

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Paulo Fonseca Junior

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO
SUSTENTÁVEL: BLOCO DE ALVENARIA COM
ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de Concentração: Produção e Tecnologia

Orientador: Prof. Carlos Henrique Pereira Mello, Dr.

Co-orientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Novembro de 2013

Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Paulo Fonseca Junior

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO
SUSTENTÁVEL: BLOCO DE ALVENARIA COM
ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de Novembro de 2013, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello (orientador)
Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (co-orientador)
Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes
Prof.^a Dr.^a Valquíria Claret dos Santos

Novembro de 2013
Itajubá

Dedicatória

Dedico este trabalho em especial à minha esposa Michelle e à minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela graça de abraçar a oportunidade quando me foi presenteada e pela força para perseverar até a sua conclusão;

À minha amada esposa Michelle que muito se esforçou e apoiou esta realização, com sua paciência, amor e amizade;

A meus pais, que infelizmente não tiveram a oportunidade de estudar, mas que ensinaram várias lições de vida muito importantes;

A minha irmã Adriana e meu cunhado Marcio, grandes responsáveis pelo incentivo inicial e pelo apoio incondicional de retorno aos estudos;

Ao professor e amigo Carlos Henrique Pereira Mello pela confiança, orientação e apoio tão fundamentais para a realização deste trabalho;

Ao professor Anderson Paulo de Paiva pela valorosa orientação e apoio para a realização deste trabalho;

Aos professores Carlos Eduardo Sanches da Silva e João Batista Turrioni, pela valiosa amizade e companheirismo, combustível fundamental para a realização deste trabalho;

Ao amigo Leandro Barsottini, pela amizade e companheirismo no decorrer deste trabalho.

Aos amigos Jeferson (Fortebloco), Marcos Vieira, Ana Lucia e Equipe Siqueira Silva e tantos outros, os quais, cada um à sua maneira, suavizaram o caminho percorrido;

À Universidade Federal de Itajubá, através do Instituto de Engenharia de Produção, por tornar possível essa realização;

Aos parceiros da PUC – Poços de Caldas, Professor Luís Reis e o monitor Esteferson Rodrigo pela valiosa colaboração no laboratório de ensaios.

Enfim, a todos que contribuíram para esta conquista, meus sinceros agradecimentos.

“Revelemo-nos mais por atos que por palavras,
dignos de possuir este grande país.”
(Dr. Theodomiro Carneiro Santiago)

Resumo

O esgotamento dos recursos naturais no planeta e o descarte de resíduos não recicláveis de diversos produtos, nos remete a sermos conscientes no nosso comportamento e desenvolvimento. A possibilidade de desenvolver um produto sustentável e de baixo custo, que possibilite a redução do descarte de Poliestireno Expandido - EPS (ou Isopor), descartado nos aterros, e o consumo de areia extraída dos rios, motivaram o desenvolvimento deste projeto. O objetivo principal é desenvolver um bloco de alvenaria de baixo custo e sustentável, para o segmento da construção civil, com a inserção de Isopor descartado e moído e que atenda às especificações técnicas correspondentes, com foco em resistência à compressão e índice de absorção, conforme os requisitos da norma NBR 6136. Utilizou-se o método de experimentos com misturas na tentativa de se definir um ponto ótimo ou uma região ótima para fabricação de blocos de alvenaria. Espera-se que esta inserção do Isopor diminua a necessidade de areia para a confecção dos blocos, reduzindo assim seu custo e impacto causado ao meio ambiente. Baseado na análise das respostas de 36 experimentos, verificou-se que quando se insere o resíduo de Isopor moído na composição do bloco e deseja-se elevar o resultado de uma das respostas (resistência à compressão, índice de absorção ou custo unitário), as outras serão reduzidas proporcionalmente. Para a resistência à compressão, 80% dos experimentos atenderam à classificação de B a D. Para o índice de absorção todos os experimentos atenderam à especificação. Para o custo unitário por bloco, verificou-se que, em comparação a três fabricantes, os blocos alternativos obtiveram um custo menor.

Palavras-chave: Desenvolvimento de produto sustentável; Bloco de Alvenaria; Sustentabilidade; Delineamento de experimentos de misturas.

Abstract

The exhaustion of natural resources in the planet and non-recyclable waste discard of several products, leads us to be aware of our behavior and development. The possibility of developing a sustainable product and also with low cost, that allowing the reduction of Expanded Polystyrene waste- EPS (or Styrofoam), disposed in landfills, and consumption of sand from rivers, motivated the development of this project. The main objective is to develop a masonry block with low-cost and sustainable for the civil construction industry that includes discarded and grounded Styrofoam, and also meets the corresponding technical specifications, focusing on the compressive strength and absorption level, according NBR 6136 requirements. Mixture experiments was the used method in order to determine an optimum or best region for manufacture the masonry blocks. Inserting Styrofoam expects that occur the decreasing of sand necessity for manufacture the blocks, reducing its cost and impact on the environment. Based on the analysis of 36 experiment responses, it was possible founding that when inserting the residue of grounded Styrofoam, and it is desired raising the result of the response (compressive strength, absorption level or unit cost), the others will be reduced proportionately. For compressive strength, 80% of experiments met the classification B to D. For the absorption level, all experiments met the specification. For the unit cost per masonry block, it was found that, in comparison to three common manufacturers, the masonry blocks achieved a lower cost.

Keywords: Sustainable product development; Masonry blocks, Sustainability; DOE of mixtures.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Triângulo de definição de sustentabilidade.....	22
Figura 2.2: Inter-relação dos três fatores de sustentabilidade.....	22
Figura 2.3: Sistema perfeito.....	24
Figura 2.4: Ciclo de vida do EPS.....	27
Figura 2.5: Ciclo de vida de um produto.....	29
Figura 2.6: Critérios para produtos sustentáveis.....	30
Figura 2.7: Bloco estrutural e bloco de vedação.....	31
Figura 2.8: Bloco de alvenaria vazado.....	32
Figura 2.9: Exemplo de delineamento de experimentos com misturas.....	37
Figura 2.10: Exemplo de <i>Simplex Lattice Design</i>	39
Figura 2.11: Exemplo de <i>Simplex Centroid Design</i>	40
Figura 2.12: Exemplos de <i>Extreme Vertice Design</i>	41
Figura 3.1: Planejamento metodológico da pesquisa.....	42
Figura 3.2: SIPOC do processo de fabricação do bloco alternativo.....	44
Figura 3.3: Método para a fase de experimentação.....	45
Figura 3.4: Balde com escala de medição em litros.....	47
Figura 3.5: Componentes dentro da betoneira.....	47
Figura 3.6: Exemplos de resíduos de Isopor.....	48
Figura 3.7: Moagem do resíduo de Isopor.....	48
Figura 3.8: Granulometria do Isopor após processo de moagem.....	49
Figura 3.9: Massa da mistura na máquina vibro prensa.....	49
Figura 3.10: Prensagem da massa contra o molde.....	50
Figura 3.11: Blocos após vibração e prensagem.....	50
Figura 3.12: Retirada dos blocos da máquina vibro prensa.....	50
Figura 3.13: Transporte dos blocos para a área de cura.....	51
Figura 3.14: Blocos alocados na área de cura.....	51
Figura 3.15: Funções multiobjetivos definidas para análise.....	52
Figura 4.1: Região ótima de mistura dos componentes para resistência.....	55
Figura 4.2: Plotagem da superfície da região ótima para resistência.....	56
Figura 4.3: Resposta ótima da proporção dos componentes para resistência.....	57
Figura 4.4: Região ótima de mistura dos componentes para absorção.....	58
Figura 4.5: Plotagem da superfície da região ótima para absorção.....	60

Figura 4.6: Resposta ótima da proporção dos componentes para absorção.....	61
Figura 4.7: Região ótima de mistura dos componentes para custo unitário.....	63
Figura 4.8: Plotagem da superfície da região ótima para custo unitário.....	64
Figura 4.9: Resposta ótima da proporção dos componentes para custo unitário.....	65

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Especificação mínima da propriedades do EPS.....	25
Tabela 2.2: Dimensões reais dos blocos.....	33
Tabela 2.3: Designação por classe, largura e espessura da parede dos blocos.....	33
Tabela 2.4: Requisitos para resistência, absorção e retração.....	34
Tabela 2.5: Tipos de cimento Portland e suas aplicações.....	34
Tabela 3.1: Experimentos bloco alternativo.....	46
Tabela 4.1: Comparação das misturas conforme especificação.....	53
Tabela 4.2: Equação para maximizar a característica resistência à compressão.....	55
Tabela 4.3: Equação para minimizar a característica absorção.....	59
Tabela 4.4: Equação para minimizar a característica custo unitário.....	64

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1: Classificação dos blocos de alvenaria alternativos.....	54
Gráfico 4.2: Absorção média dos blocos de alvenaria alternativos.....	58
Gráfico 4.3: Resultados de custo unitário por bloco.....	62
Gráfico 4.4: Comparativo de custo entre bloco alternativo x convencional.....	62

Lista de abreviaturas e siglas

EPS – *Expanded Polystyrene* (Poliestireno expandido);

DPS – Desenvolvimento de Produto Sustentável;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial;

DOE – *Design of Experiments* (Delineamento de experimentos);

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações iniciais.....	15
1.2 Objetivo.....	17
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Limitações.....	18
1.5 Estrutura do trabalho.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Considerações iniciais.....	19
2.2 Países em desenvolvimento e descarte de resíduos.....	19
2.3 Sustentabilidade.....	21
2.4 Poliestireno expandido (Isopor) e seu descarte.....	24
2.5 Desenvolvimento de Produto Sustentável.....	27
2.6 Bloco de Alvenaria.....	31
2.7 Delineamento de experimentos com misturas.....	37
3. MÉTODO DE PESQUISA	42
3.1 Fundamentação teórica preliminar.....	42
3.2 Coleta de dados exploratória.....	43
3.3 Fundamentação teórica abrangente.....	43
3.4 Definição dos parâmetros da formulação do bloco alternativo.....	44
3.5 Experimentação.....	45
3.6 Critério para análise dos resultados.....	51
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1 Resultados de resistência à compressão.....	53
4.2 Resultados de absorção.....	57
4.3 Resultados de custo unitário por bloco.....	61
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	66
6. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Uma perceptível explosão demográfica e a melhoria no nível de vida provocaram um crescimento exponencial na demanda por consumo de produtos, levando assim, a produção de bens e, finalmente, ao descarte de resíduos, gerando poluição e desperdícios (GEHIN, ZWOLINSKI e BRISSAUD, 2007). É de amplo conhecimento que o planeta Terra possui uma quantidade limitada de recursos e que as atividades humanas diárias provocam sérios impactos ambientais, muitas das vezes causados pelo descarte desordenado de resíduos, que remete à prática de um pensamento e um estilo de vida cada vez mais sustentável.

De acordo com Ljunberg (2007), as medidas para o desenvolvimento de produtos sustentáveis devem ocorrer desde a extração da matéria prima, até o estágio de disposição do resíduo no fim do ciclo de vida do produto.

Mesmo com o crescente apelo para uma consciência sustentável, ainda é possível observar descuidos e pouco interesse na reciclagem de alguns resíduos, como por exemplo, o Isopor. Conforme Guimarães, Pessoa e Fornari (2009), o Isopor apresenta uma baixa densidade e apresenta grandes dificuldades de ser reprocessado em equipamentos convencionais, pois ocupa grande volume e pequena quantidade mássica, inviabilizando economicamente a produção de artefatos.

Associado a isso, ainda é também notório a baixa utilização dos blocos de alvenaria em algumas regiões do país, pois somente na década de 1970 que o bloco de alvenaria obteve aceitação no mercado de construção civil brasileiro. Mas, sua utilização iniciou-se em obras públicas e edifícios de, no máximo, cinco pavimentos, gerando uma imagem negativa para este tipo de sistema estrutural (IZQUIERDO, 2011). Dentre os fatores atribuídos a este aspecto, destaca-se o pouco conhecimento técnico sobre este recurso de alvenaria, desde a fabricação dos blocos de alvenaria nas empresas de produção até o desenvolvimento das potencialidades que podem ser observadas na sua aplicação (AKALIN *et al.*, 2010).

Uma pesquisa preliminar no site do Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI (2013) para a palavra-chave bloco de alvenaria retornou em sete resultados, enquanto que para a palavra-chave bloco de construção retornou 78 resultados. Porém, nenhum desses resultados tratava da proteção para um bloco alternativo sustentável com

inserção de Isopor descartado e moído em sua composição como é a proposta da presente pesquisa.

Diante deste cenário, observou-se uma oportunidade de desenvolvimento de um produto sustentável, de baixo custo e com um mercado propício a crescimento. De acordo com Brito (2004), o segmento de construção civil ainda tem muito a ser explorado, pois o tempo de execução é grande, tendo possibilidades de eliminação de tarefas e elaboração de produtos ecologicamente corretos. Whang (2009) completa que o segmento de construção civil vem estudando extensivamente a viabilidade de utilizar materiais reciclados e a utilização de resíduos descartados, com o objetivo de reduzir o consumo de recursos naturais.

Praticamente não existem trabalhos publicados sobre o reaproveitamento de Isopor e a possibilidade de confeccionar blocos de alvenaria alternativos motivam a elaboração deste presente projeto de pesquisa. Podem-se citar alguns trabalhos que utilizam o isopor como matéria prima na redução de peso em concreto e blocos de alvenaria. Por exemplo, Badu, Badu e Tiong-Huan (2006) apresentam placas novas de Isopor como uma alternativa para redução de peso em concreto e Xu *et al.* (2012) utilizaram esferas novas de Isopor para reduzir peso em blocos utilizando o método Taguchi.

Em virtude disso, o presente projeto de pesquisa também vai analisar se a inserção de Isopor descartado e moído reduz custos na fabricação de blocos de alvenaria, mantendo suas características físicas e mecânicas, conforme especificações técnicas pertinentes; e apresentar uma forma para o reaproveitamento de um resíduo descartado em abundância pela população em geral.

Uma pesquisa preliminar no Portal de Periódicos da Capes apresentou 88 artigos, entre os anos de 1984 a 2013 utilizando a palavra-chave “*masonry block*” (bloco de alvenaria) no título dos trabalhos. Desses, 59% foram publicados entre 2008 e 2013.

Para mencionar alguns desses trabalhos, Diaz *et al.* (2011) buscaram otimizar o projeto e a forma dos blocos de alvenaria por meio dos elementos finitos. Zhai e Stewart (2010) analisaram a confiabilidade estrutural de paredes de alvenaria com blocos de concreto com reboco reforçado. Vyas e Reddy (2009) avaliaram a força de compressão prismática de blocos de alvenaria por meio de elementos finitos. Turgut (2008) analisou as propriedades dos blocos de alvenaria produzidos com serragem, pó de vidro e resíduos de calcário. Entretanto, Xu *et al.* (2012) inseriram EPS virgem na argamassa buscando

reduzir o peso dos blocos, porém utilizando o método Taguchi de experimentos. Assim, pode-se afirmar que nenhum dos trabalhos publicados no período analisado tem uma proposta similar à desenvolvida neste presente trabalho.

Assim, a contribuição científica esperada para este trabalho é de apresentar um novo agregado a ser inserido na mistura dos blocos de alvenaria, de forma que o bloco atenda às normas pertinentes para sua utilização na construção civil, que neste caso é a NBR 6136. Em uma pesquisa preliminar nos trabalhos consultados pôde-se observar que os pesquisadores não utilizaram o método de delineamento de experimentos (*Design of Experiments* – DOE) de misturas para a elaboração da massa dos blocos de alvenaria.

1.2. Objetivo

Para sanar os problemas de pesquisa identificados, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um bloco de alvenaria de baixo custo e sustentável, para o segmento da construção civil, com a inserção de Isopor descartado e moído e que atenda às especificações técnicas correspondentes, com foco em resistência à compressão e índice de absorção, conforme os requisitos da norma NBR 6136 (2007).

1.3. Justificativa

Os blocos de alvenaria podem ser utilizados em vários tipos de construção, principalmente para a construção de casas populares. Uma vez que são necessários vários blocos para construir uma casa, observou-se a oportunidade de inserir Isopor moído em sua composição, uma vez que não foram encontrados trabalhos na literatura disponível que propusessem a inserção do Isopor no bloco como forma de reaproveitamento.

Conforme Pushpadass *et al.* (2010), é difícil e inviável economicamente coletar e dispor o resíduo de EPS, por isso, a sua reciclagem e implicações ecológicas se tornaram uma preocupação ainda maior. Uma vez que se utiliza em diversas situações do cotidiano as embalagens contendo Isopor, o presente trabalho espera contribuir apresentando uma forma de reaproveitamento deste resíduo. O resíduo de EPS causa poluição ambiental e o custo de estoque deste resíduo é alto. Reutilização, reciclagem e redução são considerados como os únicos métodos de recuperação deste resíduo. Portanto, existem várias oportunidades de melhoria nesses processos de recuperação (KAN e DEMIRBOGA, 2009).

1.4. Limitações

Como limitações do presente trabalho podem-se citar:

- Não será avaliada a possível redução nos impactos ambientais em substituir o agregado miúdo, neste caso a areia, pelo resíduo de Isopor moído;
- Não será avaliado se há viabilidade financeira do processo de fabricação dos blocos, que neste caso, contemplam o processo de moagem do Isopor;
- Não serão avaliados os resultados dos testes de retração, visto que são facultativos, conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007);
- Não serão considerados os resultados dimensionais, visto que todos os experimentos atenderam às tolerâncias exigidas conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007);
- Não serão avaliadas outras aplicações do Isopor no setor de construção civil que não seja em blocos de alvenaria.

1.5. Estrutura do trabalho

A dissertação foi dividida em cinco capítulos.

O **Capítulo 1** contém uma introdução ao tema de pesquisa, o objetivo geral, as justificativas e as limitações.

O **Capítulo 2** apresenta informações a respeito dos países em desenvolvimento e o seu respectivo gerenciamento dos resíduos, sustentabilidade, poliestireno expandido (Isopor) e seu descarte, desenvolvimento de produtos sustentáveis, blocos de alvenaria e o método experimental com o delineamento de experimentos de misturas.

O **Capítulo 3** detalha o método utilizado e o programa experimental utilizado, para se obter os resultados deste trabalho.

O **Capítulo 4** apresenta e discute os resultados obtidos com os ensaios de análise dimensional, resistência à compressão e teste de absorção dos blocos confeccionados.

