



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
(PPMEC)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI (UFSJ)

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO (ISOPOR) EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Lívia Souza de Oliveira

São João del-Rei, 28 de março de 2013



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
(PPMEC)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI (UFSJ)

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO (ISOPOR) EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Kurt Strecker

São João Del Rei, 28 de março de 2013

Oliveira, Livia Souza de

O48r Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido(isopor) em compósitos cimentícios

[manuscrito] / Livia Souza de Oliveira. – 2013.

75f. ; il.

Orientador: Kurt Strecker

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del-Rei. Departamento de Engenharia
Mecânica .



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI (UFSJ)

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO (ISOPOR) EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Autor: Livia Souza de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Kurt Strecker

A Banca Examinadora, composta pelos membros examinadores abaixo, considerou aprovada esta Dissertação.

**Prof. Dr. Kurt Strecker – Presidente da Banca
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)**

**Prof. Dr. Túlio Hallak Panzera
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)**

**Prof. Dr. Simone Pereira Taguchi Borges
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)**

São João Del Rei, 28 de março de 2013

"O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém."

Dalai Lama

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar fé, perseverança e saúde para chegar ao fim deste empreendimento.

Aos meus pais, Mauri e Glória, que possibilitaram a minha educação desde a minha infância, valores e amor incondicional.

Ao Prof. Dr. Kurt Strecker, que como orientador e amigo soube cobrar, mas também não mediu esforços em oferecer todas as condições necessárias à realização do presente trabalho.

Aos meus irmãos, Lidiane, Liliane e Luciano, pelo carinho, paciência e incentivo.

Aos meus cunhados, Gunther e Felipe, pela motivação.

Aos técnicos Emílio e Francisco pelo auxílio na execução dos ensaios mecânicos realizados na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação (PPMEC) da UFSJ por todo o auxílio prestado.

Aos amigos, pelo apoio técnico e moral recebido durante o desenvolvimento desse trabalho.

DEDICATÓRIA

À Deus, minha família, amigos, colegas de trabalho e orientador pelo apoio, força, incentivo, companheirismo e amizade. Sem eles nada disso seria possível.

RESUMO

O poliestireno expandido (EPS) ou Isopor resulta na decomposição do material em aterros sanitários, ocupando espaço; além de um longo tempo de decomposição. Este trabalho objetiva investigar o efeito da adição de resíduos de isopor em compósitos cimentícios, variando o teor da água (40e 50% em massa) em relação ao cimento, fração volumétrica de EPS (20,40 e 60%) e o tamanho do EPS nas faixas granulométricas (4-6 US-Tyler, 16-20 US-Tyler e 80-100 US-Tyler) nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios. A metodologia experimental está embasada na abordagem estatística de planejamento e análise experimental das seguintes variáveis respostas: resistência à compressão, porosidade aparente, densidade aparente, densidade volumétrica e absorção de água após 28 dias de cura. Os resultados mostraram pouca variação na resistência específica e na porosidade aparente, reduções na densidade volumétrica e aparente.

PALAVRAS - CHAVE: reciclagem, poliestireno expandido (isopor), concreto leve.

ABSTRACT

The expanded polystyrene (EPS) or Styrofoam, resulting in decomposition of the material in landfills, taking up space, and a long decomposition time. This study aims to investigate the effect of adding polystyrene waste in cementitious composites by varying the water content (40e 50% by mass) relative to the cement, the volume fraction of EPS (20.40 and 60%) and the size of the EPS particle sizes (4-6 US-Tyler, 16-20 US-Tyler and 80-100 US-Tyler) on physico-mechanical properties of cementitious composites. The experimental methodology is based on statistical approach to planning and experimental analysis answers the following variables: compressive strength, modulus of elasticity, porosity, density, bulk density and water absorption after 28 days of curing. The results show little variation in specific resistance and porosity apparent, and reductions in the volumetric density and apparent.

KEYWORDS: recycling, expanded polystyrene (EPS) lightweight concrete

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Hidratação do cimento	08
Figura 2.2. Micrografia eletrônica de varredura	09
Figura 2.3. Resistência à compressão do isopor	20
Figura 2.4. Fluxograma de reciclagem mecânica do isopor	23
Figura 3.1. Geometria e dimensões dos corpos de prova	32
Figura 3.2. Corpo de prova ensacado	32
Figura 3.3. Teste de resistência à compressão	34
Figura 4.1. Gráfico de resíduos de probabilidade normal ANOVA sobre a densidade volumétrica	43
Figura 4.2. Gráfico de resíduos de probabilidade normal ANOVA sobre a densidade aparente	44
Figura 4.3. Gráfico de resíduos de probabilidade normal ANOVA sobre a porosidade aparente	45
Figura 4.4. Gráfico de resíduos de probabilidade normal ANOVA sobre a resistência à corrosão	46
Figura 4.5. Gráfico de resíduos de probabilidade normal ANOVA sobre a absorção de água	47
Figura 4.6. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor sobre a média da densidade volumétrica	48
Figura 4.7. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor sobre a média da densidade aparente	49

- Figura 4.8.** Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da porosidade aparente **50**
- Figura 4.9.** Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da resistência à compressão **51**
- Figura 4.10.** Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da absorção de água **52**
- Figura 4.11.** Compostos fabricados com cimento, isopor e água **53**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Nomenclatura do cimento Portland	13
Tabela 3.1. Fatores e níveis do experimento	30
Tabela 3.2. Planejamento fatorial completo	31
Tabela 3.3. Condições de referência	31
Tabela 4.1. Análise de variância (ANOVA)	36
Tabela 4.2. Densidade volumétrica dos compósitos cimentícios	37
Tabela 4.3. Densidade aparente dos compósitos cimentícios	38
Tabela 4.4. Porosidade aparente dos compósitos cimentícios	39
Tabela 4.5. Resistência à compressão dos compósitos cimentícios	40
Tabela 4.6. Absorção de água dos compósitos cimentícios	41
Tabela 4.7. Resistência específica dos compósitos cimentícios	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CITEC: Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos;

DOE: Design of Experiment (Desenho do Experimento)

EPS: Earnigs per Share (Poliestireno Expandido)

MEV: Microscopia eletrônica de varredura;

Minitab: Software para análises estatísticas;

NBR: Normas Brasileiras de Regulamentação;

P-valor: Estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses;

PVC: Policloreto de polivinila (plástico);

UFSJ: Universidade Federal de São João del-Rei;

US-Tyler: Tamanho de malha para seleção;

LISTA DE SÍMBOLOS

- k: Kilo (mil unidades da grandeza);
M: Mega (um milhão de unidades da grandeza);
MOE: Módulo de elasticidade;
MOR: Módulo de resistência;
M₁: Massa do compósito seco;
M₂: Massa do corpo de prova úmido
M₃: Massa do corpo de prova imerso em água
P: Porosidade;
Aa: Absorção de água;
Dap: Densidade aparente
Dv: Densidade volumétrica

Sumário

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Geral.....	2
1.1.2 Específicos.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Cimento Portland.....	4
2.1.1 Um pouco de história.....	4
2.1.2 Composição química.....	5
2.1.2.1 Clínquer.....	5
2.1.2.2 Adições.....	5
2.1.2.3 Hidratação do cimento.....	7
2.1.2.4 Pega e endurecimento.....	11
2.1.3 Tipos de cimento.....	12
2.2 Concreto.....	15
2.3 Concreto leve.....	16
2.3.1 Aplicações.....	16
2.4 Isopor.....	17
2.4.1 História.....	17
2.4.2 Definição de polímeros.....	18
2.4.3 Poliestireno expandido – Isopor.....	18
2.4.4 Vantagens do isopor.....	20
2.4.5 Reciclagem e reaproveitamento do isopor.....	22
2.5 Concreto com adição de poliestireno expandido.....	25
2.5.1 Estudos feitos sobre concreto com adição de poliestireno expandido.....	25
MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Seleção das variáveis respostas.....	28
3.2 Seleção dos fatores e níveis experimentais.....	28

3.3 Fabricação dos corpos de prova.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 Densidade volumétrica.....	48
4.2 Densidade aparente.....	49
4.3 Porosidade aparente.....	50
4.4 Resistência à compressão.....	51
4.5 Absorção de água.....	52
4.6 Análise microscópica.....	54
CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios a humanidade desenvolve novas tecnologias para aprimorar sua forma de vida, entre elas muito foi direcionado para melhorar sua moradia, essas novas tecnologias vieram aliadas de novas ideias e matérias-primas, pois substituí os materiais usados tradicionalmente por outros materiais alternativos o que proporciona redução de custos e aumento do conforto.

Entre os materiais que estão ocupando espaço na construção civil encontra-se o Poliestireno Expandido, popularmente conhecido como Isopor®, o que na verdade é uma marca registrada.

O volume de resíduos de isopor gerado vem se constituindo em grande preocupação, buscando-se possíveis aplicações deste material em concretos e argamassas, verificando-se as alterações nas propriedades e apresentando possibilidade e utilização como concreto para contrapiso e blocos de argamassa com ou sem função estrutural.

O desenvolvimento do concreto leve iniciou-se no ano de 1957, na BASF MEGATHERM. No princípio foi bastante lento, devido ao alto preço da matéria-prima, tanto que as pérolas pré-expandidas, como aditivo, tinham um caráter de luxo. Apesar disso, o processo de evolução não se deteve. Notou-se um impulso decisivo a partir de 1968, com a previsão de que o concreto leve poderia ocupar, em longo prazo, um lugar importante no setor da construção civil.

No Brasil, entretanto ele representa um problema ambiental, decorrente da falta de sua coleta seletiva, por não ser economicamente viável. Assim, o destino do poliestireno expandido acaba sendo o aterro sanitário, onde ocupa um espaço imenso além do longo período para decomposição. É possível a sua reutilização como matéria prima para fabricação de outros produtos, inclusive transformando-se novamente em isopor (<<http://www.ambientebrasil.com.br/>> Acesso em : 03 Março 2010).

Há muitas aplicações para o poliestireno expandido, uma das mais significativas e importantes é sua característica de isolamento térmico e acústico, sendo muito utilizado nos países europeus para essa finalidade.

Existe uma demanda crescente para concretos leves em muitas aplicações da construção civil moderna, trazendo benefícios significativos em elementos estruturais e uma redução correspondente no tamanho da fundação (Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, 1987).

De acordo com Short e Kinniburgh (1978) e Sussman (1975) as esferas de espuma de poliestireno expandido são agregados de ultra baixo peso (densidade inferior a 300 kg/m^3) as quais vêm sendo utilizadas na fabricação de concretos de baixa densidade para aplicação na construção civil tais como revestimento de painel, muro cortina, piso e blocos de concreto (COOK e SWAMY, 1983 e GODWIN, 1982). De acordo com Hanna, Bagon e Frondistou-Yannas (1976) esse material pode ser também utilizado em aplicações mais específicas como, por exemplo, base de pavimentos, leito de linha de trem, material de construção para estruturas flutuantes no mar ou barreiras no mar e material que absorve energia na proteção de instalações militares subterrâneas. Do mesmo modo, Perry, Bischoff e Yamura (1991), Hoff (1971), Bischoff, Yamura e Perry (1990).

Através da incorporação de esferas de poliestireno expandido em quantidades volumétricas diferentes no concreto, uma argamassa ou pasta cimentícia pode ser preparada resultando em ampla faixa de densidade do material. Os agregados de isopor podem substituir em parte ou completamente os agregados miúdos comumente usados no concreto ou a areia no caso de massas cimentícias.

Este projeto de pesquisa visa investigar o efeito da adição de isopor nas propriedades físico-mecânicas de compósitos cimentícios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

O objetivo principal desse projeto de pesquisa consiste em investigar o efeito da adição de resíduos de isopor em compósitos cimentícios através de uma metodologia de planejamento fatorial de experimentos. A análise estatística permitirá identificar os efeitos dos fatores individualmente, mas principalmente das interações que afetam as

variáveis respostas investigadas. Desta forma, pretende-se contribuir para o desenvolvimento desta classe de materiais além da obtenção de um compósito de alta resistência específica, isto é, elevada relação resistência/densidade, além de baixo custo.

1.1.2 ESPECÍFICOS

Investigar o efeito do teor de água (40 e 50% em massa) em relação ao cimento, da fração volumétrica de isopor (20, 40 e 60%) e do tamanho do isopor nas faixas granulométricas (4-6 US-Tyler, 16-20 US-Tyler e 80-100 US-Tyler) nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios. Cabe ressaltar que a adição de EPS consistirá na substituição das partículas de sílica da argamassa, ou seja, a inserção de 20% em volume de poliestireno expandido promoverá a remoção de 20% em volume de areia fina.

As variáveis respostas do experimento serão resistência à compressão, porosidade aparente, densidade aparente, densidade volumétrica e absorção de água após 28 dias de cura.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

2.1.1 UM POUCO DE HISTÓRIA

A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. No Brasil, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926.

Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes. (www.cimento.org, 2011)

2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

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

2.1.2.1 CLÍNQUER

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

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

2.1.2.2 ADIÇÕES

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento portland hoje disponíveis

no mercado. Essas outras matérias-primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

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

em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa.

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

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

Esse é o motivo pelo qual a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade, por exemplo, aos concretos e às argamassas.

Outros materiais pozolânicos têm sido estudados, tais como as cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a sílica ativa, um pó finíssimo que sai das chaminés das fundições de ferro-silício e que, embora em caráter regional, já têm seu uso consagrado no Brasil, a exemplo de outros países tecnologicamente mais avançados.

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante.

Quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário.

Conclui-se, pois que, de todas as adições, o gesso não pode, em hipótese alguma, deixar de ser misturado ao cimento, e que as demais matérias-primas adicionadas (escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) são totalmente compatíveis com o principal componente do cimento portland - o clínquer - acabando por conferir ao cimento pelo menos uma qualidade a mais.

2.1.2.3 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O termo hidratação, por definição, indica a reação química de uma dada espécie química com água convertendo-se em hidrato, pela introdução de água em sua molécula. No âmbito restrito da química do cimento este termo refere-se ao conjunto de mudanças que ocorrem quando o cimento anidro ou uma de suas fases constituintes é misturado com água. O fenômeno é complexo envolvendo reações químicas que superam a simples conversão de espécies anidras em hidratos correspondentes (TAYLOR, 1998).

