UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MANOEL GOMES PEDROZA NETO

PRODUÇÃO POR PRENSAGEM UNIAXIAL DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO MINERAL

RECIFE

2017

MANOEL GOMES PEDROZA NETO

PRODUÇÃO POR PRENSAGEM UNIAXIAL DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO MINERAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de pesquisa: Processos Químicos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Coorientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

RECIFE

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

P3372p Pedroza Neto, Manoel Gomes.
Produção por prensagem uniaxial de compósito à base de gesso e cinzas de carvão mineral / Manoel Gomes Pedroza Neto - 2017.
96folhas. Il.; Tab.; Abr.; Sig.; e Simb.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Coorientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Química. 2. Gesso beta. 3. Cinzas de carvão mineral. 4. Prensagem uniaxial. 5. Compósito de gesso. 6. Características mecânicas. I. Benachour, Mohand.(Orientador). II. Santos, Valdemir Alexandre dos (Coordenador). III.Título.

UFPE

660.2CDD (22. ed.) BCTG/2018 - 117

MANOEL GOMES PEDROZA NETO

PRODUÇÃO POR PRENSAGEM UNIAXIAL DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO MINERAL

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 06 de outubro de 2017 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

_____

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour
Departamento de Engenharia Química - UFPE

_____

Coorientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Departamento de Engenharia Química - UNICAP

_____

Examinador interno: Prof. Dr. Luiz Stragevitch
Departamento de Engenharia Química – UFPE

_____

Examinador interno: Prof. Dr. José Marcos Francisco da Silva
Departamento de Engenharia Química – UFPE

_____

Examinador externo: Prof. Dr. Carlos Adolpho Magalhães Baltar
Departamento de Engenharia de Minas – UFPE

Aos meus pais, Ivanise Jerônima da Silva e
José Gomes Pedroza

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo;

Ao Prof. Dr. Mohand Benachour pela sua amizade e orientação ao longo deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos pela sua confiança e orientação neste trabalho;

Ao Prof. Dr. Sérgio Carvalho de Paiva por disponibilizar seu tempo para ajudar em alguns detalhes da pesquisa;

Aos professores Dr. Luiz Stragevitch e Dr. Carlos Adolpho Magalhães Baltar pelas sugestões e avaliação da dissertação.

Aos meus Pais José Gomes Pedroza e Ivanise Jerônima da Silva pelas orações e incentivo;

À aluna Laís Silveira de Paula polos conselhos e ajuda durante a pesquisa;

À minha irmã Elisangela Jeronimo da Silva pela convivência nos momentos felizes e difíceis;

Aos colegas de turma do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química que me ajudaram nesta caminhada;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFPE;

À Universidade Católica de Pernambuco por disponibilizar equipamentos e instalações;

Aos membros do Laboratório de Análise Mineral da Universidade Federal de Pernambuco;

Aos membros do Laboratório de Físico-Química da Universidade Católica de Pernambuco;

Aos membros do Laboratório de Análise de Minerais, Solos e Água – LAMSA Universidade Federal de Pernambuco;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq por disponibilizar os recursos financeiros para a realização deste trabalho.

RESUMO

O aumento da procura por novos materiais, que contemplem a sustentabilidade, proporcionou o interesse em estudos voltados para o reaproveitamento de resíduos sólidos. Entre esses resíduos encontram-se as cinzas oriundas da queima de carvão mineral em vários seguimentos industriais. Os principais destinos dessas cinzas são aterros industriais, minas de carvão mineral desativadas para preenchimento de cavidades e matéria-prima para a indústria cimenteira. Já existem aplicações sustentáveis na indústria da construção civil utilizando cinzas, tais como, argamassas, blocos de concreto, cerâmica vermelha, entre outros. Contudo, não existe na literatura nenhuma menção à aplicação de cinzas misturada ao gesso para produção de um compósito. Tendo em vista a procura por novos materiais sustentáveis na construção civil, este trabalho testou a obtenção de um compósito formado por gesso e cinzas de carvão mineral. A metodologia de trabalho fundamentou-se na aplicação de um planejamento experimental e na técnica de conformação por prensagem mecânica uniaxial, para produzir corpos de prova de diferentes composições de gesso e cinzas, a fim de definir uma composição adequada em relação às propriedades físico-químicas e mecânicas dessa mistura. Para a aplicação do planejamento experimental variou-se os fatores: percentagem em massa de cinza leve, cinza pesada e gesso, relação água/gesso e carga de prensagem uniaxial. Para estudar a viabilidade técnica deste novo compósito foram analisadas as resistências mecânicas à compressão e à flexão, a taxa de absorção de água e os tempos de pega inicial e final. Entre as condições operacionais testadas a que apresentou os melhores resultados de desempenho técnico foi um compósito formulado com 25 % em massa de cinza leve, 25 % em massa de cinza Pesada e 50 % de gesso beta, relação água/gesso de 0,25 e carga de prensagem uniaxial de 12,5 MPa. O compósito produzido nessas condições foi considerado satisfatório quanto à aplicação como material de construção civil. Além de apresentar-se de fato como uma alternativa sustentável, o compósito obtido se mostrou mais eficiente em termos das suas propriedades mecânicas comparado ao gesso convencional.

Palavras-Chave: Gesso beta. Cinzas de carvão mineral. Prensagem uniaxial. Compósito de gesso. Características mecânicas.