O **Capítulo 5** é dedicado às conclusões obtidas com a realização do trabalho experimental. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros para que possa dar continuidade ao presente estudo elaborado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

É instigante o fato de que as ações humanas diárias causam impacto ao meio ambiente e que a população mundial gera toneladas de resíduos de todos os tipos a cada momento. Isso sem falar no consumo exagerado de materiais não recicláveis e a utilização de recursos naturais não renováveis. Isto, porque tem-se um rápido crescimento na geração de resíduos e um número limitado de locais para descarte e uma melhoria no programa de reciclagem de resíduos deve ser reconhecida como uma das soluções mais viáveis e práticas (FARZADKIA *et al.*, 2012).

Essa preocupação em como lidar com os resíduos gerados é um dos tópicos em discussão na vida cotidiana da população e de pesquisadores. Conforme Koroneos e Nanaki (2012), estratégias inovadoras são necessárias para lidar com os resíduos que são gerados diariamente, a fim de se prevenir problemas para as gerações futuras. E, além disso, é perceptível que esta preocupação é maior quando direciona-se esse assunto para países em desenvolvimento.

2.2 Países em desenvolvimento e o gerenciamento de resíduos

Pode-se definir o termo “países em desenvolvimento” como aqueles que devido às várias necessidades estruturais, como alimentação, saúde, educação e habitação, permitem que uma significativa parte de sua população viva em situação de pobreza, abaixo dos índices de desenvolvimento humano (KEMMLER e SPRENG, 2007).

Países em desenvolvimento estão em rápida urbanização e crescimento urbano. Marshall e Farahbakhsh (2013) comentam que a gestão de resíduos sólidos tornou-se um crescente problema de preocupação global, principalmente em países em desenvolvimento, devido ao crescimento desordenado da população urbana e da constante mudança nos padrões de consumo. Com esta regência e ritmo de crescimento, grandes desafios para o desenvolvimento vêm surgindo, entre os quais pode-se citar a gestão dos resíduos sólidos urbanos em áreas metropolitanas (OWUSU, OTENG-ABABIO e AFUTU-KOTEY, 2012).

Conforme Guerrero, Maas e Hogland (2013), a gestão de resíduos sólidos é um desafio para as autoridades das cidades nos países em desenvolvimento, principalmente devido ao aumento da produção dos resíduos e conseqüentemente a carga colocada no orçamento do município.

Cohen (2004) explica que as tendências contemporâneas de urbanização em muitos países em desenvolvimento são fortemente influenciadas pela globalização, que favorece a concentração de atividades econômicas, capitais e pessoas nas grandes cidades. Conforme Franchetti (2011), em se tratando de geração de resíduos sólidos, a variável mais significativa para a produção e volume dos resíduos é quantidade de pessoas, onde maior a população, maior a geração de resíduos.

É importante ressaltar que existe um grande contraste definido entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento (TROSCHINETZ e MIHELICIC, 2009). Os países desenvolvidos, por já possuírem uma boa estrutura para sua população, acabam por investir mais recursos na geração, coleta e disposição dos resíduos gerados, possuindo fortes atividades de reciclagem (TROSCHINETZ e MIHELICIC, 2009).

Já em países em desenvolvimento, existe uma carência de recursos a serem investidos em infraestrutura básica e, por conta disso, acabam por praticar um crescimento desordenado das cidades e não planejam de forma ordenada um correto tratamento dos resíduos gerados. Kemmler e Spreng (2007) afirmam que há uma diferença essencial entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. Nos países desenvolvidos, o termo sustentabilidade foca no aspecto ambiental, enquanto que em países em desenvolvimento os aspectos relacionados ao social e a economia são igualmente importantes e prioritários.

Conforme Chong, Matsufuji e Hassan (2005), muitos dos locais de deposição de resíduos sólidos em países em desenvolvimento são locais abertos ou, de alguma maneira, controlados. Conceitos sanitários adequados não são praticados ou implantados nesses locais de deposição, por motivos de restrições econômicas e tecnológicas.

Troschinetz e Mihelcic (2009) observaram que nos países em desenvolvimento, a taxa média de resíduos sólidos gerados é de 0,77 Kg/dia, sendo que a taxa de reaproveitamento pode variar de 5 a 40%, no máximo.

Uma saída viável para este problema seria tratar os resíduos gerados diariamente em todo o mundo (SEADON, 2010). Muitos dos problemas ambientais estão relacionados ao descarte dos mais variados tipos, como por exemplo, pneus, madeiras, restos de construção civil e os mais variados tipos de embalagens. Neste contexto, as embalagens dos mais variados produtos são enviadas aos aterros, trazendo problemas ambientais. De acordo com Pushpadass *et al.* (2010), uma quantidade significativa das embalagens é utilizada somente uma vez e descartada.

Pode-se dizer que resíduo é o resultado de falha no planejamento no desenvolvimento do produto e um pensamento inadequado dos consumidores. A abordagem tradicional para gerenciamento dos resíduos, principalmente em países em desenvolvimento, é lançar ou depositar em algum lugar, queimar ou simplesmente picar. É um comportamento inadequado e está resultando em uma sociedade insustentável. Uma gestão robusta da coleta de resíduos torna-se necessária para se atingir a sustentabilidade. Porém, o gerenciamento de resíduos é visto somente como parte do sistema de geração, coleta e disposição (SEADON, 2010). Mas o gerenciamento de resíduos precisa de uma melhor abordagem para atingir a sustentabilidade.

Ainda conforme Seadon (2010), a abordagem convencional de gerenciamento de resíduos é que a geração, coleta e disposição de resíduos são planejadas como operações independentes. No entanto, todas as três operações são extremamente interligadas e cada componente pode influenciar o outro. Esta visão de que todas essas fases estão estreitamente interligadas nos auxilia a sermos capazes de atingir a sustentabilidade.

2.3 Sustentabilidade

Na década atual é comum deparar-se com notícias de desastres naturais e com comportamentos inadequados, onde resíduos são direcionados para aterros e lixões sem qualquer tratamento. Pialot, Millet e Tchertchian (2012) acreditam que nossa sociedade está cada vez mais preocupada com as questões ambientais. O termo sustentabilidade é apresentado de forma a modificar o pensamento humano para um meio ambiente favorável para as gerações futuras e, ao encontro disso, Blengini *et al.* (2012) afirmam que o tópico sustentabilidade é uma meta oficial da política dos países da União Europeia. Lockrey e Johnson (2013) comentam em sua pesquisa, que a sustentabilidade é um grande problema global e, como tal, é um dos principais direcionadores que irá auxiliar na formação de designers e engenheiros a se tornarem praticantes de sustentabilidade em um futuro bem próximo.

De acordo com Ljunberg (2007), Glavic e Lukman (2007) e Tanguay *et al.* (2010), o conceito de sustentabilidade pode ser definido com três conceitos que são apresentados em forma de triângulo, conforme a Figura 2.1, com os seguintes vértices:

- Ecologia (Proteção ao meio ambiente);
- Sociedade (Equiparidade social);
- Economia (Crescimento econômico viável).

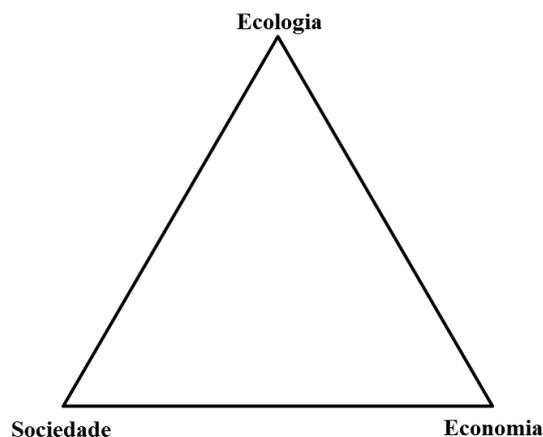


Figura 2.1: Triângulo de definição de sustentabilidade
Fonte: Adaptado de Ljunberg (2007)

Já para Tanguay *et al.* (2010) e Rashid (2011), sustentabilidade é a inter-relação das demandas ambiental, social e econômica, conforme ilustra a Figura 2.2. É possível sustentar perfeitamente as três demandas no nosso planeta, porém isso depende da uniformização e da sincronização desses três fatores.

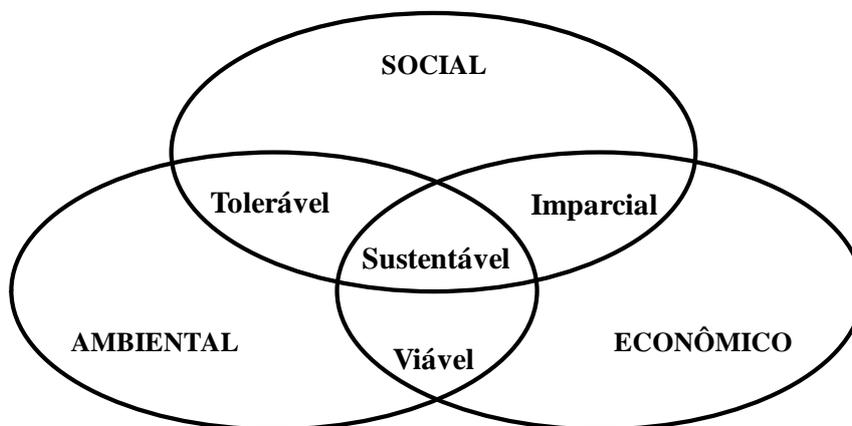


Figura 2.2: Inter-relação dos três fatores de sustentabilidade
Fonte: Adaptado de Rashid (2011)

Mori e Christodoulou (2012) acrescentam que o termo sustentabilidade deve:

- Considerar o triângulo de sustentabilidade envolvendo os tópicos ambientais, sociais e econômicos;
- Manter a igualdade entre a geração atual e as futuras gerações;
- Oferecer condições saudáveis e favoráveis relacionadas ao triângulo de sustentabilidade e a igualdade entre as gerações no longo prazo.

Para Marchand e Walker (2008), em se tratando de iniciativas individuais e de forma sustentável, um consumo responsável pode ser expresso pelos seguintes elementos:

- **Abstenção:** Conter-se ao consumo ou, em alguns casos, consumir menos;
- **Atitude:** Perceber que o que excede as necessidades básicas de uma pessoa é negativo;
- **Consciência:** Escolha de produtos baseados em suas qualidades ecológicas;
- **Alternativa:** Identificar produtos substitutos no lugar do consumo tradicional (exemplo: ao invés de trocar de produto, consertar).

Para Holmberg, Azar e Lindgren (1996), a definição de sustentabilidade deve responder aos seguintes requisitos gerais:

- Basear-se fundamentalmente em recursos renováveis;
- Utilizar da melhor forma os recursos não renováveis;
- Não acumular lixo que o ecossistema não seja capaz de “absorver”;
- Agir de modo que cada indivíduo, e cada comunidade das sociedades ricas, permaneçam nos limites de seu espaço ambiental, e que cada indivíduo das sociedades pobres possam efetivamente gozar do seu espaço ambiental de direito.

O indivíduo pode ser influenciado a acreditar que ter uma empresa sustentável, ou simplesmente atos sustentáveis, são ações inatingíveis e impossíveis de se conseguir. Conforme descrito por Lindsey (2011), três princípios podem ser aplicados para aproximar um indivíduo da sustentabilidade:

- Sustentabilidade é atingida através da redução dos desperdícios;
- Melhorando a qualidade melhora-se a sustentabilidade;
- Sustentabilidade é atingida por implantação de sistemas melhores.

Os processos produtivos deveriam se apresentar conforme o ecossistema da Figura 2.3.

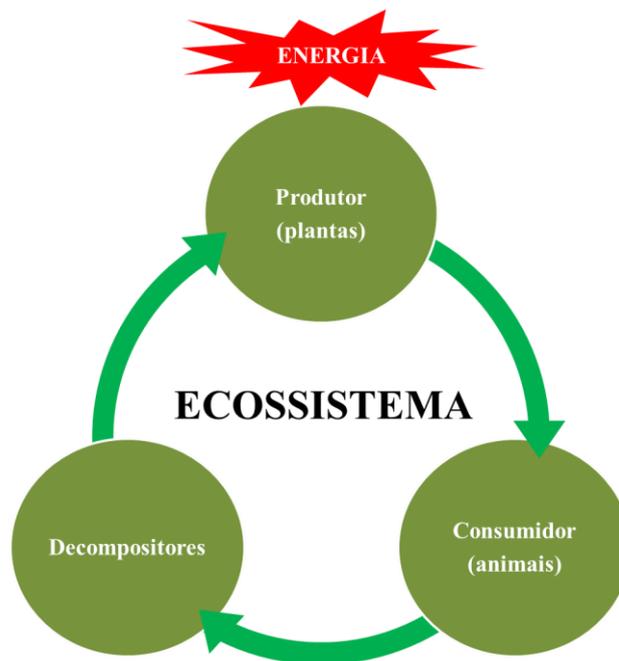


Figura 2.3: Sistema perfeito
 Fonte: adaptado de Lindsey (2011)

Baseado nas várias definições de sustentabilidade pode-se observar que existe uma oportunidade de melhoria na gestão dos resíduos sólidos, pois na vida cotidiana há o descarte incorreto de vários tipos de resíduos, dentre eles as embalagens dos mais variados tipos, causando sérios prejuízos ao meio ambiente e trabalhando de forma contrária aos conceitos de sustentabilidade.

Dentro do grupo de embalagens toma-se papel de destaque o poliestireno expandido, pois este material constitui uma parte considerável do resíduo plástico no meio ambiente em termos de volume (SEKHARAN, ABRAHAM e THACHIL, 2012).

Conforme Shin (2005), preocupações econômicas e ambientais levaram a uma maior atenção ao desenvolvimento de novas técnicas para resolução dos problemas com o descarte de resíduos plásticos, com especial atenção ao poliestireno expandido. A coleta e a disposição desse resíduo são economicamente inviáveis, fazendo com que a reciclagem e as implicações ecológicas se tornem uma preocupação nos termos de sustentabilidade (PUSHPADASS *et al.*, 2010; BHUTTA, OHAMA e TSURUTA, 2011).

2.4 Poliestireno expandido (Isopor) e seu descarte

O poliestireno expandido - EPS, que no Brasil é popularmente conhecido como Isopor, apresenta-se como um material sintético e derivado do petróleo (PUSHPADASS

et al., 2010). Ferrándiz-Mas e Garcia-Alcofel (2013) completam que o EPS é um material polímero termoplástico com estrutura celular fechada, biologicamente inerte e não tóxico.

Conforme Shin (2005), o EPS pode apresentar várias formas físicas, pois geralmente é transformado em um plástico celular rígido. Tem uma textura muito parecida com espuma, porém é constituído por um aglomerado de grânulos de plástico com micro bolhas de ar. Na Tabela 2.1 pode-se observar as especificações mínimas de todas as propriedades deste material.

Tabela 2.1: Especificações mínimas das propriedades do EPS

PROPRIEDADES	NORMA / Método Ensaio	Unidade	TIPOS DE EPS						
			TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	TIPO 5	TIPO 6	TIPO 7
Densidade Aparente Nominal	NBR 11949	Kg/m ³	10	12	14	18	22,5	27,5	32,5
Densidade Aparente Mínima	NBR 11949	Kg/m ³	9	11	13,0	16	20	25	30
CONDUTIVIDA- DE TÉRMICA Máxima (23°C)	NBR 12094	W/(mK)	-	-	≤ 0,042	≤ 0,039	≤ 0,037	≤ 0,035	≤ 0,035
Tensão por COMPRESSÃO com deformação de 10%	NBR 8082	KPa	≥ 33	≥ 42	≥ 65	≥ 80	≥ 110	≥ 145	≥ 165
Resistência mínima à FLEXÃO	ASTM C-203	KPa	≥ 50	≥ 60	≥ 120	≥ 160	≥ 220	≥ 275	≥ 340
Resistência mínima ao CISALHAMENTO	EN-12090	KPa	≥ 25	≥ 30	≥ 60	≥ 80	≥ 110	≥ 135	≥ 170
Flamabilidade se Material Classe F	NBR 11948	-	Material Retarda nte à Chama	Material Retarda nte à Chama	Material Retardant e à Chama	Material Retardant e à Chama	Material Retardant e à Chama	Material Retardant e à Chama	Material Retardante à Chama

Fonte: Adaptado de ABNT (2007, 1991, 1983 e 2007), ASTM (2012) e EN (2013)

O EPS é atualmente utilizado como um tipo de embalagem popular ou também se apresenta como material isolante em vários campos industriais, isso em âmbito mundial, devido às suas variadas características como: baixo peso, isolamento térmico, alta resistência ao impacto, durável e versátil (BHUTTA, OHAMA e TSURUTA, 2011).

Porém, conforme definido por Shin (2005), Pushpadass *et al.* (2010), Bhutta, Ohama e Tsuruta (2011) e Ferrándiz-Mas e Garcia-Alcofel (2013), as características supramencionadas podem ser assim comentadas:

- **Baixo peso:** o EPS é geralmente composto de 98% de ar e essa característica faz com que o material apresente um baixo peso. Sua utilização como embalagem se torna viável, devido ao fato de não acrescentar um significativo peso ao produto total.

- **Isolamento térmico:** são as propriedades de isolamento térmico que destacam o EPS como material de embalagem, pois auxilia a manter os alimentos frescos ao longo de toda a cadeia de distribuição. São vários os exemplos de aplicação no setor de fabricação e distribuição de produtos farmacêuticos.
- **Alta resistência ao impacto:** o fato do EPS ter a característica de absorver choques e possuir boa resistência à compressão faz com que este material seja escolhido quando há a necessidade de proteção em embalagens dos mais diversos materiais.
- **Durável:** diante de uma excelente durabilidade, o EPS é largamente utilizado em forma de embalagem, pois não perde suas características em ambientes úmidos, bem como atende às regras básicas de higiene necessárias. Além disso, trata-se de um material atóxico e sem cheiro.
- **Versátil:** o EPS é extremamente versátil e pode ser modelado em qualquer forma geométrica, conforme necessidade, a fim de atender a proteção ou isolamento do produto.

O EPS é utilizado no dia a dia como material de embalagem, material de construção e utensílios domésticos, bem como outras aplicações. Por outro lado, os resíduos de EPS têm causado muita poluição ambiental, pois este material não se decompõe na natureza (KAN e DEMIRBOGA, 2009). Conforme comentado por Pushpadass *et al.*, (2010) e Bhutta, Ohama e Tsuruta (2011), uma quantidade significativa das embalagens é utilizada somente uma vez e descartada, sendo um grande problema ambiental em todo o mundo.

Uma grande quantidade de EPS é consumida diariamente e é descartada como resíduo causando muitos problemas ambientais, especialmente poluição do solo, por não ser decomposto na natureza, uma vez que este material é não biodegradável (PUSHPADAS *et al.*, 2010). De acordo com Guimarães, Pessoa e Fornari (2009), o EPS por apresentar uma baixa densidade apresenta grandes dificuldades de ser reprocessado em equipamentos convencionais, pois ocupa grande volume e pequena quantidade mássica, inviabilizando economicamente a produção de artefatos.

