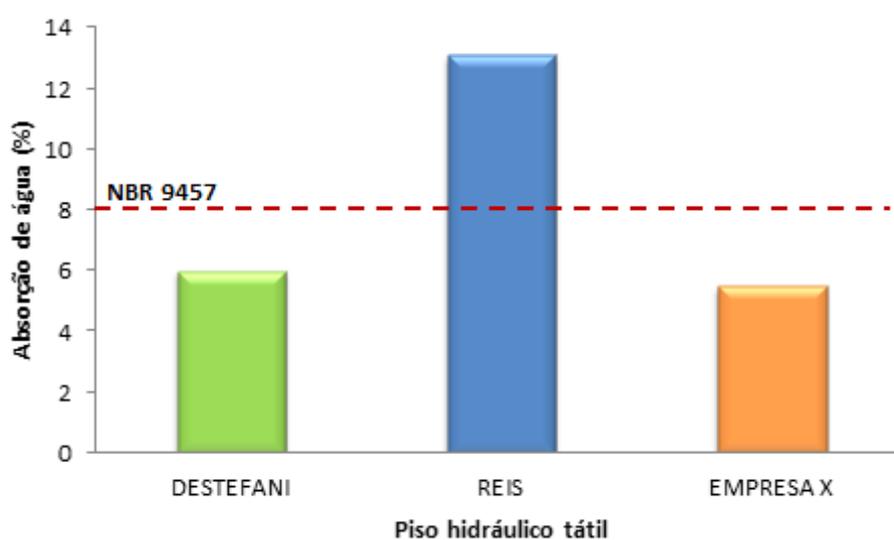
A Figura 5.32 apresenta um comparativo do módulo de ruptura à flexão dos pisos analisados e o exigido pela norma técnica brasileira.



**Figura 5.32 – Comparativo do módulo de resistência à flexão (MRF) dos pisos analisados.**

Verifica-se que todos os ladrilhos hidráulicos tátil avaliados nesta pesquisa atendem ao limite prescrito na norma para o módulo de ruptura à flexão (MRF).

A Figura 5.33 apresenta um comparativo da absorção de água dos pisos analisados e o exigido pela norma técnica brasileira.



**Figura 5.33 – Comparativo da absorção de água (AA) dos pisos analisados.**

Verifica-se no gráfico que a absorção de água do ladrilho hidráulico tátil produzido nesta pesquisa e o da empresa X atendem ao limite prescrito na norma, enquanto o ladrilhos produzido por Rei (2008) não atende ao valor máximo para a absorção de água.

#### 5.7.4.2 – Consumo de cimento Portland

Neste item são feitas algumas considerações sobre o consumo de cimento Portland do ladrilho hidráulico tátil produzido nesta pesquisa e o produzido por Reis (2008), ambos com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e os estudados por Cavalli e Valduga (2006).

Cavalli e Valduga (2006) tiveram como objetivo retomar a história do ladrilho hidráulico e a especificação do procedimento de fabricação. O tipo de ladrilho hidráulico estudado foi o liso usado em revestimentos internos. Foram feitas visitas às fábricas de ladrilhos e testes em laboratório para determinação de quantidades de componentes em cada uma das três camadas do ladrilho, conforme mostrado na Tabela 5.26.

**Tabela 5.26 – Dosagem do ladrilho hidráulico (Cavalli e Valduga, 2006).**

Camada	Materiais	Quantidades
Camada 1	Cimento	1
	Areia fina	1
	Água	0,75
Camada 2	Cimento	1
	Areia industrial	3
Camada 3	Cimento	1
	Areia fina	3
	Areia industrial	1
	Água	0,5

A Tabela 5.27 apresenta a dosagem indicada por Reis (2008) para a produção do ladrilho hidráulico com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.

**Tabela 5.27 – Dosagem do ladrilho hidráulico piso tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (Reis, 2008).**

Camada	Materiais	Quantidades
Camada 1	Cimento	1
	Resíduo	0,2
	Água	0,7
Camada 2	Cimento	1
	Resíduo	3
Camada 3	Cimento	1
	Areia	1,6
	Resíduo	0,4
	Água	0,2

O consumo de cimento Portland por metro cúbico, para as três camadas, é obtido através da Equação 5.11.

$$C_c = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + x} \quad (5.11)$$

Onde  $\gamma_c$  e  $\gamma_a$  são respectivamente, as massas específicas do cimento e areia, e 1:a:x é o traço da mistura expresso em massa.

