



Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Marcos Henrique Almeida Mota

**CONCRETO SECO COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE MADEIRA DE
ALGAROBA (PROSOPIS JULIFLORA) MOLDADO SOB PRESSÃO**

Caruaru

2014

Marcos Henrique Almeida Mota

**CONCRETO SECO COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE MADEIRA DE
ALGAROBA (PROSOPIS JULIFLORA) MOLDADO SOB PRESSÃO**

Dissertação de Mestrado para
obtenção do título de Mestre, apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Pernambuco-
Centro Acadêmico do Agreste

Área de concentração: Estruturas e
Materiais

Orientadora: Prof. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Co-orientador: Prof. Dr Humberto Correia Lima Júnior

Caruaru

2014

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Simone Xavier CRB4 - 1242

M917c Mota, Marcos Henrique Almeida .
 Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (prosopis juliflora)
 moldado sob pressão. / Marcos Henrique Almeida Mota. - Caruaru: O Autor, 2014.
 122f.; il. ; 30 cm.

 Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega
 Co-orientador: Humberto Correia Lima Júnior
 Dissertação – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste,
 Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental - PPGECAAM.
 Inclui referências bibliográficas

 1. Concreto. 2. Pré-moldados. 3. Algaroba - resíduos. I. Nóbrega, Ana Cecília
 Vieira da (Orientadora). II. Lima Júnior, Humberto Correia (Co-orientador). III. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2014-018)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**CONCRETO SECO COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE ALGAROA
(PROSOPIS JULIFLORA) MOLDADO SOB PRESSÃO**

defendida por

MARCOS HENRIQUE ALMEIDA MOTA

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 02 de julho de 2014

ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA – PPGECAM/UFPE
(orientadora)

HUMBERTO CORREIA LIMA JÚNIOR – PPGECAM/UFPE
(coorientador)

ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA – PPGEC/UFAL
(examinadora externa)

ÉRIKA PINTO MARINHO – PPGECAM/UFPE
(examinadora interna)

Aos meus pais Marco Antônio de O. Motta e Alcione Almeida Mota, minhas irmãs Anna Paulla e Sophia Karlla; meu cunhado Paulo Gallo; minha querida esposa Isabelly, meus filhos Marco, Márcio e Marianna e aos meus orientadores Ana Cecília e Humberto Lima, que sempre me ajudaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua presença em minha vida; pela oportunidade de fazer este Mestrado e sem Ele, nada posso, nada tenho e nada sou.

À minha orientadora Ana Cecília Vieira da Nóbrega, por sua presença e tempo dedicado, pelo auxílio e paciência na elaboração deste trabalho. Seu incentivo e sua ajuda muito me influenciaram nesta trajetória.

Ao meu co-orientador Humberto Correia Lima Júnior, pela disponibilidade e presteza no atendimento das minhas necessidades.

Aos meus pais Marco Antônio de Oliveira Motta e Alcione Almeida Mota pela influência nos meus estudos e pelo ensinamento de respeito e honestidade.

À minha esposa Isabelly Bezerra Mota, pelo apoio, paciência, companheirismo e confiança, fundamentais para que meus objetivos fossem alcançados.

Aos meus filhos Marco Henrique Costa Motta, Márcio Philipe Costa Motta e Marianna Victória Bezerra Motta pela alegria me dada na nossa convivência; pelo estímulo para eu continuar na minha jornada.

À Irleide Maria da Silva Santos, pelos sucos e cafés durante as longas horas de estudo, renovando a disposição e espantando o sono.

Minha gratidão aos professores da Pós-graduação, pela transmissão de conhecimentos, contribuindo assim para minha formação profissional.

Aos que compõem a Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPE- Campus do Agreste.

À FACEPE pela oportunidade de ser bolsista.

Aos funcionários e prestadores de serviço da Universidade Federal de Pernambuco – Campus do Agreste, que sempre atenderam com dedicação às minhas solicitações.

E, finalmente, a todos que contribuíram durante o mestrado e na elaboração deste trabalho.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

RESUMO

Dentre os produtos pré-moldados, há artefatos moldados utilizando concreto seco, sob compactação manual, no caso de processos fabris mais simples, ou sob vibro-compressão, no caso de empresas mais estruturadas. Nesse cenário, propõe-se a avaliação de concretos secos moldados utilizando a energia de compactação de uma prensa hidráulica simples, de forma que os benefícios proporcionados pela vibro compressão pudessem ser compensados pela otimização de variáveis relacionados ao traço, condições de moldagem e cura. Além disso, também se propôs uma utilização racional das cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) incorporadas ao concreto seco. Inicialmente, foi avaliado o melhor empacotamento empregando os métodos, experimental e matemático de Andreassen, optando-se pelo traço com 51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra. Na sequência, foram moldados corpos de prova 5x10 cm, traço 1:4:0,3, onde foi avaliada a força ótima de compactação, onde se determinou 2.000 kgf como suficiente em termos de custo-benefício. Para o traço 1:4, quando comparadas às relações água/cimento (a/c) 0,2, 0,3 e 0,4, a 0,4 foi a mais eficiente, bem como a cura úmida por imersão, quando comparada a cura por aspersão e ao ar. A resistência à compressão (R_c) e absorção de água foram averiguadas para o traço 1:4:0,4 com cura úmida e incorporação de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de cinzas em relação à massa de cimento. Os traços 1:4, 1:8 e 1:12, com 20% de cinzas, foram moldados obtendo R_c da ordem de 18 MPa, 6 MPa e 3,5 MPa, respectivamente, com incremento na absorção de água. Após submetidos a cinco ciclos de molhagem e secagem, não houve perda de massa em nenhum dos traços, com redução nas R_c de 60%, 43% e 32% para os traços 1:4, 1:8, 1:12, respectivamente. Não se observaram alterações significativas na absorção de água após ciclagem higrotérmica. Conclui-se que é possível moldar concretos secos otimizados apenas sob pressão com forças de compactação de 2.000 kgf nos traços com relações c/a 1:4, 1:8 e 1:12. Adições de 20% de cinzas de Algaroba foram mais efetivas. Para esses traços, adotando relação a/c 0,4 e cura úmida, R_c da ordem de 3,5 MPa a 18 MPa foram obtidas, podendo ser utilizados de acordo com as distintas aplicações em pré-moldados.

Palavras-chave: cinza de Algaroba; concreto seco; cura; empacotamento; energia de compactação; pré-moldados;

ABSTRACT

In the precast artefacts world, dry concrete artefacts are molded using manual compression in the case of more simple manufacturing processes or under vibro-compression in the case of more structured precast concrete enterprises. In this scenario, it is proposed to study dry concrete molded using the compaction of a simple hydraulic press, once that the benefits provided by vibro compression could be compensated by optimizing the parameters related with the mix proportion, packaging, molding conditions and curing. Moreover, it was also proposed a rational use of the Algaroba (*Prosopis juliflora*) ashes as an addition in the dry concrete. Initially, it was determined the best packaging after carried out experimental methods and the Andreassen mathematical one, opting for the mix 51% of cascalhinho and 49% of powder-stone. Subsequently, specimens were molded in 5x10 cm moulds, mix 1:4:0,3, where was analyzed the optimum compaction force, which was 2,000 kgf. It was considered sufficient in terms of money economy. The mix 1:4 was compared to the water/cement ratios 0.2, 0.3 and 0.4. The most efficient one was 1:4, as well as the wet curing process, as compared to the water sprayed curing and in the air one. The compression resistance (R_c) and water absorption were verified for the mix 1:4:0,4, wet curing and incorporations of 5%, 10%, 20%, 30% and 40% of Algaroba ashes by mass of cement. R_c for the mixes 1:4, 1:8 and 1:12 with 20% of ash were in the order of 18 MPa, 6 MPa and 3.5 MPa, respectively. Increases in water absorption were also observed. There was no weight loss in any of the mixes after five wetting and drying cycles. It were observed decreases in the R_c values for the mixes 1:4, 1:8, 1:12, respectively, 60%, 43% and 32%. No significant changes were observed in water absorption after hygrothermal cycles. It concludes that it is possible to cast optimized dry concretes only applying 2,000 kgf force compression to the mixes 1:4, 1:8 and 1:12. Addition of 20% of Algaroba ashes was more effective. For these mixes, adopting w/c ratio 0.4 and wet curing, 3.5 MPa to 18 MPa were obtained for the compressive strenght, which can be used according to the different applications in precast concrete.

Keywords: *Algaroba ash; dry concrete; curing; packaging; compaction; precast.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de absorção de água do agregado.....	25
Figura 2 – Arranjo ideal de distribuição de grãos para maior compacidade.....	25
Figura 3 – Comparação visual de arredondamento e esfericidade do grão de areia.	26
Figura 4 – Correlação entre quantidade e tamanho das partículas na eficiência de empacotamento.....	29
Figura 5 - Períodos de cura recomendados pela CEB.	36
Figura 6 - Modos de cura para proteger o concreto com baixa relação a/c.....	37
Figura 7 - Correlação entre resistência à compressão e as curas por imersão, úmida e ao ar.	38
Figura 8 – Sequência de produção dos blocos de concreto nos equipamentos de vibro compressão.	44
Figura 9 – Família 29.....	48
Figura 10 – Família 39.....	48
Figura 11 – Ensaio de resistência à tração indireta do bloco de alvenaria.....	50
Figura 12 - Tubos circulares de concreto com DN= d_i = diâmetro nominal ou diâmetro interno.	53
Figura 13 – Resíduo da queima da madeira de <i>Prosopis juliflora</i> (Algaroba).....	56
Figura 14 – Prensa hidráulica utilizada para os ensaios de energia e compactação e moldagem dos corpos-de-prova sob pressão.	65
Figura 15 – Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos.	66
Figura 16 – Descarte da cinza no meio ambiente local.....	67
Figura 17 – Tratamento do cinza de Algaroba, através de peneiramento.....	68
Figura 18 – Corpos-de-prova moldados para os ensaios	73
Figura 19 – Prensa hidráulica servo-controlada da marca Shimadzu.	76
Figura 20 – Estufa onde foram mantidas os corpos-de-prova durante os ensaios de absorção.....	77
Figura 21 – Distribuição Granulométrica das matérias primas.....	82
Figura 22 – Difração de Raios-X da cinza de Algaroba.....	85
Figura 23 – Análise termogravimétrica da cinza de Algaroba.	85
Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura da cinza de Algaroba.....	86

Figura 25 – Curvas granulométricas para os agregados cascalhinho, areia média, areia fina e pó de pedra.....	87
Figura 26 – Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e areia média.....	88
Figura 27 – Curvas de empacotamento experimental para mistura 1 (cascalhinho e areia média) e pó-de-pedra.	88
Figura 28 – Curvas de empacotamento experimental para mistura 2 (mistura 1 e pó-de-pedra) com areia fina.	89
Figura 29 - Curvas de empacotamento otimizadas por Andreasen comparadas com o empacotamento ótimo para $n=0,37$	90
Figura 30 - Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e areia fina.	90
Figura 31 - Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e pó-de-pedra.	91
Figura 32 - Gráfico de consistência.	91
Figura 33 - Gráfico de resistência à compressão (b).....	92
Figura 34 – Gráfico relacionando a tensão de compactação em MPa (eixo x) com o deslocamento da massa de concreto (eixo y1) e a variação do deslocamento (eixo y2).	94
Figura 35 – Gráfico relacionando relação a/c (eixo x) com o a resistência á compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média....	96
Figura 36 – Gráfico relacionando os tipos de cura com a resistência á compressão (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.	97
Figura 37 – Gráfico relacionando as distintas porcentagens de cinzas incorporadas ao sistema com a resistência á compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média.	99
Figura 38 – Gráfico relacionando os diferentes tipos de relação cimento/agregados estudados com o a resistência á compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média.	100
Figura 39 – Gráfico relacionando os traços estudados com o a resistência á compressão após ensaios de absorção de água (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.	102
Figura 40 – Variação de volume nos traços após cada um dos ciclos higrotérmicos.	104

Figura 41 – Variação de umidade nos distintos traços após os ciclos higrotérmicos.	105
Figura 42 – Quantidade de água retida nos traços após os ciclos higrotérmicos....	105
Figura 43 – Resistência á compressão após ensaios de molhagem e secagem (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.	106
Figura 44 – Absorção de água obtida no ensaio de absorção por imersão após moldagem e ciclagem.....	107
Figura 45 – Resistência á compressão após ensaios de ciclagem seguidos de absorção de água (eixo y), intervalos de confiança de 95% para a média.....	108
Figura 46 – Resistências à compressão após moldagem, absorção de água, ciclagem e ciclagem com absorção de água, comparativamente, com intervalos de confiança de 95% para a média.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da água presente na pasta de cimento.	24
Tabela 2 – Períodos mínimos de cura.....	35
Tabela 3 – Tempos de cura do concreto baseados na norma europeia ENV 206:1992.	36
Tabela 4 - A indústria de artefatos de cimento, faturamento nos diferentes segmentos indústrias, número de indústrias e de empregos - Brasil, 2002 a 2005. .	43
Tabela 5 – Características dos blocos de concreto segundo a resistência à compressão e absorção.	47
Tabela 6 – Designação dos blocos e suas dimensões.....	48
Tabela 7 – Segmentos/produtos da indústria de artefatos de cimento e sua finalidade, forma de venda e situação de mercado.	49
Tabela 8 - Características químicas do cimento.....	69
Tabela 9 - Características físicas do cimento.....	69
Tabela 10 – Parâmetros de caracterização das matérias-primas.	82
Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos da cinza de Algaroba.	83
Tabela 12 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de Algaroba.....	84
Tabela 13 - Parâmetros físico obtidos no ensaio de absorção por imersão.....	101
Tabela 14 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 1º ciclo.	103
Tabela 15 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 2º ciclo.	103
Tabela 16 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 3º ciclo.	103
Tabela 17 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 4º ciclo.	104
Tabela 18 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 5º ciclo.	104
Tabela 19 - Parâmetros físicos médios obtidos no ensaio de absorção por imersão após o ensaio de ciclagem.	107
Tabela 20 – Absorção de água obtida no ensaio de absorção por imersão após moldagem e após o ensaio de ciclagem.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society for Testing Materials*

BET: Brunauer-Emmet-Teller

CP II Z 32: Cimento Portland composto com Pozolana com resistência de 32 MPa aos 28 dias

CP V ARI: Cimento Portland tipo V Alta Resistência Inicial

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

DRX: Difractometria ao raio-x

IPT/EPUSP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR: Norma Brasileira

NM: Norma Mercosul

Norma EM: Norma Europeia

MPEs: Micro e Pequenas Empresas

pH: Potencial iônico de Hidrogênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Concreto seco	20
2.1.1	Relação água/cimento (a/c).....	22
2.1.2	Empacotamento	25
2.1.3	Cura	33
2.1.4	Energia de compactação.....	38
2.1.5	Durabilidade	39
2.2	Concreto para elementos pré-moldados	39
2.2.1	Blocos de concreto	41
2.2.2	Peça de concreto para pavimentos intertravados	50
2.2.3	Tubos de concreto.....	52
2.3	Resíduos de cinzas de madeira.....	55
2.3.1	Cinzas de Algaroba	56
2.4	Resíduo de britagem ou pó de pedra.....	63
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	65
3.1	Primeira etapa - Beneficiamento e caracterização do resíduo e dos agregados.....	66
3.1.1	Matérias-primas utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova	66
3.1.2	Coleta e processamento das cinzas de Algaroba	67
3.1.3	Caracterização dos materiais de partida	68
3.1.4	Cimento	68
3.1.5	Agregados miúdos	69
3.1.6	Cinzas de Algaroba	70
3.2	Segunda etapa – Determinação do traço e avaliação do ganho de resistência	71

3.2.1 Ensaio de empacotamento	71
3.2.2 Técnica empregada na moldagem dos corpos-de-prova	73
3.2.3 Ensaio para encontrar a energia de compactação necessária para a realização dos ensaios	73
3.2.4 Ensaio com variação de relação água/cimento	74
3.2.5 Ensaio com variação do tipo de cura.....	74
3.3 Avaliação de como a incorporação de cinzas de Algaroba (<i>Prosopis Juliflora</i>) em adição (10%,20%,30% e 40% em relação à massa de cimento) interferiu nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova	75
3.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco.....	75
3.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido.....	75
3.4 Avaliação da alteração da relação cimento:agregados no traço até então otimizado	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 Caracterização física do cimento, dos agregados miúdos e da cinza de Algaroba	82
4.2 Caracterização química e microestrutural da cinza de Algaroba	83
4.3 Determinação do traço e avaliação do ganho de resistência.....	86
4.3.1 Empacotamento (métodos experimental e matemático)	86
4.3.2 Energia de compactação.....	94
4.3.3 Relação água/cimento.....	95
4.3.4 Cura	96
4.3.5 Avaliação de como a incorporação de cinzas de Algaroba em adição (10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento) interferiu nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova.....	97
4.3.6 Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem.....	102
4.3.1 Avaliação global da resistência à compressão.....	109
5 CONCLUSÕES	110
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113

REFERÊNCIAS	114
-------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

São comuns em todas as regiões do nosso país, os fabricos artesanais, que sem recursos se lançam no mercado como meio de sobrevivência. Estas empresas juntas ocupam uma fatia do mercado, utilizando processos fabris mais simples. Um desses nichos são os pequenos pré-moldados.

Os processos fabris mais simples empregados pelas pequenas empresas de pré-moldados envolvem a produção dos artefatos com a utilização de concreto seco compactado manualmente, uma vez que é alto o custo para a aquisição das máquinas de vibro-prensagem para esse nicho produtivo de pré-moldados.

Além disso, muitas dessas empresas não dominam o processo produtivo, resultando em produtos de baixa qualidade e muitas vezes, com elevação de custos devido aos desperdícios de materiais, que é um fato muito comum nestes estabelecimentos. As patologias inerentes a estes produtos, muitas vezes sem um padrão de qualidade, se refletem de maneira negativa para o setor como um todo, causando descrédito na utilização dos produtos deste segmento, fato que preocupa a todos que trabalham no setor.

Nesse cenário, o presente trabalho propõe avaliar a moldagem de concreto seco utilizando apenas a energia de compactação de uma prensa hidráulica simples, em substituição à pressão de compactação aplicada manualmente naquelas microempresas e, em detrimento do uso das máquinas de vibrocompressão.

Os benefícios proporcionados em função da vibração na compactação seriam compensados pela otimização de variáveis relacionados ao traço, condições de moldagem e cura. Para tanto, os agregados foram obtidos em uma empresa emblemática de pré-moldados da região que trabalha com vibro-compressão, de forma a aproximar os concretos secos moldados apenas sob pressão dos moldados sob vibro-compressão.

Assim, maximizar as propriedades físicas e mecânicas do concreto seco moldado apenas sob pressão, selecionar matérias-primas adequadas, minimizar perdas de material, custo e tempo de produção são pontos necessários gerarão possibilidade de artefatos de qualidade final superior para as microempresas de pré-moldados.

Além disso, esses pontos nos levam a repensar sobre matérias primas alternativas que possam ser estudadas, e assim serem utilizadas na produção destes produtos. Daí a ideia de se estudar o resíduo da queima de Algaroba (*Prosopis juliflora*).

De forma que, uma vez maximizadas as variáveis para a produção do concreto seco, propõe-se, em seguida, a avaliação do comportamento das propriedades desses elementos com a adição de distintos teores de cinzas de Algaroba à massa desse concreto seco.

As cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*) são um passivo ambiental típico do Pólo de Confeções Pernambucano. Devido ao custo e adaptação de infra-estrutura para emprego de energia elétrica e do gás natural, o aquecimento da água utilizada pelas lavanderias é realizado pela queima de madeira extraída nas regiões circunvizinhas as indústrias. Em contra partida, os aspectos legais proíbem o corte de madeiras nativas, sendo liberada a queima das demais espécies.

Dentre as espécies liberadas para comercialização está a Algaroba (*Prosopis juliflora*) que possui um alto desempenho calorífico. Com a queima da madeira é gerado uma grande quantidade de resíduos minerais, as cinzas sendo estas ainda pouco utilizadas. Pequena parte desta cinza tem sido utilizada informalmente para correção de pH de solo, sendo a maior parte do resíduo descartada sem nenhum critério.

Preocupados com os impactos negativos causados pelo acúmulo destes resíduos, pesquisadores da UFPE iniciaram suas pesquisas buscando um melhor aproveitamento para estes rejeitos (MELO, 2012; LELOUP, 2013). No âmbito ambiental, a incorporação ou estabilização de um resíduo industrial, com alta finura e baixa densidade, em um material de construção, contribuiria ecologicamente com o crescimento sustentável da indústria geradora e economicamente com a redução do custo do compósito confeccionado, assim minimizaria agressões ambientais provenientes de seu descarte inadequado.

Do ponto de vista físico-mecânico dos materiais de base cimentícia, a adição não interfere fortemente nas propriedades do sistema (MELO, 2012; LELOUP, 2013), dado seu caráter básico, sendo constituída principalmente por álcalis com pH cerca de pH de 13,5 (LELOUP, 2013), sendo o meio básico essencial para a formação das fases hidratadas do cimento Portland. Embora a atividade pozolânica não tenha sido observada como característica da cinza de Algaroba (*Prosopis*

juliflora) tal qual é queimada na lavanderia (MELO, 2012; MOURA *et al.*, 2012; LELOUP, 2013); o efeito fíler é reportado (MELO, 2012; LELOUP, 2013). Além disso, por sua coloração acinzentada, igualmente ao cimento Portland, é facilmente absorvida pelo sistema do ponto de vista estético na engenharia.

A utilização das cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*) em materiais de construção contribuirá com o desenvolvimento sustentável do setor e minimizará suas preocupações com descarte e encargos ambientais, reduzindo o impacto produzido pelo armazenamento inadequado desse resíduo sólido, podendo gerar oportunidade de emprego e renda, agregando valor comercial a um subproduto e disponibilizando tecnologia para emprego dos compósitos na construção civil.

Nesse cenário, este estudo tem como objetivo geral produzir um concreto seco com incorporação de cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) moldados sob pressão. Para atingir este objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização física das cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*);
- Otimização do traço: com empacotamento (métodos experimentais e matemáticos); escolha do fator água/cimento (0,20; 0,30 e 0,40); escolha da energia de compactação ótima utilizando a prensa hidráulica e testar as diferentes curas (imersão, úmida por aspersão e ao ar) utilizando as matérias-primas regionais;
- Avaliar como a incorporação de cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*) em adição (5%,10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento) interfere nas propriedades dos estados fresco e endurecido dos corpos-de- prova; e,
- Avaliar a viabilidade da aplicação do método em corpos de prova moldados com traços variando o teor cimento: agregado, (1:4), (1:8) e (1:12);
- Avaliação do comportamento dos corpos-de- prova sob ciclos de molhagem e secagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto seco

Concreto seco é a tecnologia do concreto diferente do chamado concreto convencional ou concreto plástico, onde a quantidade de água adicionada à mistura é a mínima possível para que o cimento seja hidratado e adquira a resistência necessária para o concreto (OLIVEIRA, 2004).

Quanto mais água é adicionada na mistura até o seu “ponto ótimo”, maior a sua resistência, fato oposto ao que ocorre no concreto convencional, que seguem a “Lei de Abrams” onde a resistência do concreto é proporcional a relação água/cimento. Isto ocorre porque maiores quantidades de água melhoram consideravelmente a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos e facilitando a compactação da mesma (OLIVEIRA, 2004).

No concreto seco a água tem a função prioritária de participar das reações de hidratação do cimento (JUVAS, 1993). Enquanto no concreto convencional a pasta ocupa os espaços deixados pelos agregados, no concreto seco existe uma presença significativa de ar (TANGO, 1994).

Esta tecnologia é utilizada para fabricação de produtos pré-moldados como: guias, blocos de concreto para alvenaria e peças voltadas à pavimentação e meio-fio. Além desses, tubos de concreto vibrados, centrifugados e prensados, elementos vazados, entre outros produtos de características rústicas.

No estado fresco, as características mais importantes do concreto seco são a trabalhabilidade e a coesão. A trabalhabilidade é definida como a propriedade que determina o esforço mínimo exigido para manipular uma quantidade de concreto, com perda mínima de homogeneidade e depende do teor de umidade, do formato, da textura dos agregados e do empacotamento das partículas (DOWNSON, 1980).

A trabalhabilidade do concreto seco é restrita exigindo maior esforço no transporte, lançamento e adensamento. Apresenta, logo após a mistura, consistência semi-seca, assemelhando-se à terra úmida ou a uma farofa. Portanto, a peça só é moldada mediante a aplicação de uma energia de compactação, podendo ser associada ou não à vibração.

A coesão entre as partículas deve ser suficiente para que, após a moldagem, o concreto permaneça íntegro desde a prensagem à desforma até o momento da

colocação nos paletes. Essa coesão é obtida pelo emprego adequado de cada material, e depende do teor de finos, do formato e porosidade dos agregados (FERNANDEZ, 2008).

A coesão da mistura pode ser melhorada através do aumento do teor de finos da mistura, onde o responsável pela maior contribuição é o próprio cimento. Esta propriedade também depende do formato das partículas, onde aquelas que são arredondadas e com bordas suaves resultam em melhor coesão. Os finos têm a característica de formar a pasta que preenche os vazios entre os grãos maiores (FERNANDEZ, 2008).

Dependendo da quantidade de pedrisco utilizada na sua preparação, o concreto pode segregar, promovendo a separação entre os agregados, tornando o concreto heterogêneo. Problema este observado na produção de alguns tubos de concreto vibrados. Portanto, a sua produção requer mais homogeneidade na mistura dos agregados do concreto no estado fresco.

Em geral, este concreto por motivos de economia na utilização das formas, necessita ser manipulado imediatamente após a moldagem, ou seja, desmoldado e transportado rapidamente.

No estado endurecido as principais características a serem observadas no concreto seco são a resistência mecânica e a durabilidade.

O crescimento da resistência do concreto depende do tipo e do consumo de cimento e ainda do processo de cura utilizado, que devem ser adequados ao processo. A resistência mecânica também é diretamente relacionada à capacidade de compactação do equipamento e ao teor de umidade da mistura, e também da distribuição granulométrica dos agregados. Já a durabilidade está relacionada com a capacidade do concreto em resistir à ação da água e a ataques químicos. Esta característica depende da resistência à penetração de água no material, que está relacionada aos poros do concreto, que por sua vez dependem do teor de umidade e da compactação da mistura (DOWNSON, 1980).

Medeiros (1993) define que os principais insumos empregados na fabricação dos blocos de concreto são:

- Fração grossa: pedra britada de graduação zero (pedrisco) e pedregulho natural, geralmente, com os grãos maiores do pedrisco menores do que 9,5 mm;

- Fração fina: areia natural e areia artificial; com a areia média de diâmetro máximo característico de 4,8 mm;
- Material aglomerante: cimento Portland;
- Aditivos: redutores de água e plastificantes, e
- Água.

2.1.1 Relação água/cimento (a/c)

Concreto é o produto resultante da mistura equilibrada de um aglomerante hidráulico, agregados miúdo e graúdo, água, adições e eventualmente aditivos.

A hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros solúveis em água em compostos hidratados. Nessa reação há a formação de vários produtos de hidratação ao redor dos grãos anidros com funções diferenciadas na resistência final do concreto e está diretamente ligada à quantidade de água introduzida no sistema; este fato torna-se importante no estudo de produtos fabricados com utilização de concreto seco, pois uma baixa quantidade de água pode ocasionar uma grande quantidade de grãos anidros de cimento não reagirem diminuindo de forma potencial a resistência dos produtos.

É importante salientar que durante as reações de hidratação do cimento há a formação de um gel de C-S-H que envolve os grãos anidros do cimento, caso a água seja insuficiente para a hidratação total dos grãos, incapacitando os mesmos de reagirem e após a pega mesmo havendo um processo de cura bem realizado a água da cura não será capaz de hidratar ou fazer estes grãos anidros hidratar.

De maneira inversa, com o excesso de água, dentro dessa massa endurecida se formam os capilares que contêm água evaporável. Gomá (1979) relata que pastas hidratadas com fator água/cimento da ordem de 0,4, são compactas e teoricamente sem poros capilares, logo podemos entender que para conseguir a hidratação completa do cimento é necessário 40% de água em relação à massa do cimento, destes 40%, em torno de 22% a 32% são necessários para a hidratação química completa ficando de 15% a 25% presa ao gel servindo de meio de comunicação e transporte de compostos para a continuidade da hidratação.

Apesar disto Neville (1976) relata experiências de Duff Abrams e T. C. Powers onde com relações água/cimento de até 0,08 conseguiram alcançar altas

resistências (NEVILLE, 1976). Isto pode ser explicado pela ausência total de capilares, adensamento energético e pela própria auto compressão das camadas de gel sobre porções ainda anidras do cimento.

A água do gel, adsorvida aos micros cristais, se evapora com temperaturas acima de 100°C, enquanto aquela acima dos 40%, que é chamada de água capilar ou livre, evapora-se à temperatura ambiente até o equilíbrio das pressões capilares internas com a tensão de vapor saturante do meio externo.

O diâmetro dos poros capilares é de 1µm a 10µm o que facilita em muito a permeabilidade, quando comparadas com o poro de gel, diâmetro em torno de 0,002 µm, eventuais poros de ar tem dimensões variando de 10 µm a 1000 µm.

A reação química entre o cimento e a água se dá com redução de volume, devido às grandes forças interiores de coesão, de tal forma que a água não evaporável, ou seja, aquela combinada quimicamente (22 a 32%), sofre uma contração de cerca de 25% de seu volume original. Esta contração, sempre que for ao ar e desde que impossibilitada de se contrair livremente, incorpora certa quantidade de ar ao concreto endurecido, além daquela já aprisionada. Desta forma, todo concreto endurecido possui um volume de vazios superior ao concreto fresco que lhe deu origem (HELENE, 1979).