Conforme observado por Ross e Evans (2003), Shin (2005) e Bhutta, Ohama e Tsuruta (2011) na Figura 2.4, pode-se observar que durante a produção do EPS e após sua utilização, o resíduo é destinado para aterros e lixões.

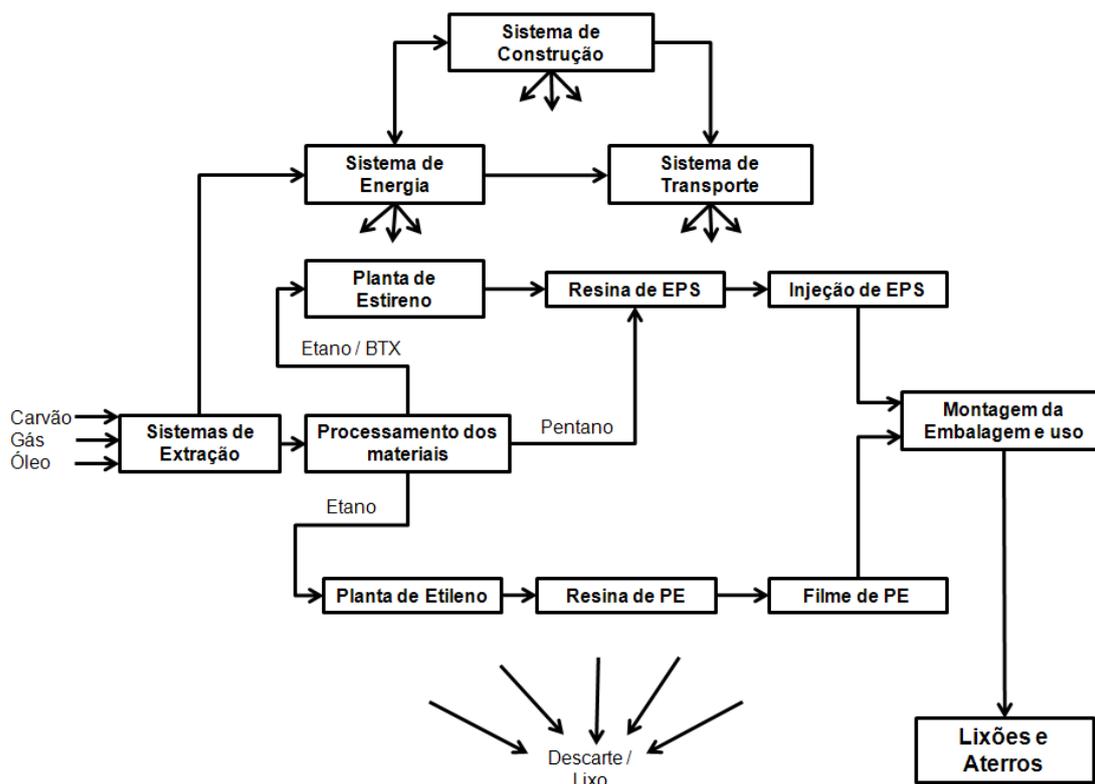


Figura 2.4: Ciclo de vida do EPS
Adaptado: Ross e Evans (2003)

Para Kan e Demirboga (2009), o resíduo de EPS causa poluição ambiental e o custo de estoque deste resíduo é alto. Reutilização, reciclagem e redução são consideradas como os únicos métodos de recuperação desse resíduo. Portanto, vislumbram-se várias oportunidades de melhoria nestes processos de recuperação. Diante deste cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de um processo de reciclagem efetivo, para os resíduos de EPS (BHUTTA, OHAMA e TSURUTA, 2011). Portanto, existe uma boa oportunidade de desenvolvimento de produto sustentável, observando todo o ciclo de vida do isopor desde seu desenvolvimento, até sua possível adição no desenvolvimento de outros produtos (PUSHPADASS *et al.*, 2010 e BHUTTA, OHAMA e TSURUTA, 2011).

2.5. Desenvolvimento de produtos sustentáveis

O crescente aumento demográfico e uma significativa melhora nos padrões de vida provocaram um crescimento exponencial na demanda por produtos e serviços, e consequentemente, poluição e descarte desordenado de resíduos. Conforme Vinodh e Rathod (2010), crescimento sustentável se refere a capacidade de uma organização ou sociedade em aproveitar o máximo da eficiência dos recursos, a fim de garantir um ambiente limpo e verde.

Em contrapartida, um possível esgotamento dos recursos naturais no planeta e o descarte de resíduos não recicláveis de diversos produtos nos remete a sermos conscientes no nosso comportamento e desenvolvimento.

Em geral, o interesse sobre as questões ambientais e sobre as estratégias de melhoria em desenvolvimento de produto sustentável, está em pleno aumento, devido aos significativos problemas ambientais que começaram a surgir nas últimas décadas (BEREKETLI e GENEVOIS, 2013). Ljunberg (2007) afirma que existem atualmente quatro problemas que apresentam grande complexidade de resolução: alta demanda de consumo, utilização de recursos não renováveis, poluição e exponencial aumento demográfico.

Por outro lado, os segmentos industriais e de serviço tem como principal objetivo satisfazer ou criar necessidades através da distribuição de produtos e serviços competitivos. De acordo com Gehin, Zwolinski e Brissaud (2007), ser competitivo na atual globalização mundial pode ser resumido em quatro objetivos estratégicos principais: aumentar a qualidade do produto, reduzir o *time to market*, propor custos competitivos e ser inovador.

Todos estes aspectos e comportamentos humanos nos conduzem a considerar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos (ZHOU, YIN e HU, 2009; JAYAL *et al.*, 2010). Porém, é muito importante que o desenvolvimento do produto esteja alinhado com a sustentabilidade e atenda aos requisitos ambientais. Alinhado a isso, Spangenberg, Fuad-Luke e Blincoe (2010) afirmam que a fase de desenvolvimento é a mais importante no desafio de transição para uma sociedade mais sustentável.

Maxwell e Van Der Vorst (2003), Diehl e Brezet (2004) e Diegel *et al.* (2010) consideram que um produto sustentável é um produto que apresenta soluções ambientais, que se encontram com as necessidades sociais, minimizando a demanda de consumo e maximizando o potencial econômico.

Ljunberg (2007) define um produto sustentável como um produto que produz o menor impacto possível durante o seu ciclo de vida. Essa definição de ciclo de vida inclui a extração da matéria-prima, produção, uso e reciclagem final (ou deposição).

Zhou (2008) completa que todos os custos da energia consumida no processo de formação de materiais e no processo de tratamento final também deveriam ser considerados.

Manzini e Vezzoli (2008) e *Jayal et al.* (2010) apresentam também o transporte ou logística propriamente dita no fluxo de ciclo de vida, conforme ilustrado na Figura 2.5.

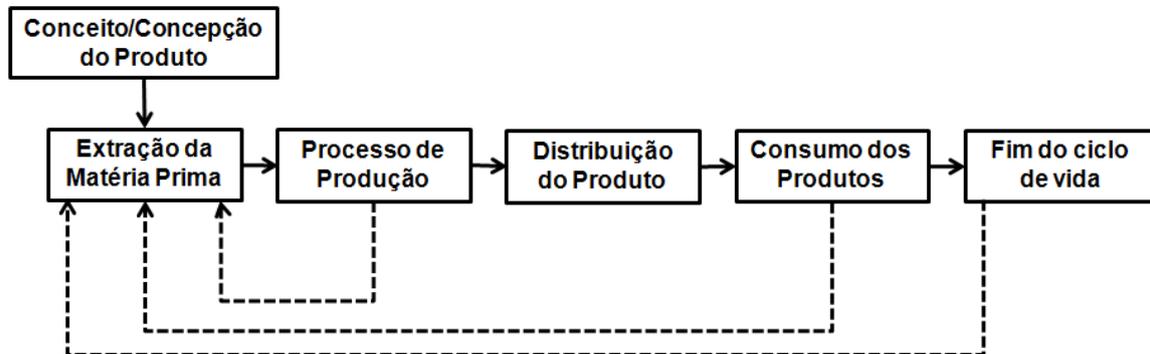


Figura 2.5: Ciclo de vida de um produto
Fonte: Adaptado de Maxwell e Van Der Vorst (2003)

Ljunberg (2007) considera que os princípios para desenvolvimento de produtos sustentáveis são:

- Utilizar materiais com baixa poluição ambiental;
- Reduzir a utilização de matérias primas raras ou escassas;
- Preferir materiais de processos de produção limpa;
- Evitar a utilização de materiais tóxicos e perigosos;
- Utilizar materiais de fácil reutilização e de fácil degradação;
- Utilizar materiais com baixo consumo de energia.

Conforme Maxwell e Van Der Vorst (2003), um produto sustentável deve integrar, além dos três vértices de sustentabilidade, os critérios tradicionais de produto, conforme ilustrado na Figura 2.6.

O desenvolvedor de produto e o comprador devem considerar diferentes critérios para cada concepção ou compra de produto, como por exemplo, preço, qualidade, tempo de ciclo de vida de produto, materiais utilizados, manutenção e as características ambientais de desempenho, antes de tomar uma decisão de desenvolvimento ou compra de um produto. Porém, isso conduz frequentemente à situações de conflito, pois não é possível obter bons resultados em todos os critérios e acaba sendo muito difícil aperfeiçoar todos de uma só vez (BYGGETH e HOCHSCHOMER, 2006).

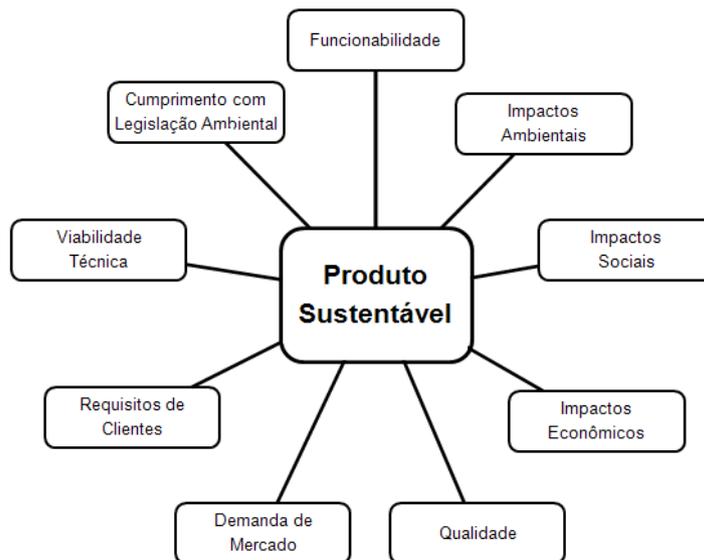


Figura 2.6: Critérios para produtos sustentáveis
 Fonte: Adaptado de Maxwell e Van Der Vorst (2003)

Portanto, tem-se uma grande demanda de descarte de resíduos de EPS e existe uma oportunidade de inserir esse material descartado no desenvolvimento de outro produto. Como as propriedades mecânicas do resíduo de EPS são muito pequenas e quase não são conhecidas, isso justifica a não adoção desse material como agregado em concreto por alguns pesquisadores (KAN e DEMIRBOGA, 2009).

Entretanto, estudos têm mostrado que contas de EPS inseridos no concreto são mais duráveis quando o mesmo é sujeito ao ataque de sulfato e também apresentam uma capacidade maior de resistir a absorção de água (KAN e DEMIRBOGA, 2009). Existem trabalhos onde são inseridos outros materiais além dos componentes comuns para a fabricação de blocos, tais como borracha de pneu (FIORITI, 2002) e fibra natural de sisal (IZQUIERDO, 2011). O fato de não existirem na literatura disponível trabalhos científicos com o objetivo de reaproveitar os resíduos de EPS na confecção de blocos de alvenaria em sua composição sugere o desenvolvimento de um bloco de alvenaria com resíduos de EPS moídos em sua elaboração, pois se necessita de vários blocos para a construção de casas e edifícios.

2.6 Blocos de alvenaria

Os blocos de cimento vêm se apresentando como elementos indispensáveis no setor de construção civil, com funções das mais diversas, como blocos de base para alvenaria com função estrutural ou blocos de alvenaria sem função estrutural. A alvenaria

estrutural, ou simplesmente de vedação, pode basear-se em blocos fabricados industrialmente, submetidos a rigoroso controle de qualidade por meio de ensaios normatizados. Os blocos de concreto são elementos prismáticos com dois ou três furos dispostos no sentido de sua maior dimensão, conforme pode ser visto na Figura 2.7, sendo constituídos basicamente de cimento, agregado miúdo e água, moldados através de vibração e prensagem (FIORITI, 2002).

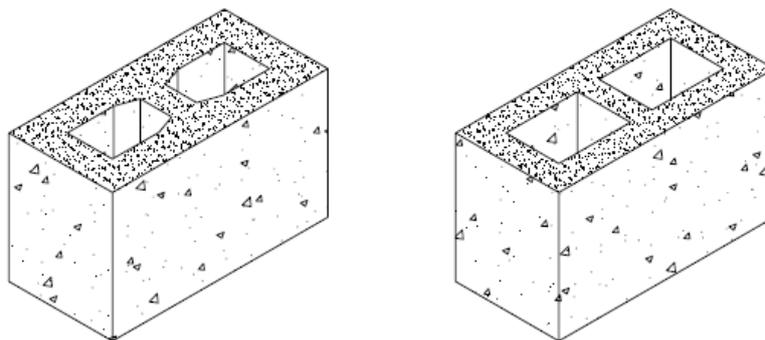


Figura 2.7: Bloco estrutural e bloco de vedação
Fonte: Fioriti (2002)

De acordo com Izquierdo (2011), bloco de concreto é a unidade de alvenaria constituída pela mistura homogênea, adequadamente proporcionada, de cimento *Portland*, agregados miúdo e graúdo, conformada através de vibrações e prensagem, possuindo dimensões superiores a 250x120x55 mm para comprimento, largura e altura respectivamente.

Já para a norma NBR 15270 (ABNT, 2005), um bloco cerâmico de vedação é um componente de alvenaria de vedação que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contém. A norma NBR 6136 (ABNT, 2007) define que bloco vazado é o elemento de alvenaria cuja seção transversal média útil seja inferior a 75% da seção transversal bruta, conforme Figura 2.8.

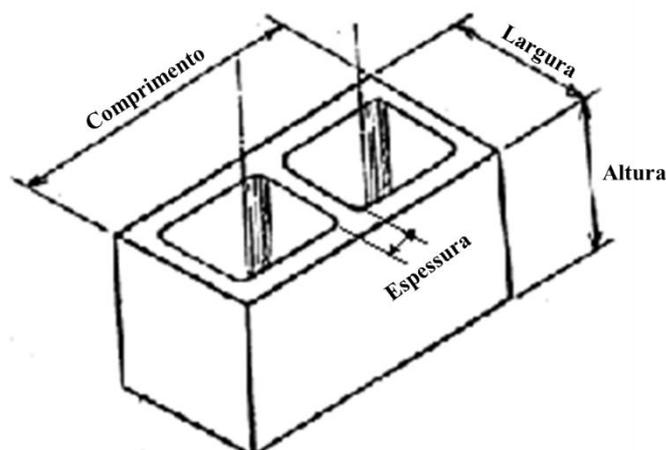


Figura 2.8: Bloco de alvenaria vazado

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

2.6.1 Requisitos gerais para bloco vazado

Conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007), os blocos de concreto devem atender, quanto ao seu uso, às classes descritas a seguir, indicadas nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4:

- **Classe A:** com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo;
- **Classe B:** com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- **Classe C:** com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo. Porém, recomenda-se a utilização de blocos de função estrutural classe C designados M10 para edificações de, no máximo, um pavimento, os designados M12,5 para edificações de, no máximo, dois pavimentos e os designados de M15 e M20, para edificações maiores;
- **Classe D:** sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo.

Tabela 2.2: Dimensões reais dos blocos

FAMÍLIAS DE BLOCOS											
Designação	Nominal	20	15		12,5			10			7,5
	Módulo	M-20	M-15		M-12,5			M-10			M-7,5
	Amarração	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2
	Linha	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	10x30	7,5x40
Largura [mm]		190	140	140	115	115	115	90	90	90	65
Altura [mm]		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Comprimento [mm]	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	190	290	390
	Meio	190	190	140	190	115	-	190	90	-	190
	2/3	-	-	-	-	-	240	-	-	190	-
	1/3	-	-	-	-	-	115	-	-	90	-
	Amarração L	-	340	-	-	-	-	-	-	-	-
	Amarração T	-	540	440	-	365	365	-	290	290	-
	Compens. A	90	90	-	90	-	-	90	-	-	90
	Compens. B	40	40	-	40	-	-	40	-	-	40
NOTA: As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos indicados na tabela são de $\pm 2,00$ mm para largura e $\pm 3,00$ mm para altura e comprimento.											
Os componentes das famílias de blocos de concreto tem sua modulação determinada de acordo com a NBR5706 e NBR5726.											

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

Tabela 2.3: Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos

Classe	Designação	Paredes Longitudinais [mm] (1)	Paredes Transversais	
			Paredes [mm] (1)	Espessura equivalente [mm/m] (2)
A	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
B	M-15	25	25	188
	M-20	32	25	188
C	M-10	18	18	135
	M-12,5	18	18	135
	M-15	18	18	135
	M-20	18	18	135
D	M-7,5	15	15	113
	M-10	15	15	113
	M-12,5	15	15	113
	M-15	15	15	113
	M-20	15	15	113
1) Média das medidas das paredes tomadas nos pontos mais estreitos.				
2) Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (metros).				

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

Tabela 2.4: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

CLASSE	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA [Mpa]	ABSORÇÃO MÉDIA EM %		RETRAÇÃO % (1)
		AGREGADO NORMAL	AGREGADO LEVE	
A	≥ 6,0	≤ 10,00%	≤ 13,00%	≤ 0,065%
B	≥ 4,0		(média)	
C	≥ 3,0		≤ 16,00%	
D	≥ 2,0		(individual)	
(1) Facultativo.				

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2007)

2.6.2 Materiais para bloco vazado

Os blocos devem ser fabricados de concreto, contendo cimento *Portland*, agregados, água e aditivos. Para um concreto bem constituído, deve-se atender aos seguintes requisitos básicos conforme NBR 5733:

2.6.2.1 Cimento Portland

Conforme a norma NBR 11578, pode-se definir cimento como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos. Conforme a Tabela 2.5, tem-se exemplos de cimentos Portland, aplicações e normas respectivas.