O cimento portland é constituído por um certo número de compostos, cujas reações são a origem do processo de endurecimento. Os compostos presentes no portland são anidros, mas quando postos em contato com a água, reagem com ela, formando produtos hidratados.

O mecanismo de hidratação do cimento pode ser dividido em cinco etapas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV), estágio final (V) ou período de reação lenta. A termodinâmica das reações químicas permite visualizar esse perfil a partir da determinação do calor de hidratação de uma pasta de cimento Portland. A Figura 2.1 associa a taxa de liberação de calor de hidratação de uma pasta de cimento Portland à variação da concentração de íons cálcio em solução, com o tempo de hidratação (JAWED *et al.*, 1983; ZAMPIERI, 1989)..

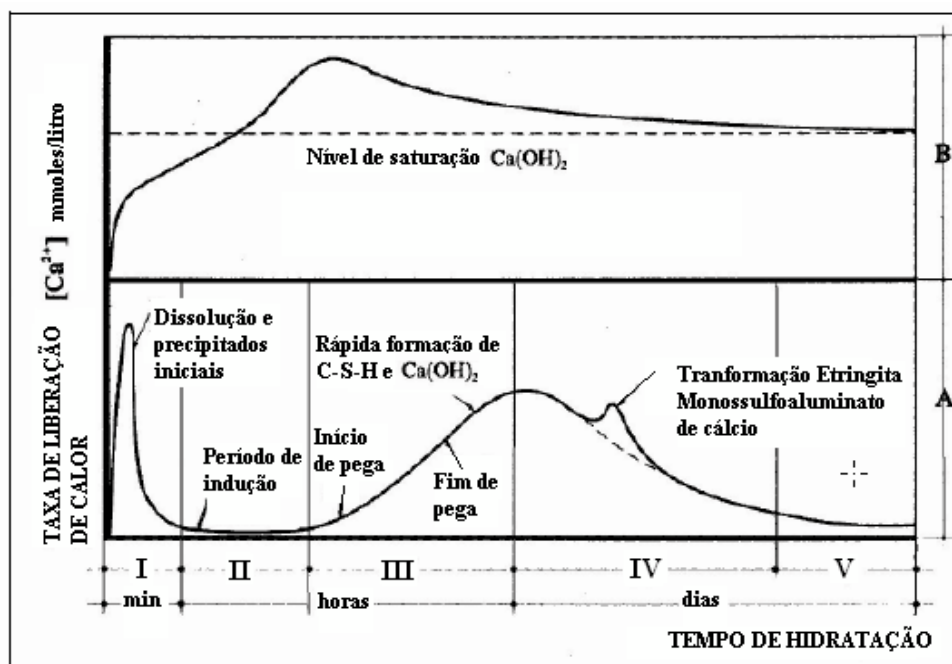


FIGURA 2.1. Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) durante a hidratação do cimento portland. Indicações das etapas de reação: (I) Estágio inicial; (II) Período de indução; (III) Período de aceleração; (IV) Período de desaceleração; e (V) Estágio final (JAWED *et al.*, 1983; ZAMPIERI, 1989).

Estágio inicial ou de pré-indução (I): o pico inicial é atribuído a uma combinação exotérmica de molhagem das partículas, de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} , dissolução do sulfato de cálcio até a saturação, à liberação de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} . A hidratação do sulfato de cálcio semi-hidratado ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) para dihidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

também contribui para a ocorrência do primeiro pico de liberação de calor (JAWED *et al.*, 1983; ZAMPIERI, 1989).

Neste estágio inicia-se a dissolução das fases anidras C₃S, C₃A e C₄AF dando origem a uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que reveste a superfície dos grãos anidros do clínquer. Os íons liberados com a dissolução do C₃A e do C₄AF reagem com os íons Ca⁺² e SO₄⁻² dando origem a um gel amorfo, rico em aluminato, sobre a superfície dos grãos do clínquer e de bastões ou pequenas e espessas agulhas de etringita (Figura 2.2) (JAWED *et al.*, 1983; ZAMPIERI, 1989).

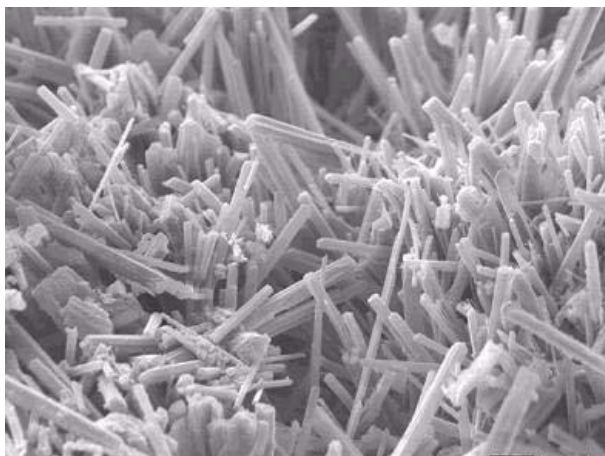


FIGURA 2.2. Micrografia Eletrônica de Varredura da Etringita

Fonte: LIMA, 2004.

Período de indução (II): uma camada de gel se deposita sobre os grãos anidros de cimento que forma uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este gel amorfo e coloidal é originado a partir da precipitação inicial da etringita, e em menor escala, de C-S-H, sendo rico em sílica e alumínio e com presença dos íons cálcio e sulfato (KADRI e DUVAL, 2002). Ocorre aumento nas concentrações dos íons Ca⁺², K⁺, Na⁺, SO₄²⁻ e OH⁻ em solução. A concentração de íons cálcio na fase aquosa atinge o seu patamar de saturação e inicia-se o declínio (HEWLETT, 2006). Este período, que também é denominado de dormência, tem duração aproximada entre 30 minutos e 3 horas, finalizando quando a camada de gel depositada sobre os grãos de clínquer é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica.

Este período é caracterizado pela baixa taxa de evolução de calor. Continuam a

crescer as concentrações de íons Ca^{+2} e OH^- , mas de forma não linear. Verifica-se um elevado grau de supersaturação quanto ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$ até atingir o patamar, quando se inicia a precipitação. O tempo necessário para atingir a supersaturação depende fortemente da relação a/c e do tamanho do cristal de C_3S (JAWED *et al.*, 1983).

Período de aceleração (III): predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com conseqüente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e CH [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Correspondem à reação do estágio III, que resulta em um declínio gradual da concentração de íons Ca^{2+} na solução. Este período finaliza com o aparecimento do segundo pico na curva (Figura 2.6) e sinaliza o início da desaceleração na geração de calor do sistema.

O fenômeno da pega se dá no decorrer do período de aceleração, em que os silicatos, sobretudo a alita (C_3S), passam a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação ao final desse período, que corresponde ao máximo de calor liberado. Ocorre também precipitação da etringita. A taxa de hidratação neste período é controlada pela formação do C-S-H. Durante o período de aceleração, a taxa e a extensão da hidratação são dependentes da área específica do clínquer (MOSTAFA e BROWN, 2005).

Período de desaceleração (IV): tem início com diminuição gradual da taxa da evolução do calor, dado à redução gradual na concentração de íons em solução, em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras (KADRI and DUVAL, 2002). Após o período aproximado de 24 horas tem-se continuidade das reações lentas que dão origem também a C-S-H e CH. O mecanismo de reação passa a ser controlado por difusão iônica ou por reação topoquímica.

Estágio final (V): um novo ombro sequencial que pode ocorrer, porém menos distinto que o anterior, tem sido associado à hidratação da fase ferrita ou a conversão da fase AFt para AFm (EMOTO, 2007). A formação de placas hexagonais delgadas de monossulfoaluminato de cálcio (fase AFm), a partir de reação do trissulfoaluminato de cálcio (fase AFt) com C_3A e o C_4AF , ocorre por indisponibilidade de sulfato de

cálcio no sistema (TAYLOR, 1998).

Fatores como temperatura, presença de álcalis, pressão, umidade relativa do ar, superfície específica e relação água/cimento podem fazer com que uma determinada fase interaja de forma distinta com a água, resultando em produtos de hidratação com variações em sua resistência mecânica, cristalinidade, permeabilidade, dentre outros. (MEHTA, 1994; TAYLOR, 1998).

2.1.2.4 PEGA E ENDURECIMENTO

Segundo Louis Vicat, o cimento Portland é um sistema químico formado por compostos, instáveis na presença da água, e que se hidratando, transformam-se em novo sistema estável e compostos hidratados. Os compostos anidros, sendo sempre mais solúveis que os compostos hidratados, quando em presença de água insuficiente para dissolvê-los inteiramente, dissolvem-se até a saturação.

Assim sendo, a solução dos compostos anidros é supersaturada em relação aos compostos hidratados, a cristalização espontânea desta solução supersaturada constitui a “Pega”.

No processo de pega e endurecimento, a reação com a água produz rapidamente uma capa superficial de produtos de hidratação envolvendo cada partícula (NELSON, 1990). Os produtos de hidratação ocupam um espaço significativo em função do tamanho das partículas bem como em função do líquido que as envolve, uma vez a combinação de ambos produzem partículas com dimensões coloidais, embora alguns cristais de hidróxido de cálcio também estejam presentes em menores proporções. Com o progresso da reação, as camadas dos produtos de hidratação se estendem e começam a se unir de tal maneira que se forma um gel nos espaços intergranulares, correspondendo à fase plástica da pasta (TAYLOR, 1997). À medida que a reação progride, as partículas existentes entre os grãos aumentam e vão se apertando progressivamente, até que o material possa ser considerado como uma massa de partículas em contato mútuo. As partículas cristalinas estão disseminadas através de gel, e também se formam nos poros por recristalização. Progressivamente, o gel se cristaliza e o cimento endurece (MEHTA e MONTEIRO, 2001).

2.1.3 TIPOS DE CIMENTO

Existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os mais empregados nas diversas obras de construção civil são (ABREU, 2001):

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

A Tabela 2.1 apresenta a nomenclatura do cimento Portland conforme normas da ABNT.

TABELA 2.1. Nomenclatura do cimento Portland (ABREU, 2001).

Cimento Portland (CP)		Sigla	Classe	Identificação
Cimento Portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25	CPI – 25
			32	CPI – 32
			40	CPI – 40
	Cimento Portland comum com adição	CP I - S	25	CPI - S – 25
			32	CPI - S – 32
			40	CPI - S – 40
Cimento Portland composto (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II - E	25	CP II – E – 25
			32	CP II – E – 32
			40	CP II – E – 40
	Cimento Portland composto com Pozolana	CP II - Z	25	CP II – Z – 25
			32	CP II – Z – 32
			40	CP II – Z – 40
	Cimento Portland composto com filler	CP II - F	25	CP II – F – 25
			32	CP II – F – 32
			40	CP II – F – 40
Cimento Portland de alto forno (NBR 5735)		CP III	25	CP – III – 25
			32	CP – III – 32
			40	CP – III – 40
Cimento Portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV – 25
			32	CP IV – 32
Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V - ARI	- -	CP V – ARI
Cimento Portland branco estrutural (NBR 12989)		CPB	25	CPB- 25
			32	CPB- 32
			40	CPB– 40
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP-classe G

• Cimento Portland Comum (CP I): cimento puro é menos resistente. Também disponível com adição de calcário ou escória (CP I – S).

• Cimento Portland Composto (CP II): leva esse nome por ser modificado. Responde por 69,2% do consumo no Brasil, e pode ser encontrado com três diferentes adições. O CP II – Z, por exemplo, vem com material pozolânico, o que o torna mais impermeável. É indicado para obras subterrâneas, marítimas e industriais. O CP II – E é

aditivado com escória granulada de alto forno, ideal para estruturas que possam ser atacadas por sulfatos. E o CP II – F leva material carbonático, sendo ótimo para aplicações em geral (argamassas) e também para pré-moldados de concreto.

- Cimento Portland de Alto-forno (CP III): feito com escória da indústria do aço (por isso o nome “alto-forno”), é ecológico, pois a cada tonelada de gusa produzida, há 300 kg de resíduos. Com essa adição, também são poupadas as jazidas de calcário. Caracteriza-se por ser menos poroso e mais durável, o que o torna bastante indicado para ficar exposta a agentes agressivos, como esgoto, chuva ácida e poluentes industriais. Ainda que seja tão vantajoso, não é amplamente utilizado por ser pouco resistente às primeiras idades. Isso quer dizer que até 7 ou 10 dias, o CP III tem resistência bem inferior aos outros cimentos. Mas é muito útil quando usado em massas de cimento maiores, como nas fundações.

- Cimento Portland Pozolânico (CP IV): acrescido de pozolanas, é um cimento menos poroso, o que lhe confere maior durabilidade. Também tem maior resistência a agentes agressivos, como água do mar e esgotos.

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI): como endurece rapidamente, pede mais cuidado na aplicação, pois gera muito calor e pode trincar se o concreto sofrer um resfriamento.

- Cimento Portland Branco (CPB): tem as mesmas aplicações do cimento cinza, mas se diferencia deste por não levar minério de ferro na fabricação, o que garante sua brancura. Pode ser estrutural (com classes 25, 32 e 40) e não estrutural.

As influências dos tipos de cimento nas argamassas e concretos são relativas, podendo-se ampliar ou reduzir seu efeito através do aumento ou diminuição da quantidade de seus componentes, sobretudo a água e o cimento. As características dos demais componentes, que são principalmente os agregados (areia, pedra britada, pó de pedra, etc.), também poderão alterar o grau de influência, sobretudo se contiverem matérias orgânicas (folhas, raízes, etc.). Finalmente, podem-se usar aditivos químicos para reduzir certas influências ou aumentar o efeito de outras, quando desejado ou necessário.

Tudo isso leva à conclusão de que é necessário estudar a dosagem ideal dos componentes das argamassas e concretos a partir do tipo de cimento escolhido, de forma a estabelecer uma composição que dê o melhor resultado ao menor custo. A dosagem deve obedecer a métodos racionais comprovados na prática e que respeitem as normas técnicas aplicáveis, e o uso dos aditivos deve seguir as instruções do seu fabricante.