Considerando os resultados das massas específicas determinadas por Reis (2008) de 2,98 kg/dm<sup>3</sup>, 2,63 kg/dm<sup>3</sup> e 2,77 g/cm<sup>3</sup> para o cimento, areia e resíduo de rochas, respectivamente, determinou-se o consumo de cimento para as camadas dos ladrilhos produzidos por prensagem e comparados com o produzido nesta pesquisa (Tabela 5.28).

As Equações 5.12 a 5.14 exemplificam o cálculo do consumo de cimento para as três camadas do ladrilho hidráulico tátil produzido por Reis (2008).

$$C_c = \frac{1}{\frac{1}{2980} + \frac{0,2}{2770} + \frac{0,7}{1000}} \rightarrow C_c = 903 \text{ kg/m}^3 \quad (5.12)$$

$$C_c = \frac{1}{\frac{1}{2980} + \frac{3}{2770}} \rightarrow C_c = 705 \text{ kg/m}^3 \quad (5.13)$$

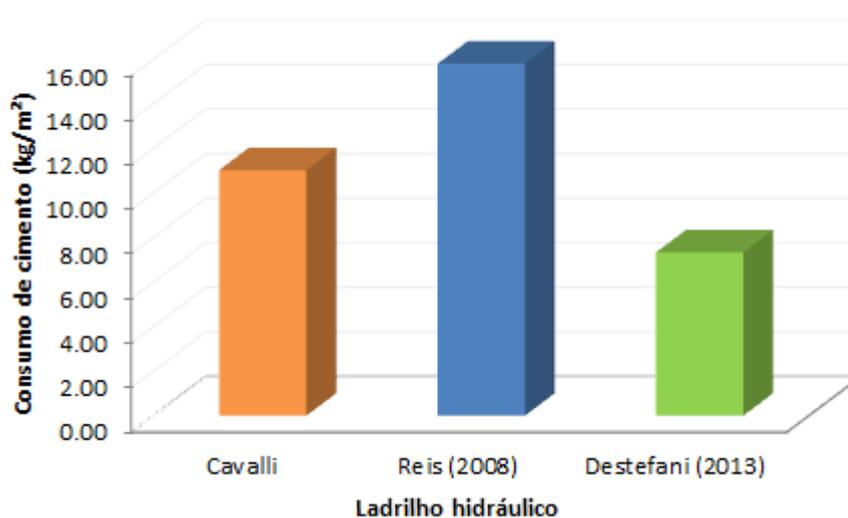
$$C_c = \frac{1}{\frac{1}{2980} + \frac{1,6}{2630} + \frac{0,4}{2770} + \frac{0,2}{1000}} \rightarrow C_c = 775 \text{ kg/m}^3 \quad (5.14)$$

**Tabela 5.28 – Consumos de cimento Portland para as dosagens estudadas.**

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cavalli e Valduga (2006)	Reis (2008)	Destefani (2013)
Camada 1	682	903	366
Camada 2	675	705	
Camada 3	423	775	

Considerando a dimensão do piso 20 cm x 20 cm e as alturas das camadas dos ladrilhos produzidos por prensagem de 5 mm, 10 mm e 5 mm respectivamente, e de 20 mm do produzido em uma única camada pelo processo de vibração, foi realizado o quantitativo unitário do consumo de cimento Portland por metro quadrado de piso.

A Figura 5.33 ilustra um comparativo do consumo médio de cimento Portland dos ladrilhos hidráulicos comparados.



**Figura 5.33 – Consumos de cimento Portland para as dosagens estudadas por Cavalli e Valduga (2006), Reis (2008) e Destefani (2013).**

Observa-se na Figura 5.33 que o consumo de cimento Portland para o ladrilho hidráulico piso tátil produzido nesta pesquisa com adição do resíduo do

beneficiamento de rochas ornamentais é significativamente inferior aos ladrilhos comparados. Comparando os ladrilhos produzidos com adição do resíduo, o ladrilho produzido nesta pesquisa, em uma única camada e pelo processo de vibração, tem uma redução de 54 % no consumo de cimento Portland de sua dosagem.