ABSTRACT

The increase in the demand for new materials, which contemplate sustainability, has given rise to interest in studies aimed at the reuse of solid waste. Among these residues are ash from the burning of mineral coal in several industrial processes. The main destinations of these ashes are industrial landfills, depleted coal mines to fill caves and raw material for the cement industry. There are already sustainable applications in the construction industry using ashes, such as mortars, concrete blocks, red ceramics, among others. However, there is no mention in the literature of the application of ash mixed with gypsum for the production of a composite. Considering the search for new sustainable materials in the construction industry, this work tested the obtaining of a composite formed by gypsum and ashes of mineral coal. The work methodology was based on the application of an experimental design and on the uniaxial mechanical press forming technique to produce test specimens of different compositions of gypsum and ashes, in order to define a suitable composition in relation to the physico-chemical properties and mechanics of this mixture. For the application of the experimental planning the factors were varied: mass percentage of light gray, heavy ash and gypsum, water / gypsum ratio and uniaxial pressing load. In order to study the technical feasibility of this new composite, the mechanical strengths for compression and bending, water absorption rate and initial and final handle times were analyzed. Among the tested operational conditions, which presented the best technical performance results was a composite formulated with 25% by weight of light ash, 25% by weight of Heavy ash and 50% of gypsum beta, water / gypsum ratio of 0.25 and Uniaxial pressing load of 12.5 MPa. The composite produced under these conditions was considered satisfactory for the application as civil construction material. In addition to presenting itself as a sustainable alternative, the composite obtained proved more efficient in terms of its mechanical properties compared to conventional gypsum.

Keywords: Beta plaster. Coal ash. Uniaxial pressing. Plaster composite. Mechanical characteristics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema da prensagem uniaxial simples..... 27

Figura 2 – Consumo de energia nas indústrias em 2014..... 30

Figura 3 – Classificação do carvão mineral quanto ao uso e reservas mundiais em porcentagem..... 31

Figura 4 – Produção de energia elétrica utilizando carvão mineral..... 32

Figura 5 – Esquema da coleta de cinzas..... 33

Figura 6 – Esquema MSR e planejamento dos experimentos aplicados ao gesso/cinza..... 41

Figura 7 – Fôrma para prensagem. (a) Base da peça. (b) Câmara e tampa da peça..... 45

Figura 8 – Corpos de prova de gesso/cinza prismáticos..... 46

Figura 9 – Etapas da preparação dos corpos de prova..... 46

Figura 10 – Prensa hidráulica automática para testes mecânicos..... 48

Figura 11 – Esquema com geometria utilizada no cálculo da resistência à tração na flexão..... 49

Figura 12 – Distribuição das partículas de gesso retidas em cada peneira..... 51

Figura 13 – Distribuição das partículas de gesso passantes em cada peneira..... 51

Figura 14 – Distribuição das partículas de cinza leve e pesada..... 53

Figura 15 – Difratograma de Raios-X da Cinza Leve..... 54

Figura 16 – Difratograma de Raios-X da Cinza Pesada..... 54

Figura 17 – Tempo de pega inicial em função da composição da mistura..... 57

Figura 18 – Tempo de pega Final em função da composição da mistura..... 57

Figura 19 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (resistência à compressão)..... 59

Figura 20 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para compressão (MPa) 60

Figura 21 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 62

Figura 22 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 63

Figura 23 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e carga de prensagem (MPa) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 64

Figura 24 – Perfil da resistência à compressão em função da fração mássica de cinza leve (%) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 65

Figura 25 – Perfil da resistência à compressão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 66

Figura 26 – Perfil da resistência à compressão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 67

Figura 27 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (resistência à flexão) 69

Figura 28 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para resistência à flexão..... 70

Figura 29 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza leve (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 72

Figura 30 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza pesada (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 73

Figura 31 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e relação água/gesso (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 74

Figura 32 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza pesada (%) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 75

Figura 33 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 76

Figura 34 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 77

Figura 35 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (taxa de absorção de água) 79

Figura 36 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para taxa absorção de água..... 81

Figura 37 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza leve (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 83

Figura 38 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza pesada (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 84

Figura 39 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e relação água/gesso (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 85

Figura 40 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza leve (%) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – Carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 86

Figura 41 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza pesada em 16 % e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 87

Figura 42 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno..... 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores e níveis para o DCCR..... 42

Tabela 2 – Matriz de experimentos decodificada do DCCR..... 43

Tabela 3 – Características físicas do pó de gesso..... 50

Tabela 4 – Resultados da umidade e densidade das cinzas..... 52

Tabela 5 – Resultado quantitativo da espectroscopia de absorção atômica..... 55

Tabela 6 – Análise de Variância para resistência à compressão do gesso/cinza..... 58

Tabela 7 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para resistência à compressão..... 60

Tabela 8 – Análise de Variância para resistência à flexão do gesso/cinza ... 68

Tabela 9 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para resistência à flexão..... 70

Tabela 10 – Análise de Variância para taxa de absorção de água do gesso/cinza..... 78

Tabela 11 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para taxa de absorção de água..... 80