Além disso, é fundamental fazer corretamente o adensamento e a cura das argamassas e dos concretos. O adensamento e a cura mal feitos são as principais causas de defeitos e problemas que surgem nas argamassas e nos concretos, como baixa resistência, as trincas e fissuras, a corrosão da armadura etc. O bom adensamento é obtido por vibração adequada. O principal cuidado que se deve tomar para obter uma cura correta é manter as argamassas e os concretos úmidos após a pega, molhando-os com uma mangueira ou com um regador, ou então os cobrindo com sacos molhados (de aniagem ou do próprio cimento), ou até colocando tábuas ou chapas de madeira molhadas sobre a superfície, de modo a impedir a evaporação da água por ação do vento e do calor do sol durante um período mínimo de sete dias.

2.2 CONCRETO

O concreto é um material de construção resultante da mistura, em quantidades racionais, de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água, sendo que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente aos fragmentos de agregados (pedra e areia), formando um bloco monolítico (www.portaldoconcreto.com.br, 2012).

A proporção entre todos os materiais que fazem parte do concreto é também conhecida por dosagem ou traço, sendo que podemos obter concretos com características especiais, ao acrescentarmos à mistura, aditivos, poliestirenos expandidos (isopor), pigmentos, fibras ou outros tipos de adições.

Para se obter um concreto resistente, durável, econômico e de bom aspecto, deve-se observar atentamente:

- As propriedades de cada um dos materiais componentes;
- As propriedades do concreto e os fatores que podem alterá-las;
- A proporção correta e execução cuidadosa da mistura;
- O modo de executar o controle do concreto durante a fabricação e após o endurecimento.

Outro ponto de destaque no preparo do concreto é o cuidado que se deve ter com a qualidade e a quantidade da água utilizada, pois ela é a responsável por ativar a reação química que transforma o cimento em uma pasta aglomerante. Se sua quantidade for muito pequena, a reação não ocorrerá por completo e se for superior a ideal, a resistência diminuirá em função dos poros que ocorrerão quando este excesso evaporar. A relação entre o peso da água e do cimento, utilizados na dosagem é chamada de fator água/cimento (a/c) (www.portaldoconcreto.com.br, 2012).

O concreto deve ter uma boa distribuição granulométrica a fim de preencher todos os vazios, pois a porosidade por sua vez tem influência direta na permeabilidade e na resistência das estruturas de concreto.

2.3 CONCRETO LEVE

Os concretos leves são reconhecidos pelo seu reduzido peso específico e elevada capacidade de isolamento térmico e acústico (SHORT e KINNIBURGH, 1978, SUSSMAN). Enquanto os concretos simples têm densidade variando entre 2300 e 2500 kg/m³, os leves chegam a atingir densidades próximas a 500 kg/m³. E que pode ser obtido através da substituição de parte dos materiais sólidos do concreto convencional por agregados leves. Cabe lembrar que a diminuição da densidade afeta diretamente a resistência do concreto. Os concretos leves mais utilizados são os celulares e os produzidos com agregados leves, como poliestireno expandido, vermiculita e argila expandida.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) tanto para o concreto leve como para o concreto normal, as propriedades não diferem tanto, porém, devem-se tomar alguns cuidados com a trabalhabilidade, evitando desta forma a segregação dos materiais. No caso de um alto abatimento e vibração excessiva, ocorrerá um fenômeno chamado flutuação do agregado graúdo, aonde a argamassa, pela maior massa específica, irá se concentrar na parte inferior da estrutura, prejudicando o acabamento da peça.

2.3.1 APLICAÇÕES

Sempre que não haja exigência de resistência a grandes esforços, esse tipo de concreto pode ser usado com grande redução de peso em elementos das edificações. Além do baixo peso, suas qualidades isolantes ampliam sua utilização dando um grande

passo a caminho da industrialização de componentes da construção civil (Abrapex, 2010).

O fato do isopor praticamente não absorver água e a possibilidade de um acabamento homogêneo de superfície, possibilita o uso do concreto leve em outros elementos arquitetônicos e de paisagismo. Abrem-se assim inúmeras possibilidades de uso do concreto leve de isopor. Hoje a mais comum é na regularização de lajes, que em alguns casos, pela espessura necessária, não poderia ser feito com outro material.

As aplicações do concreto leve com isopor são as seguintes:

- Regularização de lajes em geral e aplicação e inclinação para escoamento de água;
- Painéis de fechamento para: edifícios, casas pré-fabricadas e galpões;
- Elementos pré-fabricados: lajotas/blocos vazados, pilares para muros, elementos vazados, elementos decorativos para fachadas e jardins;
- Pavimentos: calçadas, painéis para fechamento de galerias;
- Elementos tipo "móveis": bancos para ambientes externos, base para montagem de sofás / balcões / camas;
- Áreas de Lazer: quadras de esporte, base para dispositivos de exercícios.

2.4 ISOPOR

2.4.1 HISTÓRIA

O Poliestireno expandido (EPS), muito conhecido no Brasil como ISOPOR®, marca registrada da Knauf Isopor Ltda, foi descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, quando trabalhavam nos laboratórios da Basf, na Alemanha. No princípio foi bastante lento, devido ao alto preço da matéria-prima, tanto que as pérolas pré-expandidas, como aditivo, tinham um caráter de luxo. Apesar disso, o processo de evolução não se deteve. Notou-se um impulso decisivo a partir de 1968, com a previsão de que o concreto leve poderia ocupar, em longo prazo, um lugar importante no setor da construção civil.

Esse material ganhou nos últimos 35 anos uma posição estável na construção de edifícios, não apenas por suas características isolantes, mas também por sua leveza, resistência, facilidade de trabalhar e baixo custo.

Atualmente, suas vantagens podem ser conferidas não apenas em lajes e miolos de parede, mas também em detalhes decorativos de fachadas, na fabricação de concreto leve e, especialmente, na fundação de estradas.

É um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Como agente expensor para a transformação do isopor, emprega-se o pentano, um hidrocarboneto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, sem comprometer o meio ambiente.

2.4.2 DEFINIÇÃO DE POLÍMEROS

Materiais poliméricos são provenientes de macromoléculas com massa molar de ordem 10^4 a 10^6 g/mol, formadas com muitas unidades de repetição conhecidas como meros, e podem ser de origem natural ou sintética. A partir disto o nome Polímero, que é derivado do grego onde Poly (muitos) e Mero (partes). (AKCELRUD, 2007). E é exatamente isto, a repetição de muitas unidades (poli) de um tipo de composto químico (mero). E polimerização é o nome dado ao processo no qual as várias unidades de repetição (monômeros) reagem para gerar uma cadeia de polímero. Existem polímeros que são inorgânicos e orgânicos, sendo o último mais pesquisado e de maior valor industrial (AKCELRUD, 2007).

Os Plásticos compreendem aos materiais poliméricos, e sendo sua maioria compostos orgânicos tem sua composição química baseada em átomos de carbono (C), hidrogênio (H) e outros elementos não metálicos (CALLISTER, 2002). São tantas características que estes materiais possuem que atualmente estão substituindo os materiais tradicionais como a madeira, metal e cerâmicos.

A matéria-prima para produção de polímeros é originada principalmente do petróleo e gás natural devido seu processo de fabricação ser barateado, com relação à extração a partir da madeira, carvão ou CO_2 , já que seu principal componente é o carbono (C).

2.4.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO - ISOPOR

Material que se apresenta como plástico celular rígido, proveniente da polimerização do estireno (derivado do petróleo) em água.

O processo de fabricação do isopor consiste em transformação física, porém esta não interfere nas propriedades químicas do material, esse processo é realizado através das seguintes etapas (Abrapex, 2010):

- Pré-expansão: nesta primeira fase em um pré-expansor o poliestireno recebe aquecimento por contato com vapor de água. Com isto as pérolas com cerca de 3 milímetros passará a ter um volume de 50 vezes mais do que o atual, o que resulta em num granulado de partículas de poliestireno expandido;

- Armazenamento intermediário: Fase de estabilização do material, que se faz necessário para posterior transformação, é aonde acontece o resfriamento do EPS que propicia uma depressão no interior das células, o qual forma espaços que serão preenchidos por ar circulante;

- Moldagem: O granulado estabilizado é introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água, o que provoca a soldadura do mesmo; assim obtém-se um material expandido tentando evitar perdas do produto, este processo de expansão dentro da câmara de vapor pode ser interrompido bruscamente com jatos de água fria direcionados contra a parede do molde.

Após serem expandidas as pérolas podem apresentar em seu volume até 98% de ar e 2% de poliestireno, por exemplo, em 1m^3 de isopor pode existir de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar.

O hidrocarboneto Pentano (C_5H_{12}) é o agente expensor empregado no Poliestireno. Por ser estruturado somente com átomos de carbono e hidrogênio deteriora-se facilmente no meio ambiente devido reação de fotoquímica realizada pelos raios solares, conseqüentemente não agredindo o mesmo. Outros aditivos também são acrescentados neste processo para que haja melhora das propriedades do EPS, como é o caso do retardantes de chama, permitindo assim que este material tenha resistência ao fogo.

2.4.4 VANTAGENS DO ISOPOR

O Poliestireno expandido obtém as seguintes vantagens:

- **Baixa condutividade térmica:** A estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor o que confere ao isopor um grande poder isolante.
- **Baixo peso:** As densidades do isopor variam entre os 10-30 kg/m³, permitindo uma redução substancial do peso das construções.
- **Resistência mecânica:** Apesar de muito leve, o isopor tem uma resistência mecânica elevada, que permite o seu emprego onde esta característica é necessária.

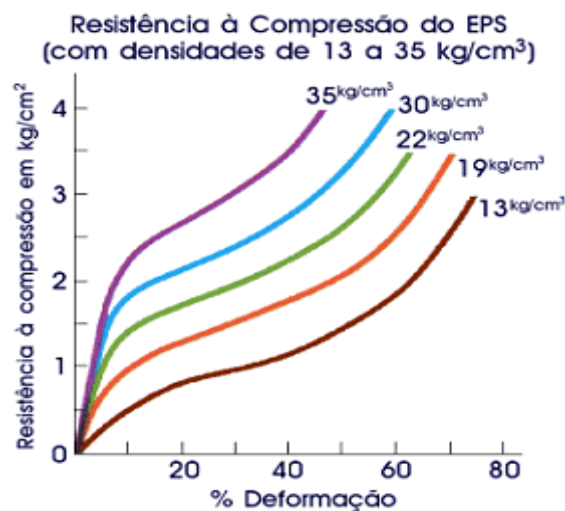


FIGURA 2.3: Resistência à Compressão de isopor

Fonte: ABRAPEX, 2010

- **Baixa absorção de água:** O isopor não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água o isopor absorve apenas pequenas quantidades de água. Tal propriedade garante que o isopor mantenha as suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade.

- **Facilidade de manuseio:** O isopor é um material que se trabalha com as ferramentas habitualmente disponíveis, garantindo a sua adaptação perfeita à obra.

- **O baixo peso do isopor facilita o manuseamento do mesmo em obra.** Todas as operações de movimentação e colocação resultam significativamente encurtadas.

- **Versatilidade:** O isopor pode apresentar-se numa variedade de tamanhos e formas, que se ajustam sempre às necessidades específicas da construção.

- **Resistência ao envelhecimento:** Todas as propriedades do isopor mantêm-se

inalteradas ao longo da vida do material, há estimativas em que em meio à natureza demore cerca de 150 anos para se degradar.

- Absorção de impactos.
- Resistência à compressão: De a 2 kg/cm².
- Resistência química: O isopor é compatível com a maioria dos materiais correntemente usados na construção civil, tais como cimento, gesso, cal, água, entre outros.

Os produtos finais deste material são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são reaproveitados, reciclados, podendo até voltar às condições de matéria-prima.

São inúmeras as utilizações do isopor, no entanto há duas propriedades em específico que têm fortalecido cada vez mais a presença deste no mercado consumidor, como a sua extrema leveza e isolamento termo-acústico, pois são propriedades estão diretamente ligadas a baixo custo. Atualmente o isopor apresenta-se bem empregado em embalagens industriais, artigos para consumo (caixas térmicas, pranchas, porta-gelo, etc.), na agricultura e até mesmo na construção civil. (ABRAPEX, 2006)

O isopor, poliestireno expandido, é um plástico rígido com inúmeras aplicações e que pode ser totalmente reciclado para voltar à condição de matéria-prima para ser utilizado principalmente em construção civil (concreto leve, argamassa, peças para lajes, blocos, etc.) (Abrapex, 2010).

Em relação ao meio ambiente:

- O isopor é 100% reciclável e reaproveitável. Em 2009 a quantidade de resíduos pós consumo coletado e reciclado por meio da captação do Projeto Repensar chegou aproximadamente 170 toneladas ao ano.
- A fabricação e utilização do isopor não geram risco à saúde ou ao meio ambiente.
- Não causa danos à camada de ozônio, ou seja, não usa e nunca usou clorofluorcarbono (CFC) nem hidroclorofluorcarboneto (HCFC) no processo de fabricação.
- Não contamina o solo, o ar ou a água.
- Fungos e bactérias não se proliferam no isopor.

Durante seu processo de fabricação o isopor libera baixos valores de resíduos sólidos e líquidos, em fato pela sua leveza, neste contexto o presente material demonstra significativa preservação de recursos energéticos quando é utilizado como isolante térmico, onde a economia de energia proporcionada durante a vida útil da construção pode ser diversas vezes superior à consumida para a produção do isopor.

2.4.5 RECICLAGEM E REAPROVEITAMENTO DO ISOPOR

Sobre os danos causados ao ambiente pelo descarte incorreto do poliestireno expandido (EPS) muita gente até percebe que contribui com a degradação, mas não sabe como evitá-la. Afinal, o isopor está hoje associado a um número cada vez maior de hábitos de consumo: das bandejas de padarias e supermercados às embalagens de proteção e até peças da construção civil.

Segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (Abrapex), foram produzidas 55 mil toneladas do material no Brasil em 2007 e outras 2 mil toneladas foram importadas junto a equipamentos eletrônicos e diferentes bens trazidos do exterior. Mas, ao contrário da crença espalhada no país, o poliestireno expandido é totalmente reciclável e já existem algumas empresas no Brasil que o reutilizam.

A reciclagem consiste na transformação do isopor, porém com as mesmas características iniciais do poliestireno envolvido no processo inicial da produção. O capital a se investir em uma unidade de revalorização para posterior comercialização é muito alto, sendo inviável em pequena escala (ABRAPEX, 2007).