Tabela 2.5: Tipos de cimento *Portland* e suas aplicações

TIPO DE CIMENTO		APLICAÇÃO	NORMA APLICÁVEL
SIGLA	DESCRIÇÃO		
CPI e CPI-S	Cimento <i>Portland</i> comum	Serviços de construção em geral.	NBR 5732
CP II-Z, CP II-E e CP II-F	Cimento <i>Portland</i> composto	Argamassa, concreto simples, armado e protendido.	NBR 11578
CP III	Cimento <i>Portland</i> de alto forno	Argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada.	NBR 5735
CP IV	Cimento <i>Portland</i> Pozolânico	Em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.	NBR 5735
CP V-ARI	Cimento <i>Portland</i> de alta resistência inicial	Blocos para alvenaria, pavimentação, tubos, lajes e meio-fio.	NBR 5733
CP-RS	Cimento <i>Portland</i> resistente a sulfatos	Estações de tratamento de água e esgoto, obras em regiões litorâneas.	NBR 5737
BC	Cimento <i>Portland</i> de baixo calor de hidratação	Evitar fissuras de origem térmica, devido ao calor da hidratação.	NBR 13116
CPB	Cimento <i>Portland</i> de branco	Estrutural: Concretos brancos com fins arquitetônicos.	NBR 12989

Fonte: Norma NBR 11578 (ABNT, 1991)

Os tipos de cimento variam conforme a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, a cor branca e calor de hidratação.

Para este presente trabalho, foi utilizado somente o cimento CP V-ARI, que conforme Tabela 2.5, é recomendado para artefatos de cimento.

2.6.2.1.1 Cimento CP V ARI

De acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991), trata-se de um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos.

Com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa a um dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para um, três e sete dias, respectivamente, o CP V-ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Pode ser utilizado no preparo de concreto e argamassa em obras desde as pequenas construções até as edificações de maior porte, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água, o CP V-ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

2.6.2.2 Agregados

Conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, duráveis, estáveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra corrosão, a durabilidade ou,

quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. Existem dois tipos básicos de agregados: Agregado miúdo e agregado graúdo.

- Agregado miúdo é constituído por grãos que passam pela peneira de classificação com abertura de malha de 4,75 mm;
- Agregado graúdo é constituído por grãos que passam pela peneira de classificação com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

2.6.2.3 Água

Conforme praticado na elaboração de concreto, a água de amassamento deve ser isenta de impurezas, matéria orgânica e livre de produtos nocivos à hidratação do cimento.

2.6.2.4 Aditivos

A inserção de aditivos e pigmentos é permitida desde que atenda aos requisitos da norma NBR 11578 (ABNT, 1990) e também que os blocos atendam as características descritas na Tabela 2.4. Conforme NBR 6136 (ABNT, 2007), os aditivos não devem conter substâncias potencialmente capazes de promover a deterioração do concreto dos blocos ou materiais próximos, quer por contato direto ou por disseminação de íons.

2.6.3 Requisitos específicos para o bloco vazado

As dimensões reais dos blocos vazados de concreto, conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007), deve atender às especificações descritas na Tabela 2.4.

2.6.4 Misturas aplicadas a blocos de alvenaria

Uma pesquisa preliminar no Portal de Periódicos da Capes apresentou 88 artigos, entre os anos de 1984 a 2013, utilizando a palavra-chave “*masonry block*” (bloco de alvenaria) no título dos trabalhos. Desses, 59% foram publicados entre 2008 e 2013. Diaz *et al.* (2011) buscaram otimizar o projeto e a forma dos blocos de alvenaria por meio dos elementos finitos; Zhai e Stewart (2010) analisaram a confiabilidade estrutural de paredes de alvenaria com blocos de concreto com reboco reforçado; Vyas e Reddy (2010) avaliaram a força de compressão prismática de blocos de alvenaria por meio de elementos finitos; Turgut (2008) analisou as propriedades dos blocos de alvenaria produzidos com serragem, pó de vidro e resíduos de calcário. Entretanto, Xu *et al.* (2012) inseriram EPS

virgem na argamassa buscando reduzir o peso dos blocos, utilizando o método Taguchi de experimentos. Assim, observou-se a oportunidade de se desenvolver blocos de alvenaria com a aplicação do método de delineamento de experimentos com misturas.

2.7 Delineamento de experimentos com misturas

Diversos produtos são elaborados através da mistura de vários componentes, dos quais se podem citar, por exemplo, produtos farmacêuticos e químicos, alimentos e tintas (ERIKSSON, JOHANSSON e WIKSTROM, 1998). Para produtos que dependem de uma combinação de misturas, o objetivo é determinar através do delineamento de experimentos com misturas, qual é a proporção ótima dos componentes que conduzem a um resultado desejado em termos de uma variável que caracteriza a qualidade do produto (SOLVASON *et al.*, 2009).

Quando a proporção ótima de cada componente não é conhecida, experimentos devem ser realizados, a fim de se conhecer o ponto ótimo e a devida proporção dos componentes. Nos experimentos são atribuídas várias combinações de proporções dos componentes e, então, são observados os valores correspondentes da característica de qualidade. Estes valores são denominados respostas do experimento (AKALIN *et al.*, 2010).

Estas proporções não podem ser negativas e elas são expressas como uma fração da mistura total e a soma deve ser igual a um (ERIKSSON, JOHANSSON e WIKSTROM, 1998; AKALIN *et al.*, 2010). Como visto na Figura 2.9, esta é uma região bidimensional simplex, com um domínio triangular, onde os experimentos são realizados nas pontas (*extreme vertices*), nos pontos médios das pontas (*midpoint*), na parte interior e no ponto de centro (*centroide*).

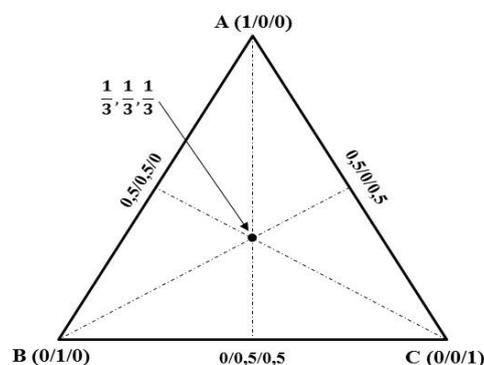


Figura 2.9: Exemplo de delineamento de experimentos com três componentes
Fonte: adaptado de Eriksson, Johansson e Wikstrom (1998)

Pode-se dizer que um experimento com mistura é um experimento cuja variável de resposta, característica a ser observada na mistura, é uma função somente das proporções relativas dos ingredientes presentes na mistura e não da quantidade total da mistura. O delineamento de misturas configura um caso especial em metodologias de superfície de resposta, utilizando técnicas matemáticas e estatísticas, com aplicações importantes, não somente no desenvolvimento de novos produtos, mas também na melhoria da concepção de produtos existentes (SILVEIRA e LEITE, 2010).

De acordo com Costa (2003), o delineamento de misturas consiste em planejar e executar um experimento de processamento de misturas e ajustar modelos empíricos, por meio de modelos matemáticos e ferramentas estatísticas, aos dados medidos.

O delineamento de experimentos de mistura é um tipo especial de experimento de superfície de resposta, onde os fatores são proporções de componentes em uma mistura (MYERS e MONTGOMERY, 2002).

Para Akalin *et al.* (2010), a produção de concreto está melhorando rapidamente e o delineamento de experimentos em misturas para concreto é muito importante para os engenheiros e arquitetos no auxílio em termos de tempo de vida do produto e rentabilidade. Aplicações reais na formulação de concreto estão baseadas em métodos de tentativa e erro (AKALIN *et al.*, 2010; SILVEIRA e LEITE, 2010).

Com muitos componentes e várias propriedades de interesse, os métodos de tentativa e erro poderiam perder as soluções ótimas que resultam em redução de custo para os construtores, principalmente no longo prazo. A aplicação de experiências de mistura na indústria de concreto pode resultar uma concepção de produto com um tempo menor e com desempenho de campo maior (AKALIN *et al.*, 2010).

Conforme comentado por Montgomery (2001), existem vários tipos de arranjos para misturas, sendo os mais comuns, o *simplex lattice design*, o *simplex centroid design* e o *extreme vertice design*.

2.7.1 Simplex lattice design

Este modelo é utilizado para estudar os efeitos dos componentes na variável de superfície de resposta (MONTGOMERY, 2001). Um arranjo para p componentes consiste de pontos definidos pelas seguintes coordenadas: as proporções assumidas por cada componente tomam $m + 1$ valores igualmente compreendidos entre 0 e 1, tal que:

$$X_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

Todas as combinações possíveis (misturas) das proporções das Equações 1 e 2 são utilizadas. Na Figura 2.10 pode-se verificar exemplos de *simplex lattice design*.

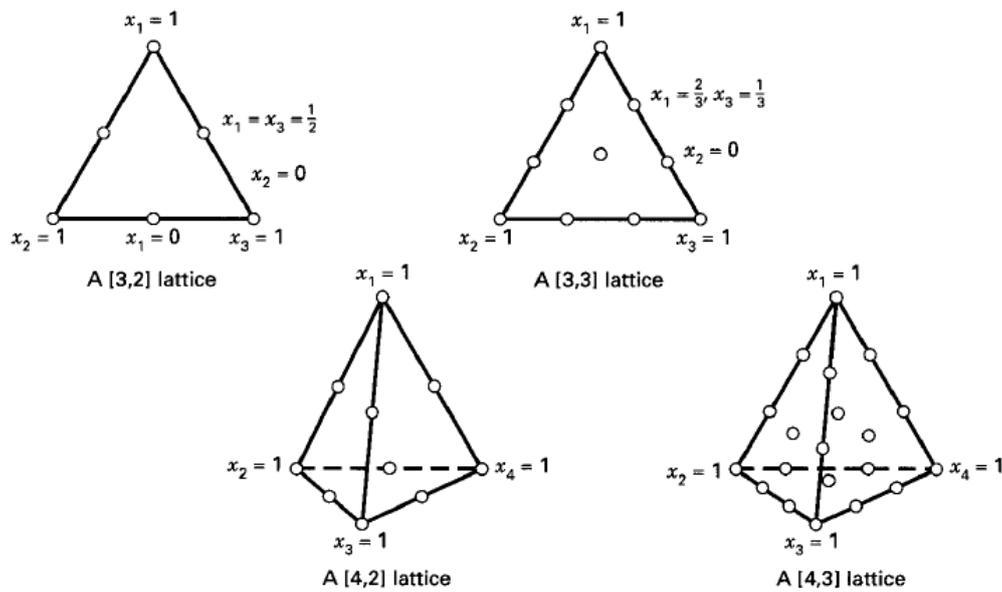


Figura 2.10: Exemplos de *Simplex Lattice Design*
Fonte: Montgomery (2001)

Em geral, o número de pontos em um $[p,m]$ *simplex lattice design* é:

$$N = \frac{(p+m-1)!}{m!(p-1)!} \quad (3)$$

Uma alternativa para o *simplex lattice design* é o *simplex centroid design*. O centroide é a mistura com proporções iguais de cada componente (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Assim sendo, no planejamento dos experimentos com mistura devem ser adotados projetos que considerem esta restrição.

2.7.2 Simplex centroid design

Em um p - componentes *simplex centroid design*, há $2^p - 1$ pontos, correspondentes a p permutações de $(1, 0, 0, \dots, 0)$, o $\binom{p}{2}$ permutações de $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0)$, o $\binom{p}{3}$ permutações de $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \dots, 0)$, ..., e o centroide $(\frac{1}{p}, \frac{1}{p}, \dots, \frac{1}{p})$ (MONTGOMERY, 2001). Conforme Figura 2.11, pode-se verificar alguns exemplos de *simplex centroid design*.

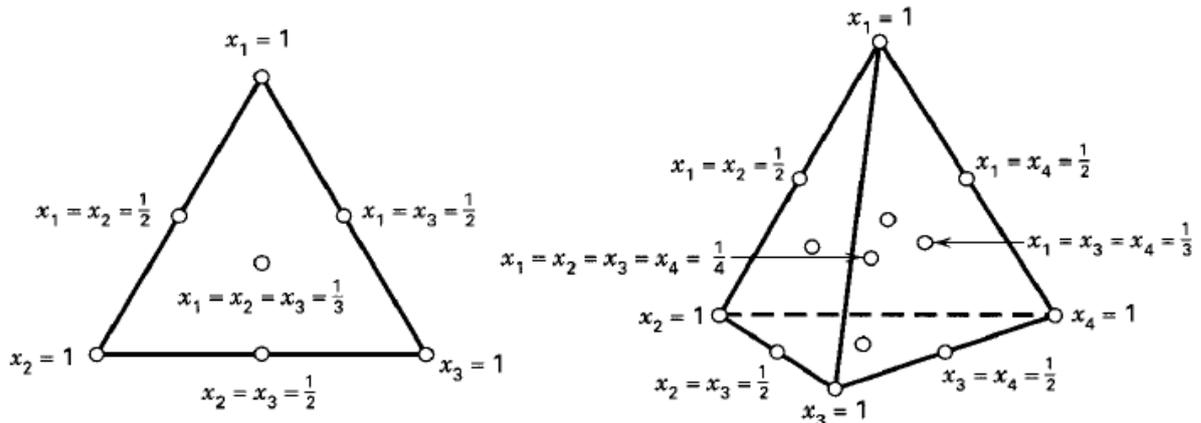


Figura 2.11: Exemplos de *Simplex Centroid Design*
Fonte: Montgomery (2001)

Uma crítica aos *centroid design* descritos acima é que a maioria dos ensaios experimentais podem ocorrer no limite da região e, por conseguinte, incluem apenas $p - 1$ dos componentes p . Geralmente, é desejável melhorar os experimentos *simplex lattice* e *centroid design* com pontos adicionais no interior da região, onde as misturas irão consistir todos os componentes da mistura de p e restrições relacionadas a proporção dos componentes (MONTGOMERY, 2001).

2.7.3 Extreme vertice design

Além da proporção dos componentes em uma mistura, podem existir casos onde restrições à proporção dos componentes devem ser considerados nos experimentos, ou seja não podem ser 0 ou 100%. De acordo com Adeyeye e Oyawale (2008), quando os componentes de uma mistura estão sujeitos à restrições adicionais, tal como um valor máximo e ou um valor mínimo para cada componente, um *Extreme Vertices Design* é recomendado.

Conforme Ding *et al.* (1999) e Adeyeye e Oyawale (2008), as restrições podem estar acima dos limites de (U_i) e abaixo dos limites de (L_i) de acordo com a equação (4).

$$0 \leq Li \leq Xi \leq Ui \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3 \dots n, Li \text{ and } Ui \text{ são constantes}) \quad (4)$$

Conforme Myers e Montgomery (2002), em projetos de mistura, onde existem restrições sobre as proporções dos componentes, estes são muitas vezes superiores e/ou inferiores as restrições dos limites conforme $Li \leq xi \leq Ui$, para $i = 1, 2, \dots, q$, onde Li é o limite inferior para o componente i e Ui é o limite superior para o componente i .

Se tratando de blocos de alvenaria por exemplo, não se deseja um bloco constituído somente de areia ou somente de cimento, uma vez que, desta forma, não estamos atendendo resistência à compressão e custo respectivamente.

Na Figura 2.12 é demonstrado o espaço possível para mistura utilizando-se *Extreme Vertice Design*, onde o objetivo é escolher pontos do arranjo que satisfaçam de forma adequada as restrições do experimento de três componentes.

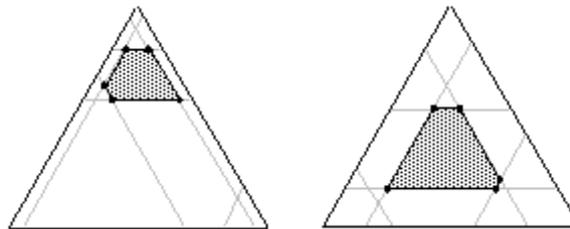


Figura 2.12: Exemplos de *Extreme vértice design*
Adaptado de: Myers e Montgomery (2002)

Ainda no exemplo da Figura 2.12 as linhas em cinza claro representam as restrições de limite inferior e superior dos componentes de mistura. A área cinza escuro representa o espaço do arranjo. Os pontos são colocados nos vértices extremos do espaço do arranjo.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do programa experimental. A Figura 3.1 apresenta o planejamento metodológico para a realização da presente pesquisa.

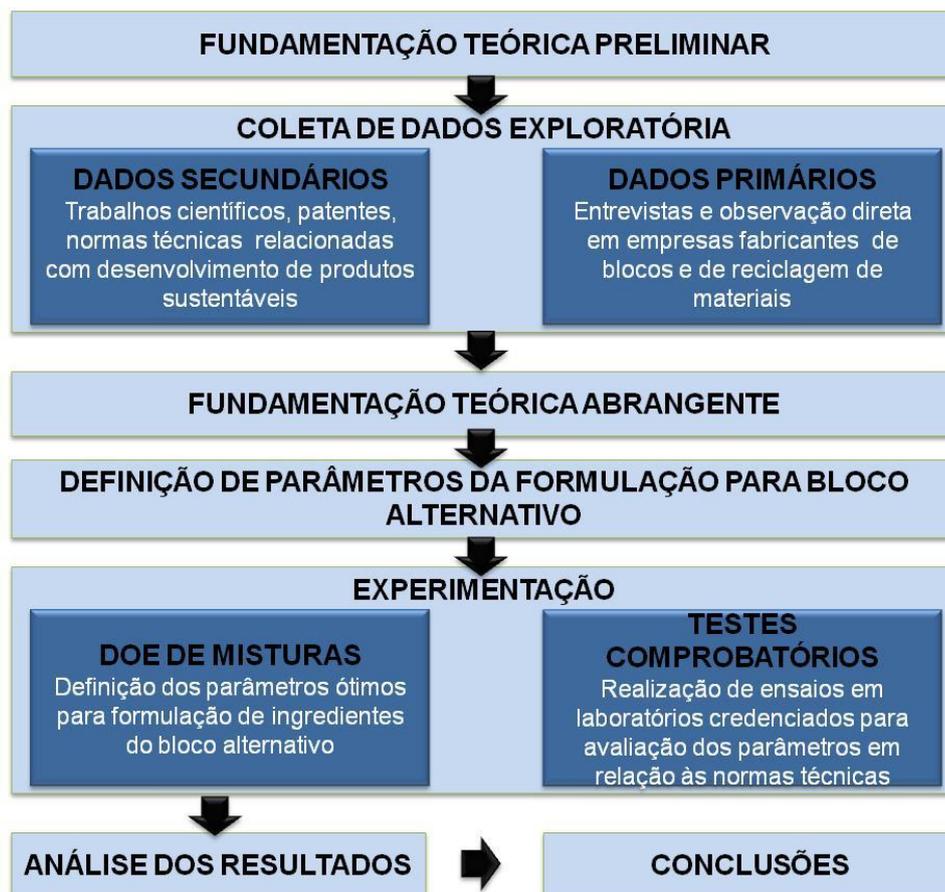


Figura 3.1: Planejamento metodológico da pesquisa

3.1. Fundamentação teórica preliminar

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar, a fim de mapear os principais trabalhos publicados sobre o tema, tanto disponíveis nas bases de dados nacionais quanto nas bases internacionais. Essa fundamentação teórica preliminar norteou a coleta de dados exploratória, identificando os produtos similares e produtos que tenham como foco a sustentabilidade.