Tabela A1 – Resultados experimentais do DCCR referentes às propriedades do compósito gesso/cinza..... 96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	*Atomic Absorption Spectrometry*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	*Analysis of Variance*
BEN	Balaço Energético Nacional
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de Raios-X
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Etileno Vinil Acetato
FAAS	*Flame Atomic Absorption Spectrometry*
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Teraftalato
RCD	Resíduo da Construção e Demolição

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Coeficiente de Regressão
α	Nível de incerteza
Re	Material Retido (%)
DMG	Diâmetro Médio Geométrico (μm)
MU	Massa Unitária ($kg \cdot m^{-3}$)
AA	Taxa de Absorção de Água (%)
σ_{TF}	Resistência à Tração na Flexão (MPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 19

2 REVISÃO DA LITERATURA..... 22

2.1 Construção civil sustentável..... 22

2.1.1 Aspetos gerais..... 22

2.1.2 Materiais de construção civil sustentáveis..... 22

2.2 Gesso..... 23

2.2.1 Considerações gerais..... 23

2.2.2 Características físico-químicas e mecânicas do gesso..... 24

2.2.3 Moldagem por prensagem uniaxial..... 26

2.2.4 Compósitos de gesso..... 27

2.3 Cinzas de carvão mineral..... 29

2.3.1 Carvão mineral nas indústrias..... 29

2.3.2 Cinzas no setor termoelétrico..... 32

2.3.3 Reaproveitamento de cinzas..... 33

2.4 Metodologia de superfície de resposta..... 35

3 MATERIAIS E MÉTODOS..... 37

3.1 Gesso e cinzas..... 37

3.2 Caracterização do pó de gesso..... 37

3.2.1 Umidade e água de cristalização..... 37

3.2.2 Granulometria do gesso..... 37

3.2.3 Massa unitária do gesso..... 38

3.3 Caracterização das cinzas..... 39

3.3.1 Análise granulométrica a laser..... 39

3.3.2 Difratometria de Raios-X..... 39

3.3.3 Teor de umidade..... 39

3.3.4 Densidade das cinzas..... 40
3.3.5 Análise por espectroscopia de absorção atômica..... 40
3.4 Planejamento dos experimentos..... 40
3.5 Preparação dos corpos de prova..... 44
3.6 Caracterização do compósito gesso e cinzas..... 47
3.6.1 Tempo de pega inicial e final..... 47
3.6.2 Resistência mecânica à compressão..... 47
3.6.3 Resistência mecânica à flexão..... 48
3.6.4 Taxa de absorção de água..... 49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 50
4.1 Características do pó de gesso..... 50
4.1.1 Características físico-químicas do pó de gesso..... 50
4.1.2 Granulometria do gesso usado**.**..... 50
4.2 Características das cinzas..... 52
4.2.1 Umidade e massa unitária..... 52
4.2.2 Granulometria das cinzas..... 52
4.2.3 Difratometria de Raios-X..... 53
4.2.4 Análise por espectroscopia de absorção atômica..... 55
4.3 Características do compósito gesso e cinzas..... 56
4.3.1 Tempo de pega inicial e final..... 56
4.3.2 Resistência mecânica à compressão..... 57
4.3.3 Resistência mecânica à flexão..... 68
4.3.4 Taxa de absorção de água..... 78
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS..... 89
5.1 Conclusões..... 89
5.2 Sugestões para trabalhos futuros..... 90

REFERÊNCIAS..... 91

APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... 96

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas são produzidas por ano no Brasil provenientes da queima de carvão mineral nas indústrias. As termoelétricas são as principais geradoras desse resíduo, sendo responsáveis por 90 % do total produzido.

Apesar da grande quantidade gerada, apenas 30 % das cinzas são reaproveitadas. Seu principal destino é a indústria cimenteira, que utiliza as cinzas para produzir *clínquer*, matéria-prima para fabricação do cimento *Portland*, e na pavimentação de estradas. O que não foi reaproveitado é descartado em aterros especificados pelas agências ambientais ou incorporados a minas de carvão mineral desativadas para preenchimento de cavidades (ROCHA *et al.*, 2012).

Segundo Rocha *et al.* (2012), o consumo de carvão mineral terá um aumento significativo devido à expectativa do crescimento do setor termoelétrico brasileiro. Como consequência, a geração de cinzas nas usinas à carvão pode chegar a 4 milhões de toneladas por ano. Em contrapartida, a indústria cimenteira certamente não terá um aumento significativo na produção para compensar este crescimento. Por conseguinte, novos produtos que utilizam cinzas no seu processo são necessários para agregar valor a esse resíduo e, concomitantemente, diminuir a sua presença no meio ambiente.

Novos produtos que utilizam cinzas de carvão mineral em sua composição vêm sendo estudados com grande intensidade por diversos autores na literatura, principalmente para formulação de novos produtos destinados à construção civil. Podem ser destacados os seguintes títulos: reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas (SIQUEIRA *et al.*, 2012); utilização de cinzas na produção de cerâmica vermelha (tijolos) (ZANIN *et al.*, 2013); emprego de cinzas em blocos de concreto para a construção civil (NOGUEIRA, 2011); uso de cinzas para camadas de base de pavimentos (LOPES, 2011); e reciclagem de cinzas para a produção de materiais vítreos (MATSINHE *et al.*, 2015).

O reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na produção de materiais de construção civil pode propiciar uma redução geral de custo, tanto pelo barateamento da fabricação desses produtos como pela diminuição da quantidade de cinzas a serem aterradas. Assim, os processos ambientais sustentáveis ganham mais espaço no

Brasil, onde são pouco explorados em relação aos países desenvolvidos (SIQUEIRA *et al*., 2012; SKORONSKI *et al*., 2015).

Entre os principais materiais de construção civil destaca-se o gesso, que possui muitas aplicações, sobretudo para fabricação de pré-moldados. Novas técnicas como: aditivação do gesso, incorporação de resíduos fibrosos e moldagem por prensagem mecânica estão sendo empregadas na produção de gesso a fim de melhorar suas características mecânicas e aspectos de durabilidade (GONÇALVES & FERRAZ, 2014).

Levando em consideração a grande relevância desse material na construção civil e o significado ambiental de reciclar as cinzas, uma possibilidade interessante seria a investigação da incorporação de cinzas de carvão mineral no gesso para a fabricação de materiais de construção civil aplicando a técnica de moldagem por prensagem.

Contudo, um produto formado pela mistura gesso e cinzas, confeccionado de forma aleatória sem uma composição prévia estudada, pode prejudicar as propriedades físico-químicas e mecânicas desse produto, diminuindo sua qualidade. Para contornar esse problema, uma das alternativas é aplicar uma metodologia de planejamento experimental fatorial com a intenção de determinar a composição ótima que traga um equilíbrio entre a quantidade significativa de cinza incorporadas ao gesso e suas propriedades físico-químicas e mecânicas.

Com isso, o objetivo geral deste trabalho é obter um compósito à base de gesso beta e cinzas de carvão mineral, originadas de uma usina termoelétrica, e analisar o desempenho desse compósito em relação ao gesso convencional.

Os objetivos específicos são:

- Obter as caracterizações dos materiais individuais – cinzas de carvão mineral e gesso beta;
- Confeccionar e realizar testes de desempenho de corpos de prova com diferentes frações de gesso e cinzas;
- Definir em quais condições operacionais (relação água/gesso, carga de prensagem, composição da mistura gesso/cinzas) apresentam os melhores resultados para resistência à compressão, resistência à flexão e taxa de absorção de água;

- Realizar uma comparação entre as propriedades mecânicas do compósito formulado e do gesso comercial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Construção civil sustentável

2.1.1 Aspectos gerais

Com o início da comprovação científica dos impactos ambientais causados pela poluição antropogênica, surgiram algumas conferências mundiais tratando sobre meio ambiente para elaboração de tratados que garantissem a diminuição das emissões à médio e longo prazo. O principal mecanismo para atingir tais objetivos foi a aplicação do conceito de sustentabilidade em todos os setores da economia, principalmente na indústria (TRETTO, 2014).

Atualmente, o modelo de produção sustentável foi ampliado para outros setores além das indústrias, sobretudo aqueles que têm maior impacto ambiental, social e econômico como, por exemplo, o setor da construção civil, que impacta o meio ambiente de diversas formas além de alterar a dinâmica das cidades com infraestrutura e habitação (GAN *et al.*, 2015).

Para materializar o conceito de sustentabilidade no setor da construção civil, foi iniciada, na década de 90, a concepção de construção civil sustentável, que engloba várias práticas voltadas para o meio ambiente, como: diminuição de resíduos na etapa de execução da obra, uso racional de recursos naturais, implantação de conceitos de racionamento de água e energia elétrica na fase de utilização do imóvel e utilização de materiais de construção sustentáveis (MACÊDO & MARTINS, 2015).

Embora o conceito de construção civil sustentável apenas fosse praticado em países desenvolvidos, atualmente países como o Brasil cada vez mais investe nesse sentido, seja pela aplicação direta de práticas ambientais como também pelo incentivo a pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis no setor da construção civil.

2.1.2 Materiais de construção civil sustentáveis

Nos últimos dez anos, houve um crescimento populacional que impulsionou a indústria da construção civil em termos de habitação e infraestrutura nas cidades. Consequentemente, o consumo de materiais de construção civil convencionais (tijolos, argamassas, aço, alumínio, gesso e cimento) aumentou consideravelmente,

gerando mais resíduos tanto no seu processo de fabricação quanto na etapa de execução de projetos (PACHECO-TORGAL & LABRINCHA, 2013; AKADIRI, 2015). A ameaça dos materiais de construção civil ao meio ambiente reside na emissão de grande quantidade de gases do efeito estufa no seu processo de fabricação assim como no processo de extração da matéria prima para produzí-los, que por vezes são recursos naturais não renováveis; basta observar a gipsita, alumínio, ferro, aço e cerâmica, todos oriundos de mineração (WU *et al.*, 2014).

A atividade de mineração possui dados alarmantes. Segundo Bissoli-Dalvi *et al*. (2013) a atividade de mineração em todo o mundo gera 6 bilhões de toneladas de resíduo de minas para produzir apenas 900 milhões de toneladas de matéria-prima, ou seja, apenas 15 % de fato é aproveitado. Atualmente, técnicas inovadoras de fabricação e novos produtos voltados para construção civil estão em constante desenvolvimento com a finalidade de melhorar aspectos de qualidade, durabilidade, resistência e custo sempre observando a questão ambiental, que é um dos principais fatores.