Segundo Helene e Andrade (2010) é interessante salientar que o cimento não hidratado, existente nas pastas de cimento com baixas relações água/cimento, não interfere negativamente na resistência (ISAIA, 2003), podendo até ajudar no aumento dessa resistência (CHEAH; RAMLI, 2011). Esse conceito é verificado nos concretos de alta resistência. Hoje já é usual, no mundo e no Brasil, concretos de alta resistência com resistências à compressão de 60 MPa, 70 MPa, chegando, em certas obras, até a 120 MPa e 150 MPa, com técnicas usuais de produção em caminhões betoneiras.

Esses concretos, para atingirem esses níveis de resistência à compressão, utilizam relações água/cimento extremamente baixas, de 0,20 ou menos, que são bem inferiores às relações teóricas mínimas para a hidratação do cimento, apresentando um volume de cimento não hidratado bem superior aos simulados para a pasta com relação água/cimento de 0,30.

A forte correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento foi descoberta experimentalmente por René Féret na França ainda no século XIX e, principalmente, por Abrams (1918), nos Estados Unidos. Ainda hoje, a chamada “Lei

de Abrams” é o principal parâmetro para a definição da resistência e durabilidade dos concretos, conforme Equação 1 (ABRAMS, 1918).

$$f_c = \frac{A}{B^{a/c}} \quad \text{Equação 1}$$

na qual, f_c é resistência à compressão numa certa idade, em MPa; A é constante que depende dos materiais utilizados e da idade; B: constante que depende dos materiais utilizados e da idade; a/c: relação água/cimento ou água/aglomerantes, em massa.

Segundo Metha (1994), o fator mais importante que influencia na resistência à compressão dos concretos é a relação água/cimento, que atua sobre a porosidade, na pasta e no concreto na zona de transição entre a pasta e o agregado, com atração entre as partículas tipo forças de Van Der Waals que são tanto mais intensas quanto menores as distâncias entre as partículas, o que resulta no aumento da resistência mecânica com a diminuição da porosidade.

Há diferentes tipos de água presente na pasta de cimento, onde cada uma delas desempenha um papel distinto. Sua característica e formas de remoção encontram-se compiladas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da água presente na pasta de cimento.

Classificação da água		Característica	Remoção
Quimicamente combinada		Reage com a estrutura dos compostos hidratados de cimento	Por aquecimento
	Interlamelar	Em formato de gel, está associada à estrutura do silicato de cálcio hidratado e ligada por pontes de hidrogênio	Umidade relativa inferior a 11%, provocando a retração do silicato de cálcio hidratado
Capilar	Água livre	Vazios grandes com diâmetro maior que 0,05µm	Facilmente retirada com umidade relativa abaixo de 100%
Capilar	Água retida	Pequenos capilares com diâmetro de 0,005µm a 0,05µm	Sua remoção causa a retração do sistema
Adsorvida		Próxima à superfície do sólido, fica retida pelas forças superficiais das partículas do gel	Umidade relativa do ar abaixo de 30%, provocando a retração por secagem

Fonte: Liborio (2001).

Mehta (1994) menciona que, no estado fresco, outra parcela de água da mistura pode ser succionada pelos agregados porosos, cujo processo de absorção apresenta-se na Figura 1 (MEHTA, 1994).

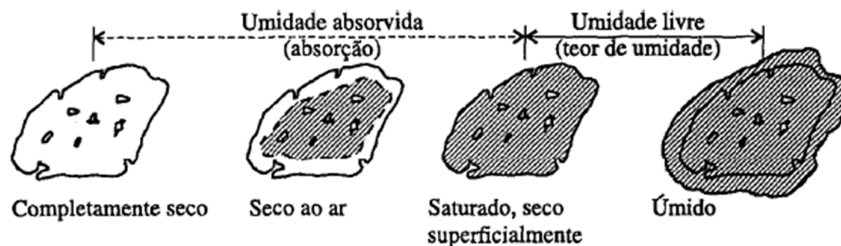


Figura 1 – Processo de absorção de água do agregado.
Fonte: (MEHTA, 1994).

2.1.2 Empacotamento

Entende-se por empacotamento a distribuição cumulativa de tamanhos ideais de partículas buscando a densidade máxima da mistura (YU; STANDISH, 1988). Autores na literatura vigente têm se preocupado com a maximização do empacotamento (YU; STANDISH, 1988; 1993; DE LARRARD; SEDRAN, 1994; BONNEAU *et al.*, 2000; SOBOLEV, 2004; STROEVEN *et al.*, 2009; ŽIVICA; KRIŽMA, 2011).

Sabe-se que os materiais sólidos empregados na produção do concreto são, basicamente, os agregados e o cimento. Assim, sendo o concreto um material compósito, além de buscar as melhores relações a/c para favorecer as reações químicas de hidratação, devemos buscar os arranjos de grãos mais compactos possíveis para que se aproxime da proposta de Apolônio de Perga, apresentada em 200 a.C., mostrada na Figura 2, promovendo assim uma maior compacidade do produto final (DURAN, 2000).

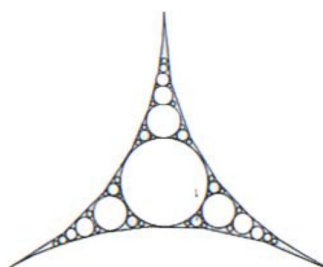


Figura 2 – Arranjo ideal de distribuição de grãos para maior compacidade.
Fonte: Duran (2000).

O formato final do agregado pode ser ou anguloso ou lamelar, resultado do intemperismo de rochas matrizes, com graus de dureza diferenciados e do equipamento de britagem utilizado, que poderá aumentar a superfície específica dos agregados.

Krumbein & Sloss (1963) estudaram a forma dos grãos originários de tijolos e blocos, e compararam a esfericidade e o arredondamento, fatores que possibilitam o melhor empacotamento entre grãos dos agregados resultando em concretos mais coesos (KRUMBEIN; SLOSS, 1963).

De acordo com Kenitiro (1973), a esfericidade é a grandeza que tenta expressar numericamente o grau de aproximação de forma de uma partícula qualquer, com aquela de esfera perfeita (KENITIRO, 1973). Mendes *et al.* (1972) define arredondamento como sendo o grau de agudeza das arestas e cantos da partícula, independentemente de sua forma, isto é, a curvatura média e seus cantos e arestas (MENDES; BIGARELLA; SALAMUNI, 1972).

Na Figura 3, compara-se o grau de arredondamento e de esfericidade: quanto maior o grau de esfericidade, menos alongada é a amostra; quanto maior o arredondamento, mais lisa é a amostra. Assim, quanto mais próximo de um, melhor será o empacotamento da amostra.

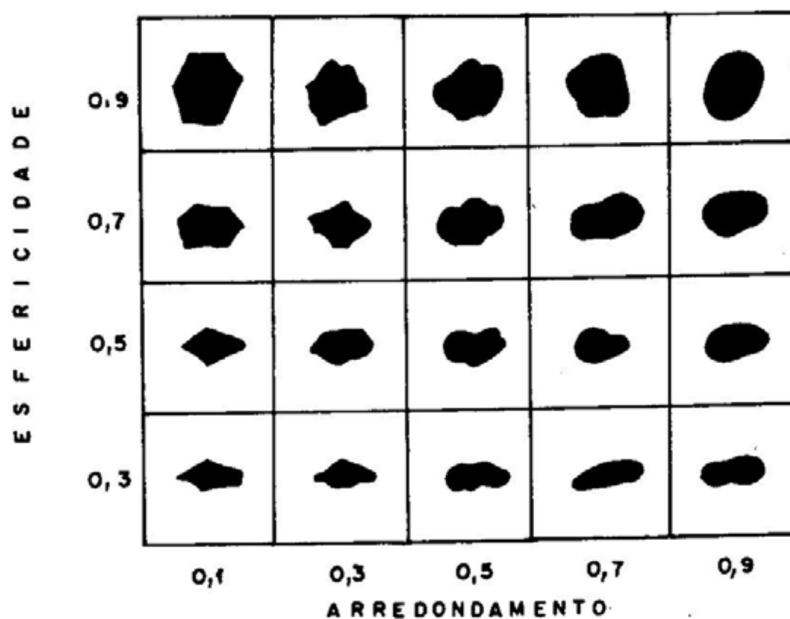


Figura 3 – Comparação visual de arredondamento e esfericidade do grão de areia.
Fonte: Krumbein & Sloss (1963).

Segundo Wadell (1933), a esfericidade pode ser determinada empiricamente pela Equação 2.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{V}{V_{\text{esfera}}}}$$

Equação 2

na qual, $V_{\text{partícula}}$ é o volume do grão do agregado analisado e V_{esfera} é o volume da esfera circunscrita ao grão do agregado.

Quanto mais compactado é o material, mais denso ele se torna. No entanto, além de aumentar a densidade, é necessário obter trabalhabilidade adequada do material estudado para que se permita o manuseio e adensamento, utilizando o melhor fator a/c para promover as reações químicas e obter trabalhabilidade do material. Um fator importante é o aparecimento de poros na mistura, diminuindo assim a densidade.

Teoricamente, para alcançar um empacotamento perfeito, ou seja, 100% de densidade, não precisaríamos de adição de água na mistura. A correlação do perfeito empacotamento com boa trabalhabilidade é um mito, pois a ausência total de porosidade em meio heterogêneo formado por partículas com tamanhos e formas variadas desfaz qualquer possibilidade de ocorrência do empacotamento perfeito, levando-nos desta forma a buscar como tarefa principal a diminuição da quantidade de água e o aumento da densidade no desenvolvimento tecnológico dos blocos a base de cimento (VANDERLEI, 2004).

Assim, para o desenvolvimento de produtos de concreto, material cerâmico, é necessário o estudo da distribuição granulométrica, visto ser determinante de uma série de propriedades dos mesmos. Entre estas propriedades destacamos a resistência mecânica e a densidade de empacotamento. Vários modelos matemáticos foram desenvolvidos ao longo dos anos com intuito de descrever o empacotamento de partículas, assim como existem métodos laboratoriais capazes de chegar ao empacotamento máximo das partículas de uma mistura.

Em geral, as matérias-primas reais são formadas por distribuições granulométricas de partículas não esféricas, daí a necessidade de encontrar a curva granulométrica para cada amostra para então combiná-las a fim de obter uma distribuição equilibrada objetivando a minimização dos vazios.

Após obter as curvas granulométricas e seus módulos de finura (MF) correspondentes, procede-se o ensaio, utilizando de início as misturas com maiores MF e então adicionando as demais misturas objetivando os maiores pesos para um mesmo volume conhecido, como consequência do maior adensamento, maior empacotamento.

Desta forma, para comprovar a metodologia apresentada, supostamente capaz de ser utilizável no desenvolvimento dos concretos em questão, foram elaboradas uma sequência de experimentos a resultar em uma mistura adensada laboratorialmente contendo as amostras necessárias para a mistura e empacotadas o máximo possível.

Os estudos de empacotamento de partícula podem ser definidos como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (MCGEARY, 1961). Na Figura 4, mostra-se a correlação entre quantidade e tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grossas; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partícula.

A metodologia empregada no estudo do empacotamento de partículas pode ser calcada em dois caminhos principais: (a) resultados experimentais por enchimento aleatório pelo método direto e, (b) modelos matemáticos método indireto.

Os modelos indiretos são muitas vezes criticados por serem baseados em aleatoriedade de variáveis do empacotamento que são muitas vezes difíceis de serem considerados em um modelo matemático único (YU; STANDISH, 1988) como: (a) forma das partículas, (b) quantidade de elementos misturados, (c) distribuição de tamanho de partículas, entre outros, conforme Lewis e Goldman, citados em (YU; STANDISH, 1993).

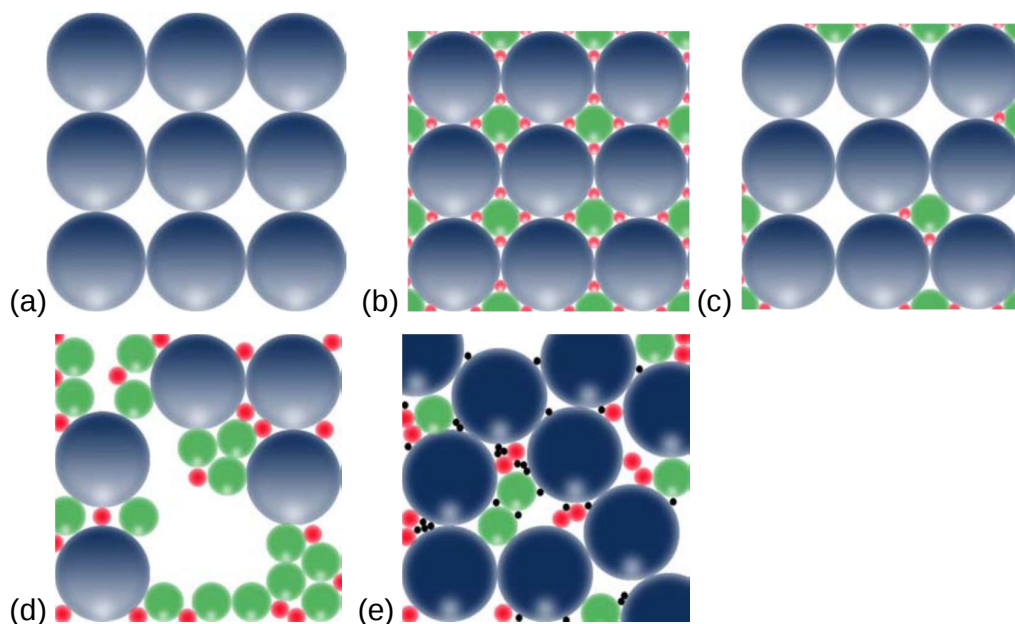


Figura 4 – Correlação entre quantidade e tamanho das partículas na eficiência de empacotamento
Fonte: (ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993).

2.1.2.1 Modelos de empacotamento de partículas

Foram desenvolvidos ao longo da história alguns modelos matemáticos para realizar o empacotamento das partículas. Entre os mais conhecidos estão os modelos de FURNAS (1931) e ANDREASSEN & ANDERSEN (1930) como clássicos, sendo o de FURNAS (1931) mais defendido pelos pesquisadores, apesar de ser mais difícil e incômodo para ser utilizado. ANDREASSEN & ANDERSEN (1930) propuseram um modelo que é simples de se aplicar, no entanto, sua natureza é semi-empírica. Esse modelo apresenta a vantagem de não requerer nenhum fator de forma das partículas, mas é necessário que elas apresentem formas similares. Alguns pesquisadores não são favoráveis ao modelo de ANDREASSEN & ANDERSEN, pois admitem partículas infinitamente pequenas, o que é irreal. A fim de superar esse problema, DINGER & FUNK (1992) combinaram a distribuição de ANDREASSEN & ANDERSEN e FURNAS, criando a distribuição de Andreassen Modificado ou modelo de ALFRED na qual o tamanho da menor partícula foi incorporado.

2.1.2.2 Modelo de Furnas

No modelo proposto por Furnas o tamanho de partículas é abordado discretamente, definindo a distribuição granulométrica entre malhas sucessivas de peneiras. É proposto que as proporções existentes de vários tamanhos de partículas na elaboração de uma distribuição de máximo empacotamento se dá pela progressão geométrica, e assim confirma sua teoria para uma distribuição contínua de partículas (BITTENCOURT, 2008). A partir dessas considerações desenvolveu a Equação 3.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

na qual, CPFT é a porcentagem acumulada de finos menor que “DP”, em volume; D_p é o diâmetro da partícula; D_s é o diâmetro da menor partícula; D_L é o diâmetro da maior partícula; r é a razão entre o volume das partículas em uma malha, pelo da malha imediatamente inferior.

2.1.2.3 Modelo de Andreasen

Andreasen (1930) monta seu modelo em cima de uma distribuição real de partículas caracterizada como contínua em que todos os tamanhos estão envolvidos. No modelo definiu a distribuição de tamanhos de partícula em termos de uma lei de potências, conforme a Equação 4. Essa definição partiu segundo ele de uma consideração de similaridade que avaliou existir em torno de duas partículas específicas com tamanhos muito diferentes, e que, quando ampliadas devidamente representaria o todo. Essa condição de similaridade foi muito questionada na época e originalmente foi considerada somente empírica. Mais tarde essa teoria passou a ser embasada por uma teoria matemática consistente, a teoria dos fractais (BITTENCOURT, 2008). Este modelo é bastante utilizado para materiais cerâmicos, pois pode ser utilizado para partículas de diversas formas .

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

na qual, CPFT é a porcentagem acumulada de finos menor que “DP”, em volume; Dp é o diâmetro da partícula; DL é o diâmetro da maior partícula; q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Segundo Bittencourt (2008), Andreasen (1930) mostrou com estudos experimentais que o expoente de sua equação devia estar entre 0,33 e 0,5. Mais tarde, Dinger e Funk (1992) mostraram através de simulações computacionais, que o expoente com valor de 0,37 é o que proporciona a máxima densidade de empacotamento.

2.1.2.4 Modelo de Alfred

Segundo Bittencourt (2008), através de um estudo extenso comparativo entre os modelos propostos por Furnas e Andreasen, Funk e Dinger (1992) provaram que esses modelos podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar uma mesma coisa e que ambas as equações propostas convergem matematicamente para a Equação 5.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

na qual, CPFT é a porcentagem acumulada de finos menor que “DP”, em volume; Dp é o diâmetro da partícula; DL é o diâmetro da maior partícula; Ds é o diâmetro da menor partícula; q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Diferentes valores de “q” induzem a distintos 4 comportamentos reológicos. Em concretos, para uma mesma extensão granulométrica, se o valor “q” for 0,37 ou menor, então 100% de empacotamento é possível para uma distribuição infinita. À medida que “q” desvia-se de 0,37, aproximando-se de 0,2, a fluidez tende a aumentar, entretanto para valores de “q” menores que 0,25 a mistura torna-se auto-adensável. Valores superiores a 0,37 favorecem o comportamento dilatante, o que corresponde a existência de porosidade no sistema. Coeficientes muito pequenos (q

= 0,2) causam um excessivo aumento na área superficial das partículas, reduzindo novamente a fluidez.

Para materiais cimentícios estudos de empacotamento estão, geralmente, relacionados ao desenvolvimento de concretos e argamassas de grandes resistências (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; BONNEAU *et al.*, 2000; SOBOLEV, 2004; MESQUITA, L. P., WILLRICJ, F. L., LIMA JÚNIOR, H. C., 2005). No entanto, alerta-se que não foram identificados trabalhos preocupados em estudar o empacotamento para sistemas pré-moldados sob pressão. Como são sistemas que são compactados com baixas relações água/cimento e constituídos de materiais de caráter que variam em torno do esférico como: (a) areias, (b) resíduos de britadeiras e, (c) cascalhinho, o estudo do empacotamento será primordial na obtenção de parâmetros maximizados de resistência à compressão e, conseqüentemente, redução de porosidade, absorção e permeabilidade, favorecendo o incremento de durabilidade.

Apesar da natureza semi-empírica, tendo, inclusive maior precisão apenas quando as partículas têm formas similares, uma vez que não requer nenhum fator de forma, a simplicidade da aplicação associada ao fato de estar consolidado na literatura, fez como que o modelo de Andreasen e Andersen (ANDREASEN, 1930) fosse escolhido como método indireto no presente estudo. A eficiência dos métodos de Andreasen e Andersen (ANDREASEN, 1930) comparado Dinger and Funk (DINGER, 1992) para maximizar o empacotamento para obtenção de micro concretos de alta resistência foram avaliados em Mesquita *et al.* (2005), de forma que os melhores resultados foram obtidos quando da utilização de Andreasen e Andersen (ANDREASEN, 1930), tanto em termos de maiores resistências à compressão como maiores massas específicas.

Além disso, a fim de validar o método de Andreasen e Andersen (ANDREASEN, 1930) para sistemas de concreto seco moldados sob pressão, também foram realizadas medidas experimentais que levaram em conta a inserção de materiais conforme módulos de finura decrescentes em volumes conhecidos com e sem processos de adensamento, bem como dados de resistência à compressão, comparativos para o método experimental e o método teórico. Metodologia semelhante foi adotada por Mesquita *et al.* (2005) para micro concretos de alta resistência.

2.1.3 Cura

O concreto deve ser curado e protegido contra agentes prejudiciais enquanto não atingir o endurecimento satisfatório (NBR 14931, 2004) para evitar a perda de água pela superfície exposta, assegurar uma superfície com resistência adequada e assegurar uma capa superficial durável.

O concreto é um material de construção versátil, durável e resistente. Assim a realização de uma boa cura, é essencial para produzir estruturas de concreto duráveis e resistentes. Quanto mais bem realizada for a cura do concreto, melhor será o seu desempenho mecânico e a sua capacidade de resistir aos agentes agressivos do meio ambiente.

Cura em excesso é sempre melhor que nenhuma cura, porém quando bem planejada no início não existe problema para a sua realização, já que é envolvido um material quase sem custo: a água (AİTCIN, 2000). Segundo Bauer *et al.* (1999), a cura é um processo em que a evaporação da água é evitado por meio de teor de umidade satisfatório, mantendo uma temperatura favorável permitindo desenvolver as reações de hidratação no concreto

No clima tropical as temperaturas médias mensais são sempre superiores a 18°C e estão associadas à umidade do ar tem influencia direta na cura do concreto. Terzian (2007) relata a importância das condições climáticas na execução de estruturas de concreto mostrando a importância dos procedimentos de cura e definindo diretrizes para a dosagem racional do concreto

Ainda, segundo Terzian (2007), as condições climáticas têm influência no grau de evaporação provável da água existente no interior do concreto, o que está diretamente relacionado à ocorrência de fissuras por retração plástica.

As condições climáticas devem ser monitoradas a partir de medidas de variação da temperatura em obra, temperatura do concreto no estado fresco, velocidade e direção predominante do vento e umidade do ar. Estas medições irão influenciar na decisão do tecnologista responsável pela dosagem de concreto sobre a necessidade de refrigeração do concreto, na escolha do período de concretagem (diurno, vespertino ou noturno), consumo máximo de aglomerante, utilização de aditivos e procedimento de cura (TERZIAN, 2007).

O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam

ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante até uma condição desejável (NEVILLE, 1997). A ausência ou falta de uma cura adequada tem ação direta na durabilidade da estrutura, a qual é inicialmente controlada pelas propriedades das camadas superficiais que ao secar prematuramente resultam em camadas porosas e com baixa resistência aos agentes agressivos (PINTO; GEYER, 2003).

2.1.3.1 Tipos de cura

2.1.3.1.1 Cura úmida

A cura consiste no conjunto de medidas adotadas para manter a superfície do concreto úmida, por meio da aplicação de água na sua superfície e/ou colocação do concreto em ambientes com umidade relativa extremamente elevada, ou ainda totalmente imersos em água, tendo como finalidade evitar a evaporação precoce da água, mantendo o concreto saturado até que os espaços preenchidos pela água sejam ocupados pelos produtos de hidratação do cimento. Isto pode ser conseguido por espalhamento contínuo, inundação ou cobrindo o concreto com areia, terra, serragem e panos ou palhas molhadas periodicamente. Os suprimentos contínuos de água são mais eficientes do que os intermitentes que podem ocasionar choques térmicos em superfícies expostas a altas temperaturas (COUTO, 2003).

2.1.3.1.2 Cura ao ar livre

É o tipo de cura que o concreto fica exposta ao ambiente e não são tomados cuidados especiais para evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento. Assim os elementos são mantidos nas formas até o endurecimento, e depois são retirados e transportados para o setor de estocagem das fábricas de pré-moldados, de onde saem para as obras.

2.1.3.1.3 Cura em ambiente coberto

Nesse procedimento os concretos ficaram expostos às condições de iluminação e ventilação controladas, isolados de exposições a intempéries.

2.1.3.1.4 Cura em ambiente coberto com aspersão

O concreto fica nas mesmas condições da cura coberta com exposição à iluminação e ventilação controlada e livre de intempéries recebendo aspersão de água; a intensidade da aspersão é modificada de acordo com a temperatura e umidade do ar para que a umidade no concreto seja mantida permitindo a perfeita hidratação do cimento.

2.1.3.2 Duração de cura

Para cimento Portland comum, 7 dias no mínimo, cimento Portland composto ou com adição mineral, a cura deve prolonga-se entre 14 a 21 dias afim de garantir o desenvolvimento das reações pozolânicas. BATTAGIN (2002) recomenda um tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e relação a/c utilizada no concreto, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Períodos mínimos de cura.				
Tipos de cimento	Tipos de Fator Água/Cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III- 32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP IV- 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

O Comitê Euro-Internacional du Béton (CEB 183:1992) sugere alguns períodos de cura, em função da agressividade ambiental durante a vida útil da obra versus clima durante o período de cura versus sensibilidade do concreto, Figura 5.

A NBR 6118 (2014) estipula que ao menos durante os sete primeiros dias após o lançamento do concreto, sendo este período aumentado quando a natureza do cimento exigir. Nesses casos deve existir proteção contra secagem prematura.

Para concretos de baixa relação a/c é essencial à cura contínua nas primeiras idades, pois a hidratação parcial pode tornar os capilares descontínuos e na retomada da cura, a água poderia não conseguir penetrar no interior do concreto interrompendo a hidratação (NEVILLE, 1997), e descreve a

Tabela 3 baseada na norma européia ENV 206:1992, observando que se o concreto for submetido a abrasão os períodos de cura indicados devem ser dobrados .



Figura 5 - Períodos de cura recomendados pela CEB.

Fonte: Boletim nº 183:1992.

Tabela 3 – Tempos de cura do concreto baseados na norma europeia ENV 206:1992.

Endurecimento do concreto	Rápido*			Médio			Lento		
Temperatura do concreto, °C	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Condições durante a cura									
Sem sol, h>80%	2	2	1	3	3	2	3	3	3
Sol ou vento médio, h>50%	4	3	3	6	4	3	8	5	4
Sol ou vento forte, h<50%	4	3	2	8	6	5	10	8	6

H= umidade relativa do ar

*Baixa relação água/cimento e cimento de alta resistência inicial.

Fonte: NEVILLE (1997).

A cura para concretos com baixa relação água/cimento, menor que 0,5, deve ser por molhagem, desde que seja aplicada por completo e continuamente, caso contrário deve-se utilizar a cura por membrana (NEVILLE, 1997). Barbosa et al (1999), concorda com os melhores resultados para a cura por imersão ressaltando que com a membrana a selagem da peça não permite a entrada de água para repor a água perdida na micro estrutura compacta com baixas relações a/c perdida na auto dessecação.

Segundo Aïtcin (2000), quanto mais baixa a relação a/c mais elevada a retração autógena e maior a necessidade de água o que não é permitido pelas membranas de cura (cura química) durante a reação de hidratação. Também afirma a necessidade destes concretos que logo após a concretagem, de imediato, de se

utilizar como proteção uma membrana de cura ou nebulização. Após a cura úmida as membranas ou pinturas podem ser utilizadas.

Na Figura 6, Aïtcin (2000) mostra a melhor maneira de se proceder à cura para concretos com baixa relação água/cimento.

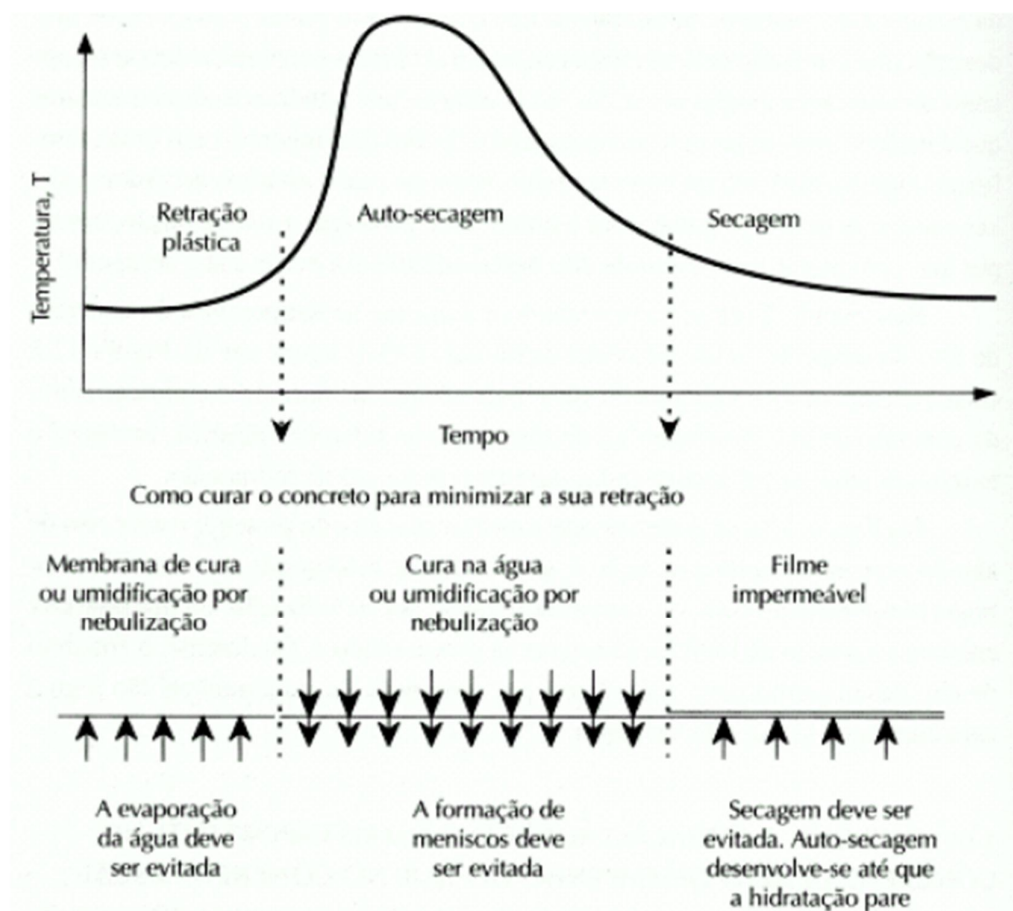


Figura 6 - Modos de cura para proteger o concreto com baixa relação a/c.
Fonte: Aïtcin (2000).