3.2. Coleta de dados exploratória

A coleta de dados exploratória, que tem como base a identificação dos elementos importantes para a elaboração da formulação para o bloco alternativo, foi realizada em duas partes, a primeira chamada de coleta de dados secundários e a segunda de coleta de dados primários.

3.2.1. Coleta de dados secundários

A coleta de dados secundários foi realizada a partir de trabalhos científicos publicados, patentes e normas vigentes publicadas. Com base nesses trabalhos e normas identificadas, foram definidos os critérios para a observação e entrevistas em dois fabricantes de blocos, onde são produzidos os blocos convencionais. Essa fase de coleta foi de extrema importância para a tomada de conhecimento dos detalhes do processo de confecção dos blocos de alvenaria convencionais, auxiliando na definição dos parâmetros de fabricação dos blocos alternativos.

3.2.2. Coleta de dados primários

A coleta de dados primários demonstrou ser uma das fases mais importantes da coleta de dados, pois foi possível o alinhamento das informações coletadas em pesquisas, trabalhos científicos e normas com a realidade da produção de blocos. Foram coletadas de dois fabricantes de blocos os traços de mistura utilizadas para fabricação de blocos convencionais. Pôde-se observar que o volume dos traços é bem semelhante, porém as quantidades dos componentes da mistura apresentam uma significativa diferença.

3.3. Fundamentação teórica abrangente

Uma vez coletados os dados secundários e primários, a pesquisa voltou-se novamente para as bases de dados de trabalhos publicados, visando a busca de trabalhos que possam contribuir no desenvolvimento de produtos sustentáveis, porém agora com informações mais precisas sobre o funcionamento desse tipo de produto, permitindo a identificação de trabalhos mais específicos, de forma a tornar as argumentações deste presente trabalho mais robustas.

Uma pesquisa realizada no site do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) para a palavra-chave “bloco de alvenaria” retornou sete resultados, enquanto que para a palavra-chave “bloco de construção” retornou 78 resultados. Porém, nenhum

desses resultados tratava da proteção para um bloco alternativo sustentável, com a inserção de Isopor descartado e moído em sua composição, com exceção de uma proposta de patente que, conforme Benett (2011), propunha inserir contas novas de poliestireno para redução de peso e proporcionar uma melhor movimentação dos blocos. Desta forma, esta proposta é diferente da proposta do presente trabalho.

Com base nesses dados foram definidos os parâmetros críticos para a definição da quantidade de elementos (mistura) necessários para a confecção do bloco alternativo que atenda às exigências prescritas nas normas de blocos de alvenaria NBR 6136 (ABNT, 2007) e também a norma NBR 12118 (ABNT, 2013) que determina os métodos a serem utilizados nos testes aplicados aos blocos.

3.4. Definição dos parâmetros da formulação do bloco alternativo

Para a definição dos parâmetros da formulação do bloco alternativo, utilizou-se o delineamento de experimentos com misturas que, segundo Cornell (2002), é um experimento cuja variável de resposta (característica de interesse) é função somente das proporções relativas dos ingredientes presentes na mistura e não da quantidade total da mistura. E essas proporções são não negativas e são expressas como uma fração da mistura total e a soma deve ser igual a um.

Porém, para uma melhor visualização da definição dos parâmetros, foi elaborado um diagrama SIPOC (*supplier, input, process, output, customer*), que consiste na descrição das entradas, processo, saídas, fatores controláveis e fatores incontroláveis, conforme ilustra a Figura 3.2.

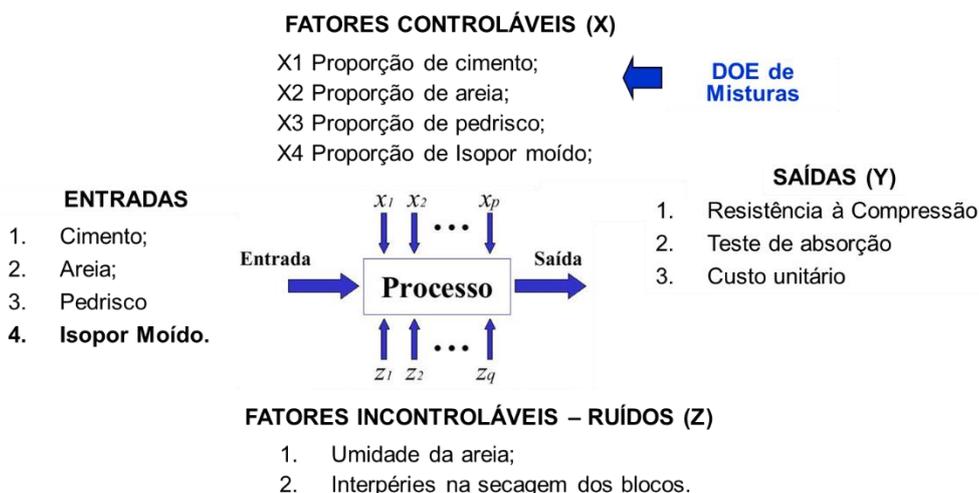


Figura 3.2: SIPOC do processo de fabricação do bloco alternativo

As pesquisas em base de dados e a entrevista com os fabricantes de blocos, citadas na seção 3.2 deste presente trabalho, possibilitaram o levantamento das seguintes faixas de porcentagem em volume para cada componente na composição do bloco de alvenaria:

- Cimento: 10 a 20%;
- Areia: 33 a 45%;
- Pedrisco: 33 a 45%;
- Isopor moído: 5 a 24%.

3.5. Experimentação

Dentro do tópico de experimentação, foi elaborado um método, conforme ilustra a Figura 3.3, onde são desdobrados os passos para a realização dos experimentos.



Figura 3.3: Método para a fase de experimentação

3.5.1. Determinação dos fatores controláveis

Os fatores a serem controlados são as proporções da mistura, tais como: cimento, areia, pedrisco e Isopor moído. Esta definição é muito importante, visto que quanto maior a quantidade de fatores controláveis, maior será a matriz de experimentos a ser trabalhada. No entanto, é importante ressaltar que para este trabalho não serão considerados os fatores de processo como fatores controláveis, sendo únicos os valores aplicados a todos os experimentos realizados, tais como:

- Tempo de mistura: 2 minutos;
- Rotação da betoneira: 30 rpm;
- Pressão de prensagem: Mecânica (aproximadamente) 300 Kgf;
- Tempo de vibração antes da prensagem: 30 segundos;
- Água: 7 litros.

3.5.2. Elaboração da matriz de experimentos

Para a elaboração da matriz de experimentos, contou-se com o auxílio do programa *Minitab*®, onde utilizou-se a matriz de experimentos denominada “*Extreme vértices design*”, com a inserção de quatro componentes e aplicando-se uma réplica do ponto de centro. Conforme comentado anteriormente, não foram inseridos fatores de processo como fatores controláveis, resultando em uma planilha com 36 experimentos, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Experimentos bloco alternativo

Ordem Aleatória	Ordem Sequencial	Tipo	Blocos	Cimento [%]	Areia [%]	Pedrisco [%]	Isopor [%]
25	1	2	1	0,135	0,365	0,450	0,050
12	2	2	1	0,100	0,390	0,330	0,180
3	3	1	1	0,100	0,330	0,450	0,120
30	4	-1	1	0,122	0,356	0,356	0,166
24	5	2	1	0,135	0,450	0,365	0,050
10	6	1	1	0,100	0,450	0,400	0,050
13	7	2	1	0,100	0,425	0,425	0,050
36	8	-1	1	0,122	0,416	0,391	0,071
7	9	1	1	0,170	0,330	0,450	0,050
2	10	1	1	0,100	0,450	0,330	0,120
6	11	1	1	0,200	0,420	0,330	0,050
27	12	-1	1	0,172	0,356	0,356	0,116
20	13	2	1	0,185	0,435	0,330	0,050
26	14	0	1	0,144	0,382	0,382	0,092
19	15	2	1	0,135	0,330	0,450	0,085
23	16	2	1	0,200	0,375	0,375	0,050
28	17	-1	1	0,122	0,416	0,356	0,106
9	18	1	1	0,100	0,400	0,450	0,050
22	19	2	1	0,135	0,450	0,330	0,085
33	20	-1	1	0,157	0,356	0,416	0,071
1	21	1	1	0,200	0,330	0,330	0,140
4	22	1	1	0,100	0,330	0,330	0,240
32	23	-1	1	0,172	0,401	0,356	0,071
15	24	2	1	0,100	0,365	0,450	0,085
8	25	1	1	0,200	0,330	0,420	0,050
21	26	2	1	0,200	0,375	0,330	0,095
17	27	2	1	0,185	0,330	0,435	0,050
34	28	-1	1	0,172	0,356	0,401	0,071
29	29	-1	1	0,122	0,356	0,416	0,106
18	30	2	1	0,200	0,330	0,375	0,095
11	31	2	1	0,100	0,330	0,390	0,180
35	32	-1	1	0,122	0,391	0,416	0,071
31	33	-1	1	0,157	0,416	0,356	0,071
14	34	2	1	0,100	0,450	0,365	0,085
16	35	2	1	0,150	0,330	0,330	0,190
5	36	1	1	0,170	0,450	0,330	0,050

3.5.3. Determinação do método do experimento

A fim de facilitar o desdobramento das informações obtidas da tabela de experimentos geradas pelo *software Minitab*®, foram transformadas as unidades de porcentagem da Tabela 3.1, por valores em litros. Esta mudança se dá pelo fato da facilidade de medição dentro da fábrica de blocos.

3.5.4. Realização dos experimentos

Para todos os experimentos, a quantidade dos componentes de mistura foi devidamente medido em um balde provido de uma escala de medidas em litros, conforme mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4: Balde com escala de medição em litros

3.5.4.1. Medição e inserção dos componentes

Os componentes foram medidos conforme Tabela 3.1 de experimentos e inseridos individualmente na seguinte ordem dentro da betoneira: pedrisco, água, areia, cimento e Isopor moído, conforme ilustra a Figura 3.5.



Figura 3.5: Componentes dentro da betoneira

Conforme citado anteriormente, inseriu-se as devidas quantidades de cimento, areia, pedrisco e Isopor moído dentro da betoneira. Porém, torna-se necessário o desdobramento da moagem do Isopor para o entendimento do processo de fabricação do bloco de alvenaria.

3.5.4.1.1 Processo de moagem do Isopor

Coletou-se para a moagem vários tipos de resíduos de Isopor, como embalagens de eletrodomésticos, forros para lajes e embalagens protetivas. A Figura 3.6 mostra exemplos desse tipo de resíduo.



(a)



(b)



(c)

Figuras 3.6: Exemplos de resíduos de Isopor

- a) Placas de Isopor para lajes; b) Embalagens de Isopor para eletrodomésticos; c) Isopor para proteção de produtos em transportes

O Isopor moído como agregado apresenta a mesma granulometria da areia. Foi necessária a utilização de um moinho para obtenção dos grãos de Isopor, conforme mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Moagem do resíduo de Isopor

Conforme comentado anteriormente, a granulometria encontrada compõe-se de grãos miúdos que passam por malha de 4,75 mm, conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A Figura 3.8 apresenta a granulometria obtida após a moagem.

Após a inserção de todos os componentes dentro da betoneira, eles são agitados por dois minutos e a massa oriunda da mistura realizada é transportada manualmente com o auxílio de uma pá, para a máquina vibro prensa, para posterior vibração de 30 segundos, conforme ilustra a Figura 3.9.



Figura 3.8: Granulometria do Isopor após o processo de moagem



Figura 3.9: Massa da mistura na máquina vibro prensa

Realizada a vibração da massa, a fim de assentar a massa dentro do molde e desta maneira obter um bom processo de prensagem, foi realizada a descida do bloco de prensagem que trabalha de forma mecânica, realizando uma pressão de aproximadamente 300 kgf, como mostra a Figura 3.10.



Figura 3.10: Prensagem da massa contra o molde

Como resultado da vibração e posterior prensagem, são retirados da máquina os blocos confeccionados, conforme ilustra a Figura 3.11.



Figura 3.11: Blocos após vibração e prensagem

Os blocos são retirados da máquina, conforme Figura 3.12, com o auxílio de um carrinho específico. Pode-se observar que os blocos são prensados sobre uma tábua previamente elaborada.



Figura 3.12: Retirada dos blocos da máquina vibro prensa

De acordo com a Figura 3.13, os blocos são transportados para um local coberto, onde se inicia o processo de cura, que levará 28 dias, conforme apresenta a Figura 3.14.



Figura 3.13: Transporte dos blocos para a área de cura

Conforme as normas NBR 6136 (ABNT, 2007) e NBR 12118 (ABNT, 2013), esse período de 28 dias se faz necessário para garantir um bom desempenho da mistura de concreto que foi moldada.



Figura 3.14: Blocos alocados na área de cura

3.6 Critério para análise dos resultados

Dentre as possíveis funções multicritério a serem analisadas neste trabalho, pode-se destacar o critério econômico, critério técnico e o critério ambiental (vide Figura 3.15). Essas funções multicritério desdobram-se em funções multiobjetivo, que vão ao encontro dos objetivos deste trabalho, que são: Resistência à compressão, absorção e custo unitário por bloco. Vale ressaltar que os ganhos ambientais não serão analisados neste projeto e serão destacados como oportunidades para futuros trabalhos no Capítulo 5.

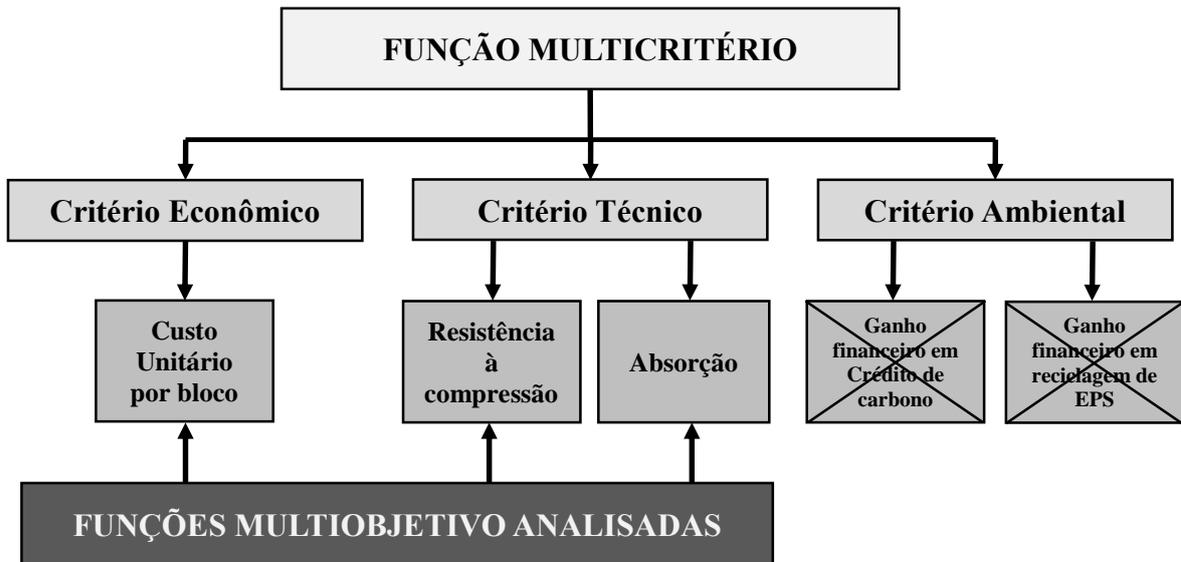


Figura 3.15: Funções multiobjetivo definidas para análise de resultados

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após realizar os testes dos 36 experimentos de nove blocos (conforme NBR 6136, são necessários nove blocos para realização dos testes, sendo seis para resistência à compressão e três para absorção) cada em laboratório e analisar os resultados, observou-se que as respostas propostas para este presente trabalho, que são: resistência à compressão, absorção e custo por bloco, são conflitantes, isto é, quando se insere o resíduo de Isopor moído na composição do bloco e se quer elevar o resultado de uma das respostas, as outras serão reduzidas proporcionalmente. Conforme Tabela 4.1, é possível verificar as proporções sugeridas como ótimas individuais para cada resposta.

Tabela 4.1: Comparação das misturas conforme resposta

Componente / Característica	Cimento 0,10 a 0,20	Areia 0,33 a 0,45	Pedrisco 0,33 a 0,45	Isopor moído 0,05 a 0,24
Resistência à Compressão	0,17	0,33	0,45	0,05
Absorção	0,20	0,33	0,42	0,05
Custo	0,10	0,45	0,33	0,12

Deste modo, sugere-se analisar os resultados dividindo-os em três tópicos, conforme os objetivos propostos deste trabalho.

4.1 Resultados de resistência à compressão

Resistência à compressão é a relação entre a carga de ruptura e a área bruta do corpo de prova, quando submetido ao ensaio de compressão axial (NBR 12118, 2013). Utilizando os critérios de classificação de blocos de alvenaria para resistência à compressão, conforme norma NBR 6136 (2007), pode-se verificar os resultados no Gráfico 4.1, dos 36 experimentos realizados e também os resultados a seguir:

- Sete experimentos apresentaram resultados abaixo de 2,0 MPa, sendo que estes valores estão abaixo do mínimo esperado para uma classificação D, que é menor classificação para blocos de alvenaria. Portanto, não é recomendado a utilização das misturas utilizadas nestes experimentos;

- Seis experimentos apresentaram resultados entre 4,0 e 6,0 MPa, sendo que com estes valores são inseridos na classificação B, podendo ser utilizados para função estrutural e em elementos de alvenaria acima do nível do solo;
- Treze experimentos apresentaram resultados entre 3,0 e 4,0 MPa, sendo que com estes valores são inseridos na classificação C, podendo ser utilizados para função estrutural e em elementos de alvenaria acima do nível do solo. Conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007), é recomendado a utilização de blocos classe C designados M10 em edificações de um único pavimento, designados M12,5 para edificações de, no máximo, dois pavimentos e designados M15 e M20 para edificações maiores;
- Dez experimentos apresentaram resultados entre 2,0 e 3,0 MPa, sendo que com estes valores são inseridos na classificação D, podendo ser utilizados para função não estrutural, ou seja, para preenchimento de paredes e elementos de alvenaria acima do nível do solo.