Como exemplo desses materiais, pode ser citado o gesso. Algumas pesquisas com o objetivo de adicionar materiais à matriz do gesso foram publicadas, visando não só a melhoria das suas propriedades físicas como também a diminuição do impacto ambiental promovido por sua fabricação. Podem ser citados: reaproveitamento de resíduo de gesso e PET para produção de telha ecológica (TESKE *et al*.2015); adição de borracha proveniente de isolamento de espuma de tubulações industriais ao gesso (RIVERO *et al*., 2014); adição de cera de carnaúba ao gesso (GONÇALVES & FERRAZ, 2014) e reaproveitamento de polímero (EVA) na matriz de gesso (OLIVEIRA *et al*., 2012).

2.2 Gesso

2.2.1 Considerações gerais

O gesso é um aglomerante que consiste no sulfato de cálcio hemihidratado de fórmula química $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$. Seu principal uso é na construção civil, porém é utilizado bastante na ortopedia (imobilização em fraturas) e na odontologia (próteses dentárias). Fazendo uma comparação entre os materiais de construção civil, o gesso é o menos utilizado entre os aglomerantes, todavia ele possui várias propriedades

vantajosas como plasticidade da pasta fresca, lisura da superfície endurecida além de endurecimento rápido (TESKE *et al.*, 2015).

Segundo Barbosa *et al.* (2014), o processo de fabricação de gesso consiste na extração, preparação para calcinação e calcinação de uma rocha sedimentar chamada gipso. O gipso tem como principais componentes a gipsita e a anidrita e como impurezas, geralmente argilominerais, calcita, dolomita e material orgânico.

Mineral gipsita equivale ao sulfato de cálcio dihidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e é a principal matéria prima do gesso. Tem como características: baixa dureza, pouca solubilidade em água e pode ser encontrada em várias regiões do mundo (BALTAR *et al*., 2013; BARBOSA *et al*., 2014).

Segundo Baltar *et al*. (2013), o sulfato de cálcio dihidratado possui uma propriedade particular de perder e recuperar água da sua estrutura devido à cristalização. O processo de perda de umidade é chamado de calcinação. Nela, a gipsita perde 75 % de água, num processo térmico entre 125 ºC a 180 ºC, e transforma-se em gesso (sulfato de cálcio hemihidratado - $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$), segundo a reação:

$$\underset{\text{(Gipsita)}}{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \xrightarrow{125\text{-}180\ ^oC} \underset{\text{(Hemidratado)}}{CaSO_4 \cdot 1/2H_2O} + \underset{\text{(vapor d'água)}}{3/2\ H_2O} \qquad (1)$$

As condições de operação determinam o tipo de gesso que será produzido: calcinação sob pressão ambiente, ou em baixas pressões, darão origem ao hemihidratado β (gesso β); calcinação sob pressão de vapor de água saturada, será obtido o hemihidratado α (gesso α). Em relação à aplicabilidade, o gesso α possui um emprego mais nobre (gesso hospitalar) e, por esse motivo, possui preços mais elevados. O gesso β caracteriza-se pelo baixo custo de produção e é amplamente usado na construção civil, tanto para revestimento interno quanto para produzir pré-moldados de gesso.

2.2.2 Características físico-químicas e mecânicas do gesso

Uma das principais vantagens do gesso é a sua característica de ser um aglomerante menos agressivo ao meio ambiente em termos de fabricação quando comparado a outros materiais de construção, além de ter boa aderência, possuir baixa

condutividade térmica e um elevado coeficiente de absorção acústica. No entanto, apresenta como desvantagem a inviabilidade de ser usado em ambientes externos e de elevada umidade, pois possui uma alta taxa de absorção de água em relação aos outros materiais de construção (DIAS & MOREIRA, 2012; GONÇALVES & FERRAZ, 2014).

Novas tecnologias vêm sendo empregadas para melhorar o desempenho mecânico do gesso. A incorporação de materiais fibrosos e resíduos em geral na pasta de gesso é um dos exemplos de inovação que visa não só a melhoria de suas propriedades físico-químicas e mecânicas como também a destinação mais nobre para esses resíduos. Para ser feita uma comparação coerente entre o gesso comercial e novos compósitos de gesso, algumas propriedades importantes devem ser levadas em consideração. Tais propriedades são regidas pela norma NBR 13207 (1994) – Gesso para construção civil; nela consta os métodos de análise e valores de referência para as principais propriedades do gesso.

Dentre as propriedades presentes na norma, existem duas principais no estudo do gesso: a consistência normal da pasta e o tempo de pega. Quando se prepara gesso, uma relação importante é entre a quantidade de água e a massa de gesso utilizada para a sua formulação. Essa relação chama-se consistência normal da pasta e define a característica da pasta para sua manipulação.

Quando há excesso de água, em relação à quantidade teórica de hidratação, a pasta fica com um aspecto fluido. Em contrapartida, quando o fator água/gesso é menor que o ideal, a pasta toma uma textura mais plástica. Esta propriedade influencia diretamente no tempo de pega inicial e final, resistência à compressão e na morfologia dos cristais formados (SOARES, 2005). Desta forma, a consistência normal da pasta (relação água/gesso) é uma importante variável para observar as características do gesso, sobretudo dos cristais de gipsita formados após processo de re-hidratação.