Zain & Radin (2000), testaram a resistência à compressão, concretos com relação a/c 0.25 submetidos a 03 diferentes curas, imersão em água, cura úmida (sacos molhados) e cura ao ar, obtendo como resultados expostos na Figura 7, onde mostra o desempenho muito inferior da cura ao ar em relação às demais, havendo alternância de resultados entre imersão e úmida

Pinto e Geyer (2003) também analisaram diversos tipos de cura, tendo a cura úmida e seca como o melhor e pior resultado respectivamente nos ensaios a resistência à compressão, ressaltando que as condições climáticas locais não foram observadas, fato que merece estudos posteriores.

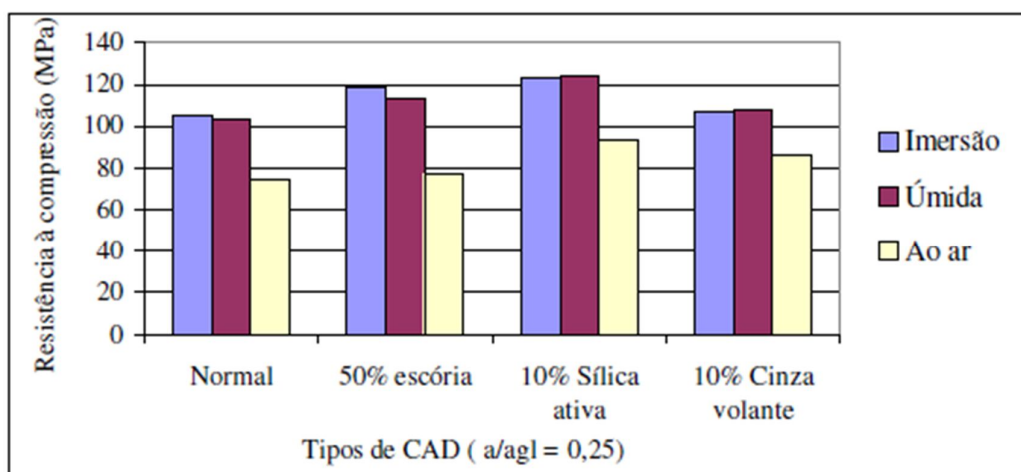


Figura 7 - Correlação entre resistência à compressão e as curas por imersão, úmida e ao ar.
Fonte: Zain & Radin (2000).

2.1.4 Energia de compactação

Se referindo ao ganho potencial de resistência em concretos, autores (OHAMA, 1986; ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993) relatam que grandes resistências foram obtidas em laboratório usando técnicas especiais, tais como autoclavagem, compactação a alta pressão, ou impregnação com polímeros.

Para Freidin (2007) e Zhongzi et al (1993) uma solução muito interessante para o ganho potencial de resistência em concreto, representa a combinação de baixas relações a/c associada à pressão de compactação nas misturas de concreto fresco, resultando numa estrutura com poros sub microscópicos (ZHONGZI XU, 1993; FREIDIN, 2007).

Roy & Gouda (1973) e Roy et al. (1972) relatam os resultados do elevado efeito positivo da força de compactação. Pela pressão de compactação de 350 MPa, foi possível alcançar uma pasta de cimento endurecido com resistência à compressão de 645 MPa, utilizando uma relação a/c de 0,21.

As relações entre a pressão de compactação, a estrutura dos poros e a forma da hidratação do cimento em produtos produzidos com pastas de cimento sob pressão são relatados na literatura (BAJZA, 1972). Informações mais detalhadas sobre os efeitos da mecânica da compactação também é relatado por outros autores (ROESSLER, 1985). Segundo estes autores a determinação do parâmetro

porosidade inicial é muito importante na formação e desenvolvimento de estrutura de poros e nas propriedades de compósitos de cimento.

2.1.5 Durabilidade

Durante muitos anos os projetos de estruturas tinham por objetivo apenas as propriedades mecânicas das estruturas, sem que houvesse preocupação com relação aos aspectos de durabilidade, fato que hoje é primado após tantos problemas estruturais que têm sido reportados, e que estão intimamente relacionados com a resistência mecânica dos concretos.

Para Sjöström e John (2003), o objetivo final do estudo da durabilidade é estimar a vida útil, definida como o período durante o qual o produto vai apresentar desempenho satisfatório, nas diferentes condições de uso (SJÖSTRÖM *APUD* ROCHA, 2003).

O que determina a penetração e deslocamento dos agentes agressivos no concreto é a estrutura da pasta de cimento hidratada, as suas características químicas e físicas, a concentração superficial das substâncias agressivas a as condições ambientais (NEVILLE, 1997). Esta penetração e deslocamento de gases, líquidos e íons no concreto só são possíveis por este ser um material poroso, ou seja, todo o seu volume é preenchido quando o mesmo se encontra no estado endurecido (COUTINHO, 1997). A eliminação dos poros capilares contínuos deve ser considerada uma condição necessária para a obtenção de concretos duráveis (CAMARINI, 1999).

2.2 Concreto para elementos pré-moldados

Segundo a NBR 9062 (2006), elemento pré-fabricado é o elemento pré-moldado produzido em escala industrial, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, obedecendo a manuais e especificações técnicas, por pessoal treinado e qualificado, sob condições rigorosas de controle de qualidade, inclusive em laboratório, identificados individualmente ou por lote. Segundo a mesma norma elemento pré-moldado é o elemento executado fora do local de utilização definitiva na estrutura, produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade, mas sujeito a inspeção do próprio construtor.

De acordo com a NBR 9062 (2006), os termos pré-moldados e pré-fabricados se diferenciam somente com relação ao processo de controle de qualidade, sendo rigorosos para pré-moldado e muito mais rigorosos para pré-fabricado. Nesse trabalho foi considerado um termo único, pré-moldado se referindo tanto para estruturas pré-moldadas como para estruturas pré-fabricadas.

Assim, qualquer elemento fabricado fora do local de utilização definitiva é um pré-moldado, desde os artefatos de cimento simples, sem nenhuma estrutura metálica de aço, como é o caso dos artefatos de cimento de uma maneira geral, como os blocos para pavimentos, vedação ou estrutural, tubos circulares simples, etc., até aqueles fabricados com estruturas de aço com uma tensão prévia aplicada, os protendidos.

A produção destes elementos de maneira individualizada permite projetos peça a peça, de acordo com o projeto da obra como um todo, viabilizando a execução da construção industrializada em concreto, segmento bastante amplo que abrange quase toda a cadeia da construção civil, incluindo a construção de casas, galpões, ginásios de esportes, supermercados, 'shopping center', etc.

As indústrias de elementos pré-moldados tiraram o concreto da obra e o colocaram na fábrica com inúmeras vantagens competitivas, constituindo-se numa tendência da construção civil atual. A produção numa fábrica possibilita processos de produção mais eficientes e racionais, trabalhadores especializados, repetição de tarefas, controle de qualidade, etc. Assim, possibilita melhor desempenho estrutural e durabilidade do que as construções moldadas no local, por causa do uso altamente potencializado e otimizado dos materiais, do emprego de equipamentos informatizados no preparo do concreto, etc.

Aditivos e adições podem ser empregados para conseguir os desempenhos mecânicos específicos, para cada classe de concreto. O lançamento e o adensamento do concreto são executados em locais fechados, com ou sem a utilização de equipamentos. A relação água/cimento pode ser reduzida ao mínimo possível e o adensamento e a cura são executados em condições controladas. O resultado é que o concreto pode ser perfeitamente adaptado aos requerimentos de cada tipo de componente para otimizar o uso dos materiais.

Os principais clientes das indústrias produtoras são empresas que querem construir imóveis comerciais e industriais, como fábricas, centros de distribuição,

hipermercados e toda sorte de estruturas que precisam ser erguidas com rapidez e baixo custo.

2.2.1 Blocos de concreto

O bloco de concreto é um material de construção produzido de forma pré-moldada, tendo usualmente como matérias primas o cimento Portland, pedrisco e areia, utilizado na produção das alvenarias, onde devido à diversidade de formas é permitindo o emprego da técnica de coordenação modular para alvenarias do tipo resistente ou simplesmente de vedação, produzindo rapidez, segurança e durabilidade ao processo construtivo.

No entanto este processo de produção ainda é um tanto quanto artesanal, apesar de existirem maquinários ultramodernos desenvolvidos para dinamizar o processo produtivo, a metodologia utilizada na produção é realizada sem critérios definidos quanto à dosagem dos traços e utilização das matérias primas, principalmente com relação ao controle da umidade que reflete diretamente no fator a/c (água/cimento), o qual está diretamente associado à resistência de compressão já que os blocos são moldados com um baixo fator a/c , numa mistura heterogênea de diversos materiais de construção formando uma farofa úmida que é levada a uma forma para ser prensada, onde adquire forma e consistência. Então é realizada a cura, onde os mesmos adquirem a resistência necessária para ser utilizados de forma racional nos diversos processos construtivos.

Para que os blocos de concreto sejam de qualidade, a sua fabricação deve ser realizada utilizando materiais industrializados, equipamentos de boa precisão, procedimentos de dosagem e cura controlada (FRANCO, 1994).

Assim, os blocos de concreto para produção das alvenarias devem ser produzidos com a mínima infraestrutura que garanta a conformidade com as especificações estabelecidas pelas normas técnicas existentes (NBR 12118:2013). Observa-se que esse fato que não é levado em consideração pela maioria dos fabricantes de blocos de concreto, os quais não possuem informação relacionada à normatização do produto.

Dentre os fatores atribuídos a baixa utilização dos blocos de concreto, destaca-se a falta de conhecimento técnico sobre o assunto, desde a fabricação dos blocos nas centrais de produção até o desenvolvimento das potencialidades

atribuídas à sua utilização (TANGO, 1984; ALVES, 2004). A Tabela 4 mostra alguns resultados gerados na indústria de artefatos de cimento.

Existem relatos sobre as primeiras máquinas destinadas à produção dos blocos de concreto no Brasil, foram importadas dos Estados Unidos na década de 1950 (BARBOSA, C. S., 2004), assim como a utilização de blocos de concreto na construção de núcleos habitacionais próximos às hidrelétricas, utilizando como matéria prima, o resíduo de britagem dos agregados que eram utilizados nas construções das barragens (MEDEIROS, 1993).

A norma NBR 6136 (2014) define basicamente dois tipos de blocos de concreto, de acordo com sua aplicação:

- Bloco vazado de concreto simples para alvenaria sem função estrutural, denominado bloco de vedação. Utilizados para fechamento de vãos, de modo a propor vãos modulados em função das dimensões dos blocos.
- Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural, denominado bloco estrutural. Aplicados em alvenaria estrutural, armada e parcialmente armada, permitindo que as instalações elétricas e hidráulicas sejam embutidas na alvenaria, durante a fase de elevação, não sendo permitido nenhum tipo de recorte na alvenaria durante o processo construtivo, existindo para isto blocos vasados próprios.

Quanto ao uso, a NBR 6136 (2014) classifica os blocos de concreto em:

- Bloco classe A: com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;
- Bloco classe B: com função estrutural para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Bloco classe C: com função estrutural para uso em elemento de alvenaria acima do nível do solo;
- Bloco classe D: sem função estrutural para uso de elemento acima do nível do solo.

Tabela 4 - A indústria de artefatos de cimento, faturamento nos diferentes segmentos indústrias, número de indústrias e de empregos - Brasil, 2002 a 2005.

SEGMENTOS INDUSTRIAIS	FATURAMENTO							
	- em bilhões de Reais -				- em percentagem -			
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005
Fibrocimento (1)	1,035	1,056	1,190	1,190	22,9	24,0	26,3	25,8
Lajes pré-fabricadas (2)	1,195	0,986	1,060	1,060	26,4	22,4	23,4	23,0
Argamassas (3)	0,767	0,805	0,805	0,829	17,0	18,3	17,8	18,0
Construção industrializada (pré-fabricados) (4)	0,699	0,780	0,702	0,730	15,5	17,7	15,5	15,8
Blocos de concreto (5)	0,621	0,621	0,590	0,602	13,7	14,1	13,0	13,0
Postes de concreto (6)	0,068	0,016	0,060	0,078	1,5	0,4	1,3	1,7
Tubos de concreto (7)	0,092	0,089	0,071	0,073	2,0	2,0	1,6	1,6
Elementos arquitetônicos (8)	0,046	0,045	0,055	0,056	1,0	1,0	1,2	1,2
FATURAMENTO TOTAL	4,524	4,398	4,533	4,618	100,0	100,0	100,0	100,0
	- em unidades -							
NÚMERO DE INDÚSTRIAS	12600	12000	12000	8500				
EMPREGOS DIRETOS E INDIRETOS	150000	150000	150000	130000				

Fonte: SINAPROCIM (Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento)

A produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural e de vedação se caracteriza pelo emprego de um concreto com baixa relação água/cimento. Logo, esse concreto apresenta consistência significativamente superior à dos concretos plásticos, devido à menor quantidade de água empregada, para que seja realizada a desforma imediata das peças (MARCHAND, 1996).

Para a confecção dos blocos de concreto podem ser empregadas máquinas vibro-prensas, equipamentos que aplicam, simultaneamente, um esforço de compressão aliado a um efeito de vibração para a eliminação dos vazios e moldagem das peças. No esquema da Figura 8, pode-se entender a sequência de produção dos blocos de concreto, empregando-se uma máquina vibro prensa (OLIVEIRA, A. L.; ANSELMO JR, 2002).

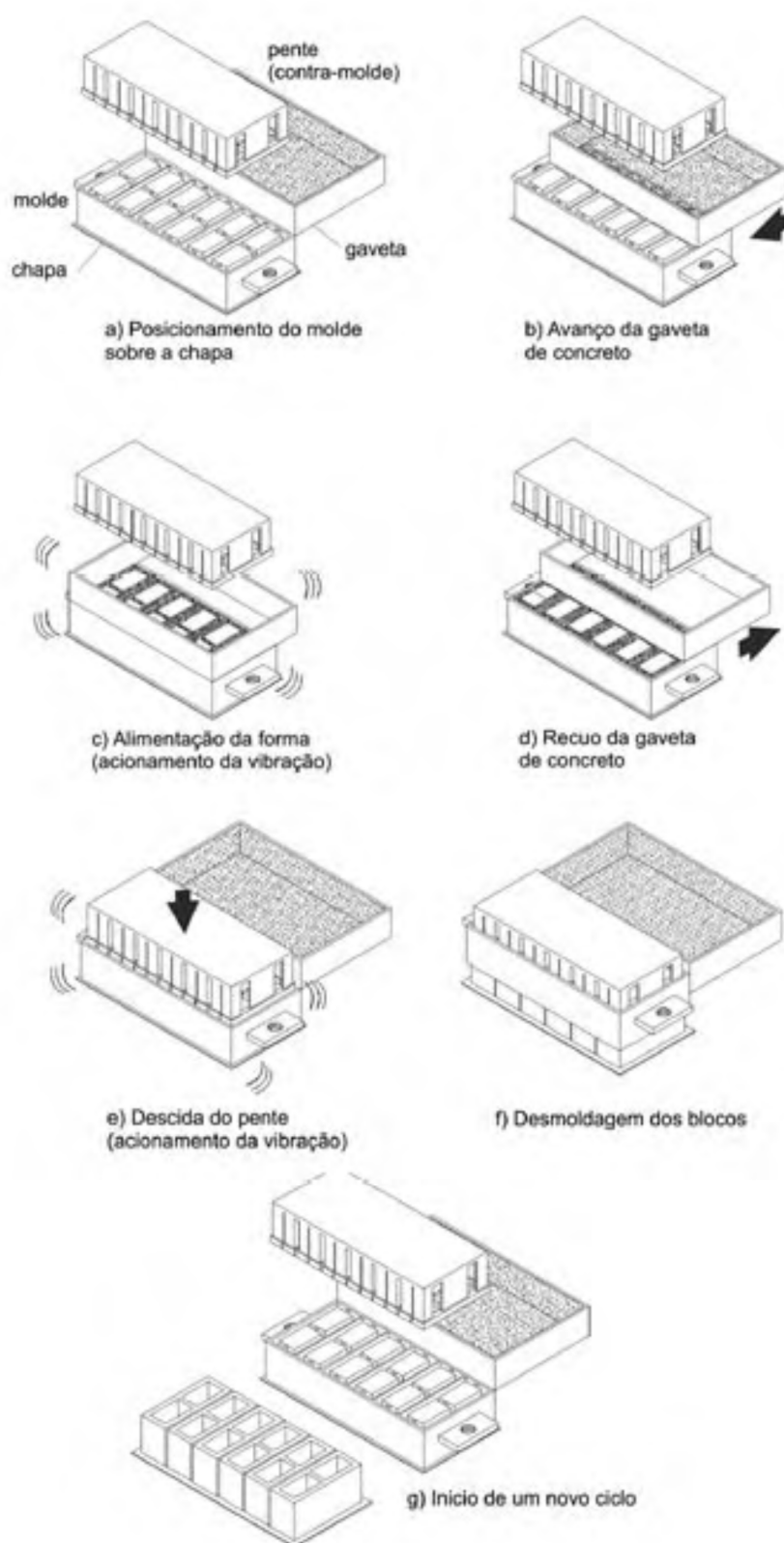


Figura 8 – Sequência de produção dos blocos de concreto nos equipamentos de vibro compressão.
 Fonte: (OLIVEIRA, A. L.; ANSELMO JR, 2002).

Outra particularidade com relação à produção e dosagem das misturas para a produção de blocos diz respeito à maior preocupação com a textura final dos produtos, principalmente, em se tratando de blocos para alvenaria aparente, e, aos traços empregados, que na maioria das vezes são mais pobres do que os utilizados para a confecção dos concretos de consistência plástica. Para se ter uma idéia, os traços normalmente empregados para a produção de blocos, dentro da faixa de resistência à compressão especificada pela NBR 6136 (1994) podem variar de 1:6 a 1:14 (cimento: agregados); dependendo dos materiais utilizados, do tipo e porte do equipamento de vibro-compressão e da regulagem do mesmo.

Diversos autores afirmam que a quantidade de água em uma mistura para a produção de blocos de concreto deve ser a maior possível, desde que os artefatos não apresentem dificuldades para desforma por aderência ao molde, ou problemas de perda de formato em função do excesso de água (TANGO, 1994; FERREIRA JUNIOR, 1995; RODRIGUES, 1995).

Diversos métodos de dosagem para blocos de concreto surgiram com o passar dos anos desta forma cita-se os mais utilizados no mercado nacional.

O método de dosagem da Besser Company, adaptado por Medeiros (MEDEIROS, 1993). Este método foi desenvolvido por Pfeiffenberger (PFEIFFENBERGER, 1985) e adotado pelo fabricante de máquinas vibro-prensas, Besser Company. No entanto, Medeiros (1993), em usinas e com equipamentos nacionais, elaborou um procedimento sistemático mais adequado à situação específica dos fabricantes brasileiros.

Outro método de dosagem é o da ABCP Este método de dosagem foi publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland em forma de boletim técnico, sob o título: Produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural - Prática recomendada (FERREIRA JUNIOR, 1995). Seu enfoque é dado no proporcionamento entre agregados graúdos e miúdos, de tal forma que se obtenha o menor volume possível de vazios.

Para tal, o referido método prescreve que sejam feitas composições entre agregado graúdo e agregado miúdo, em proporções variadas no estado seco, determinando-se as massas unitárias compactadas para cada composição. As determinações das massas unitárias compactadas no estado seco podem ser feitas com base nas especificações da NBR 7810 (1983).

Outro método de dosagem é o do IPT/Epusp Este método foi proposto por Tango (TANGO, 1994), com base no consagrado método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE, P. L.; TERZIAN, 1993; TERZIAN, 2007), adaptado, entretanto, para blocos de concreto produzidos em máquinas vibro-prensas. Uma das particularidades deste método é a fixação de uma umidade ótima para as misturas e controle de massa dos blocos.

Outro método de dosagem é o proposto pela Columbia, fabricante de máquinas vibro-prensas. Este método de dosagem é baseado em estudos realizados por Wilk Grant (WILK; GRANT, 1948) e Menzel (MENZEL, 1934).

Diferente das metodologias apresentadas anteriormente, o método de dosagem proposto preocupa-se muito com as características dos agregados e de que forma estas características influenciam a produção e as propriedades finais dos blocos, tais como resistência à compressão, textura e porosidade.

2.2.1.1 Qualidade dos blocos de concreto pré-moldados

O desconhecimento do processo produtivo e a diversidade de técnicas utilizadas na produção de alguns produtos pré-moldados, aliada a baixa de qualidade dos produtos à base de cimento, encontrados em muitas fábricas de pré-moldados, desencoraja o mercado consumidor em relação ao processo construtivo de alvenaria estrutural. Assim a Associação Brasileira de Cimento Portland lançou em 2001, o programa “Selo de Qualidade ABCP”. O selo objetiva certificar a conformidade dos produtos com as normas brasileiras contribuindo para a melhoria da qualidade dos sistemas construtivos à base de cimento. As vantagens oferecidas pelos produtos certificados pelo selo refletem no sistema construtivo e na qualidade final das edificações.

Segundo Grossi (2001), o programa contribui para a imagem positiva do sistema construtivo e estimulando as fábricas a seguirem às Normas brasileiras. Vale salientar que o programa criado dá suporte as empresa a obterem e padronizarem seus produtos com uma qualidade mínima aceitável, fato que poderá estimular o mercado da construção de alvenaria estrutural ainda desacreditado aumentando assim a venda dos blocos de concreto.

Um bloco de qualidade comprovada, deve apresentar dimensões regulares, boa aparência, grande durabilidade e resistência adequada à sua aplicação. Para

verificação da qualidade do bloco, é necessário observar a aparência (arestas vivas e definidas, sem trincas, cantos quebrados ou imperfeições), se tem aspecto homogêneo, estrutura compacta; boa planicidade nas paredes, se as dimensões são constantes; se não quebra com facilidade, além de verificar os ensaios de laboratório que efetivamente irão comprovar se suas características atendem às especificações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

A resistência à compressão é uma propriedade fundamental para os blocos estruturais, justamente por sua função e também porque a durabilidade, a absorção de água e a impermeabilidade da parede estão intimamente ligadas a esta propriedade. No caso da absorção, para os blocos estruturais, elas devem ser menor ou igual a 10%. Na Tabela 5, compilam-se as informações relativas às características dos blocos de concreto segundo esses critérios: resistência à compressão e absorção.

Uma das características importantes é que o bloco deve ser vazado, ou seja, sem fundo, aproveitando-se os furos para a passagem das instalações e para a aplicação do graute (concreto de alta plasticidade). Não tendo fundo, há também uma grande economia de argamassa de assentamento.

Tabela 5 – Características dos blocos de concreto segundo a resistência à compressão e absorção.

TIPO DE BLOCO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	ABSORÇÃO
Estrutural	F_{ck} superior a 4,5 MPa, dividido em classes de resistência	menor ou igual a 10%
Vedação	Média de 2,5 MPa, mínima individual de 2,0 MPa	média menor ou igual a 10% máxima individual de 15%

Fonte: ABCP – Alvenaria com blocos de concreto – prática recomendada PR-1

Oliveira (2001) cita como vantagens da utilização da alvenaria estrutural a economia devida à racionalização da estrutura possibilitando a subdivisão de espaços e a utilização de outros produtos, além de possibilitar o isolamento térmico, proteção ao fogo e conforto às condições climáticas. Ressalta algumas restrições ao serem solicitadas por cisalhamento, tração e flexão.

Bortoluzzo (2000) relata que os blocos são responsáveis pela resistência à esforços mecânicos, durabilidade a agentes agressivos, estabilidade e precisão dimensional. As variações dimensionais, provocadas pela expansão térmica e pela retração por secagem, levam à perda de aderência, surgindo fissuras na interface bloco-argamassa.

Bayeux (2000) descreve algumas propriedades dos blocos como resistência mecânica, deformabilidade, estanqueidade, isolamento termo-acústico, segurança ao fogo, higiene e estética.

A norma brasileira faz uma designação dos blocos, tomando como base a largura, por exemplo: M-10, M-15 e M-20 (Tabela 6). O aspecto visual da família dos blocos 29, que se enquadra na designação M-15, pode ser visto na Figura 9, assim como a família 39, designada por M-15, visto na Figura 10. Tal diferença exige a introdução de blocos complementares, com o objetivo de restabelecer a modulação nos encontros das paredes: o 14x19x34, para amarração nos cantos, e o 14x19x54, para amarrações em T.

Tabela 6 – Designação dos blocos e suas dimensões.

Designação	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)
M-10	9	19	19 e 39
M-15	14	19	19 e 39
M-20	19	19	19 e 39

Fonte: ABCP.



Figura 9 – Família 29
Fonte: Dias, 2008.

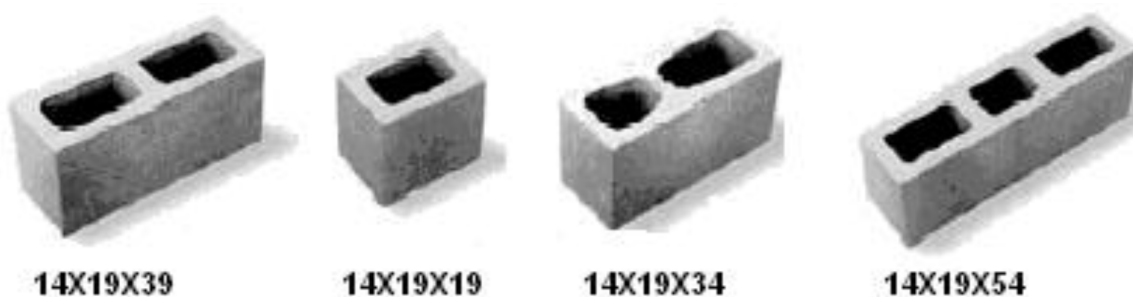


Figura 10 – Família 39
Fonte: Dias, 2008.

Dados envolvendo segmentos/produtos da indústria de artefatos de cimento e sua finalidade, forma de venda e situação de mercado encontram-se compilados na Tabela 7.

Tabela 7 – Segmentos/produtos da indústria de artefatos de cimento e sua finalidade, forma de venda e situação de mercado.

SEGMENTO/PRODUTO	FINALIDADE	FORMA DE VENDA	SITUAÇÃO DO MERCADO
BLOCOS	Alvenaria (concreto, calcário, concreto celular) e pavimentação (concreto)	Venda direta ao consumidor (pessoa física ou jurídica)	Baixa qualidade; não domina o processo de produção; desperdício de material; presença em bairros em fase de expansão
LAJES PRÉ-FABRICADAS	Lajes, Pré-Lajes e Painéis	Venda direta ao consumidor	Semelhante ao segmento de "blocos"
ARGAMASSAS	Revestimentos colantes e rejuntamento para cerâmica (azulejos, etc)	Mercado de revenda (lojas de material de construção)	Mercado em expansão; MPEs buscam apoio.
CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA	Sistemas construtivos (construção pré-fabricada, pré-moldados p/indústria)	Venda direta	Mercado com grande potencial de crescimento; necessidade de tecnologia.
FIBROCIMENTO	Telhas e caixas d'água	Revenda	Investimentos elevados e forte detalhamento técnico
LADRILHOS HIDRÁULICOS	Pisos	Mercado de revenda (lojas de material de construção)	Segmento pequeno; é o mais antigo segmento de artefatos do cimento.
POSTES DE CONCRETO	Distribuição, Redes de transmissão e Entrada do domicílio	Revenda	Não disponível.
TUBOS DE CONCRETO	Esgoto, Águas pluviais	Venda direta	Não disponível.
OUTROS	Vasos. Escadas, caixas de esgoto, etc.	Venda direta e revenda	O segmento envolve cerca de 500 produtos diferentes.

Fonte: Sindicato da Indústria de Produtos de Cimento (SINPROCIM).

NOTA: Quadro elaborado pelo SEBRAE-SP

2.2.1.2 Desempenho mecânico das alvenarias com blocos

As estruturas em alvenaria foram estudadas inicialmente de forma empírica, porém, com o tempo, passaram a ser ensaiadas em escala real, como prismas e paredes de menores dimensões, isto devido à demora de construção destas

paredes, alto custo e dificuldades de ensaio. Os resultados destes ensaios, permitem aos projetistas parâmetros para seus dimensionamentos.

Cheema & Klingner, apud Mohamad (1998), propõem um modelo para determinar a resistência à tração dos blocos (f_{tb}) de alvenaria, representada pela Equação 6.

$$f_{tb} = 0,41\sqrt{f_b} \quad \text{Equação 6}$$

na qual, f_b é resistência à compressão do bloco (MPa).

Mohamad (1998), utilizando a Equação 2 para determinação da resistência, proposta pela ASTM C1006-8411, realizou ensaio de resistência à tração indireta conforme a Figura 11, sendo que o diâmetro da barra de carregamento é de 3,1 mm, com taxa de carregamento de 0,33 MPa/min.

$$T = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot h} \quad \text{Equação 7}$$

na qual, T é resistência à tração na seção transversal (MPa); P é carga aplicada à máquina (N); L é largura da amostra (mm);

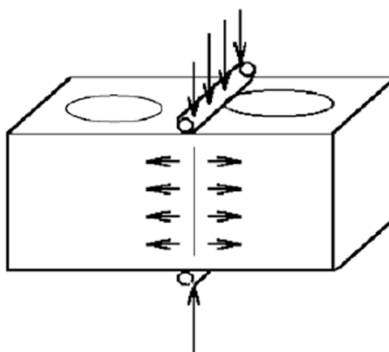


Figura 11 – Ensaio de resistência à tração indireta do bloco de alvenaria.
Fonte: Mohamad (1998).

2.2.2 Peça de concreto para pavimentos intertravados

A NBR 9781 (2013) define peça de concreto como componente pré-moldado de concreto, utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado.