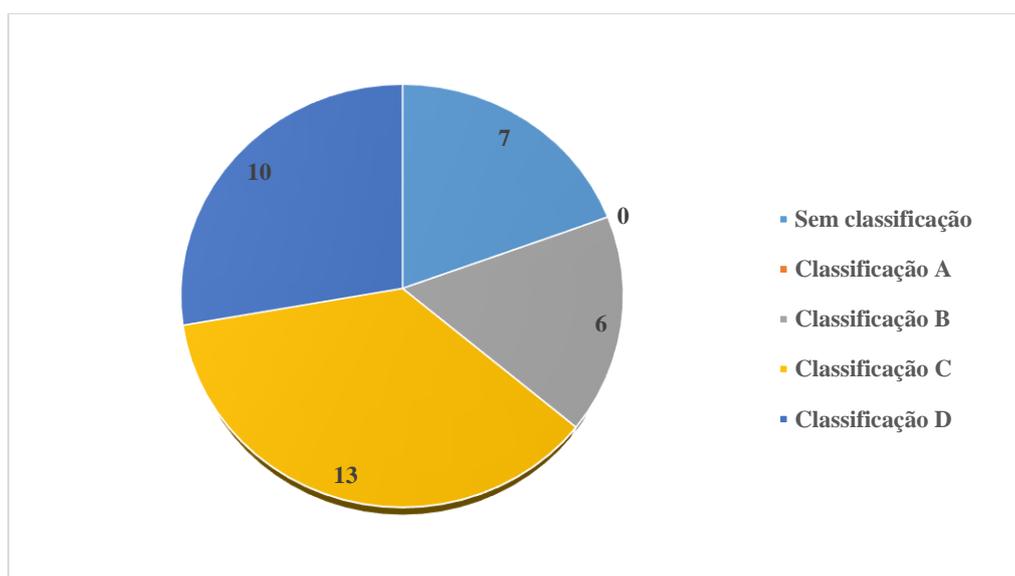


Gráfico 4.1: Classificação dos blocos de alvenaria alternativos

Conforme Figura 4.1 obtida do software MINITAB[®], pode-se verificar a região ótima da proporção dos componentes de mistura, cimento, areia e pedrisco, quando se tem como objetivo maximizar a resistência à compressão dos blocos. Conforme a equação da Tabela 4.2, onde é utilizado um modelo quártico com abordagem *backward elimination*, pode-se verificar as respostas obtidas para as proporções de cada componente quando o interesse é maximizar os valores de resistência à compressão. Pode-se observar também, que a proporção de Isopor moído é mantida no mínimo de 0,05 de modo a

influenciar o mínimo possível. Pode-se observar as mesmas informações na Figura 4.2, que se trata de uma análise da plotagem da superfície de mistura para resistência à compressão obtida do MINITAB®.

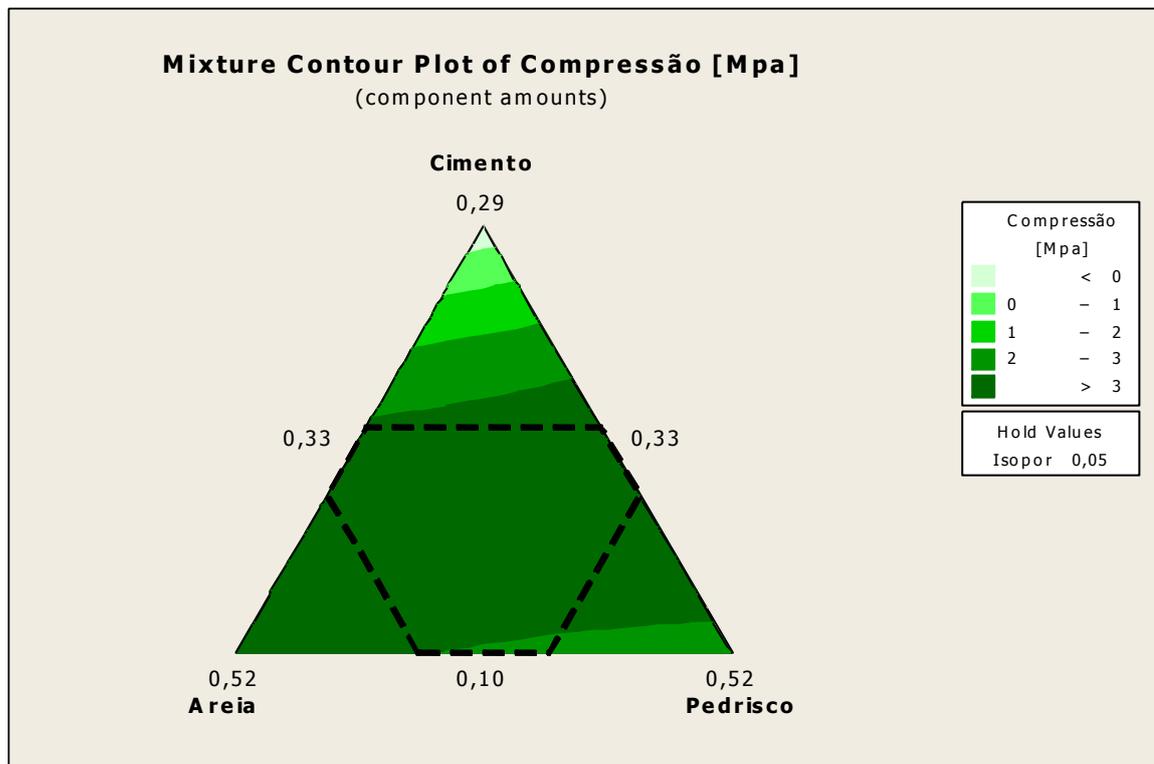


Figura 4.1: Região ótima de mistura dos componentes para resistência à compressão

Tabela 4.2: Equação para maximizar a característica resistência à compressão

Compressão			
S	0,357722	PRESS	5,69343
R-Sq	81,89%	R-Sq(pred)	72,21%
R-Sq(adj)	78,14%		
A	4,4745		0,1700
B	-13,9834		0,3300
C	15,1463		0,4500
D	-25,8178		0,0500
A*C*(-)	-208,3305		-0,0214
B*C*(-)	146,3502		-0,0178
A*C*D*D	2744,9386		0,0002
Função Objetivo:	F(x):		4,051
Restrições:	g(x):		1,00000
	x1	0,10000	0,20000
	x2	0,33000	0,45000
	x3	0,33000	0,45000
	x4	0,05000	0,24000

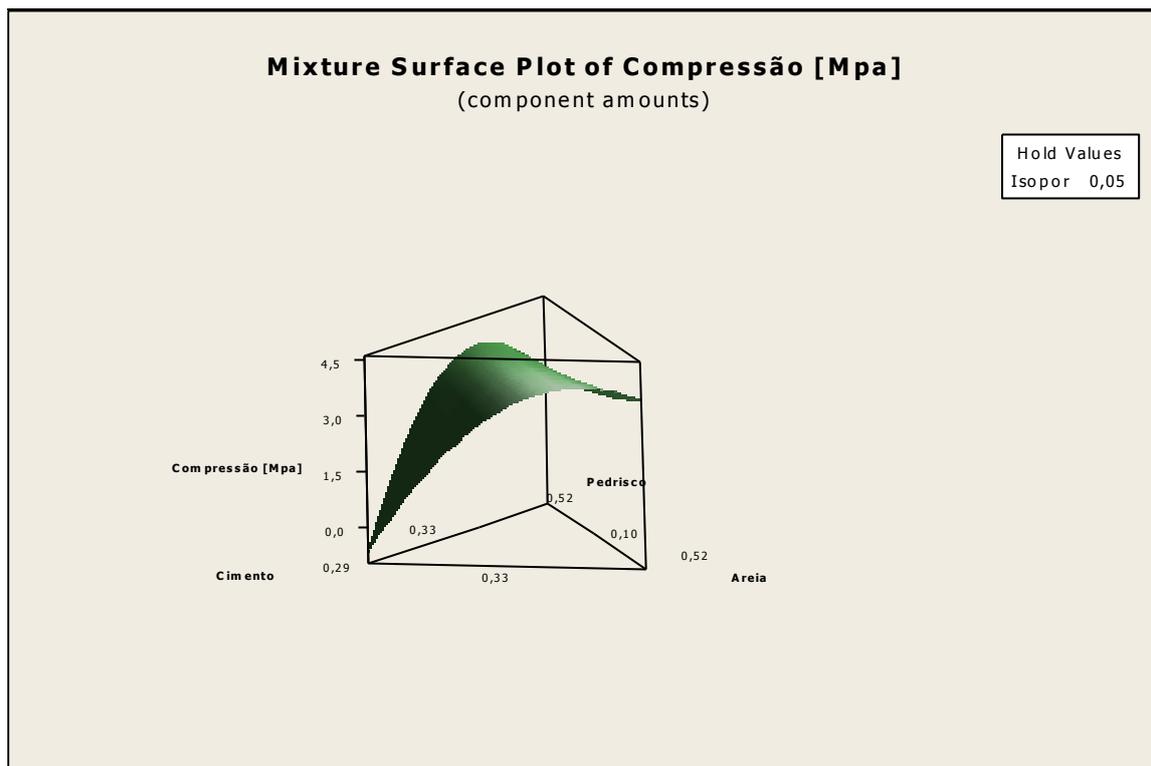


Figura 4.2: Plotagem da superfície da região ótima de mistura dos componentes para resistência à compressão

A melhor resposta para a característica resistência à compressão pode ser obtida através do software MINITAB®, conforme a Figura 4.3 ou conforme equação da Tabela 4.2.

Com as restrições de quantidade para os componentes de mistura utilizada nos experimentos, não foi observado nenhum resultado que alcançasse a classificação A, que são blocos de alvenaria com resistência à compressão acima de 6,0 MPa, e são utilizados para função estrutural, tanto acima quanto abaixo do nível do solo.

Vale ressaltar que, mesmo com a inserção de resíduo de Isopor moído na composição dos blocos de alvenaria é possível elaborar misturas para blocos que atendam às exigências de resistência à compressão conforme norma vigente.

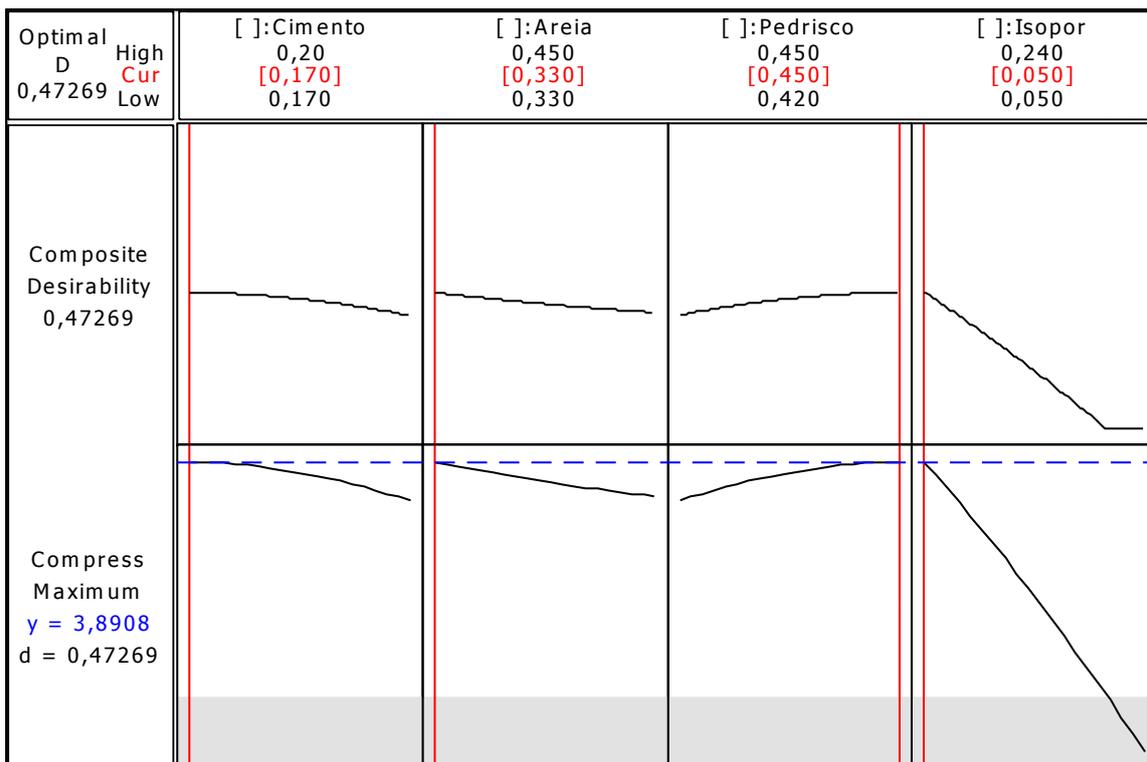


Figura 4.3: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à compressão

4.2 Resultados de absorção

Absorção é a relação entre a massa de água contida no bloco saturado e a massa do bloco seco em estufa até constância de massa, expressa em porcentagem, conforme definido na norma NBR 12118 (ABNT, 2013). Utilizando-se os critérios de absorção para blocos de alvenaria conforme a norma NBR 6136 (ABNT, 2007), pode-se verificar os resultados conforme o Gráfico 4.2, onde são apresentados os resultados dos 36 experimentos realizados e também os resultados a seguir.

Todos os 36 experimentos apresentaram resultados de absorção inferiores a 10%, conforme recomendado em norma vigente.

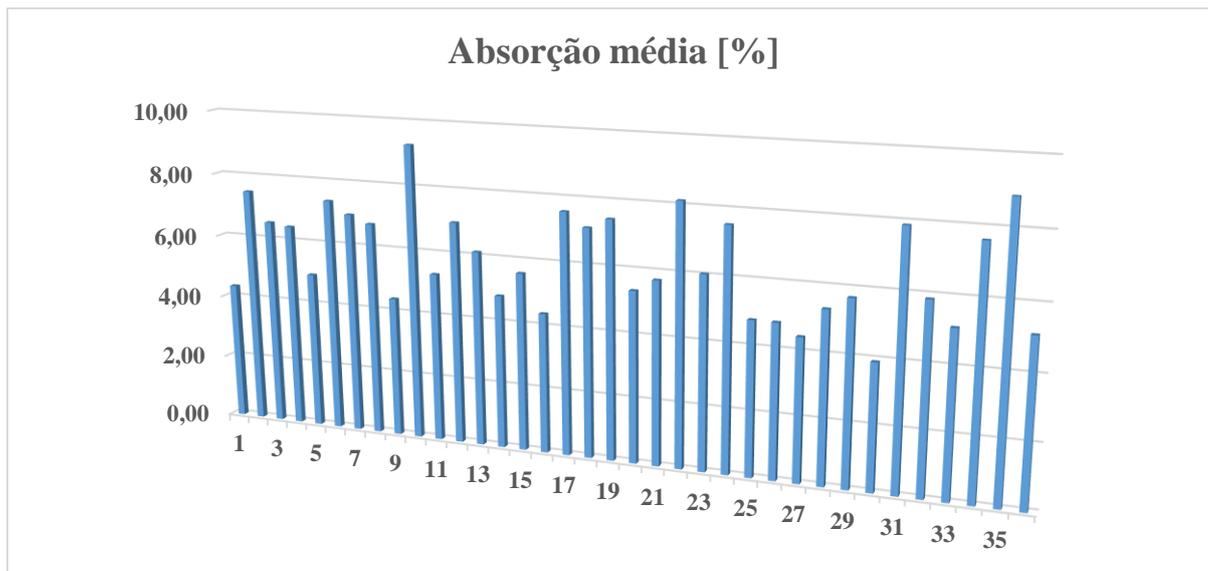


Gráfico 4.2: Absorção média dos blocos de alvenaria alternativos

Conforme a Figura 4.4 obtida do software MINITAB®, pode-se verificar a região ótima da proporção dos componentes de mistura, cimento, areia e pedrisco, quando se tem como objetivo minimizar o índice de absorção dos blocos.

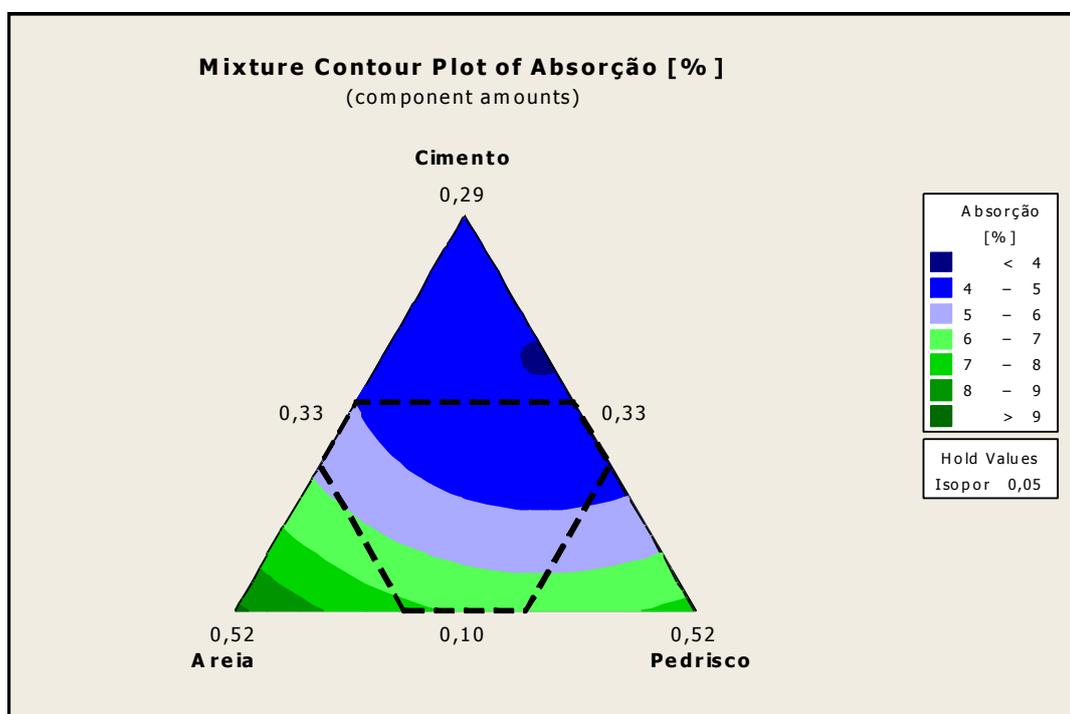


Figura 4.4: Região ótima de mistura dos componentes para absorção

Conforme a Equação da Tabela 4.3, onde é utilizado um modelo quártico com abordagem *backward elimination*, pode-se verificar as respostas obtidas para as

proporções de cada componente quando o interesse é minimizar os valores de absorção. Pode-se observar também que a proporção de Isopor moído é mantida no mínimo de 0,05 de modo a influenciar o mínimo possível. É importante ressaltar que a resposta obtida com o otimizador de misturas do MINITAB®, a proporção de Isopor moído também é mantida no mínimo de 0,05.