Já o tempo de pega significa o tempo que a pasta leva para endurecer. Vários fatores influenciam nessa propriedade como: relação água/gesso, tempo de mistura, temperatura, uso de retardadores e aceleradores, adição de gipsita, presença de impurezas e tamanho da partícula de gesso (SOARES, 2005). Um baixo tempo de pega é relativamente prejudicial à manipulação do gesso, pois ele endurece rapidamente levando a um eventual desperdício pelo pouco tempo disponível para manuseá-lo (DIAS & MOREIRA, 2012).

Além dessas duas propriedades, também devem ser observados a granulometria do gesso, a sua taxa absorção de água, a resistência mecânica à compressão e a resistência mecânica à flexão dos corpos de prova. O método de ensaio e valores de referências para essas propriedades são regidas por normas adjacentes à norma NBR 13207, como: NBR 12142 (1992) – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos, NBR 12127 (1991) – Determinação das propriedades físicas do pó de gesso, NBR 12129 (1991) – Determinação das propriedades mecânicas do gesso, NBR 6220 (1997) – Determinação de absorção de água em materiais densos conformados. Todas essas normas foram tomadas como base para caracterizar o gesso comercial e o compósito de gesso proposto nessa dissertação.

2.2.3 Moldagem por prensagem uniaxial

Na indústria de materiais cerâmicos, a principal técnica de conformação de peças é a prensagem uniaxial. A prensagem uniaxial consiste em moldar uma certa quantidade de material em um molde rígido e, através da aplicação de punções em um único sentido axial, fazer a compactação deste material (ROJEK *et al*., 2016).

As técnicas de prensagem se diferenciam pela movimentação dos elementos básicos do molde: o punção superior, o punção inferior e a matriz, bem como pelo número de elementos responsáveis pela aplicação da pressão (BRISTOT *et al*., 2014).

Na prensagem uniaxial de ação simples (Figura 1), a pressão é aplicada através do punção superior, que é introduzido na cavidade que contém a massa, formada pela matriz e pelo punção inferior, os quais permanecem imóveis nesta etapa. Uma vez compactada a peça, o punção superior é retirado e o deslizamento do punção inferior permite a extração da peça do molde (BRISTOT *et al*., 2014).

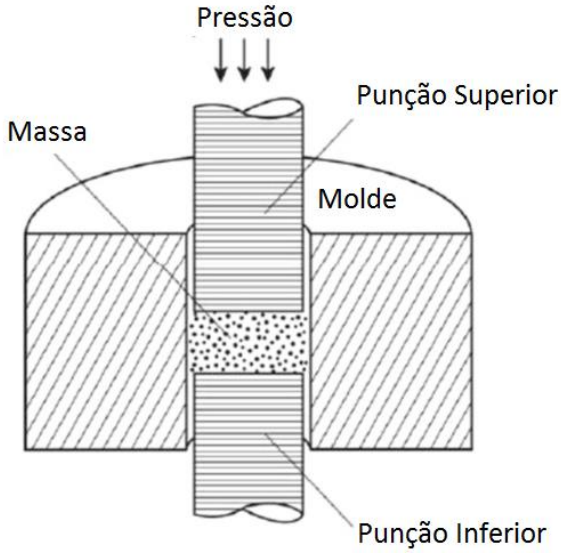


Figura 1 – Esquema da prensagem uniaxial simples

Fonte: Adaptado de Rojek *et al.* (2016)

A prensagem uniaxial de ação simples tem por objetivo estabelecer uma forma definida a um pó moldável, cujas características são variáveis, através da homogênea redução da porosidade do mesmo, transformando-o em um corpo compactado com maior densidade e microestrutura adequada para obter-se um produto com características mecânicas melhores (KATSNEL'SON; KERBEL', 2014).

Segundo Rojek (2016), a compactação de pó utilizando a técnica de moldagem por prensagem atribui um aumento na resistência mecânica no produto final por reduzir os espaços vazios na microestrutura da peça.

Esta técnica vem sendo aplicada a vários materiais de construção civil em diversos estudos, como, por exemplo, blocos de concreto (NOGUEIRA, 2011) e pré-moldados de gesso (AVELAR, 2012; REAL, 2009). Na ocorrência de se aplicar a moldagem por prensagem uniaxial simples a pré-moldados de gesso, pode ser constatado, além do aumento na resistência mecânica à compressão e à flexão, a diminuição da taxa de absorção de água do produto final, consoante Avelar (2012) e Real (2009).

2.2.4 Compósitos de gesso

Adicionar elementos ao gesso pode levar a dois fatores positivos, desempenho e economia. O custo de fabricação de algumas peças de gesso composto é ligeiramente menor comparados aos materiais convencionais, principalmente se o

agregado for um resíduo. Dependendo do material agregado, as propriedades físicas e mecânicas do gesso podem sofrer alterações positivas ou negativas (AVELAR, 2012). A literatura dispõe de alguns estudos científicos referente a essa aplicabilidade.

Com a intenção de melhorar as características físicas e mecânicas do gesso, Rivero *et al.* (2014), adicionaram ao gesso resíduo de borracha moída proveniente de espuma de isolamento de tubulações industriais. Segundo esses autores, a produção de isolamento de espuma de tubulações gera grandes volumes de rejeitos, constituindo um grave problema ambiental. Nesse trabalho, os efeitos da incorporação deste material no gesso foram estudados analisando dureza, resistência à flexão e resistência à compressão testando paralelamente diferentes proporções de água/gesso. Tendo em vista os resultados obtidos, foi possível provar que é viável tecnicamente o uso desse resíduo em compósitos de gesso.