Na Figura 2.4, representa os processos que usam o isopor na reciclagem:

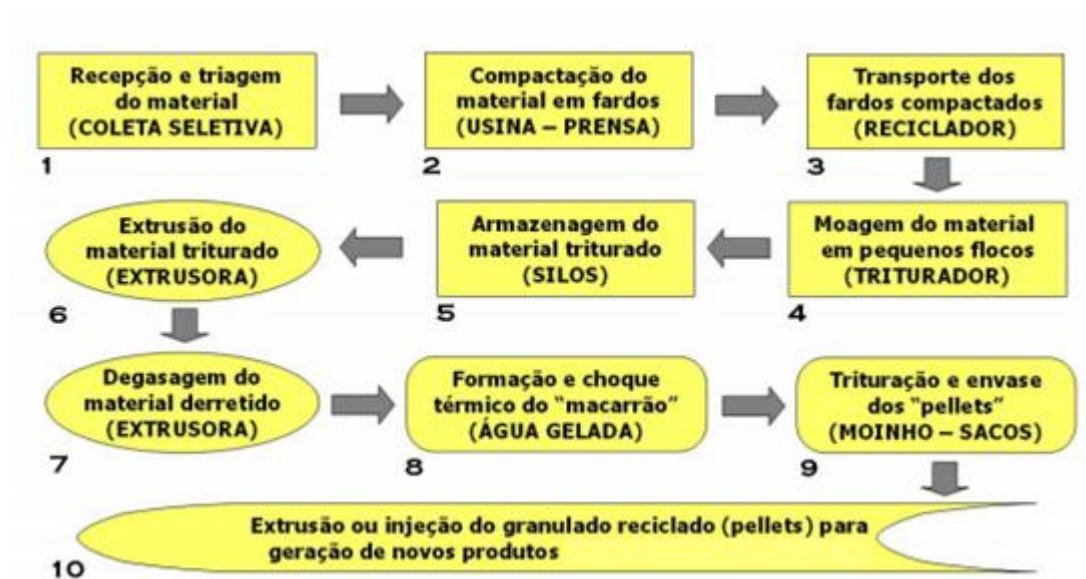


FIGURA 2.4. Fluxograma de reciclagem mecânica do Isopor

Fonte: Michaltchuk, 2007

As etapas do processo de reciclagem do Isopor:

1ª, 2ª e 3ª Etapas:

O isopor é recolhido e separado pela coleta seletiva, após há uma “quebra” do isopor em pedaços menores (forma correta para melhoria da reciclagem e “ocupação” do espaço).

4ª, 5ª e 6ª Etapas:

O material é aglutinado, através de exposição ao calor e ao atrito.

7ª Etapa:

Já bastante adensado, o material é colocado na extrusora, onde é submetido a novo aquecimento, em temperaturas controladas, até seu “derretimento” (e não a queima).

8ª Etapa:

Nesse estado, o isopor é homogeneizado e transformado em filetes, na forma de “espaguete”.

9ª e 10ª Etapas:

Depois de resfriados e secos, os filetes passam por uma máquina de picotes que transforma o poliestireno em grânulos.

Após a dez etapas do processo de reutilização, conforme informado acima, o material está pronto para ser reutilizado novamente em diversas formas e formato.

Segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (Abrapex), foram produzidas 55 mil toneladas do material no Brasil em 2007 e outras 2 mil toneladas foram importadas junto a equipamentos eletrônicos e diferentes bens trazidos do exterior.

O presidente da Abrapex, Albano Schmidt, conta que metade da produção nacional de isopor é usada na construção civil e fica incorporada à obra, mas o restante poderia ser transformado.

O poliestireno expandido, ou isopor, como já visto, é totalmente reciclável e por isso, algumas empresas já desenvolvem programas com esse fim. A cooperativa paulistana Coopervivabem é uma das empresas que começou a recolher e a vender o EPS em janeiro de 2007 e hoje funciona como um ponto de coleta para as outras cooperativas de reciclagem da cidade: ela compra o produto sujo, faz à remoção de fitas adesivas, papéis, grampos e outros materiais e o revende.

Reciclados e voltando novamente a forma de matéria-prima, o isopor pode ser, por exemplo, moldado em forma de bloco, injetados como produtos para embalagens, aplicada como complemento em moldes de peças injetadas ou fundição do ramo industrial. E reaproveitado o poliestireno expandido pode ser utilizado na construção civil como, por exemplo, concreto leve.

Quando reaproveitados para aeração de solo o isopor é incorporado à argila facilita a penetração da água no solo, induzindo o adubo as raízes. Em conjunto com a brita o isopor na jardinagem age em função dos substratos para plantas, mas para os gramados e campos de futebol possibilita a drenagem das águas pluviais (ABRAPEX).

O isopor tem vários destinos, dentre eles a fabricação do concreto leve, para regularização de lajes em geral, painéis de fechamento, elementos pré-fabricados, pavimentos, podendo atingir densidades aparentes que variam entre 300 kg/ m³ e 1600 kg/ m³ (ABRAPEX,2007).

2.5 CONCRETO COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

2.5.1 ESTUDOS FEITOS SOBRE CONCRETO COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

Bagon e F.-Yannas (1976), Perry et al. (1991), Cook (1973), Ravindrarajah e Tuck (1994) investigaram a inclusão de poliestireno expandido em massas cimentícias utilizando o cimento Portland comum como fase matriz. Também para compensar a característica hidrófoba do poliestireno, foram adicionados aditivos tais como resinas epóxi emulsificadas em água e dispersões de polivinilpropionato (COOK, 1973), ou as esferas de isopor tratadas quimicamente para evitar a segregação nas misturas com o concreto (RAVINDRARAJAH e TUCK, 1994).

Diversos pesquisadores (BAGON e FRONDISTOU-YANNAS, 1976, PERRY, BISCHAFF e YAMURA, 1991, COOK, 1973, RAVINDRARAJAH e TUCK, 1994, BABU e BABU, 2003, ZHANG e GJORV, 1991, CHEN, 2004, TANG, LO e NADEEM, 2008, LE ROY, PARANT e BOULAY, 2005, PARANT e LE ROY, 1996, LAUKAITIS, ZURAUSHAS e KERIENE, 2005, MILED et AL, 2004, MILED, SAB e LE ROY, 2007, BISSCHOP e VAN MIER, 2008, BABU e BABU, 2004, BABU, BABU e HUAN, 2006, GUAN et al, 2007) reportaram que as esferas de isopor tendem a flutuar, o que pode resultar em uma mistura não homogênea devido à segregação, tornando necessário o uso de aditivos, como areia fina. Além disso, a maioria dos estudos foram feitos com concretos de densidades abaixo de 1300 kg/m^3 e com resistências abaixo de 12 MPa.

Babu e Babu (2003) estudaram a obtenção e as propriedades mecânicas de concreto com adição de esferas de poliestireno expandido e com a adição de areia fina, abaixo de 2,3 mm, para evitar os efeitos de segregação. Os autores obtiveram compósitos cimentícios com densidades variando de 1500 a 2000 kg/m^3 com resistências entre 10 e 20 MPa, para adições de poliestireno expandido na faixa de 20 a 40 % em volume.

Chen e Liu (2004) obtiveram compósitos cimentícios apresentando densidade entre 800 a 1800 Kg/m^3 e resistência à compressão de 10 a 25 MPa, para adições de poliestireno expandido na faixa de 25 a 55% em volume. Os autores reportaram que a

adição de fibras de aço (70 kg/m^3) na mistura aumentou significativamente a resistência à tração do compósito além de reduzir a taxa de retração.

Tang et al. (2008) adicionaram poliestireno expandido na faixa de 20 e 60% de volume, relatando que a densidade, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade do compósito diminuem em função da concentração do poliestireno expandido da mistura. Além disso, as retrações em longo prazo dos compósitos são fortemente dependentes da fração volumétrica do poliestireno expandido e do tempo de cura.

Le Roy et al. (2005) variaram o tamanho das partículas de poliestireno expandido adicionadas (diâmetro variando entre 1, 3 e 6 mm), observando que ao diminuir o diâmetro das mesmas, aumenta-se a resistência compressiva do compósito. Esse efeito do tamanho da partícula de poliestireno expandido na resistência à compressão também foi reportado por outros autores (BABU e BABU, 2003, PARANT e LE ROY, 1996, LAUKAITIS, ZURAUSKAS e KERIENE, 2005).

Miled et al. (2004), realizaram simulações de um compósito cimentício com a adição de poliestireno expandido sob compressão, concluindo que o efeito do tamanho da partícula de poliestireno expandido na resistência à compressão deve-se principalmente a aleatoriedade na distribuição das partículas na matriz.

Miled et al. (2007), estudando compósitos cimentícios com adição de partículas de poliestireno expandido de diâmetro variado (1, 2,5 e 6,5 mm) observaram que o efeito do tamanho das partículas de poliestireno expandido é mais pronunciado em compósitos com baixa porosidade, tornando-se insignificante em compósitos de alta porosidade, exibindo macro-porosidades entre 10 – 50%.

Bisschop e Van Mier (2008) compararam o efeito da concentração de agregados (esferas de vidro, grãos de areia e poliestireno expandido) na taxa de secagem de compósitos cimentícios, observando que a taxa de secagem nos compósitos não difusivos (esferas de vidro e grãos de areia) diminui com o aumento da fração volumétrica dos agregados, enquanto nos compósitos com poliestireno expandido, a taxa de secagem aumentou em função do aumento da fração volumétrica do poliestireno expandido.

Babu e Babu (2004) estudaram compósitos cimentícios com a adição de poliestireno expandido (EPS) com uma ampla faixa de densidades ($550\text{--}2200 \text{ kg/m}^3$) e concentração de isopor entre 95% a 0%. Os resultados foram comparados com outros compósitos encontrados na literatura, observando que o compósito cimentício com adição de isopor apresentou menor absorção de água do que o concreto normal além de

uma melhor resistência química. Os autores reportaram também que com o aumento da fração volumétrica de isopor, há um aumento na permeabilidade e absorção de água dos compósitos cimentícios.

Babu et al. (2006) investigaram o efeito do tamanho de agregados de poliestireno em compósitos cimentícios em ampla faixa de densidades (1000–1900 kg/m³), utilizando poliestireno expandido (EPS) e polietileno não expandido (UEPS). Os resultados indicaram que os compósitos cimentícios com UEPS exibem resistência compressiva 70% maior do que os compósitos cimentícios com isopor, porém, os compósitos cimentícios com isopor de diâmetro menor apresentam maior resistência compressiva. O concreto com UEPS adicionado exibe um comportamento mecânico com fratura frágil semelhante ao concreto normal, enquanto uma falha gradual foi observada no concreto adicionado com isopor.

Guan et al. (2007) estudaram a perda de reflexão eletromagnética em compósitos cimentícios com EPS na faixa de frequência de 8 a 18 GHz, observando que o tamanho da partícula e a espessura da amostra apresentam efeitos notáveis na perda de reflexão da onda eletromagnética. Os autores obtiveram, com uma concentração volumétrica de EPS de 60% e diâmetro de 1 mm, uma perda de reflexão maior que -8 dB na faixa de 8–18 GHz e que uma largura de faixa para - 10 dB alcança 6,2 GHz para uma amostra de 20 mm de espessura.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental está embasada na abordagem estatística de planejamento e análise experimental (MONTGOMERY, 1997), seguindo o roteiro sugerido por Werkema e Aguiar (1996). As etapas deste procedimento serão detalhadas nos item seguintes.

3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS

As variáveis respostas escolhidas a serem analisadas neste trabalho são: densidade aparente, densidade volumétrica, porosidade, absorção de água, resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade, seguindo as normas de cada tipo de ensaio.

3.2 SELEÇÃO DOS FATORES E NÍVEIS EXPERIMENTAIS

Neste experimento, a matriz do compósito foi o cimento Portland (CP-V), fornecido pela empresa Holcim S.A. do Brasil e a fase dispersa, partículas de poliestireno expandido nas faixas granulométricas (4 - 6 US-Tyler, 16 - 20 US-Tyler e 80-100 US-Tyler) e foi utilizada a areia fina para construção civil, .

Os fatores e níveis experimentais foram selecionados com base nos estudos de artigos discutidos na revisão bibliográfica e nos objetivos deste projeto. Este trabalho pretende identificar quais fatores/níveis apresentam efeito significativo sobre as variáveis-respostas selecionadas, verificando a possível utilização dos compósitos desenvolvidos em setores industriais.

Dentre os fatores de maior relevância e possíveis de serem controlados, escolheram-se três, entre eles: fração volumétrica de isopor (resíduo de isopor), faixa granulométrica das partículas de poliestireno expandido e teor água/cimento. Os fatores mantidos constantes no experimento foram: tempo de mistura (~5min), temperatura ambiente de fabricação e tempo de cura (28 dias).

Os teores de água adicionados foram: 40 e 50% em massa em relação ao cimento, a fim de verificar a influência na resistência à compressão desses compósitos. A fração volumétrica de poliestireno expandido na matriz cimentícia foi investigada em três níveis: 20,40 e 60% em volume em substituição de agregados de sílica usados. As faixas granulométricas das partículas de poliestireno expandido foram: 4-6 US-Tyler, 16 – 20 US-Tyler e 80-100 US-Tyler.

A fração de areia fina, 70-80 US-Tyler (0,177 mm), adicionada foi de 70% em volume do percentual de cimento, sendo que este foi substituído em função da adição das partículas de poliestireno expandido (isopor). Por exemplo, se adicionado 20% de isopor, a mistura final contará com 50% de areia fina mais 30% de cimento. O teor de areia fina restante é importante para evitar os efeitos de segregação do isopor, conforme reportado por diversos pesquisadores (BAGON e FRONDISSTOU-YANNAS, 1976, PERRY, BISCHAFF e YAMURA, 1991, COOK, 1973, RAVINDRARAJAH e TUCK, 1994, BABU e BABU, 2003, ZHANG e GJORV, 1991, CHEN, 2004, TANG, LO e NADEEM, 2008, LE ROY, PARANT e BOULAY, 2005, PARANT e LE ROY, 1996, LAUKAITIS, ZURAUSHAS e KERIENE, 2005, MILED et AL, 2004, MILED, SAB e LE ROY, 2007, BISSCHOP e VAN MIER, 2008, BABU e BABU, 2004, BABU, BABU e HUAN, 2006, GUAN et al, 2007), com conseqüências benéficas na resistência dos compósitos.