Tabela 4.3: Equação para minimizar a característica absorção

Absorção			
S	0,621824	PRESS	15,9224
R-Sq	0,7954	R-Sq(pred)	0,7192
R-Sq(adj)	76,13%		
A	19,573		0,2000
B	-4,973		0,3300
C	-6,676		0,4200
D	3,612		0,0500
B*D*(-)2	368,022		0,0013
1/A	0,863		5,0000
Função Objetivo:	F(x):		4,44126
Restrições:	g(x):		1,00000
	x1	0,10000	0,20000
	x2	0,33000	0,45000
	x3	0,33000	0,45000
	x4	0,05000	0,24000

Pode-se observar as mesmas informações na Figura 4.5, que se trata de uma análise da plotagem da superfície de mistura para absorção.

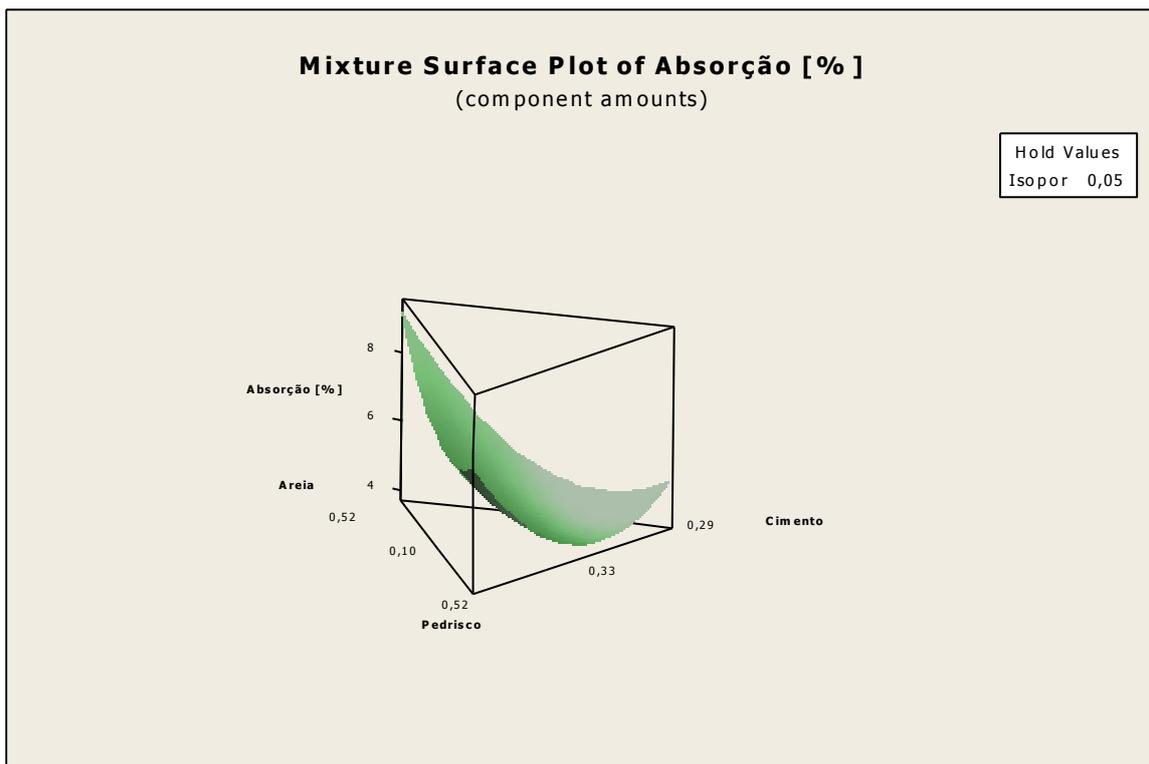


Figura 4.5: Plotagem da superfície da região ótima de mistura dos componentes para absorção

O software MINITAB® sugere a melhor resposta para a característica absorção, conforme a Figura 4.6.

É importante ressaltar que para valores de absorção, quanto menor o valor, melhor é o resultado para o bloco de alvenaria. Mesmo com a inserção de resíduo de Isopor moído em todas misturas dos experimentos, os resultados alcançados para absorção são satisfatórios e pode-se analisar que o Isopor atua de forma bastante positiva nesta característica.

Sugere-se que estes resultados são possíveis, devido ao alojamento dos grãos de Isopor moído nos poros do bloco no momento de sua formação. Além disso, como a estrutura do Isopor é de um material plástico, os grãos colaboram para impedir que a água seja absorvida pelo bloco, garantindo assim, um bom resultado em absorção.

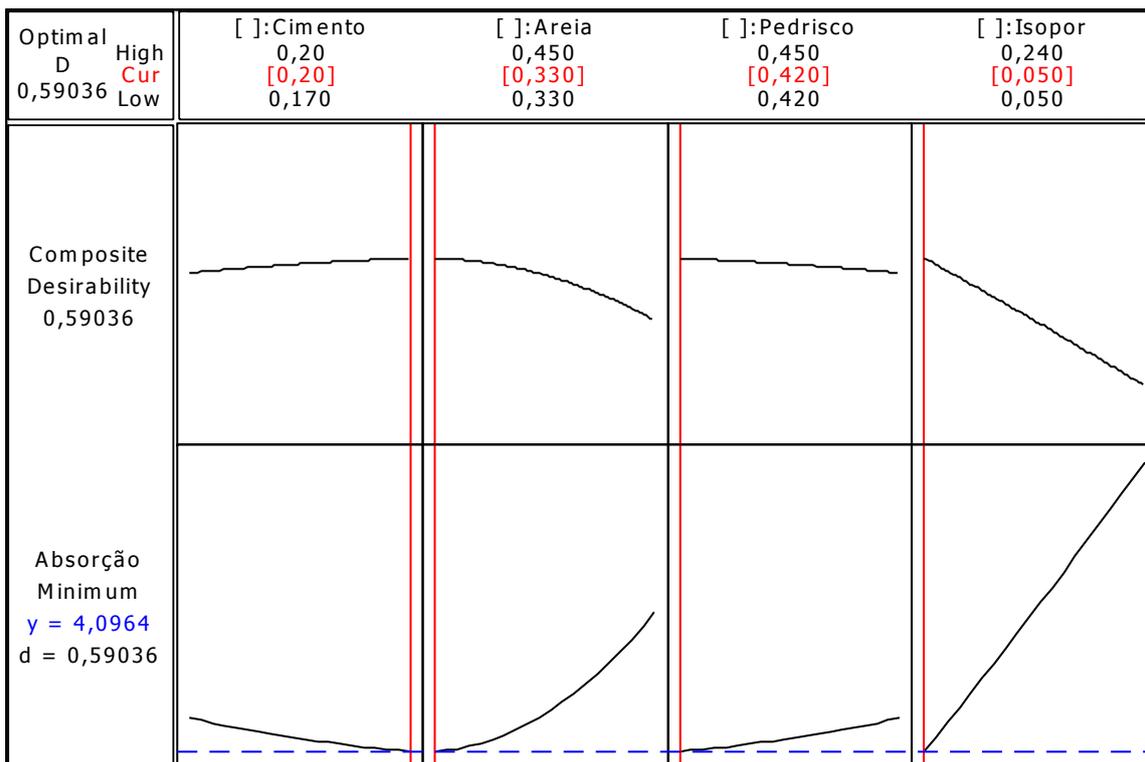


Figura 4.6: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar absorção

4.3 Resultados de custo unitário por bloco

Considera-se custo unitário por bloco, o somatório dos custos dos componentes utilizados para confeccionar um bloco, sendo assim, custo do cimento, areia, pedrisco e Isopor. Não foram considerados os custos com mão de obra, energia elétrica e custos com maquinário, uma vez que a quantidade de blocos fabricados representam somente a quantidade para os experimentos.

Conforme o Gráfico 4.3, pode-se verificar os resultados dos valores relacionados ao custo unitário por bloco.

Conforme o Gráfico 4.4, é possível comparar o custo unitário do bloco proposto neste trabalho com o custo unitário de blocos com as mesmas dimensões de fabricantes de blocos da cidade de Itajubá-MG. O custo unitário de R\$1,12 é o resultado médio do custo de todos os blocos com classificação apresentados neste trabalho.

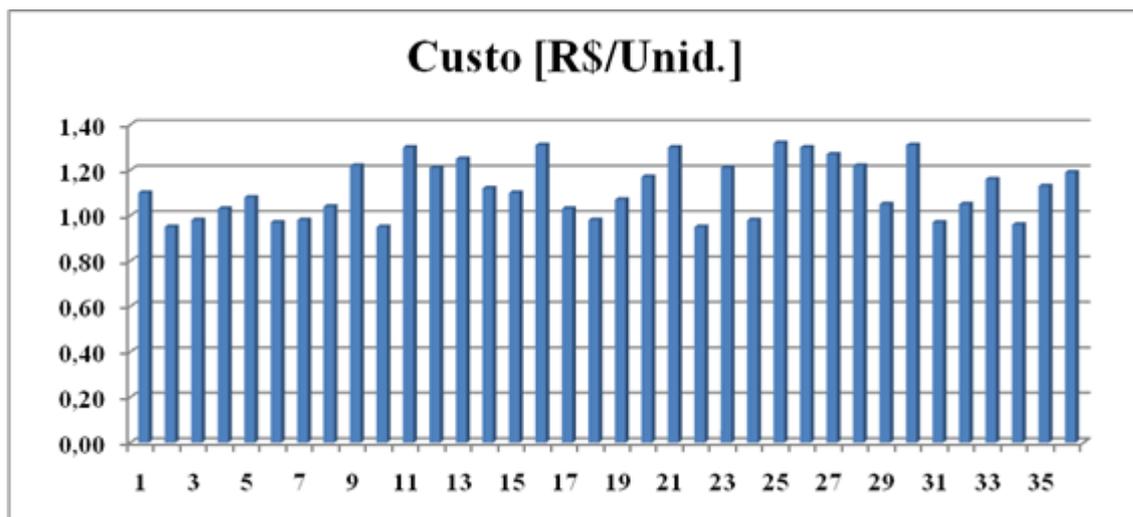


Gráfico 4.3: Resultados do custo unitário por bloco

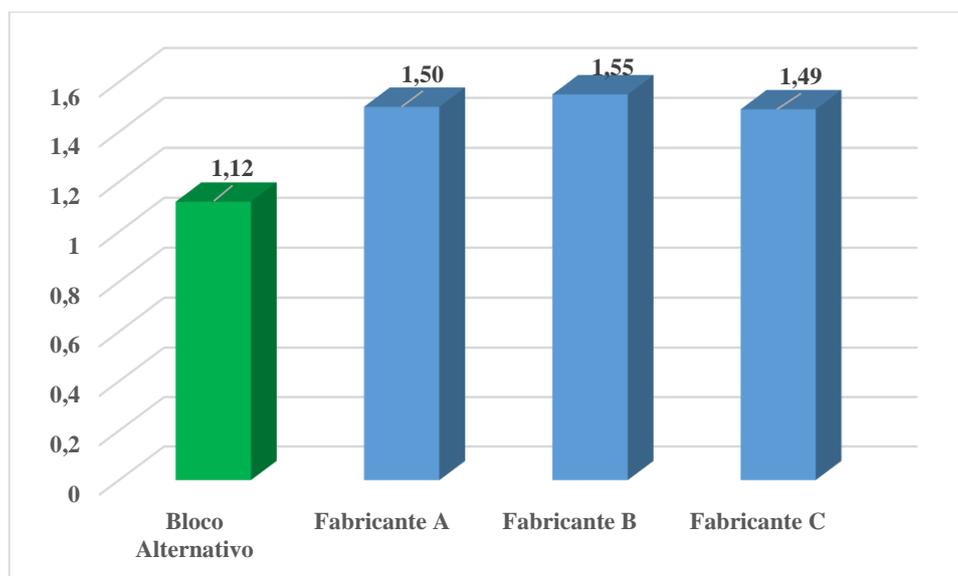


Gráfico 4.4: Custo unitário do bloco alternativo x fabricantes de Itajubá-MG

Conforme Figura 4.7, pode-se verificar a região ótima da proporção dos componentes de mistura, cimento, areia e pedrisco, quando se tem como objetivo minimizar o custo unitário por bloco.

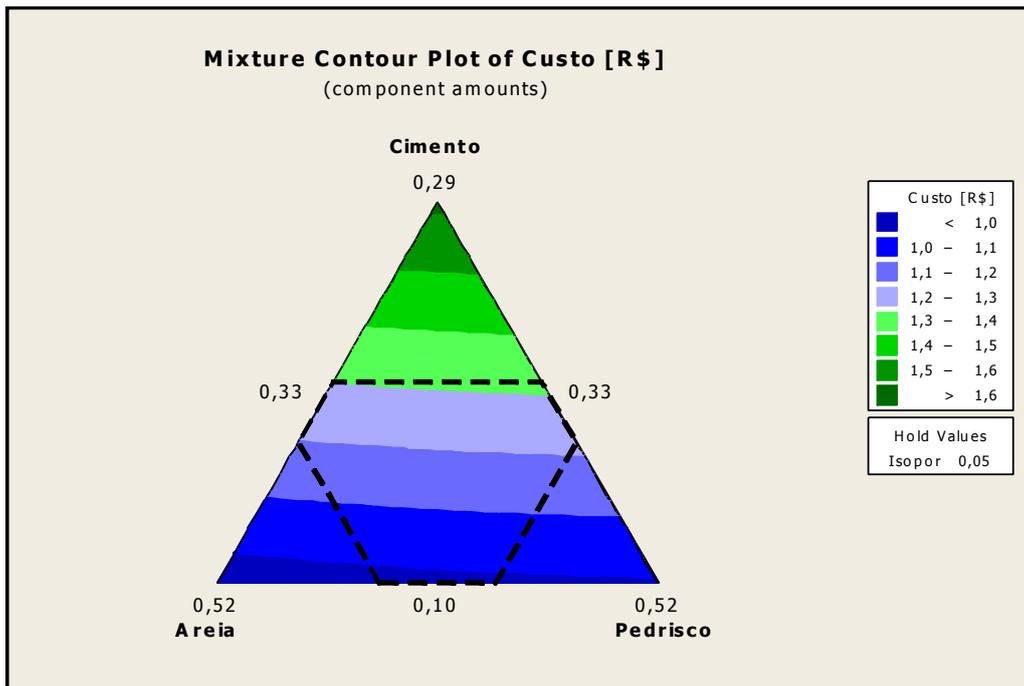


Figura 4.7: Região ótima de mistura dos componentes para custo unitário

Conforme a equação da Tabela 4.4, onde é utilizado um modelo quártico com abordagem *backward elimination*, pode-se verificar as respostas obtidas para as proporções de cada componente, quando o interesse é minimizar os valores de custo unitário. Pode-se observar também, que a proporção de Isopor moído é mantida no mínimo de 0,05 de modo a influenciar o mínimo possível. Pode-se observar as mesmas informações na Figura 4.8, que se trata de uma análise da plotagem da superfície de mistura para custo unitário.

O software MINITAB® sugere a melhor resposta para a característica custo, conforme Figura 4.9.

É importante ressaltar que para valores de custo unitário, quanto menor o valor, melhor é o resultado para o bloco de alvenaria. Mesmo com a inserção de resíduo de Isopor moído em todas misturas dos experimentos, os resultados alcançados para custo unitário são satisfatórios e pode-se analisar que o Isopor atua de forma bastante positiva nesta característica, pois o Isopor moído tem como principal função substituir a areia e por consequência reduzir o custo.

Tabela 4.4: Equação para minimizar o custo unitário

Custo Unitário			
S	0,002315	PRESS	0,000223
R-Sq	99,97%	R-Sq(pred)	99,96%
R-Sq(adj)	99,97%		
A	4,009312459		0,1000
B	0,501427597		0,4500
C	0,823791717		0,3300
D	0,500633913		0,1200
A*C*(-)	0,918619074		-0,0076
B*C*(-)2	-1,3323955		0,0021
Função Objetivo:		F(x):	0,94868
Restrições:		g(x):	1,00000
	x1	0,10000	0,20000
	x2	0,33000	0,45000
	x3	0,33000	0,45000
	x4	0,05000	0,24000

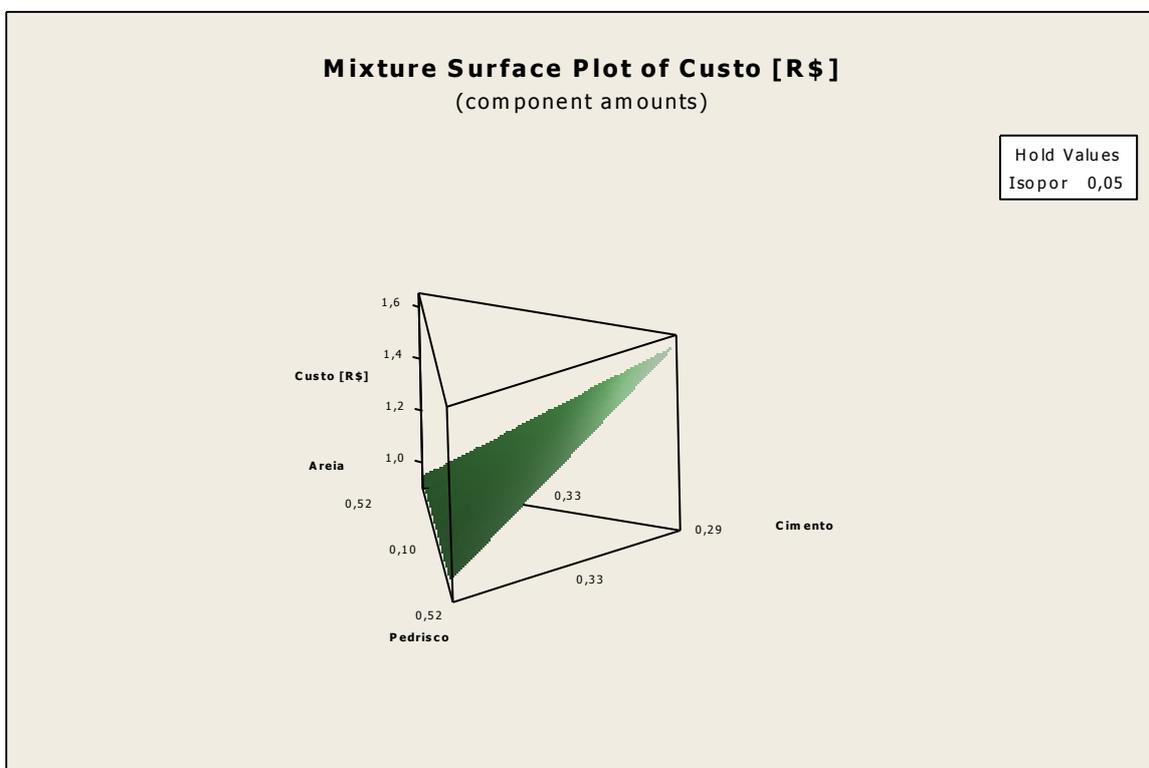


Figura 4.8: Plotagem da superfície da região ótima de mistura dos componentes para custo unitário

Esta redução no custo unitário somente é possível, pois é substituído parte da areia na mistura e inserido resíduo de Isopor moído. Este material é de baixo custo e

praticamente sem valor comercial para reciclagem, sendo assim, uma boa oportunidade de reaproveitamento deste material com uma pequena redução no custo.