Gonçalves & Ferraz (2014) estudaram o tempo de pega, a resistência à compressão e a taxa de absorção de água de compósitos de gesso formados com cera de carnaúba (impermeabilizante de origem vegetal). Neste caso, a cera de carnaúba atuou como um acelerador de tempo de pega, ademais os resultados mostraram que é possível diminuir a capacidade de absorção de água do gesso utilizando essa substância, porém a resistência mecânica à compressão foi comprometida.

Teske *et al*. (2015) inovaram criando uma telha ecológica formada por resíduo de polietileno tereftalato (PET) e gesso. Foram definidas em laboratório a umidade e a massa específica aparente e unitária do resíduo de gesso. Diversas características da telha foram descritas, como suas dimensões, massa, fonte de matéria-prima, produção, instalação no telhado, manutenção e durabilidade, o descarte após sua vida útil, o albedo, o isolamento térmico e o valor da telha. Concluiu-se que é possível a fabricação de uma telha com resíduos de gesso, juntamente com o resíduo de PET, tornando-a um produto mais sustentável e 100% reciclável.

Por sua vez, Oliveira *et al.* (2012) produziram uma matriz contendo gesso, etileno acetato de vinila (EVA), que é um resíduo da indústria de calçados e vermiculinita. As propriedades físicas estudadas foram relação água/gesso, massa específica aparente e resistência à flexão e compressão para cinco diferentes proporções de mistura (0, 5, 10, 15, 20 e 25%). Os resultados mostraram uma maior dependência da relação água/gesso; por sua vez, o percentual de agregado

apresentou maior influência na resistência à flexão do compósito com EVA e na resistência a compressão do compósito formulado.

Tendo em vista as investigações anteriormente citadas, nota-se uma preocupação com o meio ambiente por parte da comunidade científica. Neste contexto, a utilização de cinzas de carvão mineral para produzir um novo compósito de gesso torna-se uma alternativa relevante já que as cinzas são um resíduo abundante na indústria, basta saber em quais condições esse novo material alcança propriedades condizentes com o gesso convencional (comercial).

2.3 Cinzas de carvão mineral

2.3.1 Carvão Mineral nas indústrias

Antes de apresentar os aspectos gerais sobre as cinzas de carvão mineral, é importante obter entendimento sobre seu precursor, o carvão mineral. Informações onde é encontrado este combustível, em quais segmentos industriais é utilizado e qual a quantidade usada por cada indústria é de suma importância para entender o contexto das cinzas geradas no Brasil.

O carvão mineral é um recurso natural que possui grande potencial como combustível, é formado através do processo de decomposição de materiais orgânicos (em especial restos de vegetais) enterrados durante milhares de anos.

Anteriormente, os consumidores de carvão fóssil eram os meios de transporte a vapor, locomotivas e embarcações, que transformavam a energia do carvão mineral em energia cinética nas fornalhas. Logo depois, o mercado de minério como combustível perdeu espaço para os derivados de petróleo no transporte marítimo e no transporte ferroviário. Esses mercados foram substituídos, sobretudo, pelas usinas termoelétricas, que utilizam 90 % deste combustível e , não menos importante, pelas indústrias de cimento, cerâmica, petroquímica, papel e celulose, alimentícia e siderurgia (GOMES *et al.*, 1998).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia MME), a terceira fonte de energia mais utilizada em 2014 nas indústrias foi o carvão mineral que correspondeu a 13,5 % do total utilizado na matriz energética industrial (Figura 2).

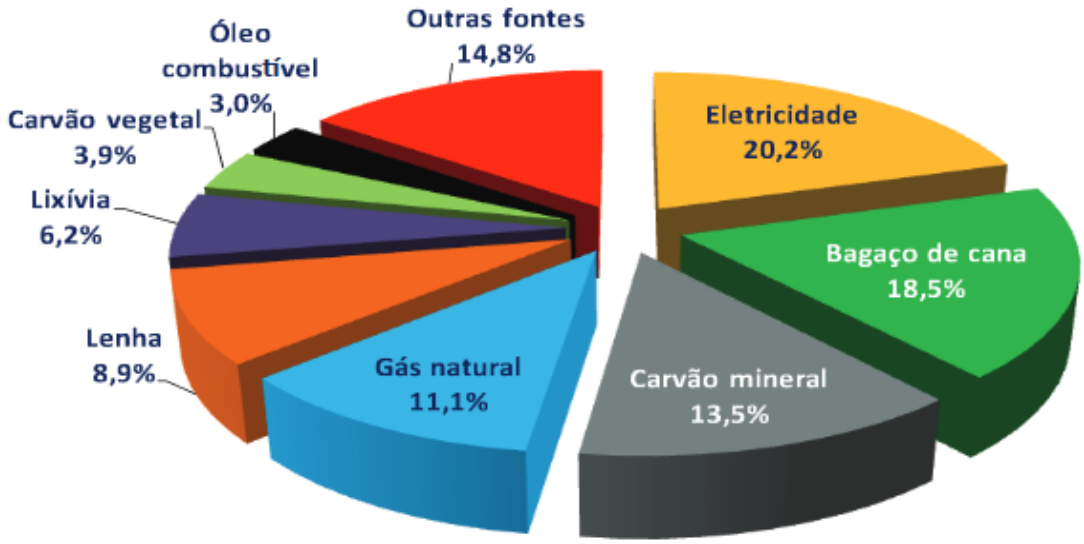


Figura 2 – Consumo de energia nas indústrias em 2014

Fonte: Balanço Energético Nacional – DNPM (2015)