A utilização de pavimentos intertravados de concreto vem crescendo a cada dia, pois seu uso tem se transformado em uma alternativa cada vez mais viável de pavimentação (MEDEIROS, 1993).

Hallack (1998) cita que as peças pré-moldadas de concreto têm se firmado como uma forma bem sucedida de revestir áreas portuárias e terminais de carga. Outros locais que esse tipo de revestimento vem sendo empregado são: postos de gasolina, terminais de ônibus, estacionamentos, áreas industriais, vias urbanas e aeroportos.

A NBR 9781 (2013) estabelece os requisitos e métodos de ensaios exigíveis para a aceitação de peças de concreto do pavimento intertravado, já a NBR 15953 (2011) dita as diretrizes para execução deste tipo de pavimento.

A resistência característica à compressão das peças deve atender as especificações da NBR 9781 (2013), que estabelece o mínimo, de 35 MPa, para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha; e de 50 MPa, para tráfegos de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados. Para absorção de água, a norma em questão preconiza um valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido um valor individual maior que 7% para as peças de concreto.

As peças de concreto são duráveis e rígidas como as placas de concreto e, por essas peças serem pequenas e espessas, não ocorrem trincas por tração na flexão.

Quando intertravadas, as peças formam uma superfície homogênea, resistente e contínua. A rede de juntas na superfície do pavimento é capaz de acomodar grandes deformações, ou seja, possui a flexibilidade associada aos pavimentos asfálticos. Em caso de recalques, as peças podem ser retiradas e recolocadas em período curto de tempo.

Outras vantagens que pode-se citar no emprego do pavimento intertravado são (BT ABCP, 1993):

- liberação imediata ao tráfego após a compactação;
- capacidade de drenagem;
- os blocos podem ser produzidos em diversos formatos e cores, servindo como sinalização horizontal no pavimento;
- efeito estético também devido à diversidade de formas e cores;

- baixo custo devido à fabricação industrializada;
- facilidade de manutenção, reutilização e reciclagem.
- resistência e durabilidade, quando projetado e executado corretamente.

No entanto, apesar do aumento do consumo e do número de fabricantes, segundo Oliveira (2004), poucas são as fábricas que conseguem garantir as resistências características preconizadas pela norma NBR 9781 (2013).

As causas da falta de qualidade na produção das peças de concreto são devidas a diversos fatores, sendo os principais: falta de controle no processo produtivo e falta de conhecimento técnico sobre o assunto. Segundo Rodrigues (1984), poucos são os dados e trabalhos realizados sobre a tecnologia de concreto para fabricação do bloco.

No Brasil, as fábricas de pavimentos intertravados diferem muito em termos de controle de qualidade e sofisticação de seus equipamentos. Isso faz com que, em condições tão diversas, os blocos produzidos apresentem propriedades bastante heterogêneas (MEDEIROS, 1993). Variações na qualidade dos pisos intertravados, mesmo quando produzidos no mesmo equipamento, são decorrentes de variações no processo de proporcionamento das matérias-primas, mistura, cura, estocagem e transporte entre outros (HOLDERCIM, 2000). Portanto, a análise de variáveis do processo como: análise dos agregados, dos aditivos, do tipo de equipamento, grau de compactação, sistema de cura, entre outros é de fundamental importância.

A produção de pavimentos intertravados exige equipamentos e controle no processo produtivo bastante apurados para que seja viável fabricar produtos com qualidade, economia e homogeneidade em suas características como resistência à compressão, textura, variações dimensionais, entre outros.

Diante deste panorama, para que se possa atender à necessidade de produção dos blocos cada vez mais resistentes, com menor consumo de cimento, com maior homogeneidade, é necessário que haja a reavaliação constante das propriedades e características impostas a estas peças.

2.2.3 Tubos de concreto

Segundo a NBR 8890 (2007), tubo é uma peça pré-fabricada de concreto, de seção circular uniforme em toda a sua superfície longitudinal interna, exceto na região da bolsa ou fêmea. Tubo de concreto armado é um tubo de seção circular,

reforçado estruturalmente com barras ou telas de aço soldadas, e tubo de concreto simples é um tubo de seção circular, sem reforço estrutural.

A relação água/cimento, expressa em litros de água por quilograma de cimento, deve ser no máximo de 0,50 para tubos destinados a águas pluviais e no máximo de 0,45 para tubos destinados a esgotos sanitários NBR 8890 (2007).

Os tubos de concreto são utilizados em todo o mundo principalmente em projetos de saneamento básico e drenagem, graças a sua durabilidade e boa resistência mecânica.

Por estarem enterrados, estas obras não são visíveis aos olhos da população que dela se beneficiam, fato que merece maior atenção na fabricação destes produtos, pois a falha de um tubo pode representar problemas muito sérios e com custos de reparação bastante altos.

A fabricação destes tubos de concreto podem ser armados ou não armados, limitando a utilização dos tubos de concreto não armados a pequenas vazões, ou seja, diâmetros nominais (DN) inferiores a 600 mm. Já os tubos de concreto armado estão disponíveis a partir de diâmetros nominais (DN) superiores a 400 mm. Conforme vistos na Figura 12.

O controle de qualidade está baseado na recomendação da NBR 8890 (2007) “Tubo de concreto, de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários-Requisitos e método de ensaio”.

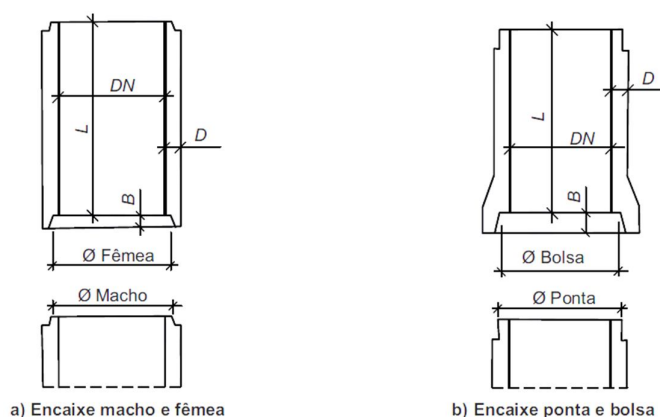


Figura 12 - Tubos circulares de concreto com $DN = d_i$ = diâmetro nominal ou diâmetro interno.
Fonte: NBR 8890 (2007).

Segundo a NBR 8890 (2007), a classe de resistência referida na licitação será denominada para águas pluviais: PA 1, PA2, PA3, PA4, para os tubos com armação;

e PS 1 e PS 2, para os tubos sem armação; ou, no caso de esgoto sanitário: EA1, EA2, EA3, EA4, para os tubos com armação; e ES, para os tubos sem armação. Lembrando que valores maiores são característicos de tubos de concreto com maiores resistências, normalmente utilizados em locais onde as pressões verticais provindas do tráfego de veículo são muito grandes. Outra característica importante desta Norma é que ela determina que todos os tubos de concreto devem ser ensaiados, para averiguar suas classes de resistência, estanqueidade, e absorção.

Neste sentido, a ABTC – Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto é uma entidade que atua direta e permanentemente em conjunto com a ABNT desenvolvendo novas Normas Técnicas ou aprimorando as já existentes, visando padronizar os produtos usados em obras de drenagem e saneamento, garantindo a qualidade e segurança para todos. Entre outras atividades fornece assistência técnica a projetistas, construtores e outros órgãos.

O projeto estrutural de tubos de concreto, visa primeiramente, em atender aos estados limites de serviços a partir dos esforços solicitantes, existindo dificuldades devido à complexidade para definir as pressões do solo contra suas paredes.

Segundo a NBR 8890 (2007), a moldagem do tubo deve ser feita por processo industrial adequado às características do produto final quanto à resistência mecânica, permeabilidade, estanqueidade, absorção, dimensões e acabamento. Quanto à absorção, os tubos devem ter sua absorção máxima de água em relação à sua massa seca limitada a 6 % para esgoto sanitário e 8 % para água pluvial. Deve ser determinada de acordo com a NBR 7531 (1982), não devendo ultrapassar 10 % em massa após período de 48 h à temperatura de 70 °C.

Além de serem utilizados para drenagem e de coleta de esgoto, são identificadas outras utilizações, tais como:

- Passagem de animais e pedestres;
- Cochos e bebedouros para bovinos;
- Dispositivo de playground;
- Fossas sépticas;
- Sumidouros;
- Poços de inspeção;
- Poços de lençol freático;
- Passagem de instalações subterrâneas.

2.3 Resíduos de cinzas de madeira

A madeira é um material vegetal que é constituído de um material fibroso e poroso, resultante da extração dos troncos e outras partes robustas dos vegetais. As propriedades deste material variam em função da espécie, podendo variar dentro da mesma espécie, em virtude da idade, fatores genéticos e ambientais.

As árvores são divididas em duas categorias: as gimnospermas (coníferas), e as angiospermas que possuem as sementes contidas em frutos. Nesta categoria estão todas as Dicotiledôneas que são as madeiras de interesse para a construção (FAGUNDES, 2006).

O Brasil é formado por cerca de 66% de florestas nativas, 0,5% de áreas plantadas ou reflorestadas e 33,5% destinadas à agricultura, pecuária, áreas urbanas dentre outras, isso faz da área florestal brasileira a segunda maior do mundo, perdendo apenas para a Rússia. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente 69% do território florestal tem potencial produtivo. (GUÉRON, 2005). O consumo de madeira de reflorestamento de florestas naturais e plantadas é a principal fonte de matéria prima para abastecimento da indústria (GAZOLA, 2007).

O conceito de resíduo, segundo algumas entidades, é tudo o que se pode agregar valor, gerando uma nova cadeia produtiva, ao contrário de lixo que é todo o resíduo que não possuir valor agregado (GAZOLA, 2007).

A norma brasileira NBR 10004 (2004) define os resíduos sólidos como sendo resíduos no estado sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem; industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, e de serviços de varrição. De acordo com a resolução do Conama, os resíduos são classificados em classes e categorias.

Segundo Rocha (2003), a seleção de usos potenciais para os resíduos é uma etapa decisiva no processo de desenvolvimento de mercado para os resíduos, não deve partir de ideias pré-concebidas, mas em função das características físico-químicas e fases do resíduo e das condições de mercado locais, para gerar um novo produto de melhor desempenho e menor impacto ambiental que as soluções tradicionais, com condições de competir em um nicho específico de mercado. Logo o preço competitivo ou a redução dos custos de produção é um fator primordial para a utilização de um resíduo (ROCHA, 2003).

2.3.1 Cinzas de Algaroba

As cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*) são um passivo ambiental típico do Pólo de Confeccões Pernambucano. Devido ao custo e adaptação de infra-estrutura para emprego de energia elétrica e do gás natural, o aquecimento da água utilizada pelas lavanderias é realizado pela queima de madeira extraída nas regiões circunvizinhas as indústrias. Em contra partida, os aspectos legais proíbem o corte de madeiras nativas, sendo liberada a queima das demais espécies.

Dentre as espécies liberadas para comercialização está a Algaroba (*Prosopis juliflora*) que possui um alto desempenho calórico. Com a queima da madeira é gerado uma grande quantidade de resíduos minerais, as cinzas (Figura 13), sendo estas ainda pouco utilizadas. Pequena parte desta cinza tem sido utilizada informalmente para correção de pH de solo, sendo a maior parte do resíduo descartada sem nenhum critério. Destaca-se que dada sua finura, essas cinzas têm alto poder poluente de águas, solo e ar, além de ocupar grandes volumes devido à sua baixa densidade.



Figura 13 – Resíduo da queima da madeira de *Prosopis juliflora* (Algaroba).
Foto: Tiago Agra, 2014.

Os estudos de Melo (2012) com a adição de cinza de Algaroba (*Prosopis juliflora*) geradas no APL de confecções Pernambucano com (10%, 20%, 30% e 40%), em argamassas de revestimento do tipo emboço, com traço 1:2:9 (cimento, cal, areia), comum nas construções da região de Caruaru-Pernambuco-Brasil,

mostraram nos resultados que argamassas com adição de cinzas em até 40%, quando comparadas com a argamassa padrão, apresentaram, no estado fresco, capacidade de retenção de água e densidade semelhantes, e no estado endurecido, índice de vazios, resistência mecânica, absorção de água e resistência potencial de aderência à tração sem alterações significativas. A manutenção das características das argamassas com a adição é atribuída à ação do efeito fíler, que contribuiu para uma maior compacidade do sistema compensando os efeitos negativos da adição. Foi verificado, ainda, que argamassas com adição de cinzas de topo e cinzas de base apresentaram resultados equivalentes.

Leloup (2013) estudou o efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland, dosadas com 1, 2 e 3% de lodo em substituição da areia. Os mesmos teores foram testados com a introdução concomitante de 1% de cinza de Algaroba (*Prosopis juliflora*), também como substituição, para verificar sua interação com o sistema. Os experimentos realizados indicam que a inclusão dos resíduos viabiliza a utilização das argamassas no mercado da construção civil. Os valores de resistência à compressão mostraram uma redução da ordem de 40% nas argamassas com resíduos, porém, satisfazem o requisito para seu emprego em fins não estruturais. Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização atestam a imobilização dos contaminantes contidos nos resíduos. Assim, a incorporação de até 4% dos resíduos têxteis estudados em argamassa, garantem uma alternativa segura de disposição para estes, e possibilita a aplicação do produto para assentamento de blocos e/ou revestimento.

Siddique (2012) estudou a composição físico-química e mineralógica básica das cinzas de madeira e verificou sua influência na absorção de água, resistência à compressão, à tração e a flexão, resistência ao congelamento e descongelamento e retração do concreto e seu comportamento à lixiviação, concluindo que a capacidade de absorção de água do concreto aumenta com o aumento do teor de cinzas de madeira, as propriedades de resistência das misturas de concreto diminui ligeiramente com o aumento no teor de cinzas de madeira, mas aumenta com a idade devido a ações pozolânicas, as cinzas de madeira podem ser usadas para fazer produtos pré-moldados e concretos estruturais (SIDDIQUE, 2012).

Jankovic *et al.* (2012), concluiu que a densidade de concreto diminuiu à medida que o percentual de agregado de tijolo reciclado aumentou, absorção de

água no concreto aumentou com o nível de substituição do tijolo moído, concretos com 100% de substituição de agregados naturais tem absorção 12% maior de água do que de concreto com 25% tijolos reciclados como agregados, mas com o teste de congelamento / descongelamento satisfeito , o que significa que o concreto com base em tijolo esmagado tem bom desempenho e durabilidade, a resistência à compressão e à tração dos blocos de concreto e a resistência à flexão das bandeiras de pavimentação diminuiu à medida que o percentual de agregado de tijolo reciclado aumentou, a absorção de água dos blocos de pavimentação e bandeiras excedem o limite de 6% , a perda de massa para todos os tipos de blocos de concreto e bandeiras após o teste de congelamento / descongelamento foi $\leq 1,0$ kg/m² , por isso satisfaz os requisitos para a melhor classe para resistência às intempéries de acordo com as normas europeias, a resistência à abrasão de elementos de pavimentação diminuiu com o percentual de agregado reciclado aumentou. Todos os tipos de concreto foram capazes de satisfazer os requisitos mínimos das normas europeias. Foi possível utilizar até 32,5% de tijolo reciclado como agregado para preparar blocos de pavimentação de concreto que preencham os requisitos da norma EN 1338. A produção de bandeiras de pavimentação de concreto é possível com tijolo reciclado como agregado. A qualidade dos elementos dependem do nível de agregado natural de substituição. É possível obter bandeiras pavimentação, de acordo com a EN 1339, flexão Classe 1 com 65% de tijolo reciclado como agregado , Classe 2 para flexão com níveis de substituição de 50% e 60% e o melhor , classe 3, com nível de reposição tijolo moído até 32,5% (JANKOVIC, 2012).

Agra *et al.* (2011), estudou o efeito sinérgico da adição de cinza de lenha de Algaroba (*Prosopis juliflora*) e lodo têxtil gerados no APL de confecção pernambucano em argamassas de revestimento, neste a substituição dos agregados miúdos foi de até 20% no traço em volume 1:2:9, concluindo a influência negativa do lodo e positiva da cinza nos índice de consistência e resistência a compressão das argamassas.

Cheah & Ramli (2011) concluíram que a quantidade e qualidade de cinzas de madeira são dependentes de vários fatores, ou seja, temperaturas de combustão de biomassa de madeira, espécies de madeira a partir do qual os combustíveis de biomassa de madeira foram obtidos e os tipos de tecnologia de combustão utilizados. Assim, a caracterização adequada de cinzas de madeira é obrigatória

antes da sua aplicação como material constituinte da produção das misturas de concreto. A distribuição de partículas de cinzas de madeira é em geral mais grosseira, em comparação com cimento Portland ordinário (OPC). No entanto, a superfície específica de cinzas de madeira é comparativamente maior do que o OPC, devido à elevada irregularidade na forma de partículas de cinzas de madeira e a sua natureza porosa (CHEAH; RAMLI, 2011).

Cheah & Ramli (2011) ainda indicam que cinzas de madeira tem uma composição química que varia significativamente dentro de espécies de árvores a partir do qual a biomassa de madeira foi derivada, mas geralmente é rica em compostos de calcário e sílica. Cimento OPC misturado com cinzas de madeira como material de substituição parcial tem uma consistência de padrão mais elevada. Ele tende a ter mais solidez, mas uma menor taxa de desenvolvimento de calor de hidratação em relação a pasta pura OPC. Quantidades significativas de cristais de etringita são formadas dentro de uma matriz de pasta de cimento em cima da cinza de madeira hidratada misturada com OPC, especialmente com a elevação dos níveis de OPC em substituição por cinzas de madeira.

Cheah & Ramli (2011) destacam ainda que misturas de concreto em misturas contendo cinzas de madeira como material de substituição parcial do cimento Portland tem maiores demandas de água para atingir um determinado nível de trabalhabilidade em comparação com misturas OPC puro equivalentes. A inclusão de cinzas de madeira como material de substituição parcial ao cimento em misturas de concreto ou argamassa a um aumento do nível de substituição do cimento pode resultar numa redução progressiva da densidade aparente da mistura de argamassa ou concreto endurecido.

Com relação à resistência à compressão, Cheah & Ramli (2011) dizem que, geralmente, a incorporação de cinzas de madeira como material de substituição do cimento parcial na formulação da mistura de concreto reduz a resistência mecânica do concreto. No entanto, não foram promissoras as observações de que a inclusão de cinzas de madeira em baixos níveis de substituição do cimento, na verdade, contribuíram para o aumento da resistência à compressão em misturas de concreto produzidos. A utilização de cinzas de madeira como um substituto parcial para o OPC em níveis de substituição de até 10% do peso total do aglutinante pode produzir concreto estrutural ou argamassa com propriedades de resistência aceitáveis. Metacaulim pode ser utilizado como um aditivo em quantidades mínimas,

como um ativador químico para aumentar a taxa de desenvolvimento de resistência mecânica das misturas de argamassa contendo cinzas de madeira como material de substituição ao cimento em concreto. Misturas de concreto contendo cinzas de madeira como material de substituição parcial de cimento produziu uma maior resistência contra a corrosão sob exposição a soluções ácidas mono-básicas em comparação com misturas OPC puro equivalentes. No entanto, o inverso é verdadeiro quando as misturas de concreto estão são expostas às ações corrosivas de soluções ácidas dibásico. O aumento do teor de cinzas de madeira como material de substituição parcial do cimento na formulação das misturas de concreto geralmente resulta no aumento da magnitude de absorção de água, em misturas de concreto.

Como conclusões, Cheah & Ramli (2011) destacam que o uso de cinza de madeira como uma substituição parcial de cimento em misturas de concreto nos níveis de substituição de até 25% do peso total não tem efeitos adversos sobre a resistência do concreto contra a difusão de íons de cloreto. Além disso, destacam que o uso de misturas minerais misturadas que consiste em 20% de cinzas de madeira e 80% de cinzas volantes de carvão, em peso, aumenta significativamente a resistência do concreto contra a difusão de íons de cloreto em misturas de concreto, a o nível de substituição de cimento de 25%. Incorporação de cinzas muito finamente moídas, produzidas a partir de co-incineração de madeira, casca de arroz e bagaço de cana, contribui na melhoria significativa nas propriedades de durabilidade das misturas em termos de reação álcali-sílica (ASR) na capacidade de mitigação, resistência elétrica contra corrente de corrosão e resistência contra cloreto de difusão. Os autores concluem, por fim, que a presença de cinzas de madeira em concreto não tem efeitos adversos sobre a resistência do concreto contra a deterioração pela ação de congelamento-descongelamento. O uso de cinzas de madeira como substituto parcial do cimento como aglutinante em concreto tem dado uma contribuição significativa para a redução da magnitude para a retração por secagem nas misturas de concreto produzidas.

Raut *et al.* (2011), analisa vários resíduos sólidos industriais e agrícolas utilizados como material de construção na fabricação de tijolos, tendo como concluindo que melhorou o desempenho em termos de uma densidade mais leve e menor condutividade térmica.

Moura *et al.* (2012), avaliou a atividade pozzolânica de cinzas de Algaroba (*Prosopis juliflora*), coletadas diretamente das lavanderias no APL de confecção do agreste pernambucano. A análise química por FRX demonstrou que na sua composição possui apenas 2% de SiO_2 , 0,73% de Fe_2O_3 e ausência de Al_2O_3 , o que indica, segundo a NBR 12653 (2012) que essa cinza não possui as condições químicas para desenvolver atividade pozzolânica.

Debiebe & Kenai (2008) analisaram a possibilidade de utilizar tijolos moídos como agregado graúdo e miúdo para a fabricação de tijolos de concreto, analisando resistência à compressão e flexão, porosidade, absorção de água, permeabilidade e retração, concluindo que é possível esta utilização limitando à 25% e 50% para os agregados graúdos e miúdos respectivamente. Agregados de tijolos reciclados apresentam relativamente mais baixa densidade e absorção de água maior em comparação com agregados naturais. Densidades de tijolos de concreto triturados foram encontradas mais baixas em até 17% do que as dos agregados naturais concreto. Concretos com 100% de agregados finos e grossos apresentaram alguma segregação e, portanto, a desmoldagem foi adiada até 56 h após a concretagem. A diminuição da resistência à compressão aos 28 dias de idade foi de cerca de 35, 30 e 40%, quando agregados graúdos, miúdos ou ambas graúdos e miúdos são, respectivamente, substituídos.

As relações entre resistência à compressão e ensaios não destrutivos são muito semelhantes aos estabelecidos para os agregados naturais do concreto. A redução com aditivos plastificantes são, consequentemente, recomendada a fim de reduzir o teor de água. A diminuição da resistência à flexão foi de cerca de 15%, chegando a 40% quando se utilizaram agregados finos e grossos reciclados de concreto. A proporção de resistência à compressão / flexão varia entre 8,1 e 11,8. O módulo de elasticidade varia da mesma maneira que a resistência à compressão e uma redução de 30%, 40% e 50% foi observado para agregados grossos, finos um tanto grosseiros e triturados finos de tijolos de concreto, respectivamente. Geralmente, o processo de absorção de água de um concreto reciclado é semelhante ao do concreto natural e obedece às mesmas leis. Os resultados dos ensaios de absorção confirmam claramente que quanto maior for a diminuição de resistência do concreto reciclado, maior será a sua porosidade, especialmente quanto aos grandes capilares, estes são de diâmetros significativos.

Encolhimento e permeabilidade à água aumentaram com a proporção de agregados de tijolos esmagados. Para uma utilização ótima deste tipo de concreto, o nível de substituição deve ser limitado a 25% e 50% para os agregados de tijolos esmagados graúdos e miúdos, respectivamente, a fim de se obter uma qualidade mínima de concreto. Devido ao baixo desempenho do concreto com agregados esmagados de tijolos, aplicações em concretos estruturais devem ser limitadas. Para confirmar estes resultados, os autores alertam que testes de durabilidade devem ser realizados, a fim de observar a microestrutura e as performances deste concreto sob condições climáticas severas, como ambientes quentes e secos e / ou com menores agressões de sulfato ou cloreto depois de um longo tempo.

Poon & Lam (2008) avaliaram os efeitos da proporção agregado/cimento e dos tipos de agregados concluindo que a resistência à compressão foi aumentada com uma diminuição da proporção de a/c. A resistência à compressão foi diretamente proporcional à força do agregado misturado. Os blocos preparados com 100% RCA (agregado reciclado esmagado) não podiam satisfazer os requisitos de absorção de água, a menos que a proporção de a/c fosse reduzida. A utilização de NCA ou RCG (vidro reciclado moído) como um substituto da RCA reduziu a absorção de água dos blocos. A absorção de água dos blocos estava intimamente relacionada com a capacidade de absorção de água das partículas de agregado. A resistência à abrasão e a resistência à derrapagem dos blocos foram afetados pela relação a/c. Quando a proporção de a/c foi maior do que quatro a resistência à abrasão foi elevada. No entanto, não houve relação direta entre os tipos de agregados e da abrasão ou resistência à derrapagem dos blocos. Para fazer uso de materiais reciclados para a produção (materiais 100% reciclados como agregados) blocos de concreto ecológicos com boa qualidade, recomenda-se a preparar os blocos com 50% de vidro reciclado moído (RCG) e 50% reciclado agregado esmagado (RCA) e com uma relação de a/c baixa.

Lima (2008) avaliou a estabilidade dimensional e a durabilidade de argamassas confeccionadas com adição de cinzas da casca da castanha de caju e concluiu que o aumento desta em substituição ao agregado miúdo foi diretamente proporcional ao aumento dos valores da retração por secagem, e que os corpos-de-prova confeccionados com teores acima de 15% deste resíduo apresentaram alto teor de ar incorporado causa da diminuição da resistência à compressão, aumento da porosidade e profundidade da carbonatação.

Garcia (2006) estudou os efeitos da substituição parcial de 0 a 10% do cimento por finos inertes de pedreiras em concretos com baixo fator a/c, concluindo uma queda na resistência à compressão para todos os percentuais utilizados (GARCIA, 2006).

Lisboa *et al.* (2004) avaliaram a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de blocos de granito em materiais à base de cimento Portland, e observou que tal material possui um alto teor de finos e não possui atividade pozolânica, o que ressalta sua potencialidade de aplicação como fíler. Os resultados comprovaram ainda que a substituição do resíduo como agregado miúdo ocasiona um aumento da resistência à compressão axial.

Gonsalves (2000) estudou o resíduo proveniente do beneficiamento de blocos de granito na confecção de concreto como adição em teores de 10% e 20% da massa de cimento e concluiu que os concretos no estado fresco apresentaram mais coesão, consistência e diminuição da exudação e quando endurecidos melhores desempenhos na resistência à compressão e na resistência à tração, em relação aos concretos de referência.

2.4 Resíduo de britagem ou pó de pedra

Silva (2006) avaliando a possibilidade de substituição da areia extraída dos rios na região metropolitana de Curitiba pela areia proveniente da britagem de rochas calcárias da mesma região, para confecção de argamassas mistas de revestimento, conclui que as argamassas de cimento, cal e areia provenientes de britagem de rocha, com proporcionamento adequado, têm desempenho igual ou superior ao das argamassas mistas produzidas com areia proveniente dos depósitos aluvionares de rios na maioria dos requisitos da NBR 13281 (2005). A restrição foi quanto à fissuração, o que exige maior aprofundamento nas pesquisas. Uma das dificuldades da utilização da areia artificial na argamassa de revestimento é devido ao formato inadequado das partículas, normalmente lamelar ou alongado, dificultando a trabalhabilidade.

Para seu experimento Silva (2006) utilizou cimento CP II Z 32, cal virgem moída e produziu 22 argamassas, 13 com areia britada e 9 com areia natural, e investigou 11 traços diferentes. Segundo o pesquisador, a substituição da areia natural pela areia artificial na indústria da construção civil foi a solução encontrada

pelos principais países do mundo, processo iniciado há mais de 30 anos. Hoje há uma tendência mundial no uso da areia artificial, com produção em alta escala.

Segundo Formigoni (2006), o reaproveitamento de resíduos é uma alternativa econômica e ecologicamente viável que proporciona um destino definitivo para os resíduos oriundos não só da construção civil, como também de indústrias de mineração, por exemplo, extração de mármore e granito. Durante o beneficiamento das rochas naturais, 25% a 30% são transformados em pó, sendo que no Brasil, estima-se que sejam geradas 240.000 toneladas/ ano de resíduos destas rochas. Sem um direcionamento correto, este pó é depositado em locais totalmente inapropriados, gerando graves impactos ambientais.

Agregados graúdos lamelares e agregados miúdos com formato irregular (areias de britagem) podem resultar em misturas perfeitamente adequadas às faixas recomendadas para a moldagem de blocos de concreto; entretanto, os concretos produzidos com esses materiais tornam-se bastante ásperos, dificultando a compactação das peças e, muitas vezes, resultando em texturas superficiais fora dos padrões desejados (FRANSSON JR).

Outra particularidade com relação à produção e dosagem das misturas para a produção de blocos diz respeito à maior preocupação com a textura final dos produtos, principalmente, em se tratando de blocos para alvenaria aparente, e, aos traços empregados, que na maioria das vezes são mais pobres do que os utilizados para a confecção dos concretos de consistência plástica. Para se ter uma ideia, os traços normalmente empregados para a produção de blocos, dentro da faixa de resistência à compressão especificada pela NBR 6136 (2014) podem variar de 1:6 a 1:14 (cimento: agregados); dependendo dos materiais utilizados, do tipo e porte do equipamento de vibro-compressão e da regulagem do mesmo.

Ferreira Junior (1995) recomenda que a proporção entre cimento: agregados encontre-se na casa de 1:6 para os traços empregados nos blocos de maiores resistências à compressão (traços mais ricos) e de 1:10 a 1:15, no caso dos traços empregados para blocos com menores resistência.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foi realizado o beneficiamento e caracterização do resíduo e dos agregados regionais utilizados para fabricação de pré-moldados de concreto. Na segunda etapa foram realizados os ensaios que definiram a dosagem das matérias-primas, a relação a/c , a cura e a tensão de compressão a ser utilizada para moldagem dos corpos-de-prova com e sem a utilização do resíduo. Na terceira etapa foram realizados os ensaios de durabilidade.