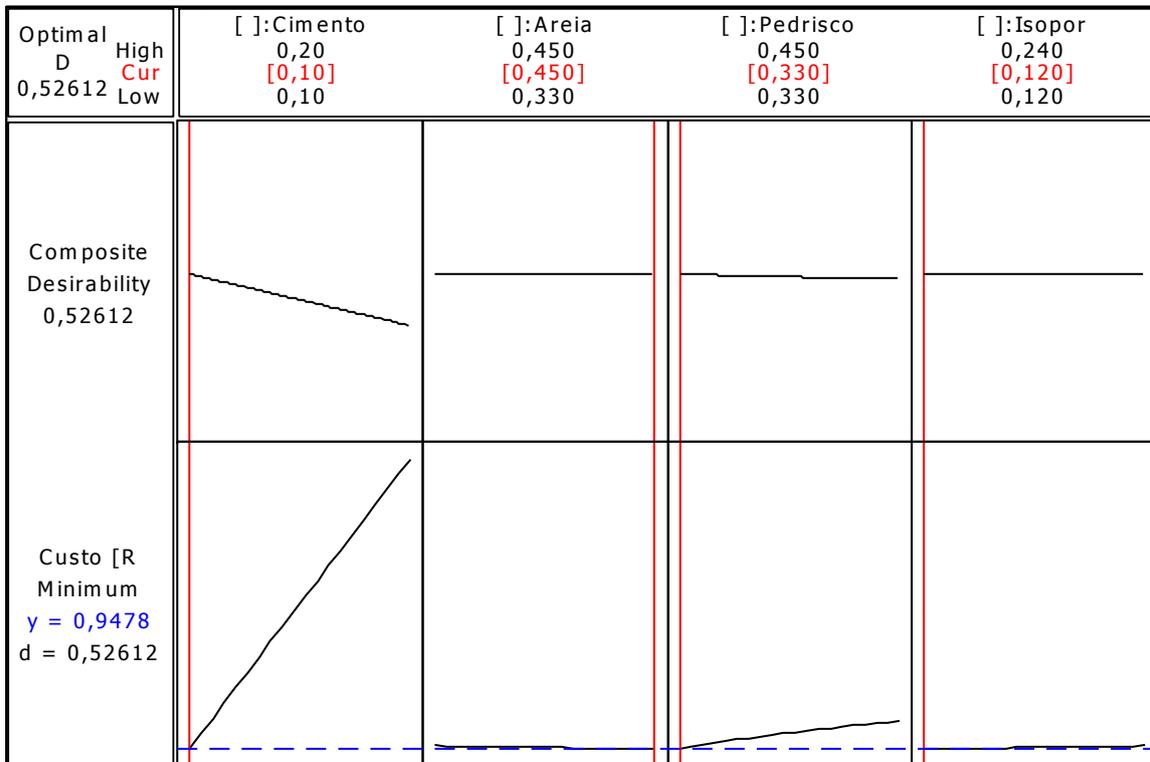


Figura 4.9: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar custo unitário

5 CONCLUSÕES

Com as respostas obtidas nos experimentos, pode-se concluir que é possível produzir blocos de alvenaria com inserção de resíduo de Isopor moído em sua composição e que atendam aos requisitos de resistência à compressão e absorção, conforme a norma NBR 6136 e com o custo unitário em valores admissíveis. Porém, esses objetivos são conflitantes e da mesma forma como acontece com o arranjo de misturas, onde não é possível conseguir bons resultados em uma resposta sem que a outra resposta seja prejudicada de forma proporcional.

Para o objetivo de produzir blocos com resíduo de Isopor moído e atender aos requisitos de resistência à compressão conforme a norma NBR 6136 pode-se concluir que com as faixas de quantidade utilizadas para os componentes é possível atender às especificações em 29 dos 36 experimentos, sendo distribuídos da seguinte maneira: sete experimentos sem atingir uma resistência mínima de 2 MPa e, conseqüentemente, sem classificação, seis experimentos com classificação B, 13 experimentos com classificação C e 10 experimentos com classificação D. Para valores de resistência à compressão, encontrou-se valores mínimo e máximo de 2,05 MPa a 4,30 MPa respectivamente, sendo que a resposta ótima de mistura para maximizar esta característica é de 17% para cimento, 33% para areia, 45% para pedrisco e 5% para Isopor moído.

Com objetivo de atender às especificações de absorção, conforme a norma NBR 6136 pode-se concluir que com as faixas de quantidade utilizadas para os componentes é possível atender as especificações em todos os experimentos, com valores mínimo e máximo de 3,92% a 9,27%, respectivamente, sendo que a resposta ótima de mistura para minimizar esta característica é de 20% para cimento, 33% para areia, 42% para pedrisco e 5% para Isopor moído.

Quanto ao objetivo de se fabricar um bloco de alvenaria alternativo e com um custo unitário menor que o de um bloco de mercado, pode-se concluir que é possível reduzir o custo com a inserção de resíduo de Isopor moído em sua composição e oferecer uma opção viável de reaproveitamento deste material que possui baixo valor comercial. Comparando-se os valores de custo unitário, o bloco com a inserção de Isopor tem aproximadamente um custo 25% menor que os blocos convencionais.

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se a otimização da mistura para blocos de alvenaria, utilizando-se das ferramentas estatísticas PCA e Wsum, para definição de uma mistura denominada “utópica”.

A otimização também pode ser realizada por classe de bloco, como por exemplo: otimização para blocos classe A, classe B, classe C e classe D.

Sugere-se também a análise de viabilidade de fabricação dos blocos em escala comercial, bem como o desenvolvimento de uma máquina específica para moagem do Isopor.

Outra sugestão, seria de analisar o efeito da granulometria e verificar se o tamanho dos grãos de Isopor moído podem influenciar nos resultados alcançados neste trabalho.

Podem ser realizados também trabalhos que testem o isolamento térmico e acústico, resistência ao fogo, estanqueidade e durabilidade em blocos com inserção do Isopor.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733**. Cimento *Portland* de alta resistência inicial. Jul. 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6136**. Bloco vazado de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Dez. 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Mai. 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8082**. Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmica – Resistência à compressão – Método de ensaio. Jul. 1983.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11578**. Cimento Portland composto – Especificação. Ago. 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11948**. Poliestireno expandido para isolamento térmica – Determinação da flamabilidade. Jul. 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11949**. Poliestireno expandido para isolamento térmica – Determinação da massa específica aparente. Jul. 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12094**. Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação da condutividade térmica – Método de ensaio. Set. 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12118**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Mai 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270**. Bloco vazado de concreto simples para alvenaria sem função estrutural. Mai 2005.

ADEYEYE, A., D.; OYAWALE, F., A. Mixture Experiments and their Applications in Welding Flux Design. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, v.4, n.4, p.319-326, 2008.

AKALIN, O.; AKAY, K. U.; SENNAROGLU, B.; TEZ, M. Optimization of chemical admixture for concrete on mortar performance tests using mixture experiments. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.104, n.2, p.233-242, 2010.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C-203 Standard test methods for breaking load and flexural properties of block-type thermal insulation**. Mai 2012.

BABU, D.S.; BABU, K.G.; TIONG-HUAN, W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement & Concrete composites**, v.28, n.6, p.520-527, 2006.

BEREKETLI, I.; GENEVOIS, M. E. An integrated QFDE approach for identifying improvement strategies in sustainable product development. **Journal of Cleaner Production**, v.54, p.188-198, 2013.

BHUTTA, M. A. R.; OHAMA, Y.; TSURUTA, K. Strength properties of polymer mortar panels using methyl methacrylate solution of waste expanded polystyrene as binder. **Construction and Building Materials**, v.25, n.2, p.779-784, 2011.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E.; SOLAR, S.; SHIELDS, D. J.; HÁMOR, T.; VINAI, R.; AGIOUTANTIS, Z. Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa). **Journal of Cleaner Production**, v.27, p.177-181, 2012.

BYGGETH, S. HOCHSCHORNER, E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. **Journal of Cleaner Production**, v.14, p.1420-1430, 2006.

CHONG, T. L.; MATSUFUJI, Y.; HASSAN, M. N. Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis. **Waste Management**, v.25, n.7, p.702-711, 2005.

COHEN, B. Urban growth in developing countries: a review of current trends and a caution regarding existing forecasts. **World Development**, v.32, n.1, p.23-51, 2004.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures. Designs, models and the analysis of mixture data**. 3rd ed. New York: Wiley, 2002.

COSTA, A. F. **Aplicação do delineamento de misturas para se avaliar o efeito da composição e plasticidade na densidade aparente de massas cerâmicas triaxiais**. Universidade Federal de Santa Catarina, 3^a Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão. Jul. 2003.

DÍAZ, J. J. C.; GARCÍA NIETO, P. J.; RABANAL, F. P. Á.; MARTÍNEZ-LUENGAS; A. L. Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method. **Engineering Structures**, v.33, n.1, p.1-9, 2011.

DIEGEL, O.; SINGAMNENI, S.; REAY, S.; WITHELL, A. Tools for Sustainable Product Design: additive manufacturing. **Journal of Sustainable Development**, v.3, n.3, p.68-77, 2010.

DIEHL, J. C.; BREZET, H. Design for sustainability: an approach for international development, transference and local implementation. In: **Proceedings...** International Conference of Environmental Management for Sustainable Universities. Monterrey: Tecnológico de Monterrey, p. 1-10, 2004.

DING, J. T.; YAN, P. Y.; LIU, S. L.; ZHU, J. Q. Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v.29, n.6, p.957-960, 1999.

EN – European Standards. **EN-12090 Thermal insulating products for buildings applications – Determination of shear behavior**. Jan. 2013.

ERIKSSON, L.; JOHANSSON, E.; WIKSTROM, C. Mixture design – design generation, PLS analysis, and model usage. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.43, n.1-2, p.1-24, 1998.

FARZADKIA, M.; JORFI, S.; AKBARI, H.; GHASEMI, M. Evaluation of dry solid waste recycling from municipal solid waste: case of Mashhad city, Iran. **Waste Management & Research**, v.30, n.1, p.106-112, 2012.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCIA-ALCOCEL, E. Durability of expanded polystyrene mortars. **Construction and Building Materials**, v.46, p.175-182, 2013.

FIORITI, C. F. **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) – Programa de Mestrado da UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

FRANCHETTI, M. ISO 14001 and solid waste generation rates in US manufacturing organizations: an analysis of relationship. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.1104-1109, 2011.

GEHIN, A.; ZWOLINSKI, P.; BRISSAUD, D. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. **Journal of Cleaner Production**, v.16, p.566-576, 2007.

GLAVIC, P.; LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. **Journal of Cleaner Production**, v.15, p.1875-1885, 2007.

GUERRERO, L. A.; MAAS, G.; HOGGLAND, W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste Management**, v.33, n.1, p.220-232, 2013.

GUIMARÃES, E. F.; PESSOA, T. B.; FORNARI, C. C. M. Reprocessamento do poliestireno expandido em poliestireno utilizando energia térmica e baixa pressão. **Anais... 2º Fórum Internacional de resíduos sólidos**. Julho, 2009.

HOLMBERG, J.; AZAR, C.; LINDGREN, K. Socio-Ecological indicators for sustainability. **Ecological Economics**, v.18, n.2, p.89-112, 1996.

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial. Disponível em <www.inpi.gov.br>. Acesso em 30/09/2013.

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Rio de Janeiro, RJ). Francisco de Assis Brito. **Bloco de concreto para construção civil, composto de material reciclado**. BR n. PI 0406296-5 A2, 06 jan. 2004.

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Rio de Janeiro). Kerry Benett. **Melhorias relacionadas com um bloco oco de alvenaria de concreto**. BR n. PI0711693-4 A2, 10 maio 2007, 06 dez. 2011.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação de mestrado (Engenharia de estruturas) – Programa de Mestrado em Engenharia de Estruturas, USP de São Carlos, 2011.

JAYAL, A. D.; BADURDEEN, F.; DILLON JR., O. W.; JAWAHIR, I. S. Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.2, n.3, p.144-152, 2010.

KAN, A.; DEMIRBOGA, R. A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, n.6, p.2994-3000, 2009.

KEMMLER, A.; SPRENG, D. Energy indicators for tracking sustainability in developing countries. **Energy Policy**, v.35, n.4, p.2466-2480, 2007.

KORONEOS, C. J.; NANAKI, E. A. Integrating solid waste management and energy production – a life cycle assessment approach: the case of study of the city of Thessaloniki. **Journal of Cleaner Production**, v.27, p.141-150, 2012.

LINDSEY, T.; Sustainable principles: common values for achieving sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.561-565, 2011.

LJUNBERG, L. Y. Material selection and design for development of sustainable products. **Materials and Design**, v.28, n.2, p.466-479, 2007.

LOCKREY, S.; JOHNSON, K. B. Designing pedagogy with emerging sustainable technologies. **Journal of Cleaner Production**, v.61, p.70-79, 2013.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis. Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. 1ª Ed. 2ª Reimpr. São Paulo: Edusp, 2008.

MARCHAND, A.; WALKER, S. Product development and responsible consumption: designing alternatives for sustainable lifestyles. **Journal of Cleaner Production**, v.16, p.1163-1169, 2008.

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHS, K. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste management**, v.33, n.4, p.988-1003, 2013.

MAXWELL, D.; VAN DER VORST, R. Developing sustainable products and services. **Journal of Cleaner Production**, v.11, p.883-895, 2003.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology**, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**, 5th ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2001.

MORI, K.; CHRISTODOULOU, A. Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). **Environmental Impact Assessment Review**, v.32, n.1, p.94-106, 2012.

OLIVEIRA, F. A.; DE PAIVA, A. P.; LIMA, J. W. M.; BALESTRASSI, P. P.; MENDES, R. R. A. Portfolio optimization using mixture design of experiments: scheduling trades within electricity markets. **Energy Economics**, v.33, n.1, p.24-32, 2010.

OWUSU, G.; OTENG-ABABIO, M.; AFUTU-KOTEY, R. Conflicts and governance of landfills in a developing country city, Accra. **Landscape and Urban Planning**, v.104, n.1, p.105-113, 2012.

PIALOT, O.; MILLET, D.; TCHERTCHIAN, N. How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. **Journal of Cleaner Production**, v.22, p.19-31, 2012.

PUSHPADASS, H. A.; WEBER, R. W.; DUMAIS, J. J.; HANNA, M. A. Biodegradation characteristics of starch-polystyrene loose-fill foams in a composting medium. **Bioresource Technology**, v.101, n.19, p.7258-7264, 2010.

RASHID, S. Longing for sustainability – a general view of western market. **Journal of Sustainable Development**, v.4, n.2, p.40-47, 2011.

ROSS, E.; EVANS, D. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system. **Journal of Cleaner Production**, v.11, p.561-571, 2003.

SEADON, J. K. Sustainable waste management systems. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.1639-1651, 2010.

SEKHARAN, R. V.; ABRAHAM, B. T.; THACHIL, E. N. Utilization of Waste Expanded Polystyrene: Blends with Silica-filled Natural rubber. **Materials and Design**, v.40, p. 221-228, 2012.

SILVEIRA, J.; LEITE, J. P. Technique for optimization of ceramic bodies using mixture design. **Cerâmica**, v.56, n.340, p.347-354, 2010.

SHIN, C. A new recycling method for expanded polystyrene. **Packaging Technology and Science**, v.18, n.6, p.331-335, 2005.

SOLVASON, C. C.; CHEMMANGATTUVALAPPIL, N. G.; ELJACK, F. T.; EDEN, M. R.; Efficient visual Mixture Design of Experiments using property clustering techniques. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.48, n.4, p.2245-2256, 2009.

SPANGENBERG, J.H.; FUAD-LUKE, A.; BLINCOE, K. Design for Sustainability (DfS): the interface of sustainable production and consumption. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.1485-1493, 2010.

TANGUAY, G. A.; RAJAONSON, J.; LEFEBVRE, J. F.; LANOIE, P. Measuring the sustainability of cities: an analysis of the use of local indicators. **Ecological Indicators**, v.10, n.2, p.407-418, 2010.

TROSCHINETZ, A. M.; MIHELICIC, J. R. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. **Waste Management**, v.29, n.2, p.915-923, 2009.

TURGUT, P. Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder. **Construction and Building Materials**, v.22, n.7, p.1422-1427, 2008.

VINODH, S.; RATHOD, G. Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.833-842, 2010.

VYAS, C. V. U.; REDDY, B. V. V. Prediction of solid block masonry prism compressive strength using FE model. **Materials and Structures**, v.43, n.5, p.719-735, 2010.

XU, Y.; JIANG, L.; XU, J.; LI, Y. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, v.27, n.1, p.32-38, 2012.

ZHAI, X.; STEWART, M. G. Structural reliability analysis of reinforced grouted concrete block masonry walls in compression. **Engineering Structures**, v.32, n.1, p.106-114, 2010.

ZHOU, C.; YIN, F.; HU, X. Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: artificial neural and genetic algorithm approach. **Materials and Design**, v.30, n.4, p.1209-1215, 2009.

WANG, H. Y. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. **Journal Waste Management**, v.29, p.335-341, 2009.