# Capítulo 6

## Conclusões

### 6.1 – Conclusões

Este trabalho de tese de doutorado teve como finalidade estudar a possibilidade de desenvolver um novo ladrilho hidráulico tátil com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Os resultados experimentais e discussão deles permitiram as seguintes conclusões:

- O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais apresenta características física, química e mineralógicas adequadas para aplicação como filler na produção de ladrilhos hidráulicos. Apresenta uma distribuição de partículas com mais de 90 % das partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ , o que pode causar um melhor empacotamento e aumento da densidade seca na composição dos agregados.
- O uso das técnicas de planejamento experimental em rede simplex e metodologia de superfícies de resposta, visando reduzir o número de experimentos e ensaios para o estudo de misturas de agregados para a produção de concretos, mostrou-se adequado e satisfatório. Conforme foi verificado por meio da validação do teste de hipótese, análise de variância e dos modelos de regressão, novas misturas obtidas fora da composição da mistura indicada e estudada, apresentaram resultados experimentais dentro de um nível aceitável, confirmando a confiabilidade do uso da técnica.
- O estudo mostrou que, a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em 20 % da massa seca total da composição dos agregados (miúdo e graúdo), promove um ganho de densidade seca máxima das misturas.
- O método de dosagem adotado neste trabalho para os concretos, método de Okamura, mostrou-se compatível com a dosagem da composição

da mistura dos agregados determinada pelo planejamento experimental em rede simplex.

- Os concretos produzidos com a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais apresentaram resultados satisfatórios, tanto no seu aspecto de microestrutura, como para as exigências de propriedades física e mecânica para sua aplicação na produção de ladrilhos hidráulicos de acordo com as normas técnicas brasileiras.

- A técnica da produção de ladrilhos hidráulicos pelo processo de vibração, apresentou resultados positivos no que diz respeito à produtividade destes materiais, já que todo processo de conformação das peças é realizado em uma única camada. A microestrutura das peças mostrou que a mistura dos materiais componentes do concreto e a conformação das peças por vibração não apresentaram problemas, gerando uma microestrutura das peças uniforme e a presença dos materiais de forma dispersa.

- O novo ladrilho hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentis produzido nesta pesquisa, apresentou resultados de absorção de água, módulo de resitência à flexão e aspectos dimensionais em conformidade com as exigências das normas técnicas brasileiras. Já os ladrilhos hidráulicos tátil comparados nesta pesquisa, não atenderam às especificações técnicas em sua totalidade.

## **6.2 – Sugestões para trabalhos futuros**

Visando o entendimento de fatores que não foram tratados como foco nesta pesquisa, são sugeridas as seguintes linhas de pesquisa para o aprimoramento do tema:

- Estudar os efeitos da frequência e tempo no processo de vibração da conformação do ladrilho hidráulico tátil;
- Avaliação da propriedade física de desgaste do ladrilho hidráulico tátil, através da realização de ensaios de desgaste por abrasão, de acordo com as especificações da ABNT NBR 9457/2013.

- Estudo dos custos do processamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e sua influência no custo final dos materiais para a produção do ladrilho hidráulico tátil com a incorporação deste resíduo; e
- Estudo da utilização de corantes na produção do ladrilho hidráulico tátil com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.

## Referência bibliográfica

Acchar, W.; Dantas, A. P. A. Uso do residuo de granito para melhoria das propriedades de produtos argilosos. In: 8° Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecanica, codigo 1653, 2007, Cusco-Peru. Anais eletronicos...Peru: PUCP, 2007. Disponível em: <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/01/01-25.pdf>.

Alexandre, J. (2000). Análise da matéria-prima e composição de massa utilizada em cerâmica vermelha. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 174p.

Almeida, S. L. M. de; Pontes, I. F. Aproveitamento de rejeitos de pedreiras e finos de serrarias de rochas ornamentais brasileiras. In: I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2001, Bahia. Anais eletrônicos...Bahia: CETEM/MCT, p. 89-110, 2001. Disponível em: [http://www.cetem.gov.br/publicacao/SEMINARIO\\_ROCHAS.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/SEMINARIO_ROCHAS.pdf).