A Tabela 3.1 exibe os fatores e os níveis experimentais investigados neste experimento.

TABELA 3.1. Fatores e níveis do experimento.

Fatores do Experimento	Níveis
Fração volumétrica de isopor (em % de massa do cimento)	1. 20% 2. 40% 3. 60%
Teor de água (em % de massa do cimento)	1. 40% 2. 50%
Faixa granulométrica de isopor (US-Tyler)	1. 80 - 100 2. 16 - 20 3. 4 - 6

O planejamento fatorial completo foi adotado, que quer dizer em realizar experimentos em todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. O planejamento fatorial gerado a partir dos fatores e níveis apresentados na Tabela 3.1 é o tipo 2^13^2 que fornece um resultado matemático de 18, o qual representa o número total de combinações distintas neste experimento. Tendo duas condições de referência que são resultados dos compostos cimento, areia e água (40% e 50%) A Tabela 3.2 apresenta as condições experimentais investigadas neste projeto.

TABELA 3.2. Planejamento fatorial completo.

Planejamento Fatorial [$2^1 3^2=18$]			
Condições Experimentais	Fatores		
	Fração volumétrica de EPS (%)	Tamanho da partícula de isopor (US-Tyler)	Teor de água (% massa)
C1	20	80-100	40
C2	20	80-100	50
C3	20	16-20	40
C4	20	16-20	50
C5	20	4-6	40
C6	20	4-6	50
C7	40	80-100	40
C8	40	80-100	50
C9	40	16-20	40
C10	40	16-20	50
C11	40	4-6	40
C12	40	4-6	50
C13	60	80-100	40
C14	60	80-100	50
C15	60	16-20	40
C16	60	16-20	50
C17	60	4-6	40
C18	60	4-6	50

TABELA 3.3. Condições de Referência

Condições de Referência	Fatores		
	Fração volumétrica de EPS (%)	Tamanho da partícula de isopor (US-Tyler)	Teor de água (% massa)
R1	----	----	40
R2	----	----	50

O método de aleatorização foi adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios, permitindo uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não controlados possam afetar a variável-resposta.

3.3. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a fabricação dos compósitos foram utilizados moldes cilíndricos de plástico (Figura 3.1) com dimensões de 47,5mm de diâmetro e 95,0mm de altura, ou seja, altura igual a duas vezes o diâmetro.

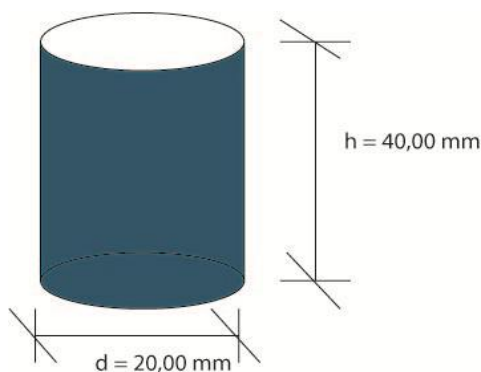


FIGURA 3.1. Geometria e dimensões dos corpos de prova.

Misturadas as fases, o material foi vazado nos moldes e os corpos de prova, onde ficaram ensacados durante 28 dias (Figura 3.2).



FIGURA 3.2. Corpo de prova ensacado

Após, foram cortados para garantir o paralelismo e utilizados 5 corpos de provas para cada teste conforme descrição de ensaios. Foi realizada também uma análise na superfície dos compósitos preparados. Para isso parte dos corpos de prova foi cortado.

O software estatístico Minitab versão 16 foi utilizado para o tratamento dos dados utilizando a ferramenta Design of Experiment (DOE) e Análise de variância (ANOVA).

O procedimento utilizado foi o método de Arquimedes, a densidade volumétrica, densidade aparente, porosidade e absorção de água foram medidas usando as seguintes fórmulas:

$$Dv = \frac{M_1}{V} \quad (1)$$

Sendo: Dv – densidade volumétrica (g/cm^3),

M_1 – massa do compósito seco (g),

V – volume do corpo de prova (cm^3).

$$Dap = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad (2)$$

Sendo: Dap – densidade aparente (g/cm^3),

M_1 – massa do compósito seco (g),

M_2 – massa do corpo de prova úmido (após período de imersão para absorção de água) (g),

M_3 – massa do corpo de prova imerso em água (g).

$$P = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (3)$$

Sendo: P – porosidade aparente (%),

M_1 – massa do compósito seco (g),

M_2 – massa do corpo de prova úmido (após período de imersão para absorção de água) (g),

M_3 – massa do corpo de prova imerso em água (g).

$$Aa = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (4)$$

Sendo: Aa – Absorção de água (%),

M_1 – massa do compósito seco (g),

M_2 – massa do corpo de prova úmido (após período de imersão para absorção de água) (g).

O ensaio de porosidade e densidade aparente seguiu recomendações da norma Britânica BS EN ISO 10545-3 (1997).

Para investigar os valores da resistência a compressão foi utilizada a máquina universal de ensaios, os testes de compressão foram feitos com uma velocidade de 5 mm/min (Figura 3.3).



FIGURA 3.3. Teste de resistência à compressão

Uma análise da superfície foi realizada a fim de verificar a distribuição do isopor e a formação de poros na matriz cimentícia.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para as médias das variáveis respostas investigadas. Os fatores relacionados a P-valor menor ou igual a 0,05 (95% de confiabilidade) são considerados significativos. O efeito principal de um fator deve ser interpretado individualmente apenas se não há evidência de que o fator não interage com outros fatores. Quando um ou mais efeitos de interação de ordem superior são significativos, os fatores que interagem devem ser considerados conjuntamente (Werkema e Aguiar, 1996). Os P-valores, sublinhados na Tabela 4.1, corresponde aos fatores significativos, e os sublinhados e em negrito são os de ordem superiores analisados neste trabalho.

O valor de R^2 adjunto exibido na ANOVA mede a proporção da variabilidade preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 1 (ou de 100%) melhor a qualidade da equação ajustada aos dados (Werkema e Aguiar, 1996).

Os gráficos de resíduos de probabilidade normal das variáveis-respostas investigadas neste trabalho apresentaram média próxima de zero, atendendo as condições de normalidade exigidas para validação do modelo da ANOVA.

TABELA 4.1. Análise de variância (ANOVA).

ANOVA		P-VALOR $\leq 0,05$				
	Fatores Experimentais	Densidade Volumétrica (g/m ³)	Densidade Aparente (g/m ³)	Porosidade Aparente	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água
Fatores Principais	Fração de Isopor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
	Faixa Granulométrica de Isopor	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
	Fração de Água	0,0062	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Interação de Fatores	Fração de Isopor * Faixa Granulométrica de Isopor	<u>0,000</u>	<u>0,009</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
	Fração de Água * Fração de Isopor	0,326	0,167	<u>0,000</u>	0,094	<u>0,000</u>
	Faixa Granulométrica de Isopor * Fração de Água	0,348	0,057	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>
	Fração de Isopor * Faixa Granulométrica de Isopor * Fração de Água	0,154	0,131	<u>0,000</u>	<u>0,003</u>	<u>0,000</u>
	R ² (Adjunto)	77,70%	75,71%	94,01%	94,61%	99,76%

Os valores das Tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 foram utilizadas para realizar a análise de variância (ANOVA).

TABELA 4.2. Densidade volumétrica dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Densidade volumétrica			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	1,74	1,76	0,22	0,24
C2	20%	80-100	50%	1,58	1,56	0,43	0,41
C3	20%	16-20	40%	1,54	1,55	0,19	0,16
C4	20%	16-20	50%	1,30	1,31	0,15	0,17
C5	20%	4-6	40%	1,23	1,28	0,05	0,03
C6	20%	4-6	50%	1,22	1,20	0,04	0,05
C7	40%	80-100	40%	1,66	1,67	0,07	0,05
C8	40%	80-100	50%	1,44	1,43	0,09	0,04
C9	40%	16-20	40%	1,03	1,02	0,26	0,28
C10	40%	16-20	50%	1,25	1,26	0,20	0,23
C11	40%	4-6	40%	0,86	0,84	0,21	0,19
C12	40%	4-6	50%	0,74	0,77	0,16	0,18
C13	60%	80-100	40%	1,34	1,33	0,06	0,04
C14	60%	80-100	50%	1,28	1,29	0,24	0,21
C15	60%	16-20	40%	0,68	0,66	0,10	0,08
C16	60%	16-20	50%	0,69	0,71	0,12	0,15
C17	60%	4-6	40%	0,41	0,38	0,04	0,07
C18	60%	4-6	50%	0,41	0,43	0,03	0,01
R1	0	0	40%	1,76	1,79	0,16	0,13
R2	0	0	50%	1,72	1,78	0,11	0,18

TABELA 4.3. Densidade aparente dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Densidade Aparente			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	2,84	2,86	0,64	0,63
C2	20%	80-100	50%	1,64	1,63	0,20	0,18
C3	20%	16-20	40%	1,58	1,59	0,30	0,31
C4	20%	16-20	50%	1,66	1,68	0,35	0,32
C5	20%	4-6	40%	1,43	1,45	0,04	0,02
C6	20%	4-6	50%	1,39	1,41	0,03	0,05
C7	40%	80-100	40%	2,34	2,36	0,27	0,25
C8	40%	80-100	50%	1,66	1,63	0,24	0,23
C9	40%	16-20	40%	1,38	1,39	0,42	0,43
C10	40%	16-20	50%	1,33	1,31	0,29	0,26
C11	40%	4-6	40%	1,14	1,17	0,43	0,45
C12	40%	4-6	50%	0,88	0,85	0,22	0,20
C13	60%	80-100	40%	1,71	1,73	0,25	0,23
C14	60%	80-100	50%	1,13	1,10	0,26	0,27
C15	60%	16-20	40%	0,79	0,76	0,35	0,37
C16	60%	16-20	50%	0,66	0,67	0,17	0,18
C17	60%	4-6	40%	0,46	0,44	0,04	0,01
C18	60%	4-6	50%	0,49	0,51	0,04	0,03
R1	0	0	40%	2,46	2,39	0,10	0,09
R2	0	0	50%	1,98	2,10	0,13	0,18

TABELA 4.4. Porosidade aparente dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Porosidade aparente			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	4,97	4,95	0,04	0,03
C2	20%	80-100	50%	5,46	5,50	0,06	0,08
C3	20%	16-20	40%	6,02	6,00	0,06	0,05
C4	20%	16-20	50%	6,54	6,48	0,04	0,01
C5	20%	4-6	40%	7,01	7,05	0,02	0,07
C6	20%	4-6	50%	7,53	7,55	0,07	0,09
C7	40%	80-100	40%	9,00	9,07	0,04	0,05
C8	40%	80-100	50%	9,49	9,50	0,02	0,05
C9	40%	16-20	40%	10,03	10,00	0,03	0,07
C10	40%	16-20	50%	10,53	10,55	0,06	0,10
C11	40%	4-6	40%	10,99	10,96	0,03	0,08
C12	40%	4-6	50%	11,30	11,38	0,43	0,31
C13	60%	80-100	40%	12,99	12,96	0,06	0,08
C14	60%	80-100	50%	13,35	13,38	0,48	28
C15	60%	16-20	40%	13,97	13,95	0,06	0,04
C16	60%	16-20	50%	14,52	14,55	0,06	0,02
C17	60%	4-6	40%	14,95	14,97	0,09	0,17
C18	60%	4-6	50%	15,53	15,55	0,04	0,12
R1	0	0	40%	9,69	8,99	0,47	0,50
R2	0	0	50%	12,56	12,50	0,36	0,40

TABELA 4.5. Resistência à compressão dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Resistência à compressão			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	20,8	20,5	0,38	0,40
C2	20%	80-100	50%	19,76	19,70	0,42	0,38
C3	20%	16-20	40%	18,96	18,97	0,54	0,55
C4	20%	16-20	50%	18,54	18,51	0,08	0,03
C5	20%	4-6	40%	18,11	18,90	0,17	0,24
C6	20%	4-6	50%	17,54	17,58	0,06	0,10
C7	40%	80-100	40%	16,18	16,21	0,20	0,17
C8	40%	80-100	50%	15,61	15,64	0,24	0,28
C9	40%	16-20	40%	14,17	14,20	0,15	0,14
C10	40%	16-20	50%	13,56	13,60	0,06	0,08
C11	40%	4-6	40%	12,18	12,19	0,18	0,17
C12	40%	4-6	50%	11,61	11,64	0,15	0,10
C13	60%	80-100	40%	9,06	9,09	0,08	0,09
C14	60%	80-100	50%	8,55	8,51	0,04	0,17
C15	60%	16-20	40%	6,08	6,03	0,08	0,12
C16	60%	16-20	50%	5,53	5,50	0,28	0,23
C17	60%	4-6	40%	3,20	3,21	0,13	0,18
C18	60%	4-6	50%	2,61	2,67	0,08	0,15
R1	0	0	40%	21,10	21,29	0,22	0,31
R2	0	0	50%	20,21	19,99	0,50	0,43

TABELA 4.6. Absorção de água dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Absorção de água			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	2,95	2,99	0,09	0,12
C2	20%	80-100	50%	3,50	3,53	0,02	0,08
C3	20%	16-20	40%	4,01	4,48	0,04	0,05
C4	20%	16-20	50%	4,56	4,86	0,02	0,01
C5	20%	4-6	40%	5,01	5,25	0,03	0,07
C6	20%	4-6	50%	5,50	5,59	0,02	0,07
C7	40%	80-100	40%	9,99	9,79	0,03	0,03
C8	40%	80-100	50%	10,53	10,48	0,03	0,01
C9	40%	16-20	40%	11,02	11,21	0,03	0,05
C10	40%	16-20	50%	11,55	11,64	0,04	0,12
C11	40%	4-6	40%	12,02	12,00	0,03	0,08
C12	40%	4-6	50%	12,49	12,58	0,01	0,05
C13	60%	80-100	40%	17,96	17,99	0,04	0,014
C14	60%	80-100	50%	18,53	18,58	0,07	0,09
C15	60%	16-20	40%	19,01	19,13	0,02	0,10
C16	60%	16-20	50%	19,53	19,59	0,03	0,09
C17	60%	4-6	40%	19,99	20,06	0,02	0,08
C18	60%	4-6	50%	20,65	20,68	0,19	0,25
R1	0	0	40%	5,00	5,31	0,14	0,24
R2	0	0	50%	5,25	5,73	0,19	0,12