Os corpos-de-prova foram moldados tendo como base um concreto com baixa relação água/cimento característico de pré-moldados compactados sobre pressão (Figura 14), com características visuais próximos aos que são utilizados por indústrias emblemáticas regionais.

A caracterização dos materiais e os ensaios de empacotamento, fator água/cimento, cura e de resistência à compressão dos corpos-de-prova e durabilidade foram realizados nos Laboratórios de Sistemas Construtivos (LSC) do Departamento de Engenharia Civil e Laboratório de Química (LQ) da UFPE-Campus Caruaru.



Figura 14 – Prensa hidráulica utilizada para os ensaios de energia e compactação e moldagem dos corpos-de-prova sob pressão.

Fonte: o autor (2014).

O fluxograma esquemático da metodologia empregada pode ser visualizado na Figura 15.

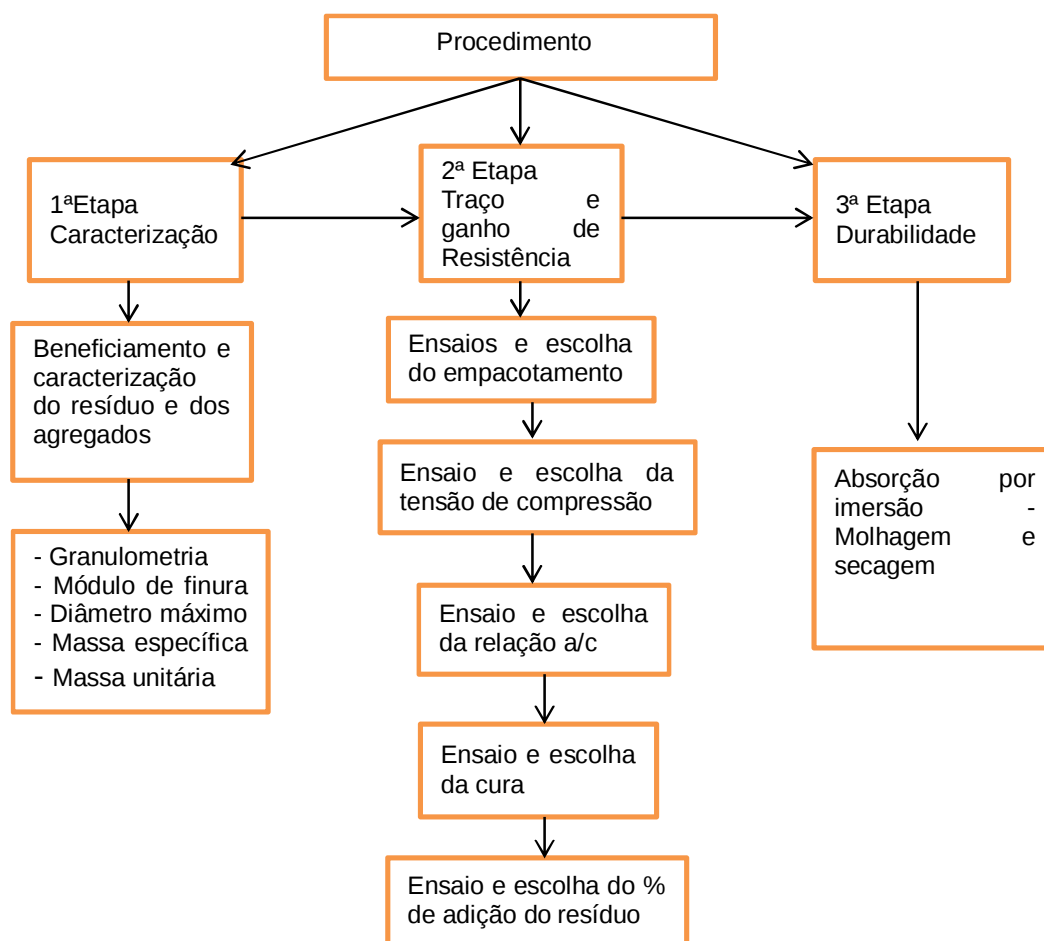


Figura 15 – Metodologia experimental esquematizada em diagrama de blocos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Primeira etapa - Beneficiamento e caracterização do resíduo e dos agregados

3.1.1 Matérias-primas utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova

A fim de se aproximar da indústria de pré-moldados, os agregados: cascalhinho (módulo de finura: 3,73, densidade real: 2,762 kg/dm³, densidade aparente: 1,243 kg/dm³), areia média (módulo de finura: 2,59, densidade real: 2,625 kg/dm³, densidade aparente: 1,270 kg/dm³), areia fina (módulo de finura: 1,96,

densidade real: 2,545 kg/ dm³, densidade aparente: 1,349 kg/dm³), e pó de pedra (módulo de finura: 2,54, densidade real: 2,747 kg/ dm³, densidade aparente: 1,353 kg/dm³), foram obtidos diretamente da indústria emblemática. Foi utilizado cimento Portland CP V – ARI.

O resíduo utilizado foi a cinza proveniente da queima da madeira da árvore denominada *Prosopis juliflora*, variedade exótica liberada para extração vegetal.

3.1.2 Coleta e processamento das cinzas de Algaroba

O resíduo escolhido para estudo deste trabalho é a cinza proveniente da queima de madeira da Algaroba (*Prosopis Juliflora*). As empresas de lavanderia, integrantes no Arranjo Produtivo Local (APL), utilizam nas caldeiras, a lenha de Algaroba (*Prosopis Juliflora*), como principal fonte de energia para aquecimento da água. No final do processo produtivo é gerada a cinza em volumes elevados e sem possibilidade de reutilização na indústria geradora, sendo descartada de forma inadequada no meio ambiente, Figura 16. A produção desse resíduo na indústria não foi quantificada, todavia constatou-se que a produção de cinza é diária nas indústrias visitadas.



Figura 16 – Descarte da cinza no meio ambiente local.
Fonte: Nascimento (2014).

O resíduo foi coletado das grelhas dos fornos de queima da biomassa, para uma vez que representa maior quantidade de resíduo, comparativamente à cinza de

topo, que se deposita no interior do forno. A lavanderia escolhida foi a Nova Geração, situada na Rua José Marcelino de Araújo, 163, bairro Cedro, Caruaru-PE, pelo fato de utilizar em sua linha de produção apenas a madeira da Algaroba (*Prosopis Juliflora*) e não uma mistura de diversas biomassas.

Após a coleta do resíduo na fonte geradora o material foi submetido aos ensaios de umidade, sendo em seguida colocado em estufa à temperatura de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas para perder a umidade e, após seco, foi caracterizado. Em seguida, o resíduo foi peneirado em malha 200, conforme Figura 17, constatando que 55% do material ficou retido, apresentando resíduo de formas diversas devido à queima irregular da madeira.



Figura 17 – Tratamento do cinza de Algaroba, através de peneiramento.
Fonte: (LELOUP, 2013)

3.1.3 Caracterização dos materiais de partida

3.1.4 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI, cimento Nacional da Brennand Cimentos. A escolha do emprego do CP V ARI baseou-se na redução do tempo para o ganho de resistência para os rompimentos dos corpos-de-prova, acelerando assim o desenvolvimento do trabalho.

As características físicas e químicas do cimento utilizado foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se compiladas nas Tabela 8 e Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8 - Características químicas do cimento

Características químicas	Resultado (%)
Perda ao fogo	3,00
Resíduo Insolúvel	0,60
SiO ₂	18,1
Al ₂ O ₃	4,2
Fe ₂ O ₃	2,35
CaO	60,4
MgO	5,55
SO ₃	3,40
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	1,03

Fonte: Fonte: Boletim técnico fornecido pela Brennand Cimentos (2014).

Tabela 9 - Características físicas do cimento

Características físicas	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm ³	3,01
Área específica	m ² /g	1,20
Início de pega	horas	3h e 10 min
Fim de pega	horas	4h e 30 min
Resistência compressão 1 dia	MPa	40,4
Resistência compressão 3 dias	MPa	45,2
Resistência compressão 7 dias	MPa	48,7
Resistência compressão 28 dias	MPa	52,4

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Brennand Cimentos (2014).

3.1.5 Agregados miúdos

Utilizou-se areia fina lavada de rio, areia média lavada de rio, cascalhinho e pó de pedra, comumente encontrado na região, devidamente caracterizados por: massa específica, massa unitária e granulometria.

As massas específica e unitária foram determinadas segundo os métodos descritos na NBR NM 52 (2009).

Após seco em estufa foi realizado sua granulometria, em peneirador elétrico, conforme prescreve a NM 248: 2003, e encontrado seu módulo de finura (MF), através da Equação 8, e dimensão máxima ($D_{máx}$), em seguida foi novamente peneirado, agora utilizando a peneira malha ABNT nº 200 (74 µm) para serem utilizadas como adição na realização dos ensaios.

$$MF = \frac{\sum \%acumuladas}{100} \quad \text{Equação 8}$$

O ensaio de sua massa unitária foi realizado segundo a norma NM 45: 2006, onde a massa do agregado é lançado em um recipiente de volume e massa conhecidos previamente.

O ensaio de massa específica real seguiu a norma NM 52: 2009, utilizando o frasco de Chapman.

3.1.6 Cinzas de Algaroba

3.1.6.1 Área superficial

O ensaio de BET (Braunauer, Emmet e Teller), usado para medição da área superficial específica, baseia-se na adsorção física e dessorção de gás na superfície da amostra sólida. O ensaio foi realizado em um equipamento Gemini 2375, Micromeritics, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de 100 µmHg por 24 horas.

3.1.6.2 Análise Termogravimétrica (TG), Difração de Raios-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X

O ensaio de termogravimetria foi realizado na cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) e cimento através de uma termobalança Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplada a uma termobalança – STA409EP.

O ensaio de DRX foi realizado no cimento e cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*), em um equipamento *Empyrean, Panalytical*, com detector Plxcel3D. A amostra foi avaliada a partir do método de DRX convencional (no pó seco) e as variáveis do ensaio foram fixadas em: radiação de cobre, fenda automática de 0,5°, filtro de Níquel e frequência de *spinning* de 2 segundos por rotação. As medidas foram feitas com passo de 0,02°, permanecendo em cada passo por 60 segundos, no intervalo de 5° < 2θ < 70°.

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) foi realizado com espectrometria por dispersão de Raios-X da marca *SHIMADZU* modelo EDX&@) com tensão no

tubo de 15 KeV (Na a Sc) e 50 KeV (Ti a U), com abertura do cromador de 10 mm (abertura da área para passagem dos raios-X, atingindo a amostra). O tempo real de integração foi 200 s, em atmosfera ambiente e detector de Si (Li), refrigerado com nitrogênio líquido. O resíduo a ser ensaiado passou por um beneficiamento, cujo procedimento consiste em aquecer a amostra por 72 horas e armazená-las em cápsulas plásticas.

3.2 Segunda etapa – Determinação do traço e avaliação do ganho de resistência

3.2.1 Ensaios de empacotamento

Para a aplicação da função de Andreasen (ANDREASEN, 1930), os agregados foram peneirados e separados em sete diâmetros: o material passante através das peneiras 9,5 mm e ficou retido na 6,3 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. O valor do módulo de distribuição, n , adotado foi de 0,37, pois a literatura expressa valores para n oscilando entre 0,20 e 0,50 (ANDREASEN, 1930; DINGER, 1992; MESQUITA, L. P., WILLRICJ, F. L., LIMA JÚNIOR, H. C., 2005), e Segundo Dinger e Funk (1992), este coeficiente é fator determinante da densidade de empacotamento, sendo as maiores densidades obtidas para $q = 0,37$.

Na sequência, com base no conjunto de granulometrias e no módulo de distribuição adotado, foram determinados os percentuais granulométricos ótimos para cada diâmetro. Após, utilizou-se o software Mathcad para determinar as misturas quaternárias e ternárias de empacotamento ótimo, o que não foi possível, pois retornou resultados negativos na solução dos sistemas. Assim, foram encontradas três misturas binárias de: cascalhinho/areia média, cascalhinho/areia fina e cascalhinho/pó-de-pedra.

Piorotti (1989) relata que caso seja utilizados mais de dois agregados, o ensaio é feito primeiramente com dois agregados mais grossos; uma vez determinada a proporção ideal entre eles, realiza-se um segundo ensaio, agora entre a mistura ideal dos dois primeiros com o terceiro agregado mais fino. Piorotti (1989) relata que caso seja utilizados mais de dois agregados, o ensaio é feito primeiramente com dois agregados mais grossos; uma vez determinada a proporção

ideal entre eles, realiza-se um segundo ensaio, agora entre a mistura ideal dos dois primeiros com o terceiro agregado mais fino (PIOROTTI, 1989).

Assim, foram realizados empacotamentos experimentais quaternários e binários. O agregado de maior módulo de finura (cascalhinho) e o agregado de segundo maior módulo de finura (areia média) foram compactados juntos. A mistura experimental foi incrementada de 5 em 5%, iniciando com 100% do cascalhinho e finalizando com 100% da areia média; em seguida, a mistura 1, equivalente ao ponto ótimo entre cascalhinho e areia média, foi adensada com o pó-de-pedra e a mesma metodologia foi adotada, em seguida, para a areia fina. Para tanto, os agregados foram colocados em um recipiente com volume conhecido $4,29 \text{ dm}^3$, adensados durante 2 minutos em mesa vibratória e, após a pesagem de cada incremento de 5%, encontrou-se a mistura mais densa. As pesagens foram realizadas em balança com precisão de 0,001 g.

Em seguida, foram moldados cinco corpos-de-prova cilíndricos (Figura 18) nas dimensões de 5 cm de diâmetro de base por 10 cm de altura para cada ponto ótimo de empacotamento a fim de verificarmos a resistência à compressão NBR 7215: 1997 e a relação existente entre estas variáveis. Para moldagem utilizou-se argamassadeira de eixo vertical com cuba de capacidade de 5 litros. Os materiais foram misturados na proporção de 1:4 (cimento: agregados) e relação água-cimento 0,78 mantida constante para todas as formulações, obtida para obtenção da consistência padrão na argamassa experimental otimizada (Mistura 2 = 70% da mistura 1 + 30% de pó de pedra; Mistura 1 = 65% de cascalhinho + 35% de areia média). As consistências foram avaliadas com o emprego de flow table conforme preconizações da NBR 13276 (2005). Os corpos-de-prova foram preenchidos em três camadas com compactação sob vibração ao final, fazendo uso de um peneirador vibratório adaptado por 1 minuto em baixa vibração. A cada camada eram aplicados os golpes com soquete normal, conforme a norma NBR 7215: 1997. Os corpos-de-prova foram desmoldados com 24 horas após permanecerem devidamente cobertos e expostos ao ar, quando, então, foram desmoldados e levados à cura em imersão em água saturada com cal por 6 dias, totalizando 7 dias de cura. Foram, então, retirados da cura 2 horas antes do rompimento, secos com papel e capeados com enxofre para então serem rompidos.



Figura 18 – Corpos-de-prova moldados para os ensaios .
Fonte: o autor.

3.2.2 Técnica empregada na moldagem dos corpos-de-prova

A produção do concreto foi executada seguindo condições recomendadas pelas normas brasileiras: NBR 12655 (2006) e NBR 12821 (2009). O material foi misturado com betoneira. Dado o volume dos corpos-de-prova, optou-se por adaptação da norma, misturando em argamassadeira de eixo vertical. Cimento Portland, agregados, na forma de areia, pó de pedra, pedrisco e cinzas de Algaroba foram utilizados como insumos.

3.2.3 Ensaios para encontrar a energia de compactação necessária para a realização dos ensaios

Após determinado o empacotamento a ser adotado (mistura binária de cascalhinho e pó de pedra), foram ensaiados vários corpos-de-prova, fixando o percentual dos agregados, a relação cimento em 0,3 e a relação cimento/agregado em 1:4, agora objetivando encontrar a tensão à ser imposta aos corpos-de-prova. Para este ensaio foi utilizada a mesa de reação com uma célula de carga de 10 tf, onde corpos-de-prova contendo o concreto fresco foram compactados com

diferentes tensões, iniciando com uma carga de 0,1 tf chegando até 5 tf ponto de máximo onde não mais houve deslocamento da massa, então traçamos o gráfico onde encontramos a tensão mínima necessária para a realização dos ensaios.

3.2.4 Ensaios com variação de relação água/cimento

A escolha de utilização de baixas relações a/c em traços, 0,2 e 0,3 está intimamente relacionada com a utilizada no mercado. No entanto, são bem inferiores às relações teóricas mínimas de hidratação, pois entendemos que para conseguir a hidratação completa do cimento é necessário 40% de água em relação à massa do cimento.

Em se tratando de blocos de concreto, a quantidade de água em uma mistura deve ser a maior possível, desde que os artefatos não apresentem dificuldades para desforma por aderência ao molde, ou problemas de perda de formato em função do excesso de água.

Assim, foram escolhidas para os ensaios as relações a/c 0,2; 0,3 e 0,4.

Foram moldados dezoito corpos-de-prova 5x10 cm com a relação cimento/agregado 1:4, utilizando a cura por imersão em solução de cal, variando apenas os teores da relação a/c 0,2, 0,3 e 0,4, logo seis corpos-de-prova foram moldados para cada relação a/c.

Ao final do período de cura foram realizados ensaios de resistência à compressão, para se verificar a melhor resistência mecânica.

3.2.5 Ensaios com variação do tipo de cura

Foram moldados dezoito corpos-de-prova cilíndricos 5x10 cm com a relação cimento/agregado 1:4, utilizando o fator a/c 0,4, variando apenas os diferentes tipos de cura (seca ao ar, aspersão e imersão em solução de cal), logo seis corpos-de-prova foram moldados para cada tipo de cura.

A cura por imersão em solução com cal foi realizada colocando os corpos-de-prova em um recipiente contendo água e solução saturada de cal.

Para a realização da cura úmida por aspersão, onde foi desenvolvido um sistema de recalque utilizando uma bomba de aquário aspergindo água ininterruptamente sobre os corpos-de-prova.

No processo de cura ao ar em ambiente coberto, os corpos-de-prova foram desmoldados e deixados no laboratório ao ar sem controle nenhum de umidade e temperatura.

Ao final do período de cura foram realizados ensaios de resistência à compressão, para se verificar a melhor resistência mecânica.

3.3 Avaliação de como a incorporação de cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) em adição (10%,20%,30% e 40% em relação à massa de cimento) interferiu nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova

3.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco

O concreto seco no estado fresco para a relação água/cimento 0,4, se comporta como uma farofa que adquire forma ao ser exposta a compactação. A análise da consistência do concreto seco fresco, ao serem adicionadas as cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) nos percentuais de 5%,10%,20% foram melhoradas com aumento da trabalhabilidade, a partir de 30% e 40%, houve redução da trabalhabilidade em relação a mistura padrão.

3.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

3.3.2.1 Resistência à compressão

Devido a utilização do cimento CP V-ARI a resistência à compressão foi determinada sempre aos 7 dias segundo a NBR 12118 (2010). Os corpos-de-prova foram rompidos em prensa hidráulica servo-controlada da marca Shimadzu, com capacidade de célula de carga de 200 t, com fundo de escala de 10 t e 4 t (Figura 19).



Figura 19 – Prensa hidráulica servo-controlada da marca Shimadzu.
Fonte: o autor.

Foram moldados vinte e cinco corpos-de-prova com a relação cimento/agregado 1:4, utilizando o fator a/c 0,4, e curados utilizando a cura úmida por imersão em solução de cal, variando apenas os teores de adição de cinzas (5%, 10%, 20%, 30% e 40%), logo cinco corpos-de-prova foram moldados para cada teor de adição.

3.3.2.2 Absorção de água por imersão

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (2005).

Foram moldados vinte e cinco corpos-de-prova com a relação cimento/agregado 1:4, utilizando o fator a/c 0,4, e curados utilizando a cura úmida por imersão em solução de cal, variando apenas os teores de adição de cinzas (5%, 10%, 20%, 30% e 40%), logo cinco corpos-de-prova foram moldados para cada teor de adição.

Para determinação da absorção de água, foi necessária a seguinte aparelhagem:

- balança hidrostática;
- balança com resolução de 0,01g;
- recipientes adequados para imersão e fervura das amostras.

- estufa com capacidade para manter temperatura no intervalo de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Foram utilizadas para o ensaio inicial de imersão 5 corpos-de-prova de cada amostra. Já para o ensaio de imersão após ciclagem utilizamos 7 corpos-de-prova de cada amostra.

Após a cura, as amostras foram postas em estufa e mantidas à temperatura de 105°C por 72 h (Figura 20). Após determinado e registrado a massa seca em estufa (m_s) das amostras. Em seguida, as amostras foram imersas em água à temperatura de 23°C e mantidas por 72 h nessa condição e depois fervidos. Ao serem retiradas dessa condição onde foram mantidos durante 5 h, e então ao esfriar naturalmente até a temperatura de 23°C , foi determinada com o auxílio da balança hidrostática, a massa imersa (m_i) das amostras. Após, retiramos as amostras da água, enxugamos com pano úmido e determinamos a massa saturada (m_{sat}).



Figura 20 – Estufa onde foram mantidas os corpos-de-prova durante os ensaios de absorção.
Fonte: o autor.

O valor da absorção de água de cada corpo de prova, expresso em porcentagem, calculado pela Equação 9.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad \text{Equação 9}$$

na qual, A é a absorção total, em porcentagem; m_{sat} é a massa do corpo-de-prova saturada após imersão e fervura, em gramas; e, m_s é a massa do corpo-de-prova seca em estufa, em gramas.

O valor do índice de vazios de cada corpo de prova, expresso em porcentagem, calculado pela Equação 10.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 10}$$

na qual, m_i é a massa do corpo-de-prova saturada imersa em água após a fervura, em gramas;

O valor da massa específica da amostra seca é calculado pela Equação 11.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 11}$$

O valor da massa específica da amostra saturada após fervura é calculado pela Equação 12.

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 12}$$

O valor da massa específica real é calculado pela Equação 13.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 13}$$

3.3.2.3 Durabilidade por ensaios de ciclos de molhagem e secagem

A metodologia adotada no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem foi uma adaptação da Norma da NBR 13554 (2012), referente ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem de solo-cimento. Nesta norma é prescrita o método para a determinação de perda de massa, variação da umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem como fator acelerador de envelhecimento.

Segundo Oliveira *et al.* (2006), em se tratando de compósitos de concreto decidiu-se acrescentar a essa metodologia a determinação da resistência à compressão simples e absorção de água, havendo sempre comparações entre

amostras protegidas e não protegidas dos fatores de envelhecimento, metodologia que entendemos lógica pois nos dará mais subsídios para análise dos resultados (OLIVEIRA, D. F. *et al.*, 2006)

O ensaio consistiu em moldar 14 corpos-de-prova o traço definido, com a adição 20% de resíduo.

Dos 14 corpos-de-prova ensaiados para o traço definido, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de envelhecimento por molhagem e secagem. Após o ensaio de ciclagem, 7/14 das amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, e as outras 7/14 das amostras foram submetidas ao ensaio de umidade por imersão, sendo posteriormente utilizados para avaliação da resistência a compressão simples. Todos os resultados foram comparados com o desempenho das amostras para o mesmo traço sem o ensaio de secagem e molhagem.

Para calcular as variações de volume ocorridas nos corpos-de-prova entre o final da moldagem e os volumes obtidos após cada etapa e expressa-las em porcentagem do volume inicial utilizou-se à Equação 14.

$$\delta V, n = \frac{V_i - V_n}{V_i} \times 100 \quad \text{Equação 14}$$

na qual, $\delta V, n$ é a variação de volume do corpo-de-prova em cada etapa, em%; V_i é o volume inicial do corpo-de-prova determinado na desmoldagem, em cm^3 ; V_n é o volume do corpo-de-prova em cada etapa, em cm^3 .

A variação de volume da composição para cada etapa (ciclo) foi obtida pela media dos corpos-de-prova.

Para calcular as umidades ocorridas nos corpos-de-prova entre os ciclos de molhagem e secagem obtidos após cada etapa utilizou-se a Equação 15.

$$\delta h, n = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

na qual, $\delta h, n$ é a umidade do corpo-de-prova em cada etapa, em%; M_u é a massa úmida do corpo-de-prova em cada ciclo, em gramas; M_s é a massa seca do corpo-de-prova em cada ciclo, em gramas.

A umidade da composição para cada etapa (ciclo) foi obtida pela media dos corpos-de-prova.

Para calcular a perda de massa dos corpos-de-prova no fim dos ciclos de molhagem e secagem foi necessário obter a quantidade relativa de água nos corpos-de-prova destinados a avaliação da variação do volume e utilizou-se a Equação 16.

$$A_n = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 16}$$

na qual, A_n é a água retida no corpo-de-prova; M_f é a massa seca final do corpo-de-prova após atingir massa constante, em gramas; M_i é a massa seca inicial do corpo-de-prova calculada na moldagem, em gramas. A água retida A_n foi obtida pela média medidas dos corpos-de-prova.

Para corrigir as massas secas dos corpos-de-prova selecionados para a obtenção da perda de massa teve-se que descontar a água que ficou retida no corpo-de-prova durante o ensaio, conforme a Equação 17.

$$M_{fc} = \frac{M_f}{A_n + 1,00} \quad \text{Equação 17}$$

na qual, M_{fc} é a massa seca final corrigida dos corpos-de-prova, em gramas; M_f é a massa seca final do corpo-de-prova após atingir massa constante, em gramas; A_n é a água retida no corpo-de-prova;

Para o calculo da perda de massa dos corpos-de-prova como porcentagem da massa seca inicial utilizou-se a Equação 18.

$$P_n = \frac{M_i - M_{fc}}{M_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 18}$$

na qual, M_i é a massa seca inicial calculada na moldagem do corpo-de-prova, em gramas; M_{fc} é a massa seca final corrigida dos corpos-de-prova, em gramas; P_n é a perda de massa do corpo-de-prova em%.

A perda de massa de cada composição foi obtida pela media dos corpos-de-prova utilizados.

A resistência à compressão simples foi determinada segundo as recomendações da Norma NBR 5739: 2007.

3.4 Avaliação da alteração da relação cimento:agregados no traço até então otimizado

A fim de aproximar da realidade das empresas de “fundo de quintal”, bem como averiguar a influências nas propriedades dos concretos da variação da relação cimento/agregados, os traços 1:8 e 1:12 (cimento:agregados) foram também confeccionados após otimização de todas as outras variáveis avaliadas, a título comparativo. Os corpos-de-prova foram avaliados em termos de propriedades no estado endurecido e ciclos de molhagem e secagem.

Foram moldados dez corpos-de-prova com adição de 20% de cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*), fator a/c 0,4, e curados utilizando a cura úmida por imersão em solução de cal, variando apenas as relações cimento/agregado, logo cinco corpos-de-prova foram moldados para cada relação cimento/agregado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física do cimento, dos agregados miúdos e da cinza de Algaroba

Os resultados dos ensaios de área superficial específica do cimento CP V - ARI, comparativamente aos resultados da cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*), encontram-se compilados na Tabela 10. A distribuição granulométrica do cimento e da cinza é apresentada na Figura 21.

Tabela 10 – Parâmetros de caracterização das matérias-primas.

Propriedades	Cimento	Cinza
Área superficial (m^2/g)	1,20	4,40
Densidade real (g/cm^3)	3,00	2,86

Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

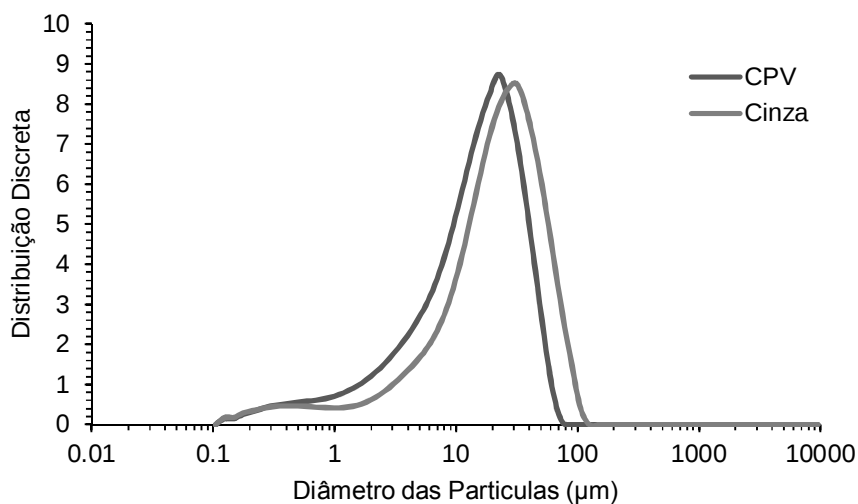


Figura 21 – Distribuição Granulométrica das matérias primas.

Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

A presença de materiais com alta área superficial específica como a cinza ($4,40 \text{ m}^2/\text{g}$) possibilitará um aumento na demanda de água pelo sistema. Além disso, observa-se que as densidades reais são semelhantes entre o cimento e a cinza.

Na Figura 21 observa-se uma semelhança granulométrica entre a cinza e o cimento, possibilitando uma maior nucleação das fases hidratadas na superfície da cinza, levando a possíveis alterações no período de indução, aceleração e

desaceleração da hidratação das fases cimentícias (QUARCIONI, 2005 *apud* NASCIMENTO, 2014).

A cinza proveniente da queima da madeira da Algaroba (*Prosopis Juliflora*) foi caracterizada e suas principais propriedades encontram-se expostas na Tabela 11, identificando as características físico-químicas.

Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos da cinza de Algaroba.