Almeida, N.; Branco, F.; Santos, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: application to concrete mixtures. *Building and Environment*, v. 42, n.2, p. 810-819, 2007.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2008). Situação atual e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais. Informe 002/2008. São Paulo. 2008. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br>.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2010). Manual de ladrilho hidráulico: Passeio Público. São Paulo, SP. ABCP.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002). Boletim técnico 106: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. São Paulo, SP. ABCP.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio – NBR 6467 (2006). Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Rochas e Solos – NBR 6502 (1995). Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Determinação da Massa Específica dos Grãos – NBR 6508. (1980). Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT - Análise Granulométrica - NBR 7181, Solo, 1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1983. Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1996. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão - NBR 7215. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Agregados para concreto – Determinação do teor de material pulverulento - NBR 7219. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1982. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio - NBR 7251. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2013. Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez - NBR 7681. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2006. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio - NBR 7809. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2004. Acessibilidade e edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos – NBR 9050. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1986. Ladrilho hidráulico – NBR 9457. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1986. Assentamento de ladrilho hidráulico – NBR 9458. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1986. Ladrilho hidráulico – Formato e dimensões – NBR 9459. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1987. Amostragem de Resíduo – NBR 10007. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1990. Aglomerantes de origem mineral – NBR 11172. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1991. Cimento Portland – NBR 11578. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1991. Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200) – NBR 11579. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1991. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – NBR 11582. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992. Solo-cimento – Ensaio de compactação – NBR 12023. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2010. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos – NBR 12142. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1997. Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios – NBR 13818. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2001. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica – NM 23. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2003 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal – NM 43. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2006. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios – NM 45. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2003 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrômetros, por lavagem – NM 46. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2003 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente – NM 52. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2003. Cimento Portland – Determinação do tempo de pega – NM 65. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1998. Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) – NM 76. Rio de Janeiro.
- Bahiense, A. V. Incorporação de Resíduo de Rocha Ornamental em Argamassa Utilizando Planejamento de Experimentos em Rede Simplex. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 159p.
- Barros Neto, B., Spacino, I., S., Bruns, R. E. Planejamento e Otimização de Experimentos. Campinas-SP: Editora da UNICAMP, 1995.
- Brasil. Ministério da Educação: Secretaria de Educação Profissional e Tecnologia. Rochas Ornamentais. Brasília, DF, 2007. p. Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf3/publica\\_setec\\_rochas.pdf](http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf3/publica_setec_rochas.pdf)>.
- Buest, G. T. Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Curitiba – PR, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 117p.
- Calmon, J. L.; Tristão, F. A.; Lordêllo, F. S. S.; Silva, S. A.; Mattos, Flávio V. Aproveitamento do resíduo do corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1997a. Anais...Salvador: ANTAC, p.64-75, 1997a.
- Calmon, J. L.; Silva, S. A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo-cimento. In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1998. Florianópolis: ANTAC, 1998.
- Cartilha: Cidade Cidadã. CREA-ES – Conselho Regional de Engenharia, arquitetura e agronomia do Espírito Santo. 2007. Disponível em: <<http://www.creaes.org.br/cartilhas.aspx>>.

Carletto, C. Brasil: Kassab sanciona lei das calçadas. LERPARAVER, 2008, edição 25/01/2008. Disponível em: <<http://www.lerparaver.com/node/7639>>.

Carvalho Filho, M. R.; Ribeiro, R. C. C.; Carrisso, R. C. C. Utilização do rejeito do corte de granito em pavimentação asfáltica. In: IV Jornada de Iniciação Científica do CETEM, 2006, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2006.

Catoia, T. (2007). Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – São Carlos, Universidade Federal de São Paulo - UFSCAR, 111 pg.

Cavalcanti, D. J. H. (2006). Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Alagoas, Universidade Federal de Alagoas - UFA, 141 pg.

Cavalli, A. F., Valduga, L. Ladrilhos hidráulicos: Reconstituição e Caracterização. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2006, Florianópolis. Anais...Florianópolis: ANTAC, p.4042-4050, 2006.

Cordeiro, G. C (2006). Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 445p.

Cornell, J. A. Experiments With Mixtures: Designs, Models, and The Analysis of Mixtures Data 2<sup>a</sup> ed., 1990.

Correia, J. C. G.; Ribeiro, R. C.; Seidl, P. R. Aproveitamento de resíduos sólidos minerais na produção de asfalto. 2005. In: 60º Congresso Anual

da Associação Brasileira de Metalurgia (ABM), 2005, Belo Horizonte. Anais...Belo Horizonte: ABM, 2005.

Dal Molin, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural concreto fresco. In: ISAIA, Geraldo Cechella. COCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 345-379, 1600p, 2005.

Destefani, A. Z. Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe . Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 118p.