TABELA 4.7. Resistência específica dos compósitos cimentícios

Condição	Fração de isopor	Faixa granulométrica de isopor	Fração de água	Resistência específica			
				Média	Média da réplica	Desvio padrão	Desvio padrão da réplica
C1	20%	80-100	40%	12,13	11,65	1,69	1,62
C2	20%	80-100	50%	13,36	12,63	4,09	4,02
C3	20%	16-20	40%	12,47	12,24	1,64	1,60
C4	20%	16-20	50%	14,45	14,13	1,57	1,52
C5	20%	4-6	40%	14,80	14,76	0,66	0,61
C6	20%	4-6	50%	14,42	14,65	0,58	0,59
C7	40%	80-100	40%	9,76	9,70	0,58	0,51
C8	40%	80-100	50%	10,90	10,93	0,70	0,65
C9	40%	16-20	40%	14,67	13,92	4,40	4,46
C10	40%	16-20	50%	11,01	10,79	1,49	1,42
C11	40%	4-6	40%	14,89	14,51	4,40	4,48
C12	40%	4-6	50%	16,35	15,11	1,49	1,41
C13	60%	80-100	40%	6,78	6,83	3,94	3,90
C14	60%	80-100	50%	6,85	6,59	1,16	1,10
C15	60%	16-20	40%	9,01	9,14	1,34	1,39
C16	60%	16-20	50%	8,18	7,75	1,18	1,14
C17	60%	4-6	40%	7,94	8,45	0,88	0,82
C18	60%	4-6	50%	6,45	6,21	0,54	0,59
R1	0	0	40%	11,98	11,89	4,21	4,29
R2	0	0	50%	11,75	11,23	3,53	3,58

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, apresentam os gráficos de resíduos de probabilidade normal da ANOVA em relação às propriedades físicas e mecânicas dos compostos de isopor, granulométrica de isopor e água, comprovando normalidade nas distribuições dos resíduos pelos P-valores encontrados serem ambos superiores a 0,05, auxiliando por validar o modelo da ANOVA, se no gráfico os resíduos estiverem situados aproximadamente simétricos, então será obtida uma indicação de validade da suposição de independência.

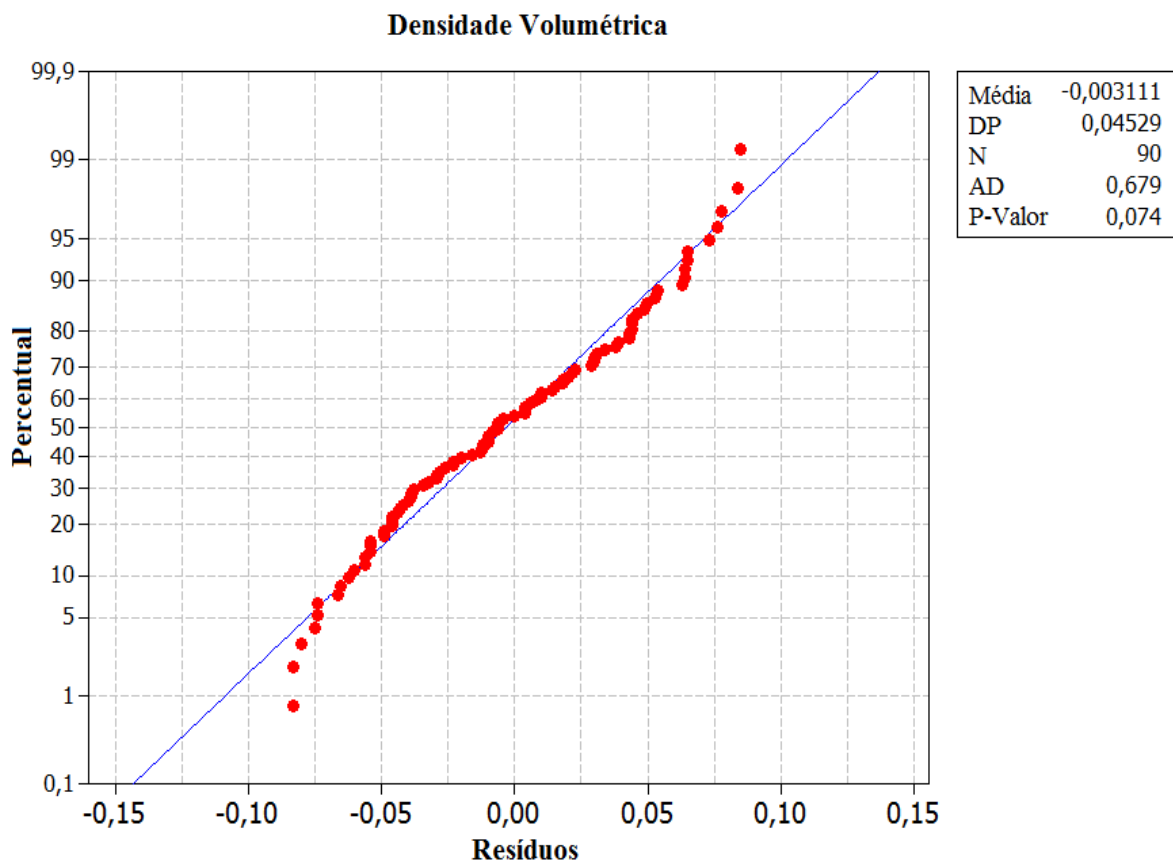


FIGURA 4.1. Gráfico de resíduos de probabilidade normal da ANOVA sobre a densidade volumétrica.

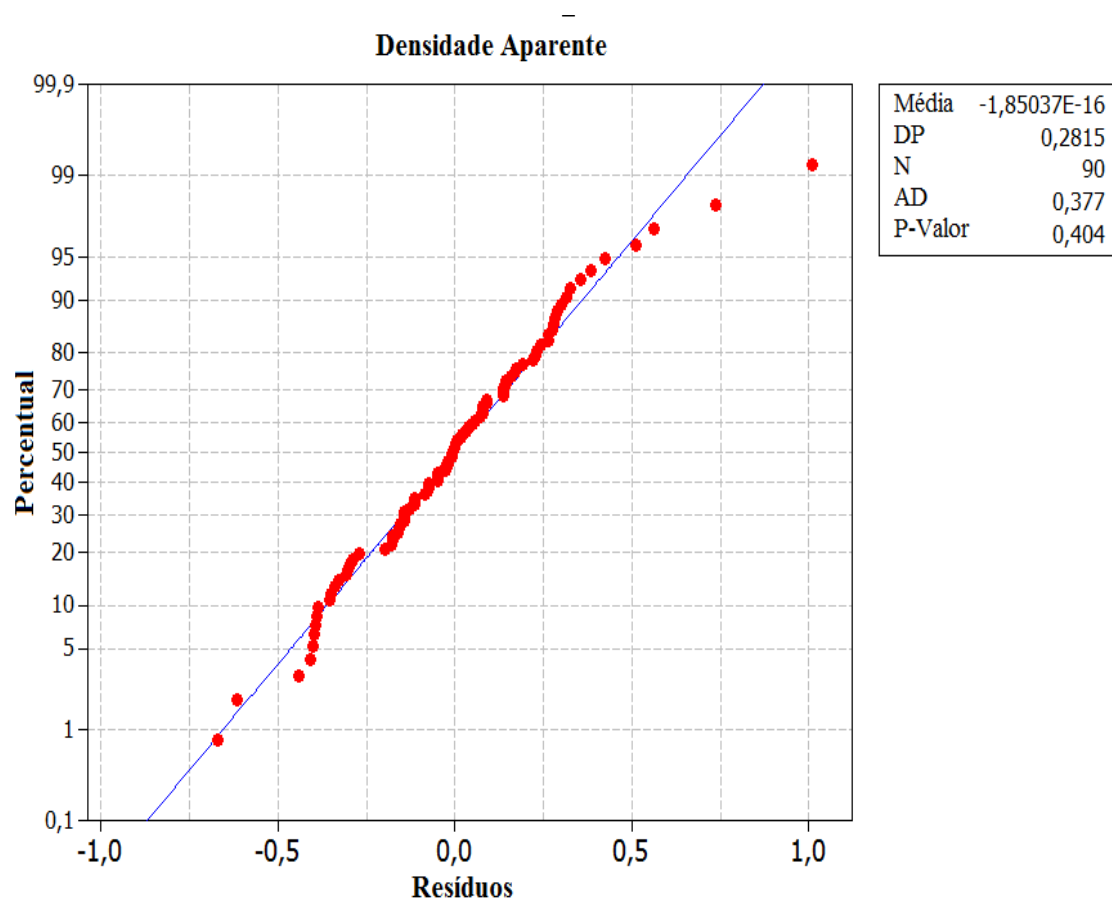


FIGURA 4.2. Gráfico de resíduos de probabilidade normal da ANOVA sobre a densidade aparente.

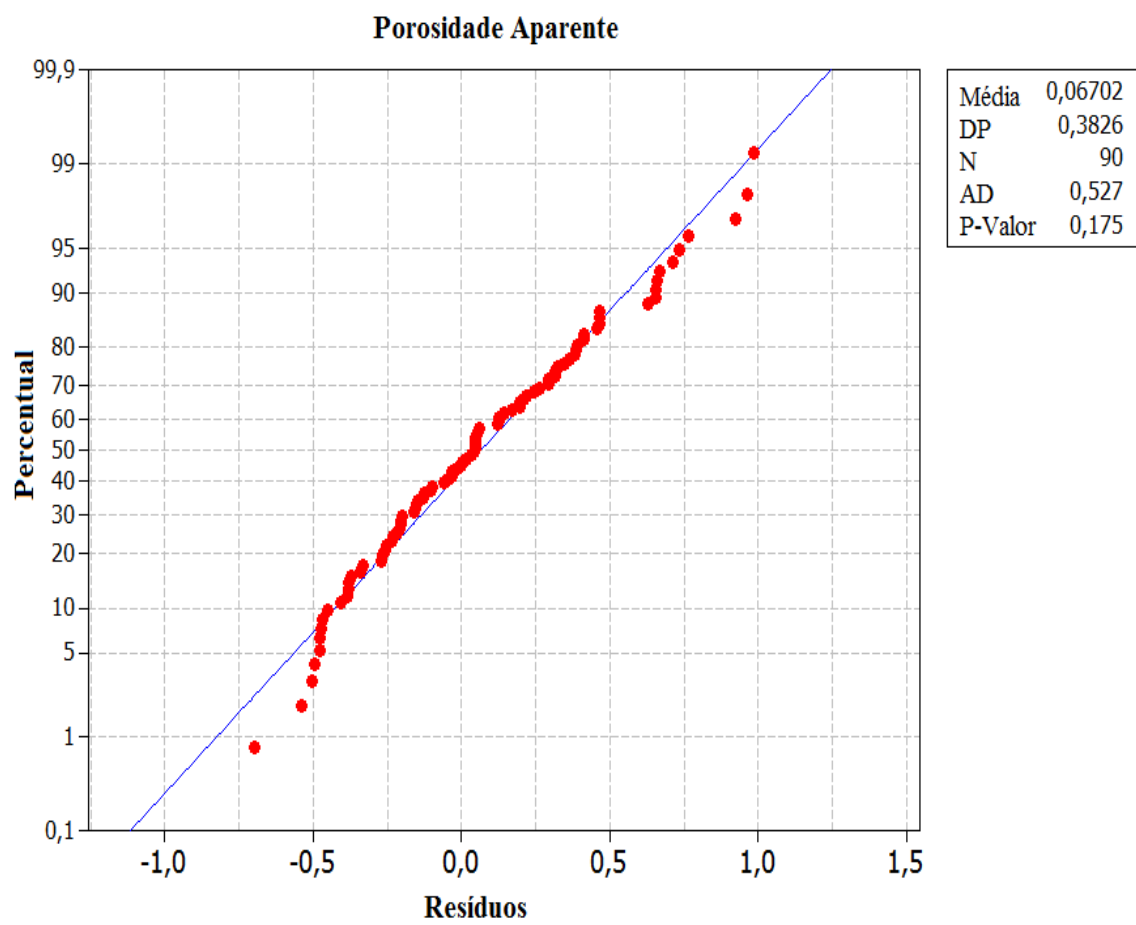


FIGURA 4.3. Gráfico de resíduos de probabilidade normal da ANOVA sobre a porosidade aparente.

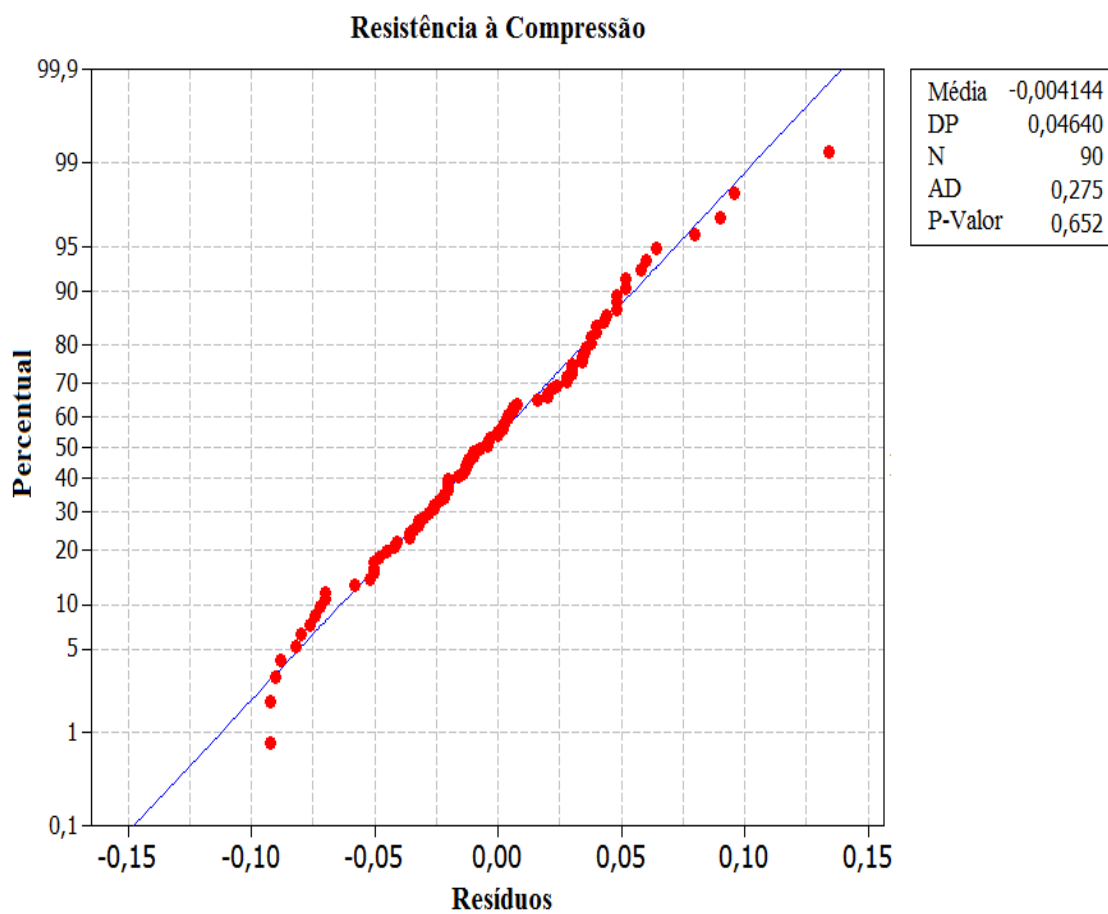


FIGURA 4.5. Gráfico de resíduos de probabilidade normal da ANOVA sobre a resistência à compressão.