Parâmetro	Resultado
Área superficial (m ² /g)	4,40
Densidade real (g/cm ³)	2,86
pH	13,50
Condutividade (mS)	77,00
Cloretos (%)	0,97
Sulfatos (mg/L)	0,05
Umidade a 105°C (%)	0,10
Sólidos totais (%)	99,90
Sólidos fixos (%)	98,79
Sólidos voláteis (%)	1,11

Fonte: (LELOUP, 2013)

Conforme exposto na Tabela 11, a cinza possui pH básico, o que é positivo de ponto de vista cinético e termodinâmico nas reações de hidratação do cimento, por manter o mesmo ambiente alcalino do sistema ao substituir parcialmente a cal.

A distribuição granulométrica do resíduo encontra-se relacionada à dos demais materiais utilizados na Figura 21. A cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) coletada na indústria local foi peneirada em malha 200 com eficiência de 45%, a fim de possibilidade de promoção do efeito filer.

4.2 Caracterização química e microestrutural da cinza de Algaroba

As cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) utilizadas no presente estudo foram do mesmo lote de coleta das cinzas de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) utilizados em dissertações de mestrado antecessoras referentes aos alunos Wilma Leloup (LELOUP, 2013) e Jonathas Nascimento (NASCIMENTO, 2014), ambas defendidas do âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA – CAA – UFPE e que estão inseridas dentro do grupo de pesquisa coordenada pela professora orientadora do presente trabalho. Assim, a caracterização físico-química e microestrutural das cinzas de Algaroba (*Prosopis*

Juliflora) foi realizada para o grupo de pesquisa e, por isso, os resultados encontram-se referenciados nas dissertações de Leloup (2013) e Nascimento (2014).

Os resultados de caracterização química da cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) por Fluorescência de Raio-X encontram-se expostos na Tabela 12. Nota-se que o elemento predominante é o cálcio (77,85%), com presença de potássio, silício, ferro e enxofre. A NBR 12653 (2012), que preconiza o valor mínimo de 50% para o somatório dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 para considerar um material como pozolânico, fato que não foi alcançado, possuindo apenas 4,09% de SiO_2 e 2,14% de Fe_2O_3 , ou seja, valores muito abaixo do preconizado por norma.

Tabela 12 - Resultados de FRX do resíduo de cinza de Algaroba

Óxidos	Percentual (%)
CaO	77,85
K ₂ O	13,81
SiO ₂	4,09
Fe ₂ O ₃	2,14
SO ₃	1,60
Sc ₂ O ₃	0,27
MnO	0,12
ZnO	0,10
CuO	0,03

Fonte: (LELOUP, 2013).

O difratograma da cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) encontra-se representada na Figura 22, estando de acordo com os elementos presentes no FRX, Tabela 12. No pico de maior intensidade (29°) encontra-se o carbonato de cálcio; alguns picos de cloreto de potássio também estão discriminados. Potássio, cloro e magnésio são característicos da combustão de biomassas à base de celulose.

Em concordância com o ensaio de Difração de Raios-X, a análise termogravimétrica, Figura 23, indica a presença em uma intensidade considerável de carbonato de cálcio na cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*). A presença de um composto químico inerte como o carbonato de cálcio, encontrado em todos os tipos de cimentos Portland, não prejudica o sistema, e o fato de não ter sido identificada a presença de óxido de cálcio no difratograma e termogravimetria da cinza é positivo, uma vez que os óxidos possibilitam reações de expansão tardias no sistema. Portanto, a cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) usada nesse estudo apresenta as condições necessárias para adição em concretos à base de cimento Portland.

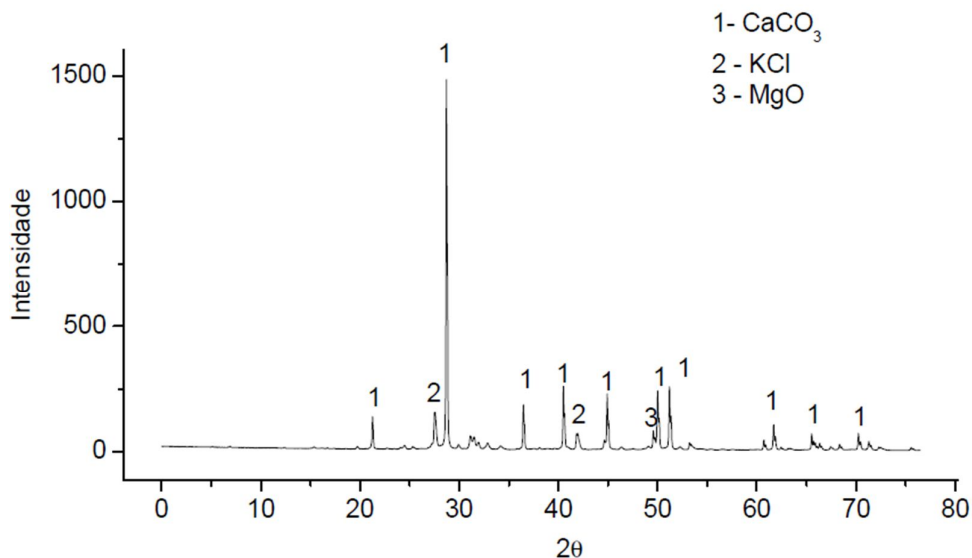


Figura 22 – Difração de Raios-X da cinza de Algaroba.
Fonte: Nascimento (2014).

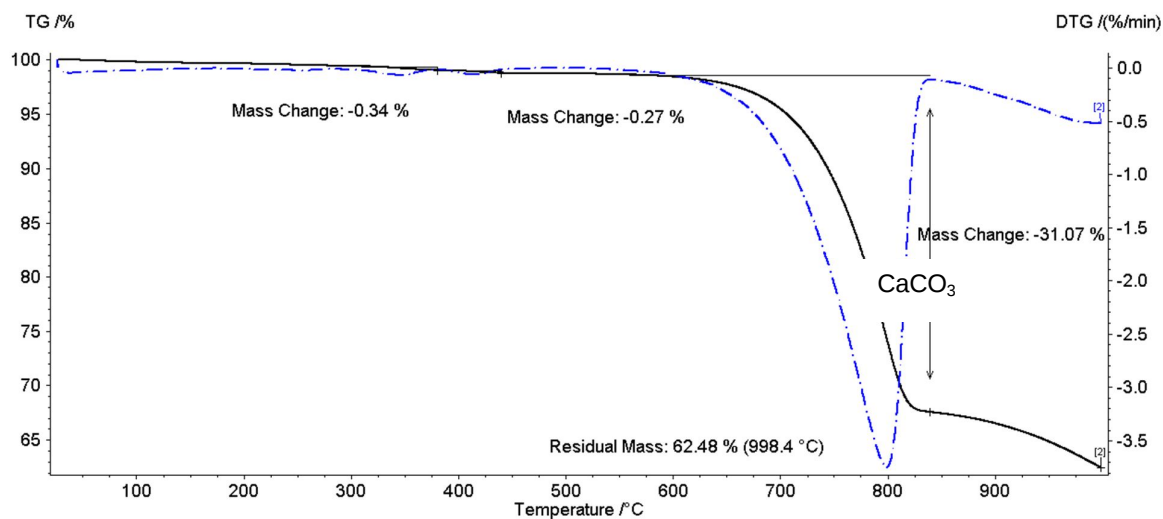


Figura 23 – Análise termogravimétrica da cinza de Algaroba.
Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

A análise microestrutural da cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) com microscopia eletrônica de varredura, Figura 24, foi possível determinar que a estrutura da cinza de Algaroba (*Prosopis Juliflora*) é arredondada com alguns aglomerados e grão na ordem de 10 μm . Foi realizada a caracterização química qualitativa por microsonda de energia dispersiva (EDS), cujo resultado determinou a presença de Ca, K, Si, como mostrado na análise de Fluorescência de Raios-X

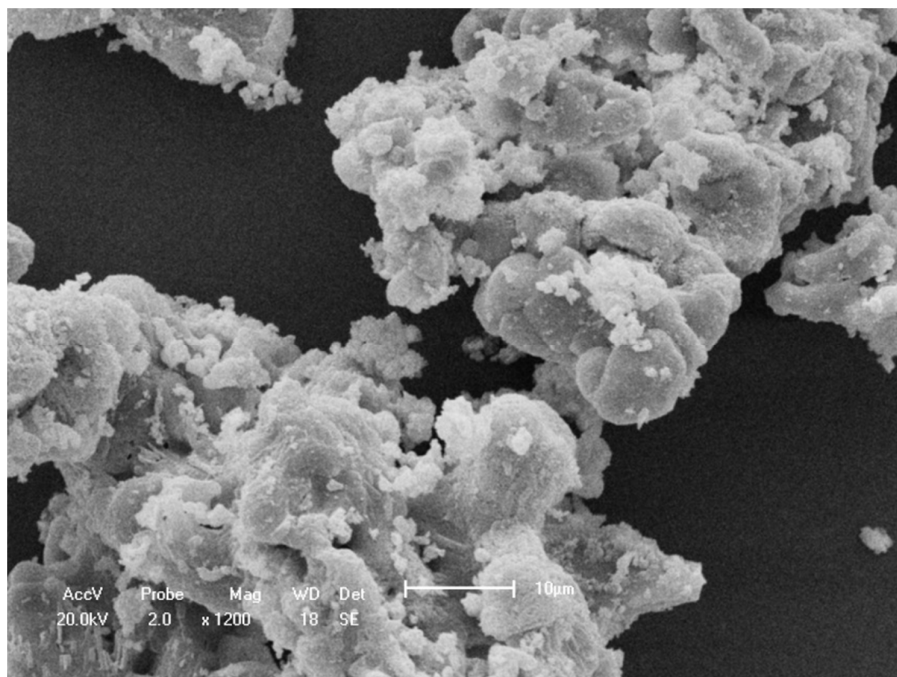


Figura 24 – Microscopia eletrônica de varredura da cinza de Algaroba
Fonte: (LELOUP, 2013).

4.3 Determinação do traço e avaliação do ganho de resistência

4.3.1 Empacotamento (métodos experimental e matemático)

As curvas granulométricas dos supracitados agregados encontram-se expostas na Figura 25. Verifica-se que a distribuição granulométrica dos agregados areia fina, areia média e pó de pedra são semelhantes, divergindo o pó-de-pedra das areias média e fina nos diâmetros das peneiras de diâmetros maiores. Por outro lado, a areia média e o pó de pedra convergem nos diâmetros menores. Para o cascalhinho, os percentuais maiores estão para as peneiras de diâmetro maior, enquanto que nas peneiras de diâmetro menor estão os menores percentuais.

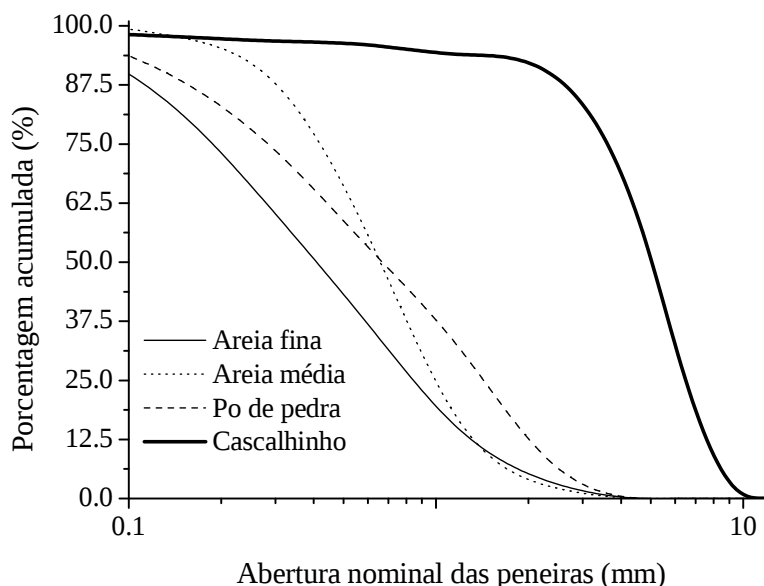


Figura 25 – Curvas granulométricas para os agregados cascalhinho, areia média, areia fina e pó de pedra.

Fonte: Figura do autor, 2014.

Os percentuais granulométricos ótimos para cada diâmetro por Andreasen foram: 9,57% (6,3 mm), 20,46% (4,8 mm), 15,83% (2,4 mm), 12,25% (1,2 mm), 9,48% (0,6 mm), 7,33% (0,3 mm) e 25,08% (0,15 mm). Ao tentar unificar os quatro agregados em uma composição granulométrica única houve incompatibilidade entre os agregados, devido à já citada semelhança de composição granulométrica entre eles. Misturas ternárias foram testada também sem sucesso. Apenas nas misturas binárias entre cascalhinho e os outros agregados obteve-se convergência, gerando três misturas: cascalhinho/areia média (65,2%/34,8%), cascalhinho/areia fina (49,2%/50,8%) e, cascalhinho/pó de pedra (51,0%/49,0%).

Em termos de empacotamento experimental para a mistura quaternária, com base nos módulo de finuras decrescentes, houve empacotamentos para cascalhinho/areia média (65%/35%) e mistura 1 (cascalhinho e areia média)/pó-de-pedra (70%/30%), conforme pode ser visualizado nas Figura 28a e Figura 28b. No entanto, não houve empacotamento da mistura 2 (mistura 1 e pó-de-pedra) com areia fina, conforme exposto na Figura 28c.

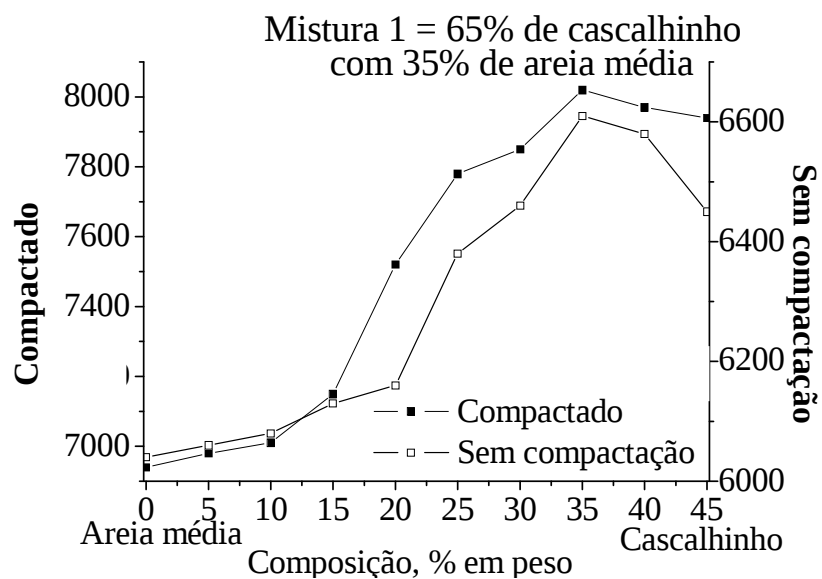


Figura 26 – Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e areia média.
Fonte: Figura do autor, 2014.

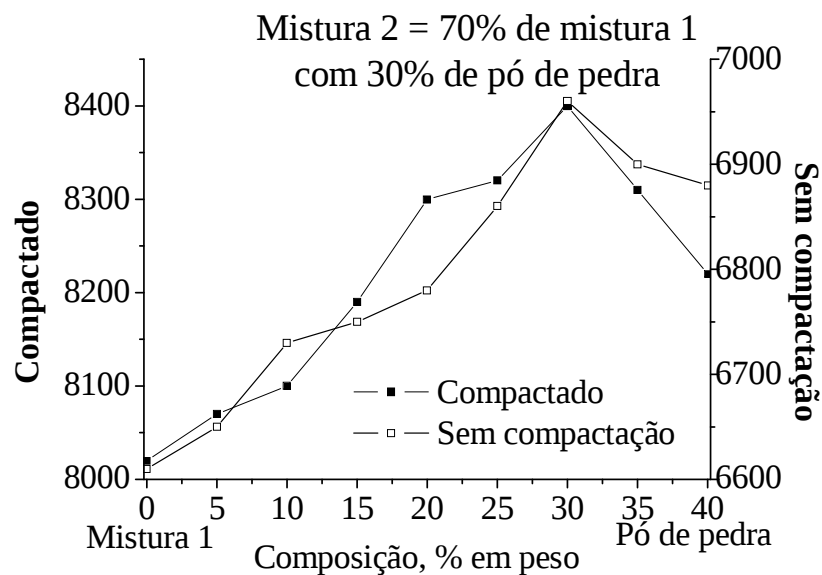


Figura 27 – Curvas de empacotamento experimental para mistura 1 (cascalhinho e areia média) e pó-de-pedra.
Fonte: Figura do autor, 2014.

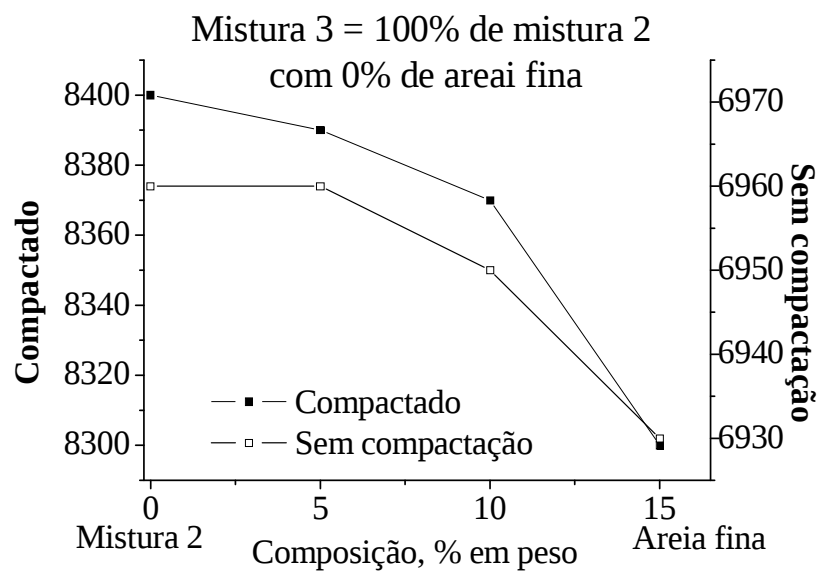


Figura 28 – Curvas de empacotamento experimental para mistura 2 (mistura 1 e pó-de-pedra) com areia fina.

Fonte: Figura do autor, 2014.

As curvas de empacotamento otimizadas por Andreasen para cascalhinho/areia média (65,2%/34,8%), cascalhinho/areia fina (49,2%/50,8%) e, cascalhinho/pó de pedra (51,0%/49,0%), comparadas com o empacotamento ótimo para $n=0,37$, podem ser visualizadas na Figura 29. Verifica-se que houve uma sobreposição entre as curvas, demonstrando a uniformidade entre os empacotamentos binários e o ótimo, tornando representativa a sua utilização.

A curva de empacotamento otimizada por Andreasen para cascalhinho/areia média (65,2%/34,8%) foi confirmada experimentalmente com ponto ótimo (65%/35%), conforme pode ser visto na Figura 28a. A hipótese de Andreasen para o sistema binário cascalhinho e areia fina também foi confirmado experimentalmente com a relação 50%/50% comparativamente a 49,2%/50,8%, conforme pode ser visto na Figura 31a. No entanto, houve uma pequena divergência nos percentuais entre o modelo experimental (45%/55%), Figura 31b, e a função de Andreasen (51%/49%). Acredita-se que essa divergência seja em função da forma lamelar e angulosidade dos grãos de pó-de-pedra.

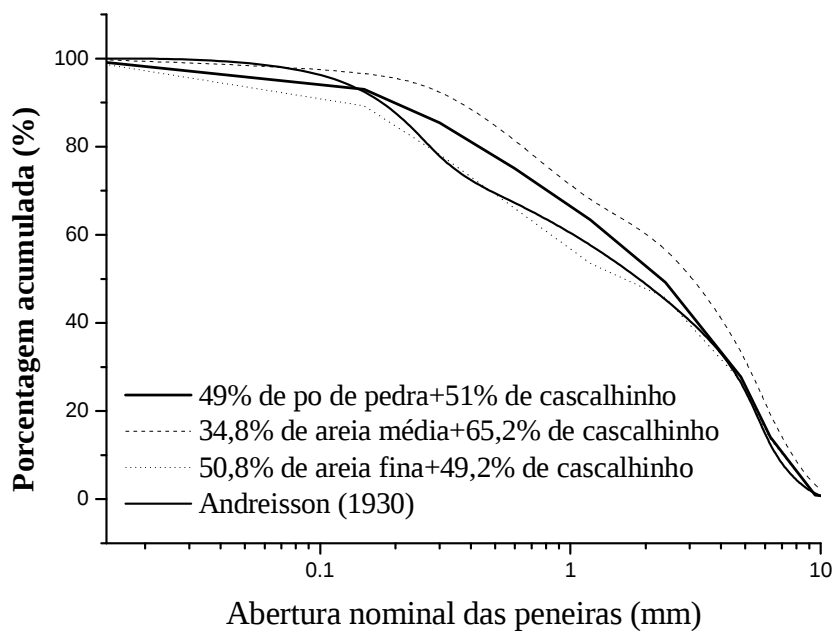


Figura 29 - Curvas de empacotamento otimizadas por Andreasen comparadas com o empacotamento ótimo para $n=0,37$.

Fonte: Figura do autor, 2014.

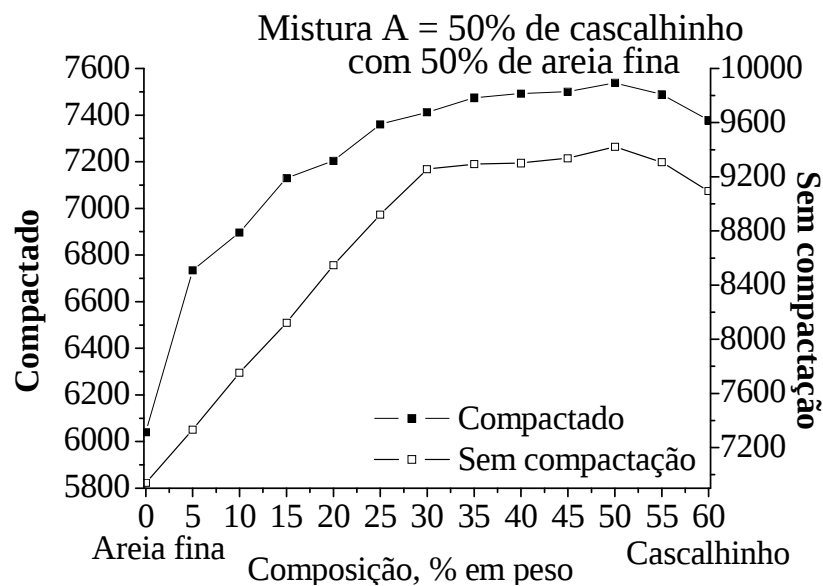


Figura 30 - Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e areia fina.

Fonte: Figura do autor, 2014.

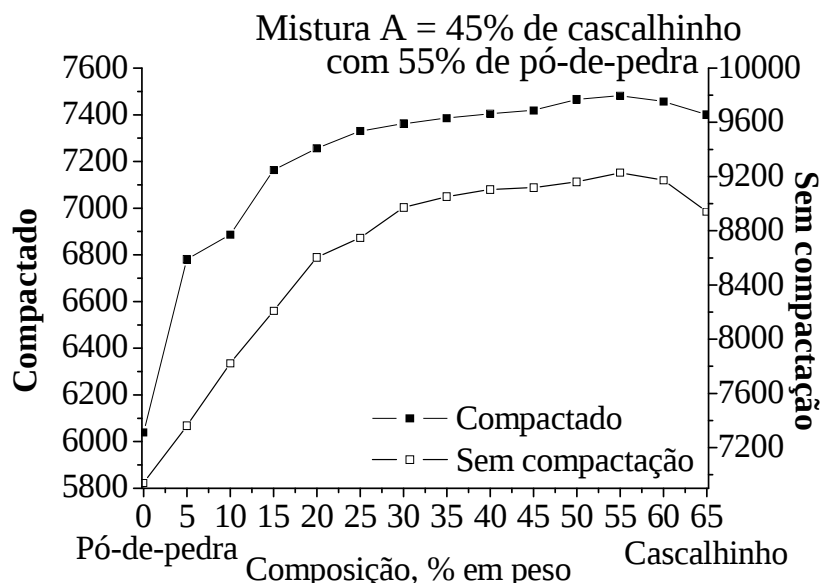
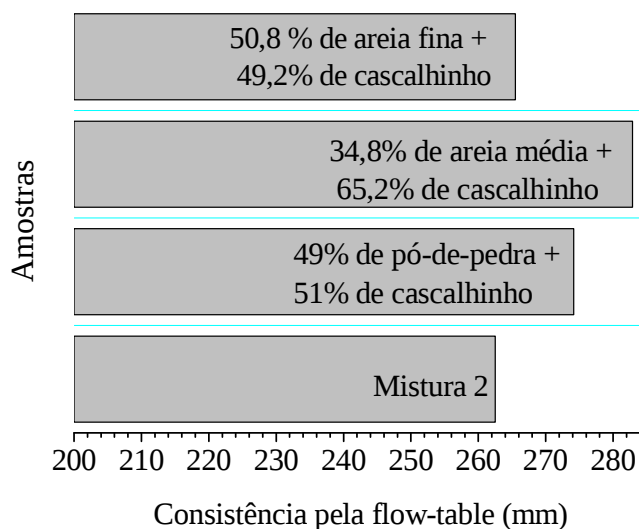


Figura 31 - Curvas de empacotamento experimental para cascalhinho e pó-de-pedra.
Fonte: Figura do autor, 2014.

As consistências (Figura 33a) bem como as resistências à compressão (Figura 33b) alcançadas nas argamassas produzidas com base: na mistura experimental 2 (mistura 1 + 30% de pó de pedra), sendo a mistura 1 = 65% de cascalhinho + 35% de areia média; comparativamente às misturas otimizadas por Andreasen: (1) 49% de pó-de-pedra + 51% de cascalhinho; (2) 34,8% de areia média + 65,2% de cascalhinho; e, (3) 50,8% de areia fina + 49,2% de cascalhinho.



Consistência pela flow-table (mm)

Figura 32 - Gráfico de consistência.

Fonte: Figura do autor, 2014.

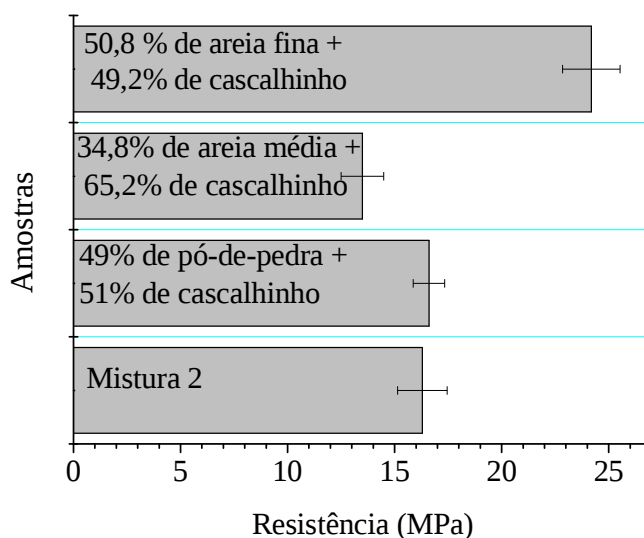


Figura 33 - Gráfico de resistência à compressão (b).
Fonte: Figura do autor, 2014.

Baseando-se no fato de que a relação água-cimento 0,78 foi dosada para se atingir a consistência padrão na argamassa na mistura experimental (Mistura 2), verifica-se na Figura 33 que para o mesmo fator água-cimento e relação cimento-agregado fixa (1:4) as misturas com 34,8% de areia média + 65,2% de cascalhinho, bem como 49% de pó-de-pedra + 51% de cascalhinho apresentaram incrementos no índice de consistência em torno de 7,76% e 4,44%, respectivamente, mostrando-se mais fluida. Esse fato é positivo, visto que vislumbra a possibilidade de redução de água nos sistemas para manter a consistência padrão das referidas argamassas, tendo como consequência o incremento nas resistências mecânicas em função da melhoria na microestrutura da pasta cimentícia. Além disso, notou-se que não houve mudanças significativas com relação à mistura 50,8% de areia fina + 49,2% de cascalhinho, em termos de índice de consistência, sendo o incremento apenas de 1,14%, saindo de 262,52 para 265,5 mm.

No que concerne às resistências mecânicas (Figura 33b), considerando os desvios-padrões nesse parâmetro, verifica-se que: houve manutenção no caso da argamassa com pó-de-pedra, incremento em termos médios de 48,5% para a argamassa com 50,8% de areia fina + 49,2% de cascalhinho e, redução em termos médios de 20,7% para a argamassa composta com 34,8% de areia média + 65,2% de cascalhinho.

Ao correlacionar a mistura experimental e as misturas otimizadas por Andreasen foi notório a redução dos índices de resistência à compressão nas amostras compostas com cascalhinho e areia média com elevação dos índices de consistência. Acredita-se que esse comportamento esteja relacionado com a menor área específica do agregado areia média, de forma que adsorveu menos água da mistura, disponibilizando mais água para as reações cimentícias, de forma que, comparativamente à argamassa experimental, houve aumento na relação água-cimento. Ratificando tal raciocínio, comportamento inverso foi observado na mistura contendo areia fina, dada sua maior área específica. Bem como, manutenção dos fenômenos no sistema com pó-de-pedra.

Além disso, deve-se levar em consideração que fenômenos de superfície, efeito rolamento, molhabilidade dos agregados, possibilidade de segregação, bem como fricção entre agregados, regerão o empacotamento e a quantidade de água disponível para reação. O empacotamento influi diretamente na quantidade de água necessária para o sistema (ROMANO *et al.*, 2009a). Se o teor de água for inferior ou igual a porosidade de empacotamento, o sistema não flui (ROMANO *et al.*, 2009a). Decaimentos na plasticidade das argamassas estão relacionados com a quantidade de água insuficiente ou diferença discrepante no tamanho de partículas (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009). Além disso, composições com maior área específica são susceptíveis ao efeito de superfície que pode ocasionar maior aglomeração das partículas (ROMANO *et al.*, 2009a) que podem ser causadas pela adsorção superficial da água, forças capilares e interação de Van der Waals (ROMANO *et al.*, 2009a; ROMANO *et al.*, 2009b).