Espírito Santo. Secretaria de Desenvolvimento. Rochas Ornamentais. Vitória, 2011. Disponível em: <[http://www.sedes.es.gov./index.php?option=com\\_content&view=article&idItemid=40](http://www.sedes.es.gov./index.php?option=com_content&view=article&idItemid=40)>.

Espírito Santo (Estado). Instrução Normativa IEMA-ES nº19 de 17 de agosto de 2005. Diretrizes técnicas para o gerenciamento dos efluentes líquidos e dos resíduos sólidos provenientes das indústrias de beneficiamento.

\_\_\_\_\_ Lei Estadual nº 4636/1192. Recirculação de água nas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais.

\_\_\_\_\_ CONREMA IV nº 007/2000. Soluções para o controle ambiental dos resíduos gerados pelas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais.

Figueiredo, J. M.; Rodrigues, F.; Correia, A.; Chambino, M. T. (2001). Sector da Pedra Natural. Guia Técnico – INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisboa, 2001. Disponível em: <<http://www.netresíduos.com/cont/file/sectorpedranatural.pdf>>.

- Frasca, M. H. B. O. Rocha como material de construção. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, v1, p. 437-480, 2007.
- Freire, A. S.; Motta, J. F. M. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. *Revista Rochas de Qualidade*. São Paulo. Ano XXV. Edição 123, p.98-108, julh/ago, 1995.
- Gartner, E. M., 2004. "Industrially interesting approaches to 'low-CO2' cements", *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, pp. 1489-1498.
- Gobbo, L. de A.; Mello, I. S. De C.; Queiroz, F. C. de; Frasca, M. H. B. de O. Aproveitamento de Resíduos Industriais. In: MELLO, Ivan Sérgio de Cavalcanti. *A cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais e para Revestimentos no Estado de São Paulo*. IPT, São Paulo, Publicação 2995, p. 129-152, 2004.
- Gonçalves, J. P. (2000). *Utilização do resíduo do corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 120p.
- Guerreiro, H. J. P. (2000). *Exploração Subterrânea de Mármore – Aspectos Geotécnicos*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico Portugal – Lisboa, julho de 2000.
- Helene, P. R. L.; Terzian, P. (1992). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Pini, 349p.
- INET (2001). *Guia Técnico – Sector de Pedra Natural*. Instituto Nacional de Pedra Natural – INET. Lisboa – Portugal (2001).
- Isaia, G. C. (2010). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e*

Engenharia de Materiais. São Paulo: 2ª edição, v. 1, 862p.

Lameiras, R. M. Estudo do potencial de utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito (RBCG) como material de construção: aplicação em concreto (2004). Monografia (Engenharia Civil) – Alagoas – AL, Universidade Federal de Alagoas – UFA, 97p.

Lawrence, P., 1998, “The production of low-energy cements”. In: Hewlett, P. C. (ed), Lea’s chemistry of cement and concrete, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 421-469.

Lisboa, E. M.; Gomes, P. C. C.; Lima, F. B. de; Barboza, A. da S. R.; Lameiras, R. de M. Obtenção de pastas e argamassas altamente fluidas com resíduo da serragem dos blocos de granito para utilização em concreto auto-adensável. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais...São Paulo: ANTAC, 2004.

Machado, L. G. Exposições – Se esta rua fosse minha. São Paulo, 2005. Disponível <<http://www.mcb.sp.gov.br/mcbItem.asp?sMenu=P002&sTipo=5&sltem=224&sOrdem=1>>.

Marques, J. S. (2012) Estudo do processo de produção de ladrilhos hidráulicos visando à incorporação de resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Londrina – PR, Universidade Estadual de Londrina – UEPR, 119p.

Mello, I. S. de C.; Cuchierato, G.; Motta, J. F. M.; Consoni, A. J.; Reis, F. A. G. V.; Muniz, J. M. C. Aproveitamento dos resíduos sólidos das serrarias de rochas ornamentais e para revestimento. Estudo de caso: Emigran Pisos e Revestimentos em granitos. IPT. São Paulo. 2006.

Menezes, R. R.; Ferreira, H. S.; Neves, G.A.; Ferreira, H. C. Cerâmica 48, 306 (2002) 92-101.

- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 573p., 1994.
- Miranda, R. A. C.; Bacarji, E.; Ferreira, R. de C. Estudo da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. In: IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS, 2007, Mato Grosso do Sul. Anais...Mato Grosso do Sul: ANTAC, 2007.
- MME (Ministério de Minas e Energia). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Relatório Técnico 33 – Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento. 2009.
- Montgomery, D. C. (1997). Design and analysis of experiments, 4 th edition. New York, Wiley, 1997.
- Moreira, J. M. S.; Freire, M. N.; Holanda, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do Espírito Santo em cerâmica vermelha. Revista Cerâmica. v. 49, p.262-267, São Paulo, 2003.
- Mota, Jackeline. Em busca de acesso a todos. Como um instrumento jurídico vem garantindo acessibilidade a deficientes físicos nos municípios do Rio. Rio de Janeiro: CREA-RJ, n.71, p.43, 2008.
- Moura, W. A.; Gonçalves, J. P., Leite, R. da S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana – Sitientibus, Feira de Santana, n.26, p.49-61, jan./jun. 2002.

- Neves, G. de A.; Patricio, S. M. da R.; Ferreira, H. C.; Silva, M. C. Utilização de resíduos da serragem de granitos para confecção de tijolos cerâmicos. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1999. Florianópolis. Anais...Florianópolis: ABC – Associação Brasileira de Cerâmica, p.601-612, 1999.
- Neville, A. M., 1997, Propriedades do concreto, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828 p.
- Nunes, S. C. B. (2001). Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto – PT, Universidade do Porto.
- OFICEMEN Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. On-line. Disponível em: <<http://www.oficemen.com/eventos/vermemorias.php>>.
- Oliveira, I. R. de; Studart, A. R.; Pileggi, R. G., Pandolfelli, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas. São Paulo: Fazendo arte, 195p., 2000.
- Okamura, H. Self-Compacting High-Performance Concrete. International Concrete, v. 19, n. 7, 1997, p. 50-54.
- Petruci, E. G. R. (1998). Concreto de Cimento Portland – 13. ed – São Paulo: Globo.
- Prefeitura Municipal de Seropédica – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável – Projeto calçada acessível: guia para projetos de espaços públicos. Seropédica – RJ, 2012, 45p.
- Pontes, I.; Stellin Júnior, A. Utilização de finos de serrarias do Espírito Santo nas Indústrias de construção civil. In: Jornadas IBERMAC “Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción”. Programa CYTED, 2001, Madri/Espanha. 2001.

- Reis, A. S. Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Vitória – ES, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 221p, 2008.
- Ribeiro, C. da C.; Correia, J. C. G.; Peter, R. S. Utilização de rejeitos minerais em misturas asfálticas. In: XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2005, Rio Grande do Norte. Anais...Rio Grande do Norte: UFRN; CEFET/RN. Vol. 2, p.318-325, 2005.
- Rocha, C. A. A (2008). Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 107p.
- Schumacher, H. R. S. P. (2007). Caracterização do concreto convencional com pó de pedra em substituição parcial a areia natural. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Joinville – SC, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 89p.
- Silva, S. A. C (1998). Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Vitória – ES, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 159p.
- SNIC Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. On-line. Disponível em: <<http://www.sindicatodocimento.org.br>>.
- Souza, J. N. de (2001). Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como fíler no concreto asfáltico usinado a quente. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 108p.

- Souza, J. N. de, Rodrigues, J. K. G.; Souza, P. N. de. Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente. Revista Ambiente Brasil. 2004. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/>>.
- Struble, L., Godfrey, J., 2004, "How sustainable is concrete?", In: International Workshop on Sustainable Development and Technology, part II, Beijing, China, pp. 201-211.
- Vieira, F. A. (2004). Processamento e caracterização de materiais cerâmicos obtidos através da incorporação de resíduos de mármore e granito provenientes das indústrias do RN. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 132p.
- Villaschi, A. F., Sabadini, M. S. Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (mármore e granito) no Estado do Espírito Santo. Estudos Empíricos – Nota Técnica 15. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ, 2000.
- Xavier, G. C.; Júnior, F. S.; ALEXANDRE, J. Otimização por planejamento factorial  $3^2$  dos ensaios físicos-mecânicos das misturas de resíduo de granito na massa cerâmica vermelha moldados por prensagem. In: 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003. João Pessoa/PB. 2003. Anais...João Pessoa/PB: ABCP – Associação Brasileira de Cerâmica, p.180-187, 2003.