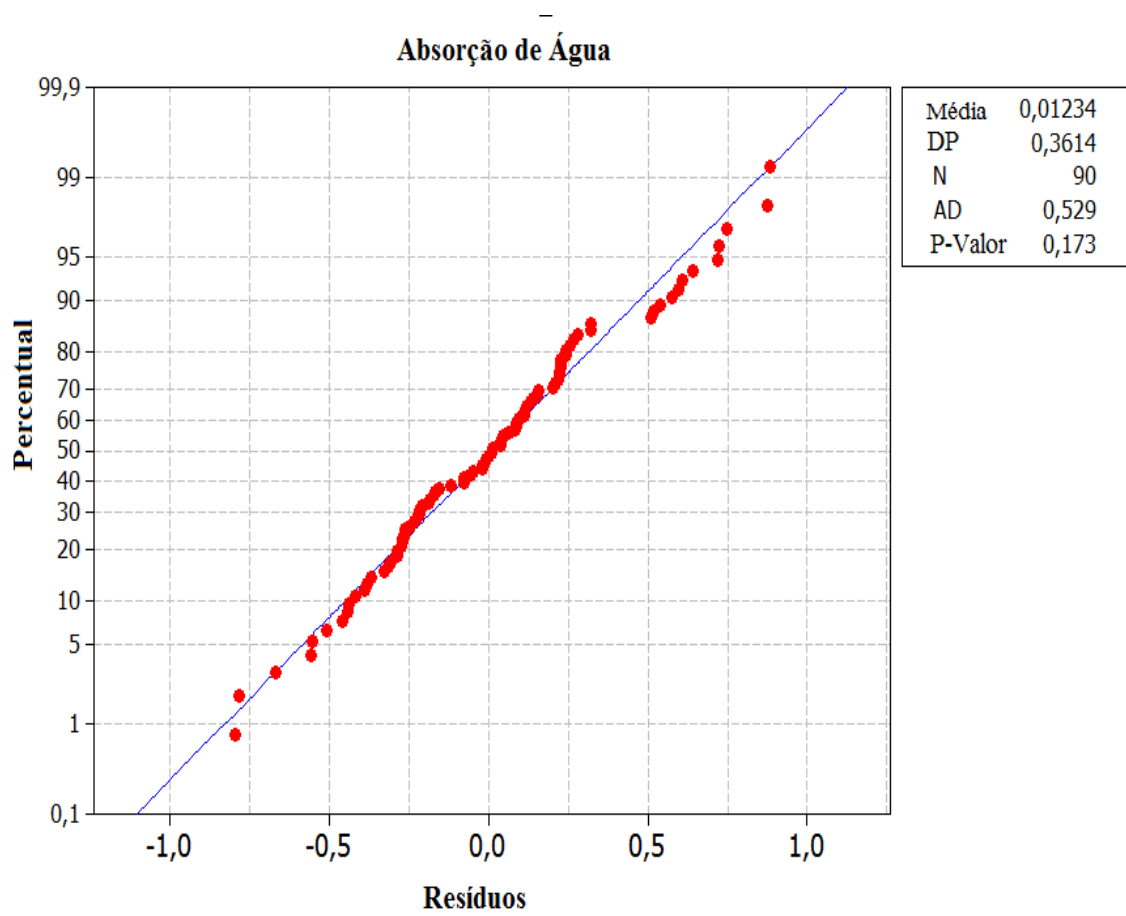


FIGURA 4.5. Gráfico de resíduos de probabilidade normal da ANOVA sobre a absorção de água.

4.1 DENSIDADE VOLUMÉTRICA

A média dos valores da densidade volumétrica dos compósitos variaram de 0,40 a 1,74 g/cm³, enquanto os compósitos cimentícios somente com cimento, areia e água (variando em 40% e 50%) teve o valor médio de 1,79 e 1,72 g/cm³ respectivamente. O P-valor (0,00) sublinhado na Tabela 4.1 indica que o efeito de interação da faixa granulométrica de isopor são significativos. O valor de R² ajustado foi de 77,70% indicando que a qualidade de ajuste do modelo foi satisfatória.

A figura 4.6 exhibe o efeito da interação dos fatores “faixa granulométrica de isopor e fração de isopor” sobre a densidade volumétrica, pois quanto maior a quantidade de isopor e menor a faixa granulométrica de isopor, menor é a densidade, isto se deve a baixa densidade do isopor usado no experimento (0,025 g/cm³).

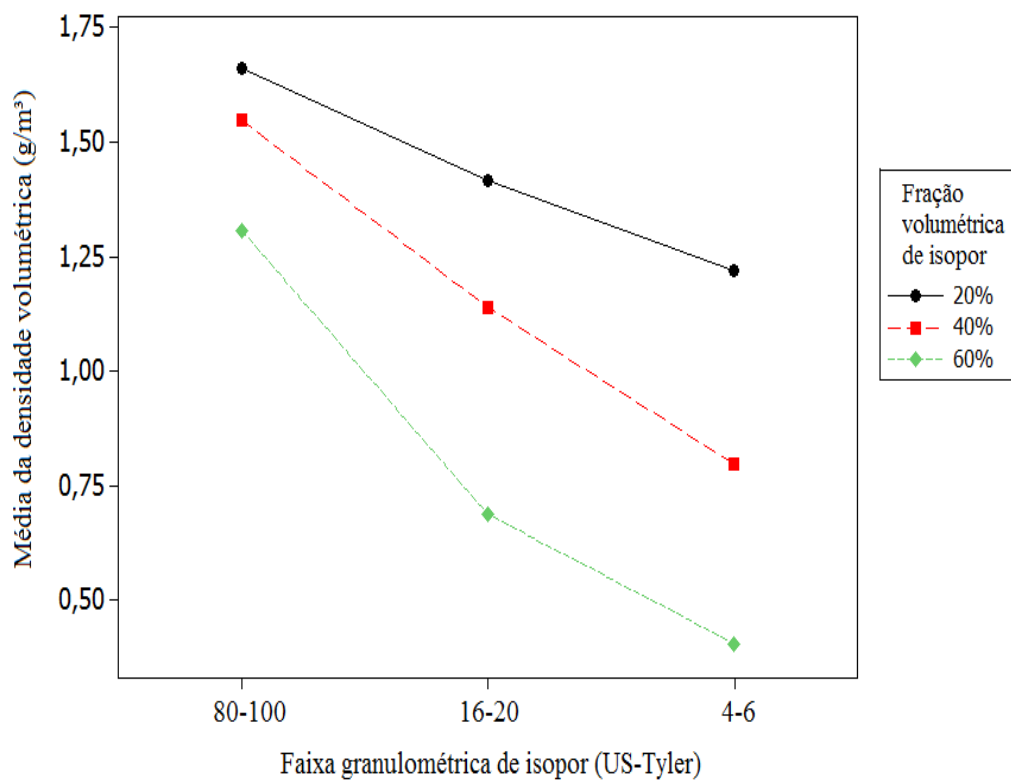


FIGURA4.6. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor sobre a média da densidade volumétrica.

4.2 DENSIDADE APARENTE

A média dos valores da densidade aparente variaram entre 0,43 a 2,17 g/cm³ enquanto os compósitos cimentícios somente com cimento, areia e água (variando em 40% e 50%) teve o valor médio de 2,46 e 1,98 g/cm³ respectivamente. As interações de segunda ordem “faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor” e “faixa granulométrica de isopor e fração de água” e foram significativas, exibindo um P-valor de 0,009 e P-valor de 0,000 respectivamente (ver Tabela 1). A Figura 4.6 exhibe o efeito da interação dos fatores “faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor” e a Figura 4.7 exhibe “faixa granulométrica de isopor e fração de água” sobre a densidade aparente. O isopor contribui para a diminuição da densidade aparente, visto que sua densidade aparente é muito baixa. E quando se tem uma menor quantidade de areia e maior quantidade de isopor, menor a densidade aparente.

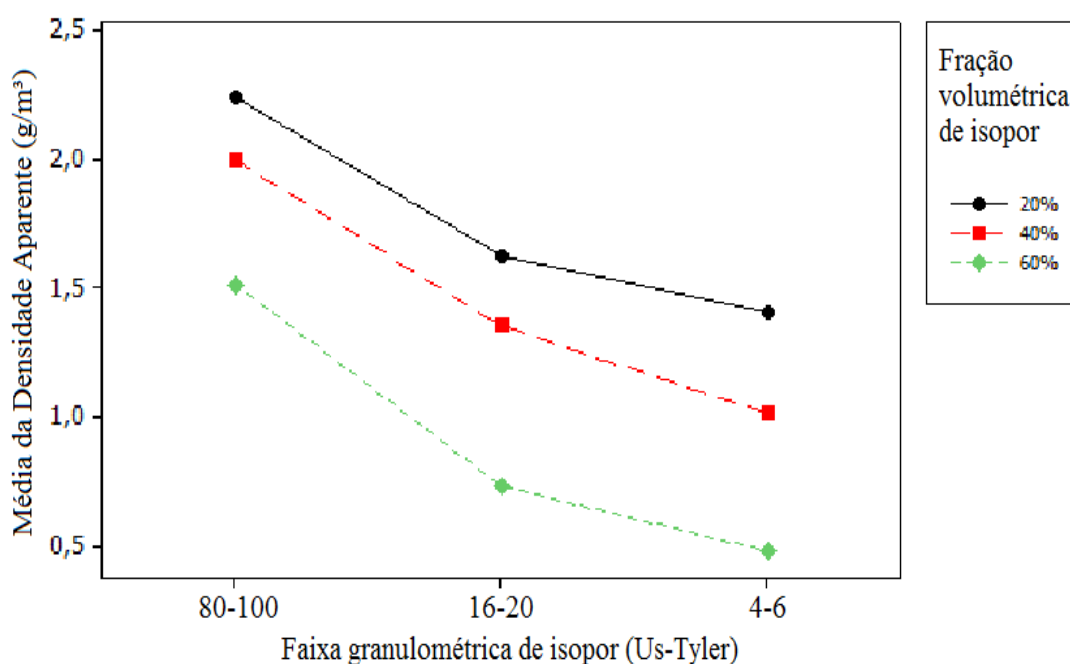


FIGURA 4.7. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor e fração de quantidade de isopor sobre a média da densidade aparente

4.3 POROSIDADE

A média dos valores da porosidade aparente variaram de 4,97 a 15,53 enquanto os compósitos cimentícios somente com cimento, areia e água (variando em 40% e 50%) teve o valor médio de 9,69 e 12,56 respectivamente. O valor de R^2 ajustado de 94,01% indica o ajuste satisfatório do modelo adotado aos resultados da Porosidade Aparente obtidos. A Figura 4.1 exibe os P-valores para fatores significativos foi identificado a interação “fração de quantidade de isopor, faixa granulométrica de isopor e fração de água” com o valor de 0,000. As partículas de isopor são hidrofóbicas, assim, elas contribuem para a diminuição da porosidade aparente dos compósitos.

A impermeabilidade está diretamente relacionada com a porosidade da pasta. Quanto menos poroso, mais impermeável foi a pasta e conseqüentemente, o concreto.

A relação água/cimento, neste caso, define a estrutura da pasta. Quanto menor essa relação, mais próximos uns dos outros estão os grãos de cimento e menor, portanto, foi a porosidade da pasta, indicado na figura 4.8.

Quanto maior a quantidade de isopor e menor a faixa granulométrico de isopor, aumenta a quantidade de interstícios no compósito, aumentando assim a porosidade.

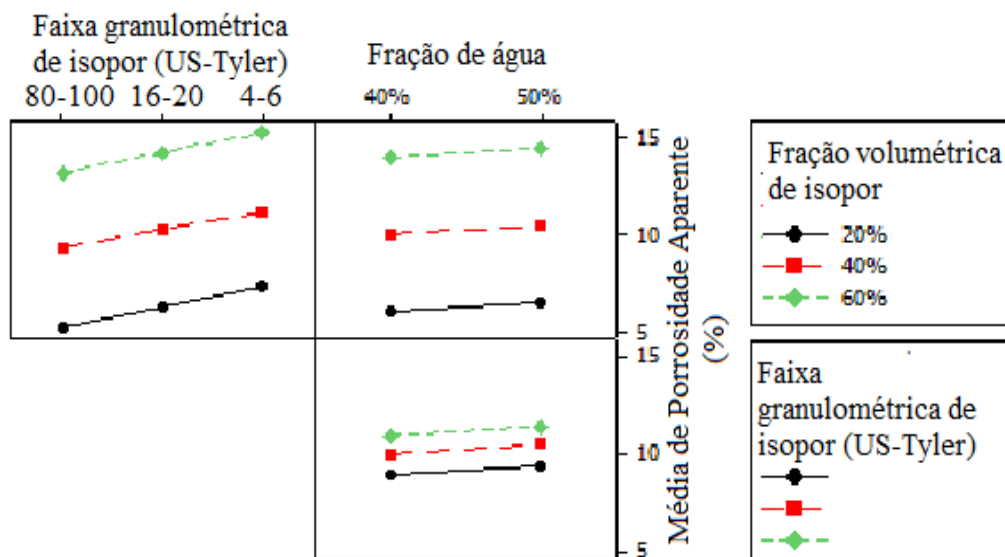


FIGURA 4.8. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da porosidade aparente

4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A média dos valores de resistência à compressão dos compósitos variaram de 2,61 a 20,80 MPa enquanto os compósitos cimentícios somente com cimento, areia e água (variando em 40% e 50%) teve o valor médio de 21,10 e 20,21 MPa respectivamente. O valor de R^2 ajustado de 94,61% indica o ajuste satisfatório do modelo adotado aos resultados da resistência à compressão obtidos.