Por fim, os traços otimizados são binários, o que tem um benefício frente ao traço quaternário utilizado pela indústria local. Com base na caracterização física dos agregados de partida, verifica-se que o módulo de finura de três dos quatro agregados existentes são bastante semelhantes: pó-de-pedra (2,54), areia fina (1,96), areia média (2,59). Comparativamente o módulo de finura do cascalhinho é de 3,73. O fato dos três módulos de finura serem semelhantes, ratifica o sistema binário indicado pelo método de Andreasen como empacotamentos ótimos. Do ponto vista industrial e ambiental, redução do custo e quantidade de área para armazenamento das matérias-primas, menos agressão ambiental com extração de areias, bem como facilidade de mistura corroboram com a utilização do sistema binário, além dos melhores empacotamentos e resistências mecânicas.

Quanto ao traço a ser definido dentro do âmbito dos otimizados por Andreasen, apesar do traço 49,2% de cascalhinho e 50,8% de areia fina ter apresentado a melhor resistência mecânica, optou-se pelo traço composto por 51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra como ideal, uma vez que os valores de resistência mecânica ainda foram relativamente altas para o fim desejado, que são blocos de concreto pré-moldados, bem como se trata da incorporação de um resíduo, corroborando com o aspecto da sustentabilidade. Ratifica-se que o agregado areia fina utilizado no experimento é de um módulo de finura muito baixo, fato tal que leva a dificuldade ambiental de adquirir esse material, logo o resíduo é um insumo que se tem permanentemente e com características físico-químicas constantes na região.

4.3.2 Energia de compactação

Após a determinação do traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra) partiu-se para a determinação da energia de compactação. A relação entre a tensão de compactação em MPa (eixo x) com o deslocamento da massa de concreto (eixo y1) e a variação do deslocamento (eixo y2) encontra-se exposta na Figura 34.

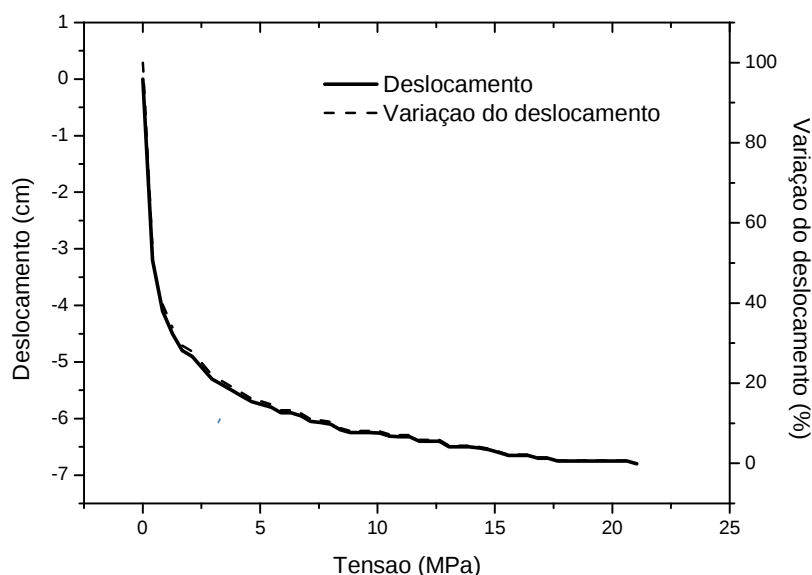


Figura 34 – Gráfico relacionando a tensão de compactação em MPa (eixo x) com o deslocamento da massa de concreto (eixo y1) e a variação do deslocamento (eixo y2).

Fonte: Figura do autor, 2014.

O ponto referente à tensão de 8,00 MPa (1.900 kgf) refere-se a uma variação do deslocamento percentual de 10,29% (2.000 kgf). Já o ponto referente a 8,42 MPa (2.000 kgf) refere-se a uma variação do deslocamento percentual de 8,82% e 8,84 MPa (2.100 kgf) de 8,09%. Acredita-se que deslocamentos abaixo de 10% não justifiquem aumento energético e de custos relativos com a tensão de compactação, para as microempresas que são foro de implantação da técnica avaliada neste trabalho, de forma que se adotou 2 tf.

4.3.3 Relação água/cimento

Após a determinação do traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra) e da energia de compactação com força de compactação de 2 tf, partiu-se para a determinação da melhor relação água/cimento.

O gráfico relacionando relação a/c (eixo x) com o a resistência à compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média encontra-se exposto na Figura 35.

Após a análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados para a escolha do fator água/cimento padrão a ser utilizado nas futuras moldagens, nota-se que houve baixa resistência à compressão para os corpos-de-prova moldados com os fatores 0,2 e 0,3, comparativamente aos corpos-de-prova moldados com o fator 0,4.

A resistência à compressão média atingida para corpos-de-prova moldados com relação a/c 0,4 foi de 22,82 MPa. Os valores médios da resistência à compressão para os traços com relação a/c 0,2 foram 56% menores que aqueles para a relação a/c 0,4, bem como cerca de 35% menores para relação a/c 0,3.

Esta diferença pode ter sido devido aos grãos anidros de cimento em função da hidratação incompleta para os fatores 0,2 e 0,3. Com o fator 0,4 dá-se a hidratação completa. Desta forma se escolheu como padrão para a continuidade da otimização do traço o fator a/c 0,4.

Salienta-se que, tátil-visualmente, no momento da desmoldagem, não foi notado grandes diferenças entre os corpos-de-prova para as diferentes relações a/c, sendo o acabamento final um pouco mais refinado para os corpos-de-prova com

relação a/c 0,4, fato que corrobora com a escolha dessa relação água/cimento como padrão.

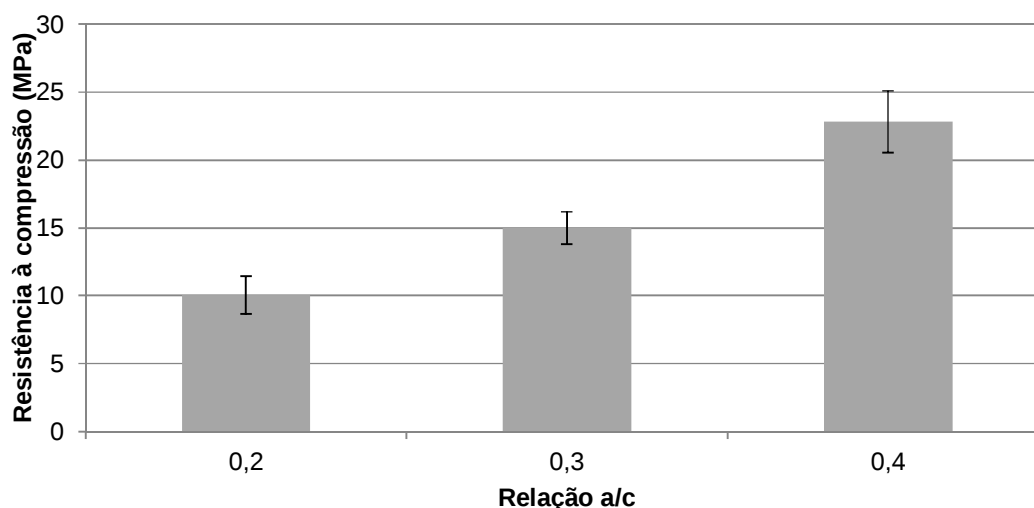


Figura 35 – Gráfico relacionando relação a/c (eixo x) com o a resistência á compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.4 Cura

Após a determinação do traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra), da energia de compactação com força de compação de 2 tf e definição da relação a/c 0,4, partiu-se para a avaliação da influência do tipo de cura.

O gráfico relacionando os diferentes tipos de cura estudados com o a resistência á compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média encontra-se exposto na Figura 36.

Após a análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados para a escolha do tipo de cura padrão a ser utilizado nas futuras moldagens, nota-se que para os corpos-de-prova moldados e curados ao ar e por aspersão houve queda nos valores de resistência à compressão, comparativamente com os corpos-de-prova moldados e curados com a cura úmida com solução de cal.

As quedas foram em torno de 55% para a cura por aspersão e 62% para a cura ao ar, quando comparados aos 22,82 MPa, a melhor resistência média à

compressão para os corpos-de-prova curados em imersão em solução saturada com cal.

As perdas nos valores de resistência à compressão podem ter sido em função da baixa relação a/c, apresentando alta retração inicial devido a evaporação da água de amassamento na cura ao ar, reduzindo ainda mais a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento, o que não ocorre nos corpos imersos totalmente em água. Processo semelhante, mas com menor intensidade, ocorre na cura sob aspersão.

Desta forma, escolheu-se como padrão a cura úmida. Deve-se salientar que tátil-visualmente, após o período de cura, não foram notadas grandes diferenças entre os corpos-de-prova para os diferentes tipos de cura.

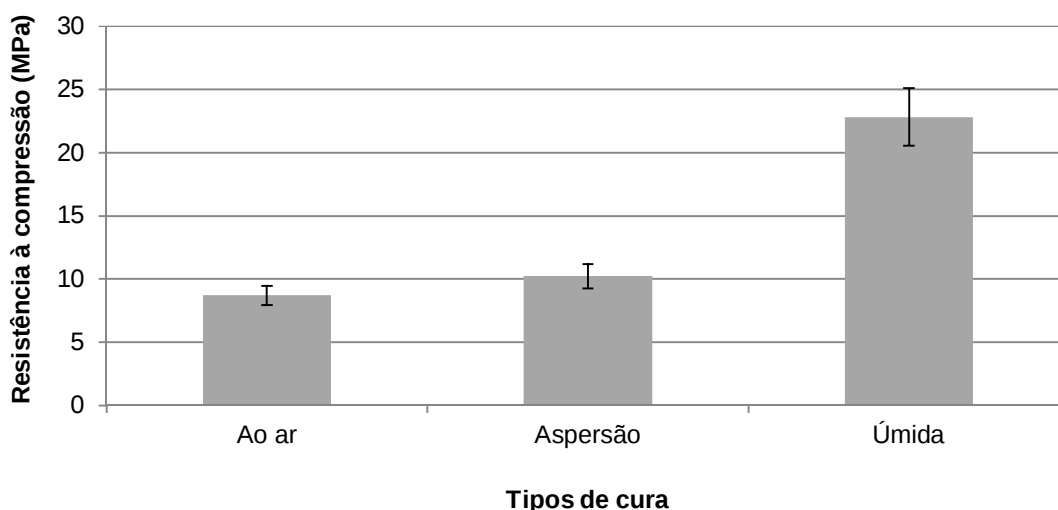


Figura 36 – Gráfico relacionando os tipos de cura com a resistência á compressão (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.
Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.5 Avaliação de como a incorporação de cinzas de Algaroba em adição (10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento) interferiu nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova

Após a determinação do traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra), da energia de compactação com força de compactação de 2 tf, definição da relação a/c 0,4 e cura úmida em água saturada

com cal, partiu-se para a avaliação da influência da incorporação de cinzas de Algaroba ao sistema.

4.3.5.1 Estado fresco (impressões tátil-visuais)

Há que salientar que tátil-visualmente, na etapa de moldagem, diferenças foram observadas entre os corpos-de-prova para os diferentes teores de cinzas. Notou-se que o acabamento superficial dos corpos-de-prova foi melhorado com o aumento da adição do teor de cinza. Em termos de trabalhabilidade da massa de concreto, foi observada melhora nesse parâmetro com adições de 5%, 10% e 20% de cinzas. Já um pouco de perda na trabalhabilidade foi observada com as adições de 30% e 40% de cinzas.

4.3.5.2 Estado endurecido

4.3.5.2.1 Resistência à compressão

O gráfico relacionando as distintas porcentagens de cinzas incorporadas ao sistema com a resistência à compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média encontra-se exposto na Figura 37.

Após a análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados para a escolha do teor de adição padrão a ser utilizado nas futuras moldagens, notou-se que para os corpos-de-prova moldados com os teores 5%, 10%, 30% e 40%, houve redução na resistência à compressão, comparativamente com os corpos-de-prova moldados com o teor de 20% de cinza em relação ao cimento.

Como pode ser visto na Figura 37, o comportamento da resistência à compressão com o incremento da adição de cinzas, indica que há um ponto ótimo para essa adição. Além disso, todos os teores possuem resistência à compressão média inferior ao corpo-de-prova padrão 0% de cinza. As reduções médias foram para teores 5% (47,20%), 10% (43,95%), 20% (22,40%), 30% (39,20%) e 40% (46,3%).

Acredita-se que a adição de 20% de cinzas em relação à massa do cimento aumente o empacotamento do sistema para o conjunto de agregados formado, atuando também como efeito fíler.

Nesse cenário, foi adotado como padrão a ser utilizado nas futuras moldagens o teor de 20% de cinza em relação ao cimento.

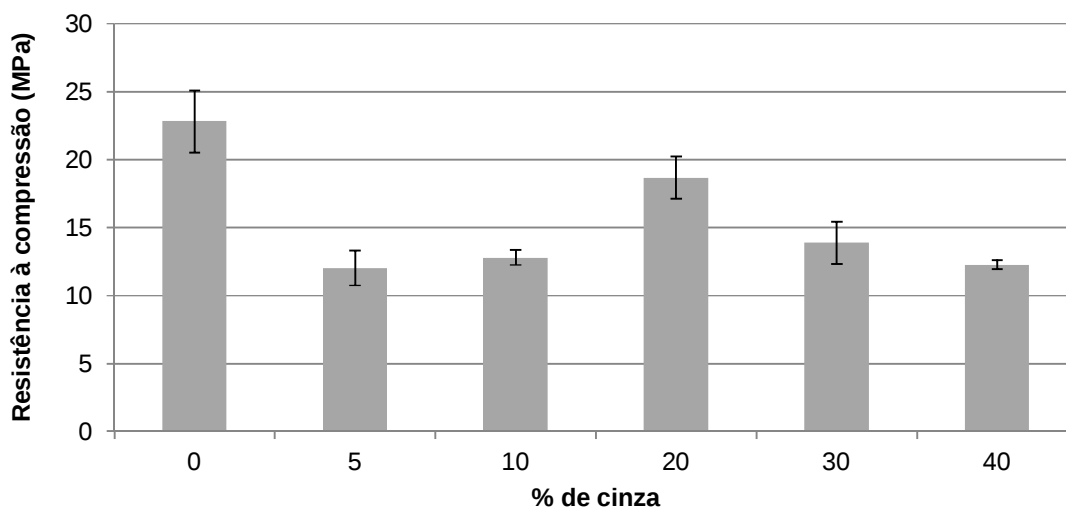


Figura 37 – Gráfico relacionando as distintas porcentagens de cinzas incorporadas ao sistema com a resistência à compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.5.2.1 Resistência à compressão com 20% de cinzas variando a relação cimento:agregados

Após a determinação do traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra), da energia de compactação com força de compactação de 2 tf, definição da relação a/c 0,4, cura úmida em água saturada com cal e 20% da incorporação de cinzas de Algaroba ao sistema, partiu-se para variação da relação cimento:agregados, buscando traços alternativos para moldagem de produtos pré-moldados a base de cimento Portland. Utilizou-se, para isto, os traços 1:8 e 1:12, que foram comparados com o traço padrão do trabalho, 1:4, e, assim, por fim, ter-se-á definidos os diferentes traços para diferentes aptidões de produtos.

O gráfico relacionando os diferentes tipos de relação cimento/agregados estudados com a resistência à compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média pode ser visualizado na Figura 38.

Após a análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados para as relações 1:8 e 1:12, comparativamente com os corpos-de-prova moldados anteriormente com a relação 1:4, nota-se que houve uma redução da resistência à compressão à medida que foram reduzidos os teores de cimento em relação aos agregados, como já esperado.

As reduções na resistência à compressão foram, em relação ao traço 1:4, da ordem de 66,8% para o traço 1:8 e 80% para o traço 1:12. No entanto, ressalta-se que os valores médios com intervalo de confiança de 95% para a média para o traço 1:8 é de 6,19 ($\pm 0,122$) MPa. Bem como, os valores médios com intervalo de confiança de 95% para a média para o traço 1:12 é de 3,77 ($\pm 0,353$) MPa.

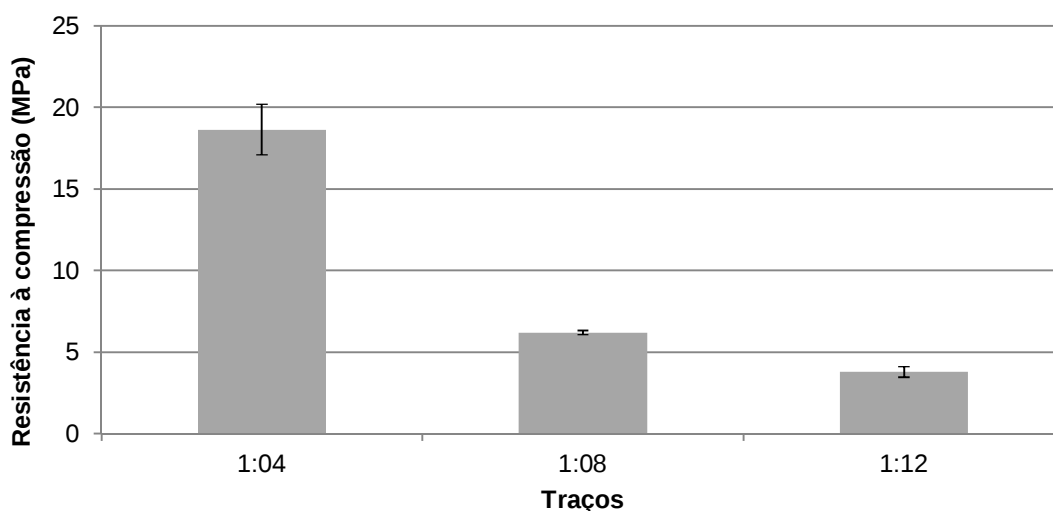


Figura 38 – Gráfico relacionando os diferentes tipos de relação cimento/agregados estudados com a resistência à compressão (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.5.2.2 Capacidade de absorção de água

Os parâmetros físicos obtidos no ensaio de absorção por imersão encontram-se compilados na Tabela 9.

Observa-se que para os parâmetros absorção e índice de vazios houve um incremento à medida que foi diminuída a relação cimento/agregado, como esperado. De maneira inversa, para os parâmetros massa específica da amostra seca e massa

específica real, houve uma pequena redução a que foi diminuída a relação cimento/ agregado. Houve uma constância para o parâmetro massa específica da amostra saturada.

Tabela 13 - Parâmetros físico obtidos no ensaio de absorção por imersão.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Absorção (%)	11,87	12,85	13,20
Índice de vazios (g/cm ³)	4,46	5,11	5,23
Massa específica da amostra seca(g/cm ³)	40,1	39,7	39,6
Massa específica da amostra saturada(g/cm ³)	44,9	44,9	44,9
Massa específica real(g/cm ³)	10,7	9,7	9,4

Fonte: Tabela do autor, 2014.

4.3.5.2.2.1 Resistência à compressão residual após ensaios de absorção de água

O gráfico relacionando os diferentes tipos de cura estudados com o a resistência á compressão residual após ensaios de absorção de água (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média encontra-se exposto na Figura 39.

Analizando os resultados do ensaio de resistência à compressão após o ensaio de absorção de água foi notada uma clara redução na resistência à compressão à medida que foi diminuída a relação cimento/ agregado, assim como se observou antes desse ensaio.

Comparativamente aos dados expostos na Figura 38, que trata dos dados de resistência à compressão antes dos ensaios de absorção capilar, observa-se que a exposição dos corpos-de-prova à estufa, seguida de imersão em água e fervura, interferiu na resistência à compressão dos sistemas.

Os valores médios reduziram de 18,64 MPa para 9,06 MPa para o traço 1:4 (com adição de 20% de cinzas), de 6,19 MPa para 3,68 MPa para o traço 1:8 (com adição de 20% de cinzas) e, por fim, de 3,77 MPa para 2,00 MPa para o traço 1:12 (com adição de 20% de cinzas). Em média, as resistências á compressão caíram na ordem de 50% nos três casos após ensaios de absorção de água.

Esse fenômeno indica que a submissão à perda de água interfere na resistência à compressão e pode estar relacionado com o fato da água contida entre as partículas em termos de adesão intercrystalina ser importante na determinação da resistência à compressão em sistemas prensados. A água confinada, que pode ter sido em parte eliminada quando da exposição a mais de 100°C, tem importante papel na adesão intercrystalina e, conseqüentemente, na resistência à compressão dos sistemas moldados sob pressão (KANNO, 2010).

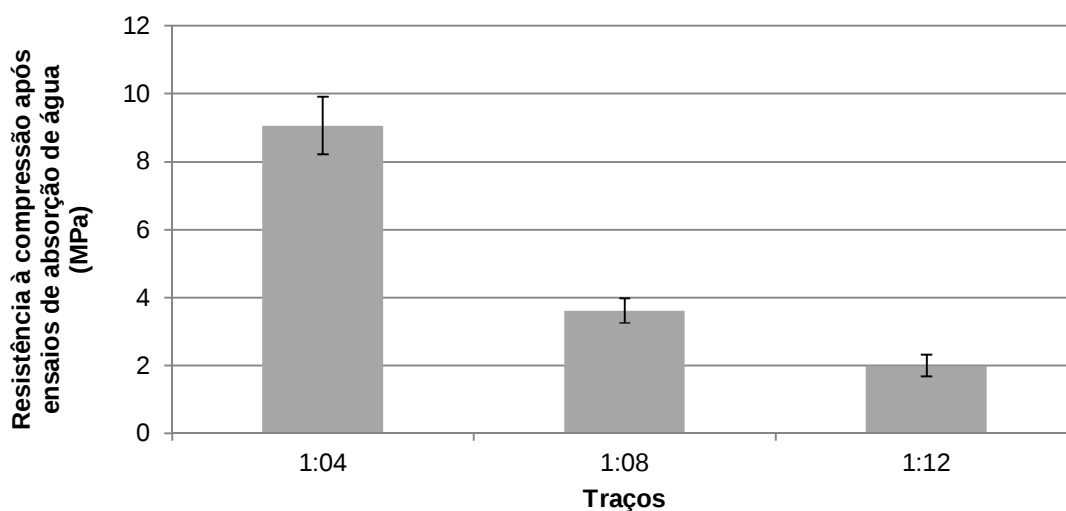


Figura 39 – Gráfico relacionando os traços estudados com o a resistência á compressão após ensaios de absorção de água (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.
Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.6 Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem

O comportamento dos corpos-de-prova frente à ciclos de molhagem e secagem foi avaliado para os sistemas com traço 1:4 com empacotamento otimizado (51% de cascalhinho e 49% de pó-de-pedra), da energia de compactação com força de compactação de 2 tf, definição da relação a/c 0,4, cura úmida em água saturada com cal e 20% da incorporação de cinzas de Algaroba ao sistema.

Os parâmetros físicos obtidos no ensaio ciclagem após o 1º ciclo, 2º ciclo, 3º ciclo, 4º ciclo e 5º ciclo encontram-se compilados nas Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, respectivamente. Os parâmetros abordados foram: variação de volume (%), variação de umidade (%), porcentagem de água retida no

corpo-de-prova (%), massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g) e perda de massa do corpo-de-prova (%).

Verifica-se, prioritariamente, que não houve perda de massa após nenhum dos ciclos, para nenhuma das amostras (1:4, 1:8 ou 1:12, com adição de 20% de cinzas), o que demonstra a compacidade do sistema.

A variação de volume (%), a variação de umidade (%) e a porcentagem de água retida no corpo-de-prova (%) encontram-se graficamente representados na sequência, respectivamente, nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42. Verifica-se que a variação de volume aumenta com as ciclagens e com a relação cimento/agregados (1:4 → 1:8 → 1:12). No entanto, o gráfico exposto na Figura 41, de variação de umidade, indica esse parâmetro bem semelhante para os três traços, principalmente nos primeiros ciclos. Por fim, o traço 1:4 foi o que teve maior capacidade de reter água nos seus poros, seguido do 1:8 e 1:12.

Tabela 14 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 1º ciclo.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Variação de volume (%)	0,81	1,02	1,18
Variação de umidade (%)	6,82	7	7,07
Água retida no corpo-de-prova (%)	-0,183	-0,126	-0,208
Massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g)	673,79	656,43	603,79
Perda de massa do corpo-de-prova(%)	0	0	0

Fonte: Tabela do autor, 2014

Tabela 15 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 2º ciclo.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Variação de volume (%)	1,24	1,68	1,77
Variação de umidade (%)	6,76	6,97	6,97
Água retida no corpo-de-prova (%)	-0,375	-0,225	-0,263
Massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g)	673,79	656,43	603,79
Perda de massa do corpo-de-prova(%)	0	0	0

Fonte: Tabela do autor, 2014.

Tabela 16 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 3º ciclo.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Variação de volume (%)	1,68	2,18	2,27
Variação de umidade (%)	6,80	6,91	6,92
Água retida no corpo-de-prova (%)	-0,638	-0,258	-0,298
Massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g)	673,79	656,43	603,79
Perda de massa do corpo-de-prova(%)	0	0	0

Fonte: Tabela do autor, 2014

Tabela 17 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 4º ciclo.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Variação de volume (%)	2,07	2,56	2,68
Variação de umidade (%)	6,00	6,01	6,01
Água retida no corpo-de-prova (%)	-0,73	-0,288	-0,303
Massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g)	673,79	656,43	603,79
Perda de massa do corpo-de-prova(%)	0	0	0

Fonte: Tabela do autor, 2014

Tabela 18 - Parâmetros físico obtidos no ensaio ciclagem após o 5º ciclo.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Variação de volume (%)	2,43	3,05	3,97
Variação de umidade (%)	6,00	5,19	5,05
Água retida no corpo-de-prova (%)	-0,826	-0,353	-0,351
Massa seca final corrigida do corpo-de-prova(g)	673,79	656,43	603,79
Perda de massa do corpo-de-prova(%)	0	0	0

Fonte: Tabela do autor, 2014.

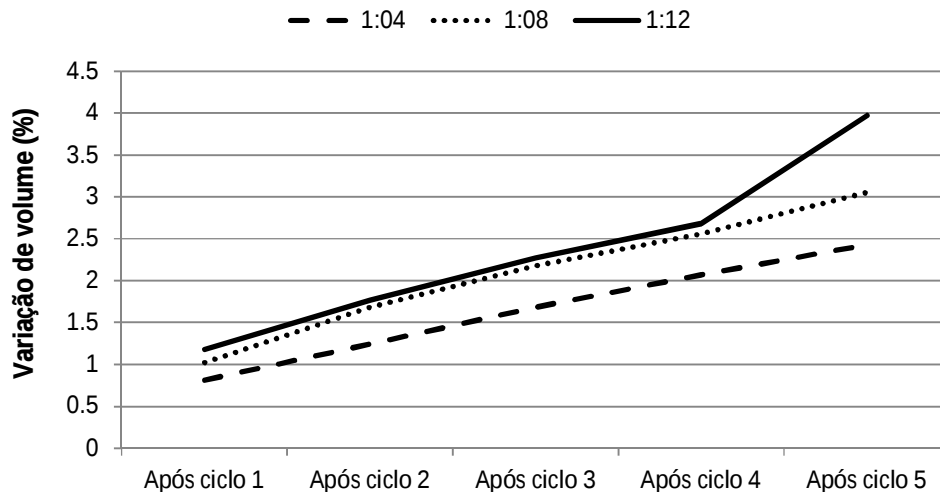


Figura 40 – Variação de volume nos traços após cada um dos ciclos higrotérmicos.

Fonte: Figura do autor, 2014.

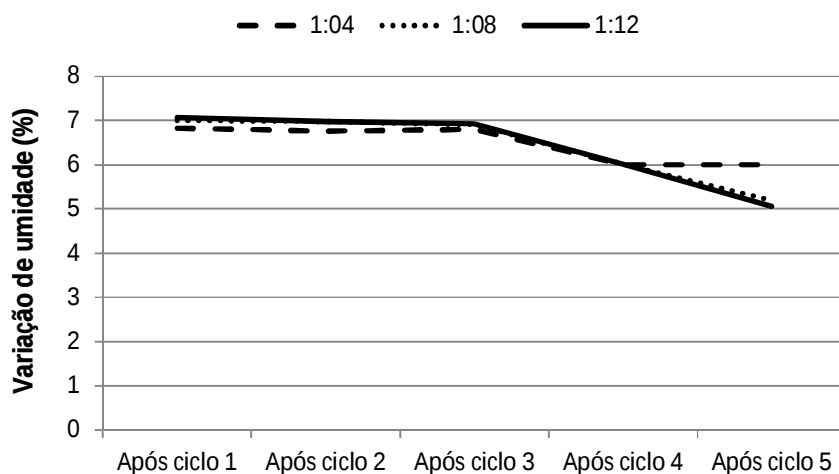


Figura 41 – Variação de umidade nos distintos traços após os ciclos higrotérmicos.
Fonte: Figura do autor, 2014.