Quando se trata de excesso de água, esta sempre começa escorrer pelas gretas da forma, ou, no caso destas estarem bem vedadas, a água excedente a subir para a superfície do concreto. Quanto maior a quantidade de água, maior foi o número de vazios com tendência de uma mistura menos resistente e menor durabilidade.

O cimento é a matriz do compósito, então quanto maior a quantidade de cimento e menor a faixa granulométrica de cimento, menor a resistência do compósito cimentício. Isto se deve ao fato de ocupar uma maior área superficial (Figura 4.9).

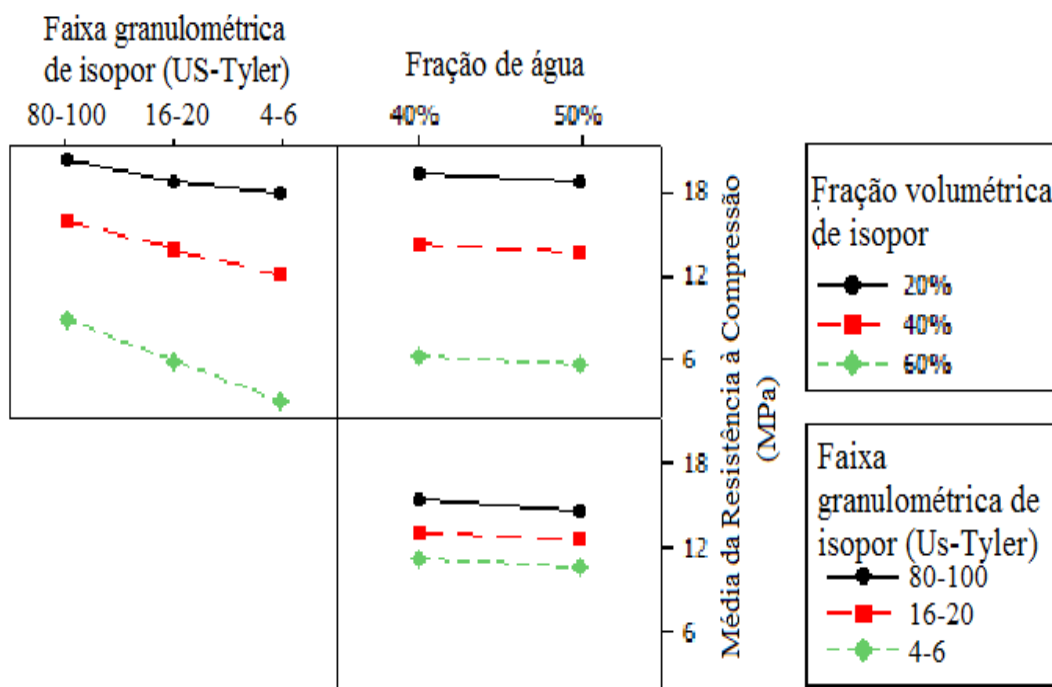


FIGURA 4.9. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da resistência à compressão

4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A média dos valores de absorção de água dos compósitos variaram de 2,95 a 20,65 enquanto os compósitos cimentícios somente com cimento, areia e água (variando em 40% e 50%) teve o valor de 5,00 e 5,25 respectivamente. O valor de R^2 ajustado de 99,76% indica o ajuste satisfatório do modelo adotado aos resultados da Absorção de Água obtidos.

A absorção de água é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros, portanto, quanto maior a quantidade de água, maior foi a impermeabilidade da pasta.

A Figura 4.10 exhibe o efeito da interação dos fatores “fração de quantidade de isopor, faixa granulométrica de isopor e fração de água” sobre a absorção de água. A zona de interface absorve mais água, pois quanto maior a quantidade de isopor e menor a faixa granulométrica de isopor, isso acontece por ter maior área superficial.

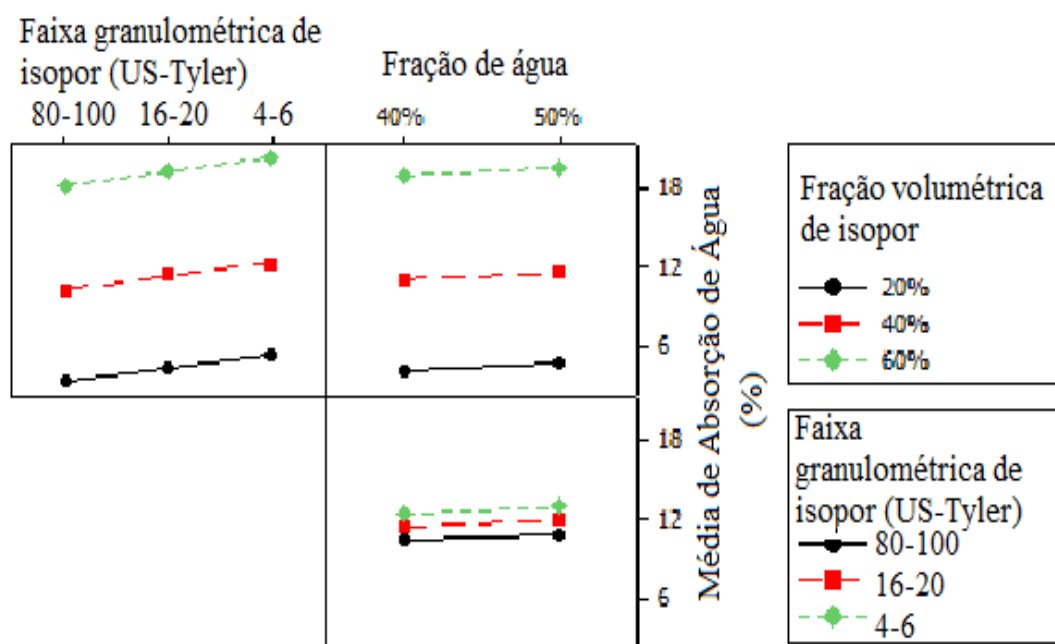


FIGURA 4.10. Gráfico efeito da interação faixa granulométrica de isopor, fração de quantidade de isopor e fração de água sobre a média da absorção de água

4.6 ANÁLISE MACROSCÓPICA

A Figura 4.11 mostra os corpos de prova fabricados das 18 condições experimentais (Tabela 3.2) referentes aos compostos cimento, isopor e água (C1 ao C18) e as 2 condições de referência aos compostos cimento e água (R1 e R2).



FIGURA 4.11. Compostos fabricados com cimento, isopor e água.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

O processo de fabricação dos compósitos desenvolvidos mostrou ser simples, sendo os materiais obtidos da mistura direta entre as fases.

A incorporação progressiva da quantidade de isopor, como também na granulométrica do isopor, conferiu reduções na densidade volumétrica e na densidade aparente, devido à baixa densidade do isopor utilizado no experimento.

A variável resposta porosidade aparente mostrou que qualquer compósito cimentício com a fração de isopor de 20% e a fração de 40% nos níveis das faixas granulométricas de 80-100 US-Tyler, apresentou menor valor que os compósitos cimentícios sem qualquer adição de isopor.

Dos compósitos, pode-se notar que a resistência específica, ou seja, considerando a resistência à compressão e a leveza do material, dos fatores/níveis de fração de isopor de 40%, faixa granulométrica de 4-6 US-Tyler e fração de 50% de água apresentou uma alta resistência específica, podendo ser aplicado em diversas ocasiões onde não haja exigência de resistência a grandes esforços.

Conclui-se também que a incorporação de isopor em maiores quantidades possa diminuir a densidade ainda mais, mantendo uma resistência suficiente para aplicações não estruturais, tais como revestimento de painel, muro cortina e piso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrapex - Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. Disponível em <http://www.abrapex.com.br/> (acessado em 03/03/2010)

ABREU, J. V., Palestra técnica de cimentos para pré-moldados, Seminário nacional de blocos de concreto para alvenaria e pavimento de concreto, Instituto de Engenharia de São Paulo, São Paulo / SP, 2001.

Ambiente Brasil. Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/isopor.html> (acessado em 03/03/2010)

ACI Committee 213 R-87, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1987.

AKCELRUD, Leni. Fundamentos da ciência dos polímeros. São Paulo: Manole, 2007

BABU, K.; BABU, D. S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, Cement and Concrete Research, 33 (2003) 755 – 762.

BABU, K.; BABU, D.S. Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, Cement and Concrete Composites, 26 (2004) 605 – 611.

BABU, D.S.; BABU, K.; HUAN W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 28 (2006) 520 - 527.

BAGON, C.; FRONDISSTOU-YANNAS, S. Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads, Mag. Concr. Res. 28 (1976) 225– 229.

BISCHOFF, P.H.; YAMURA, K.; PERRY, S.H. Polystyrene aggregate concrete subjected to hard impact, Proc.-Inst. Civ. Eng. 2. Res. Theory 89 (1990) 225– 239.

BISSCHOP, J.; VAN MIER, J.G.M. Effect of aggregates and microcracks on the drying rate of cementitious composites, *Cements and Concrete Research*, 38 (2008) 1190 – 1196.

BRITISH STANDARD. BS 7591-1: Porosity and pore size distribution of materials. Method of evaluation by mercury porosimetry, 1992.

BRITISH STANDARD. BS 1881-122: Testing concrete. Method for determination of water absorption, 1983.

BRITISH STANDARD. BS EN 12390-3: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2002.

BRITISH STANDARD. BS 1881-209: Testing concrete. Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity, 1990.

CALLISTER, Willian D. Junior. *Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Ed 5.

Cimento. Org. Disponível em www.cimento.org (acessado em 04/05/2011)

COOK, D.J. Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete, *Precast Concr.* 4 (1973) 691– 693.

COOK, D.J. in: SWAMY, R.N. (Ed.), *Expanded Polystyrene Concrete, Concrete Technology and Design: (1)*. New Concrete Materials, Surrey University Press, London, 1983, pp. 41– 69.

CHEN, B.; Liu, J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1259 – 1263.

DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement and Concrete Composites*, 26 (2004) 919-933.

Ebah. Disponível em www.ebah.com.br (acessado em 07/04/2011)

EMOTO, T.; BIER, T. A. Rheological behavior as influenced by plasticizers and Hydration kinetics. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p 647-654, may 2007.

FRANCIS, A. J., *The Cement Industry 1796-1914: A History*, Ing.: David & Charles, 1977.

GODWIN, A. Versatile concrete blocks for the third world, *Indian Concr. J.* (1982, September) 240– 241.

GUAN, H.; LIU, S.; DUAN, Y; ZHAO, Y. Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composite filled with EPS, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 49 – 54

HANNA, A.N. Properties of expanded polystyrene concrete and applications for pavement sub-bases, *Res. Develop. Bull.-Portland Cem. Assoc.* (Rd 055.01P).

HEWLETT, P. C. (Ed). *LEA's Chemistry of cement and concrete*. 4. Ed. [S.I.]: Elsevier, 1083p. 2006.

HOFF, G.C. New applications for low density concretes, *Lightweight Concrete*, ACI SP, vol. 29, American Concrete Institute, Detroit, 1971, pp. 181– 220.

JAWED, I., SKALNY, J., YOUNG, J.F. Hydration of Portland Cement – 1983. In: BARNES, P., ed. *Structure and Performance of Cements*. London, Applied Science.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 3, p. 138-142, 2002.

LAUKAITIS, A.; ZURAUŠKAS, R.; KERIENE, J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*, 27-1 (2005) 41–47.

LE ROY, R.; PARANT, E.; BOULAY, C. Taking in account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 770 – 775.

LIMA, P.R.L.. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese (Doutorado)- UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

MARUSIN, S. L. Ancient Concrete Structures, *Concrete International* 18 (1996) 56-58.

MOSTAFA, N. Y.; BROWN, P. W. Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. *Thermochimica Acta*, Vol. 435, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1 ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.M. *Concrete: Microstructure, properties and materials*, Editora University of Califórnia, 1ed., Berkeley, 2001.

MILED, K.; LE ROY, R.; SAB, K.; BOULAY, C. Compressive behaviour of an idealized EPS lightweight concrete size effects and failure mode. *Mechanics of Materials*, 36 (2004) 1031 – 1046.

MILED, K; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modeling, *Mechanics of Materials*, 39 (2007) 222 - 240.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to statistical quality control*. USA: John Wiley & Sons, 1997.

NELSON, E.B. *Well Cementing*. Houston: Schlumberger Educational Services, 1990, 487p

PARANT, E.; LE ROY, R. *Optimisation des bétons de densité inférieure a 1*. Tech. rep., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1996.

PERRY, S.H.; BISCHAFF, P.H.; YAMURA, K. Mix details and material behavior of polystyrene aggregate concrete, *Mag. Concr. Res.* 43 (1991) 71– 76.

SHORT, A.; KINNIBURGH, W. *Lightweight Concrete*, 3rd ed., Ing.: Applied Science Publishers, 1978.

SRI RAVINDRARAJAH, R.; TUCK, A.J. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads, *Cem. Concr. Compos.* 16 (1994) 273– 277.

SUSSMAN, V. Lightweight plastic aggregate concrete, *ACI J.* (1975, July) 321–323.

TANG, W.C.; LO, Y.; NADEEM, A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural graded polystyrene aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008) 403 – 409.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. 3rd ed. New Jersey: Thomas Telford, 1997.

ZAMPIERI, V. A. *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. São Paulo: USP.

ZHANG, M.H.; GJORV, O.E. Mechanical properties of high strength lightweight concrete, *ACI Mater. J.* 88 (3) (1991) 240– 247.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. *Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.