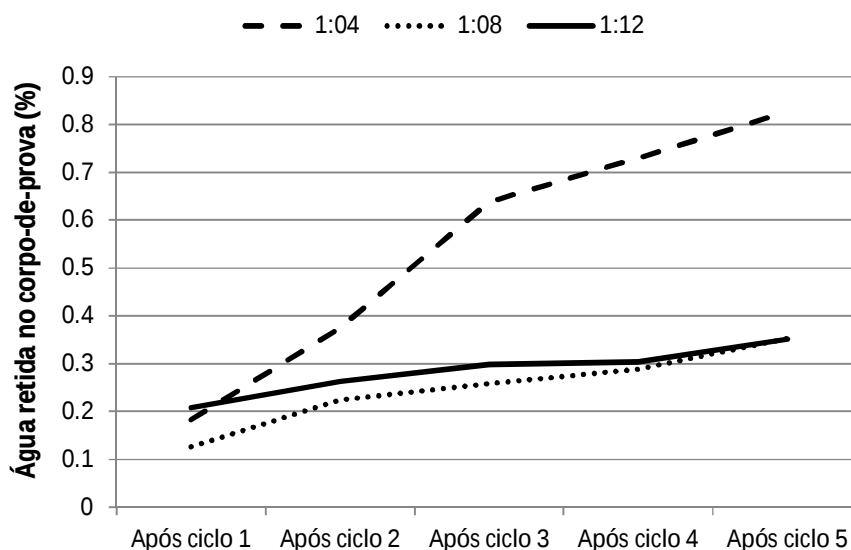


Figura 42 – Quantidade de água retida nos traços após os ciclos higrotérmicos.
Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.6.1.1 Resistência à compressão residual após ensaios de molhagem e secagem

O gráfico relacionando os diferentes traços estudados com a resistência à compressão residual após ensaios de molhagem e secagem (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média pode ser visualizado na Figura 43. Analisando os resultados do ensaio de resistência à compressão após o ensaio de

ciclagem, nota-se uma clara redução na resistência à compressão à medida que foi diminuída a relação cimento/ agregado.

Os valores médios de resistência à compressão reduziram de 18,64 MPa para 7,33 MPa, lembrando que após ensaios de absorção de água, eram de 9,06 MPa, quando do traço 1:4. Para o traço 1:8 os valores foram reduziram de 6,19 MPa para 3,55 MPa (3,68 MPa após absorção). Para o traço 1:12 os valores foram de 3,77 MPa para 2,57 MPa (2,00 MPa após absorção).

Os ensaios de absorção de água foram quase tão deletérios à resistência à compressão dos corpos-de-prova que os ensaios de cinco ciclos hidrotérmico. Acredita-se que tenha sido em função da temperatura de exposição dos corpos-de-prova no ensaio de absorção de água ser superior a 100°C, contra 71°C médio nas ciclagens, interferindo na presença da água confinada no sistema (KANNO, 2010).

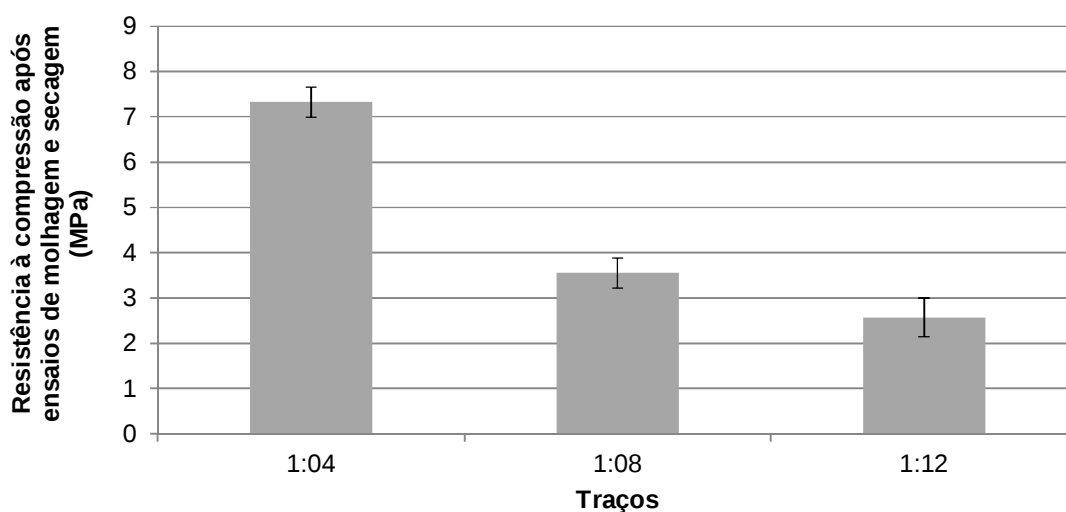


Figura 43 – Resistência à compressão após ensaios de molhagem e secagem (eixo y), com intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.6.1.2 Capacidade de absorção de água residual após ciclagem

Os parâmetros físicos médios obtidos no ensaio de absorção por imersão após o ensaio de ciclagem encontram-se expostos na Tabela 19. Analisando os resultados do ensaio de absorção por imersão após ciclagem foi observado que para os parâmetros absorção e índice de vazios houve um incremento à medida que foi diminuída a relação cimento/ agregado. De maneira inversa, para os parâmetros massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa

específica real, houve uma pequena redução a que foi diminuída a relação cimento/agregado. Houve uma constância para o parâmetro massa específica da amostra saturada. Esse comportamento foi semelhante ao observado quando da realização dos ensaios de absorção de água antes do emprego das ciclagens higrotérmicas.

No entanto, comparativamente, houve incrementos nos valores das absorções de água antes (após moldagem) e após a exposição dos corpos-de-prova aos ciclos de molhagem e secagem, conforme pode ser visto nos valores expressos na Tabela 20 e Figura 44, embora nenhuma perda de massa tenha sido observada nos corpos-de-prova após ciclagens higrotérmicas.

Tabela 19 - Parâmetros físicos médios obtidos no ensaio de absorção por imersão após o ensaio de ciclagem.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Absorção (%)	13,06	13,48	14,40
Índice de vazios (g/cm^3)	5,79	6,09	6,25
Massa específica da amostra seca (g/cm^3)	45,8	45,2	43,4
Massa específica da amostra saturada (g/cm^3)	51,7	51,3	49,7
Massa específica real (g/cm^3)	9,2	8,9	8,3

Fonte: o autor.

Tabela 20 – Absorção de água obtida no ensaio de absorção por imersão após moldagem e após o ensaio de ciclagem.

Parâmetro	Resultado		
	Amostra 1:4	Amostra 1:8	Amostra 1:12
Absorção após moldagem (%)	11,87	12,85	13,20
Absorção após ciclagens higrotérmicas (%)	13,06	13,48	14,40

Fonte: o autor.

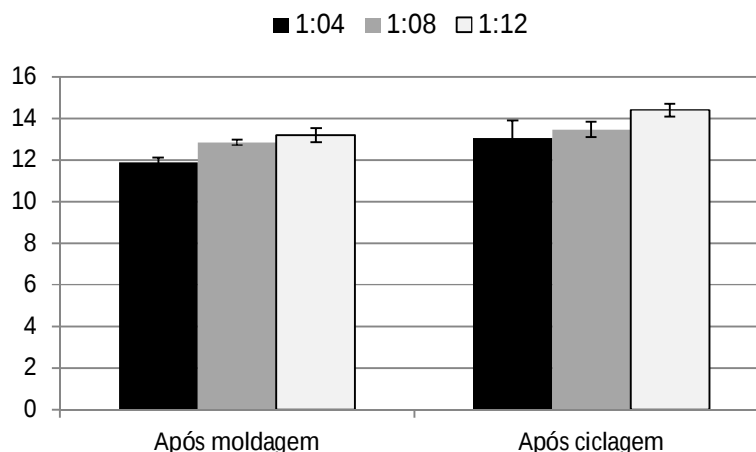


Figura 44 – Absorção de água obtida no ensaio de absorção por imersão após moldagem e ciclagem.

Fonte: Figura do autor, 2014.

4.3.6.1.3 Resistência à compressão residual após ensaios de molhagem e secagem seguido de absorção de água

O gráfico relacionando os diferentes tipos de cura estudados com o a resistência á compressão residual após ensaios de molhagem e secagem seguidos de absorção de água (eixo y), com devidos intervalos de confiança de 95% para a média pode ser visualizado na Figura 45.

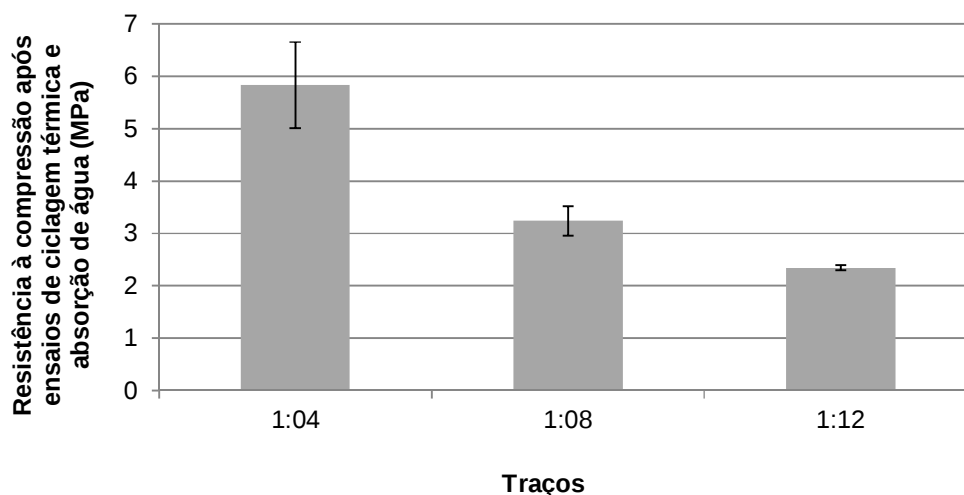


Figura 45 – Resistência á compressão após ensaios de ciclagem seguidos de absorção de água (eixo y), intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

Analisando os resultados do ensaio de resistência à compressão após o ensaio de ciclagem seguido de absorção de água notamos uma clara redução na resistência à compressão à medida que foi diminuída a relação cimento/ agregado, assim como foi notável à redução nas resistências à compressão após o novo ciclo de absorção de água. Esse comportamento foi semelhante ao observado quando, isoladamente, submeteram-se os corpos-de-prova somente ao ensaio de absorção de água ou aos ensaios de ciclagens higrótérmicas.

No entanto, comparativamente aos dados expostos no gráfico da Figura 43, houve uma redução ainda maior quando os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de absorção de água após as ciclagens. Os dados médios indicam que caiu de 7,33 MPa par 5,83 MPa (1:4), 3,55 MPa para 3,24 MPa (1:8) e 2,57 MPa para 2,34 MPa (1:12).

4.3.1 Avaliação global da resistência à compressão

O gráfico relacionando a resistência à compressão após moldagem, após absorção de água, após molhagem e secagem e após ciclagem e absorção de água, comparativamente, com devidos intervalos de confiança de 95% para a média encontram-se exposto na Figura 46.

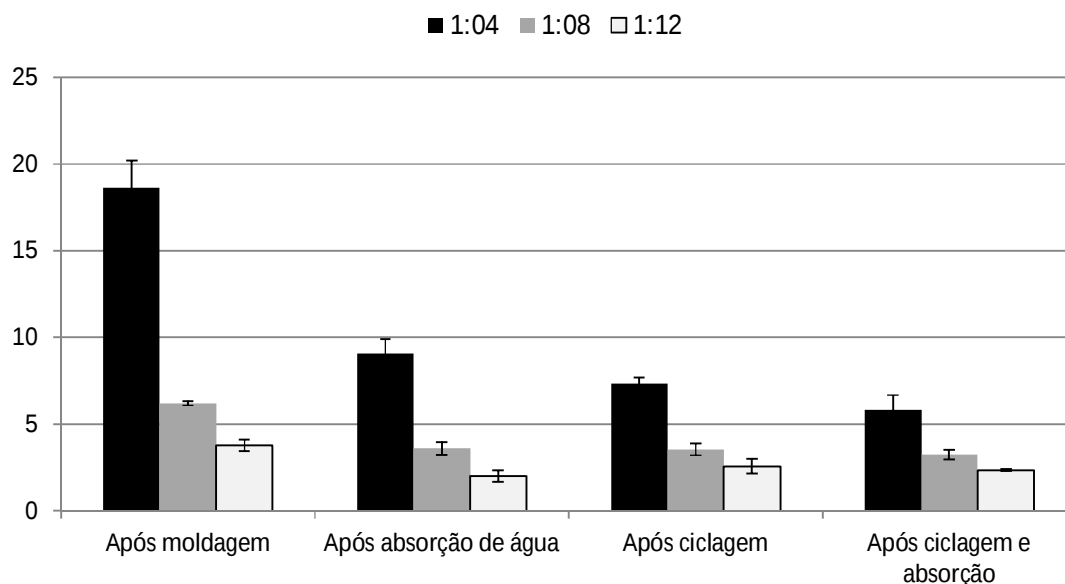


Figura 46 – Resistências à compressão após moldagem, absorção de água, ciclagem e ciclagem com absorção de água, comparativamente, com intervalos de confiança de 95% para a média.

Fonte: Figura do autor, 2014.

Analisando o resultado global dos ensaios de resistência à compressão após todos os ensaios, nota-se uma clara redução na resistência à compressão à medida que os ensaios foram sendo realizados, além da redução com a diminuição da relação cimento/ agregado, já relatado anteriormente.

No entanto, destaca-se, também, que a integridade dos corpos-de-prova se manteve durante todas as etapas do processo.

Ainda analisando estes resultados, confiamos com base nos resultados, na aplicabilidade desta metodologia com e sem a utilização do resíduo, na moldagem de produtos pré-moldados de concreto.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um concreto seco moldado sob pressão, com a utilização de um resíduo de cinzas de Algaroba, para utilização em produtos pré-moldados de concreto a base de cimento Portland. A falta da vibro-compressão foi compensada pelos processos de adensamento ótimo de partículas, atrelados à relação água/cimento, cura e pressão ótima de compactação para as condições estudadas. Ainda foi possível moldar corpos-de-prova com menores relações cimento:agregados (1:8, 1:12), comparativamente ao traço 1:4, empregando os mesmos parâmetros de moldagem. Todos os traços estudados são aptos para moldagem de produtos pré-moldados.

Conclui-se que é possível a moldagem de concretos secos otimizados apenas sob pressão com forças de compactação de 2.000 kgf nos traços com relações cimento/agregados 1:4, 1:8 e 1:12 e adições de 20% de cinzas de Algaroba. Para esses traços, adotando relação água/cimento 0,4 e cura úmida, resistência da ordem de 20 MPa a 3,5 MPa foram obtidas, podendo ser utilizados de acordo com as distintas aplicações em pré-moldados.

As seguintes conclusões pontuais respondem a cada um dos objetivos específicos propostos:

- **Caracterização físico-química das cinzas de Algaroba:** As cinzas de Algaroba são ricas em carbonato de cálcio, não apresentando óxidos expansivos e de morfologia esférica com superfície irregular, possuem um módulo de finura baixo, fato que justifica sua utilização como fíler na mistura, além de uma cor muito similar a do cimento Portland fator positivo para sua utilização.
- **Otimização do traço: com empacotamento (métodos experimentais e matemáticos); escolha do fator água/cimento (0,20; 0,30 e 0,40); escolha da energia de compactação ótima utilizando a prensa hidráulica e testar as diferentes curas (imersão, úmida por aspersão e ao ar) utilizando as matérias-primas regionais:** O método matemático de Andreasen (1930), respondeu positivamente para os empacotamentos do trabalho (51%

de cascalhinho e 49% de pó de pedra), assim como o fator a/c 0,40, com energia de compactação de 2 Tf, e a cura úmida por imersão, utilizando as matérias-primas regionais, otimizaram as propriedades do sistema.

- **Avaliar como a incorporação de cinzas de Algaroba em adição (5%,10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento) interfere nas propriedades dos estados fresco e endurecido dos corpos-de-prova:**

- o **Avaliação do concreto no estado fresco**

A utilização das cinzas tornaram a mistura mais trabalhável até 20% de adição, após esta concentração a mistura ganhou consistência, perdendo trabalhabilidade na moldagem. Na desforma não houve grandes alterações na superfície dos corpos de prova, porém notamos um melhor acabamento superficial em relação aos corpos-de-prova sem a utilização do resíduo.

- o **Avaliação do concreto no estado endurecido**

Com a utilização das cinzas houve uma diminuição na resistência mecânica dos corpos-de-prova, porém com 20% de resíduo houve o melhor desempenho mecânico entre as adições.

- o **Avaliar a viabilidade da aplicação do método em corpos de prova moldados com traços variando o teor cimento: agregado, (1:4), (1:8) e (1:12)**

Para esses traços, adotando relação água/cimento 0,4 e cura úmida, resistência da ordem de 20 MPa a 3,5 MPa foram obtidas, podendo ser utilizados de acordo com as distintas aplicações em pré-moldados.

o **Avaliação do comportamento dos corpos-de-prova após o ensaio de absorção de água por imersão:**

Os índices físicos de absorção ficaram acima de 10%, realizado segundo a norma NBR 9778:2006.

o **Avaliação do comportamento dos corpos-de-prova sob ciclos de molhagem e secagem:**

Os ensaios de durabilidade demonstraram a capacidade dos corpos-de-prova resistirem as mudanças higrotérmicas em cinco ciclos, mantendo sua integridade física em todas as etapas do processo. No entanto, houve um decréscimo gradual nas suas resistências mecânicas após os ensaios de absorção, ciclagem e ciclagem com absorção, respectivamente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Trabalhar com cinza de Algoroba beneficiadas através de peneiramento em malha 300, assim como em peneiras maiores.
- Moldar e avaliar blocos de concreto para pavimentação, revestimento e outros tipos de produtos pré-moldados, utilizando a metodologia proposta sob pressão.
- Avaliar microestruturalmente os concretos endurecidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Alvenaria com blocos de concreto – como escolher e controlar a qualidade dos blocos – prática recomendada PR – 1. Autoria:** Grupo de Especialistas da ABCP. **Coordenação:** Marcio Santos Faria

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto - procedimento . Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6136:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215:** cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7531:** Anel de borracha destinado a tubos de concreto simples ou armado para esgotos sanitários - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 8890:** Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 9062:** projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldadas. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 9778:** argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____. **NBR 10004:** resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12118:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12653:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12655:** materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12821:** preparo de concreto em laboratório - procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13554:** solo cimento – ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14931:** execução de estruturas de concreto - procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15953:** pavimento intertravado com peças de concreto - execução. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 45:** agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

COMITÉ EURO INTERNACIONAL DU BÉTON – CEB. Durable concrete structure, Second edition, *Boletim n.183*, 1992.

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. **Chicago, Structural Materials research Laboratory**, v., n., p., 1918.

AİTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000

ALVES, J. D. **Blocos pré-moldados de concreto**. Goiania, 2004

ANDREASEN, A. H. M., ANDERSEN J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Z**, v. 50, n., p. 217-228, 1930.

BAJZA, A. **On the factors influencing the strength of cement compacts.**: secondary title, 1972. 2, 67-78 p.

BARBOSA, C. S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M.; SALLES, F. M.; SILVA, V. M. **A influência do processo de cura nas propriedades mecânicas dos concretos de elevado desempenho.**: secondary title, 1999. 41.

BATTAGIN, A. F. C., R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C. . Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte, p.

BAUER, L. A. F. C., R.; MARTINS, A.; TAKASHIMA, S. **Estudo de característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura**: secondary title, 1999. 41.

BAYEUX, P. **Custos na parede**: secondary title, 2000. 48, 32-37 p.

BITTENCOURT, B. A. **Moldagem por compressão a frio do polietileno de ultra alto peso molecular**. 2008. (Mestrado). Centro de ciência e tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

BONNEAU, O.; VERNET, C.; MORANVILLE, M.; AÏTCIN, P.-C. Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 12, p. 1861-1867, 2000.

BORTOLUZZO, C. W. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico dos revestimentos de argamassa**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: 41º Congresso brasileiro de concreto, 1999, Salvador, p.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 748–753, 2009.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview**.: secondary title, 2011. 55, 669-685 p.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil Lisboa, 1997. 342 p.

COUTO, A. B. P. **Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos**. Escola de engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003. 151 p.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994.

DEBIEBE, F.; KENAI, S. **The use of course and fine crushed bricks as aggregate in concrete**.: secondary title, 2008. 22, 886-893 p.

DINGER, D. R., FUNK, J. E. Particles packing. Part I - Fundamentals of particle packing mosdisperse spheres. **Interceram**, v. 41, n. 1, p. 10-14, 1992.

DOWNSON, A. Mix Design for Concrete Block Paving. Procedures 1st International Conference on CBP, 1980. p.121-127.

DURAN, J. **Sands, Powders and Grains: An introduction to the physics of granular materials**. Nova Iorque: Verlag New York, 2000

FAGUNDES, G. S. R. **Apostila sobre madeiras**. Tubarão: Publisher(Apostila da disciplina de estrutura de madeira do curso de engenharia civil).

FERNANDEZ, I. D. **Blocos e Paver – Produção e Controle de Qualidade**. Ribeirão Preto 2008.

FERREIRA JUNIOR, S. **Produção de blocos de concreto para alvenaria**: secondary title. São Paulo, 1995. 103.

FORMIGONI, E. A. Aproveitamento de resíduo: reciclagem de rochas naturais., v., n., p., 2007.

FRANCO, L. S. E. A. **Desenvolvimento de um método construtivo de alvenaria de vedação**. POLI-SICAL, EPUSP-PCC, São Paulo, 1994.

FRANSSON JR, A. O., A. L.; PRUDÊNCIO, L. R. **Caderno técnico alvenaria estrutural** secondary title. 10, 31-38 p.

FREIDIN, C. **Cementless pressed blocks from waste products of coal-firing power station**.: secondary title, 2007. 21, 12-18 p.

GARCIA, T. L. N., V. C.; ALVES, J. D.; BARROS, B. C.; RODRIGUES, C. S. G.; PEREIRA, E. A. A.; ATAÍDES, R. L. A. Substituição de parte do cimento por finos inertes de pedreira em concreto com baixo fator a/c. In: IV seminário de iniciação científica, 2006, p.

GAZOLA, A. P. **Argamassa de assentamento e revestimento fabricadas com compósito de cimento-madeira: Serragem da madeira *Pinus Taeda***., UNISUL, Araranguá, 2007.

GOMÁ, F. **El cemento Portland y otros aglomerantes. Fundamentos para la interpretación de sus comportamientos en obra**. Editores Técnicos Asociados, S.A.Barcelona, 1979.

GONSALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GROSSI, P. **Selo de qualidade ABCP.: Seminário nacional sobre blocos de concreto para alvenaria e pavimentação**.: secondary title, 2001.

GUÉRON, A. L. G., V. **Móveis e madeira com potencial para crescer**.: secondary title, 2005. 15, 4 p.

HALLACK.A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. (Mestrado). Universidade de São Paulo São Paulo.

HELENE, P. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, 1993

HELENE, P. L.; TIBÉRIO, A. Concreto de Cimento Portland. In: Isaia, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto - IBRACON, 2010. v.29, p.905-944.

HELENE, P. R. L. **Notas de aula do curso de graduação de engenharia civil da EPUSP**: secondary title. São Paulo, 1979.

ISAIA, G. C. G., A. L. G.; MORAES, R. **Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete**.: secondary title, 2003. 25, 65-72 p.

JANKOVIC, K. N., D.; BOJOVIC, D. **Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate**.: secondary title, 2012. 28, 659-663 p.

JUVAS, K. Very dry precasting concrete. Special Concretes: Workability and Mixing. Proceeding of the International RILEM Workshop, 1993. London. p.153-168.

KANNO, W. M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

KENITIRO, S. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. **Stratigraphy and Asedimentation**.: WH Freemam, 1963. 660 p.

LELOUP, W. A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. Núcleo de tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013. 100 p.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: Estudo de caso da cinza da casca da castanha de cajú**. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LISBOA, E. M. G., P. C. C.; BARBOSA, A. S. R.; LIMA, F. B.; LAMEIRAS, R. M. A. Utilização de resíduo proveniente do beneficiamento de blocos de granito em materiais à base de cimento Portland. In: **Congresso brasileiro de ciências e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável**., 2004, Costão do Santinho, Florianópolis (SC), p.

MARCHAND, J. H., H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. **The microstructure of dry concrete products**.: secondary title, 1996. 26, 427-438 p.

MCGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n., p. 513-522, 1961.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componente e parâmetros de projeto**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 449 p.

MEHTA, P. K. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 1994

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de Algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano.** Núcleo de tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MENDES, J. C.; BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. **Estratigrafia e sedimentologia; geologia estrutural, aerofotogeometria.** Brasília: Instituto nacional do livro, 1972

MENZEL, C. A. **Test of the Fire Resistance and Strenth of Walls os Concrete Masonry Units.**: secondary title. Belo Horizonte, 1934.

MESQUITA, L. P.; WILLRICJ, F. L.; LIMA JÚNIOR, H. C. Yhe use of mathematical particle packing models on the casing of high strenght micro concrete. In: Symposium Structural Concrete and Time, 2005, La plata, p.

MESQUITA, L. P., WILLRICJ, F. L., LIMA JÚNIOR, H. C. **The use of mathematical particle packing models on the casting of high strenght micro concrete:** secondary title. La Plata, 2005.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOURA, L. S.; NÓBREGA, A. C. V.; MELO, M. C. S.; BARBOSA, A. A. S.; MARINHO, E. P. **Caracterização da atividade pozolânica das cinzas de Algaroba produzidas sob diferentes temperaturas.** Núcleo de tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

NASCIMENTO, J. E. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de Algaroba em argamassas de revestimento.** Núcleo de tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

NEVILLE, A. M. **Retracción.** Instituto Eduardo Torroja – IET, Curso de Estudios Mayores de la Construcción- CEMCO, Madrid, 1976.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997

OHAMA. In: 2nd Internacional CANMET/ACI Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 1986, Madrid, p.

OLIVEIRA, A. L.; ANSELMO JR, L. R. Influência da alteração de geometria de blocos de concreto na eficiência de prismas de alvenaria. In: VII Internacional seminar on structural mansory for developing countries, 2002, Belo Horizonte, p. 43-50.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** 2004. 296 (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; LIRA, H. L.; MELO, A. B.; NEVES, G. A. Durabilidade de Compósitos de Concreto de Cimento Portland Produzidos com Agregados Reciclados da Construção Civil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 1, n. 2, p. 30-36, 2006.

OLIVEIRA, F. L. **Reabilitação de estruturas de alvenaria para aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São paulo, São Carlos, 2001.

PFEIFFENBERGER, L. E. **Aggregate graduations used for various products formed on the block**

machine. Besser Block.: secondary title. Alpena, 1985, 3-5 p.

PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B. **Aplicação de diferentes procedimentos de cura no concreto de alto desempenho (CAD):** secondary title, 2003. 431, 9-13 p.

PIOROTTI, J. L. **Pavimentação intertravada.** Rio de Janeiro: Montana, 1989

POON, C. S.; LAM, C. S. **The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the proprieties of pre-cast concrete blocks.:** secondary title, 2008. 30, 283-289 p.

RAUT, S. P.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. **Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid wast: A review of waste- create bricks.:** secondary title, 2011. 25, 4037-4042 p.

ROCHA, J. C. J., V. M. Utilização de resíduos na construção habitacional. In: John, V. M. (Ed.). **Utilização de resíduos na construção habitacional.** Porto alegre, 2003,

RODRIGUES, P. P. F. Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. In: IBRACON, Reunião Anual, 1984. São Paulo.

RODRIGUES, P. P. F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação- Prática recomendada.** São Paulo, 1995. 15 p. (ABCP)

ROESSLER, M. O. I. **Investigation on the relationship between porosity, structure and strength of hidrated Portland cement pastes. I. Effect of porosity.:** secondary title, 1985. 15, 320-330 p.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 109-118, 2009a.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Sensibilidade de argamassas de revestimento ao procedimento de mistura. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas - VII SBTA, 2009b, Curitiba - PR, p.

ROY, D. M.; R., G. G.; A., B. **Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques.:** secondary title, 1972. 2, 807-820 p.

ROY, D. M.; R., G. G. **High strength generation of cement pastes.:** secondary title, 1973. 3, 349-366 p.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. **Journal of Materials Education**, v. 15, n., p. 1-16, 1993.

SIDDIQUE, R. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing**.: secondary title, 2012. 67, 27-33 p.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SJÖSTRÖM APUD ROCHA, J. C. J., V. M. **Utilização de resíduo na construção habitacional**. Porto Alegre: Antac, 2003

SOBOLEV, K. The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 7, p. 901-907, 2004.

STROEVEN, P.; HE, H.; GUO, Z.; STROEVEN, M. Particle packing in a model concrete at different levels of the microstructure: Evidence of an intrinsic patchy nature. **Materials Characterization**, v. 60, n. 10, p. 1088-1092, 2009.

TANGO, C. E. S. **Blocos de concreto: dosagem, produção e controle de qualidade**. São Paulo, 1984, v.1

TANGO, C. E. S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: 5th Internacional seminar on structural masonry for development countries., 1994, Florianópolis, p. 21-30.

TERZIAN, P. **Prevenção de fissuras por retração plástica de origem climática em pavimentos, pisos e lajes de concreto**.: secondary title, 2007.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 (Doutorado). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

WADEL, H. Sphericity and roundness of quartz particles. **Journal of Geology**, v. 41, n., p. 310-331, 1933.

WILK, B.; GRANT, W. Proportioning Concrete for Product Plants. Rock Products., v., n., p. 172-176, 1948.

YU, A. B.; STANDISH, N. An analytical—parametric theory of the random packing of particles. **Powder Technology**, v. 55, n. 3, p. 171-186, 1988.

YU, A. B.; STANDISH, N. A study of the packing of particles with a mixture size distribution. **Powder Technology**, v. 76, n. 2, p. 113-124, 1993.

ZAIN, M. F. M.; RADIN, S. S. **Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperatura range 20°C to 50°C**.: secondary title, 2000. 30, 1283-1287 p.

ZHONGZI XU, M. T., BEAUDOIN J. J. **Relation between composition, structure and mechanical properties of very low porosity cementitious systems.:** secondary title, 1993. 23, 187-195 p.

ŽIVICA, V.; KRIŽMA, M. Dependence of efficiency of pressure compaction on the cement type used. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3073-3077, 2011.