Carvão fóssil pode ser classificado em quatro tipos: Antracito, Betuminoso, Sub-betuminoso (Hulha) e Linhito (Figura 3). O Antracito, muitas vezes chamado de carvão de pedra, é petrificado e difícil de entrar em combustão, possui o maior teor de carbono entre os tipos de carvão, cerca de 90 %. O carvão Betuminoso é mais macio em relação ao Antracito, com mais umidade e mais componentes orgânicos voláteis, sua volatilidade torna mais fácil sua combustão, porém produz menos calor que o Antracito, ele é usado principalmente pelas termoelétricas e também para a produção de coque. O Sub-betuminoso é usado quase que exclusivamente para geração de energia térmica. Produz baixo calor, em contrapartida eflui menos cinzas e enxofre comparado com o Antracito e Betuminoso. E, finalmente, o Linhito que possui baixo poder calorífico e é composto de aproximadamente 35 % de água e elevado teor de materiais voláteis (HISERODT, 2012).

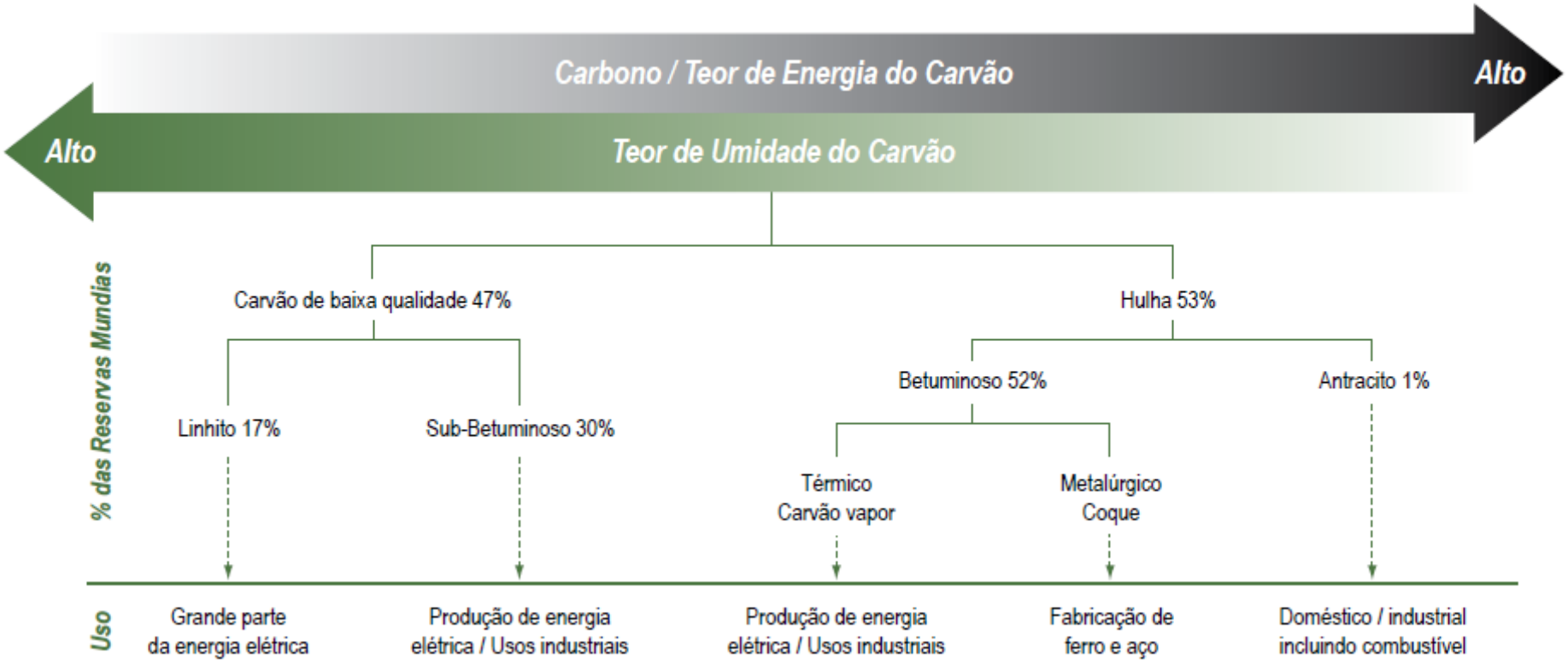


Figura 3 – Classificação do carvão mineral quanto ao uso e reservas mundiais em porcentagem

Fonte: Agência Nacional de Energia elétrica – ANEEL (2008)

2.3.2 Cinzas no setor termoelétrico

O carvão mineral, a exemplo do petróleo, pode ser utilizado em larga escala nas indústrias. No cenário industrial brasileiro, o principal destino da produção de carvão são as usinas termoelétricas (Figura 4). Em seguida vem a aplicação industrial para gerar energia térmica necessária às operações unitárias que envolvem calor nos principais seguimentos industriais (ANEEL, 2008).

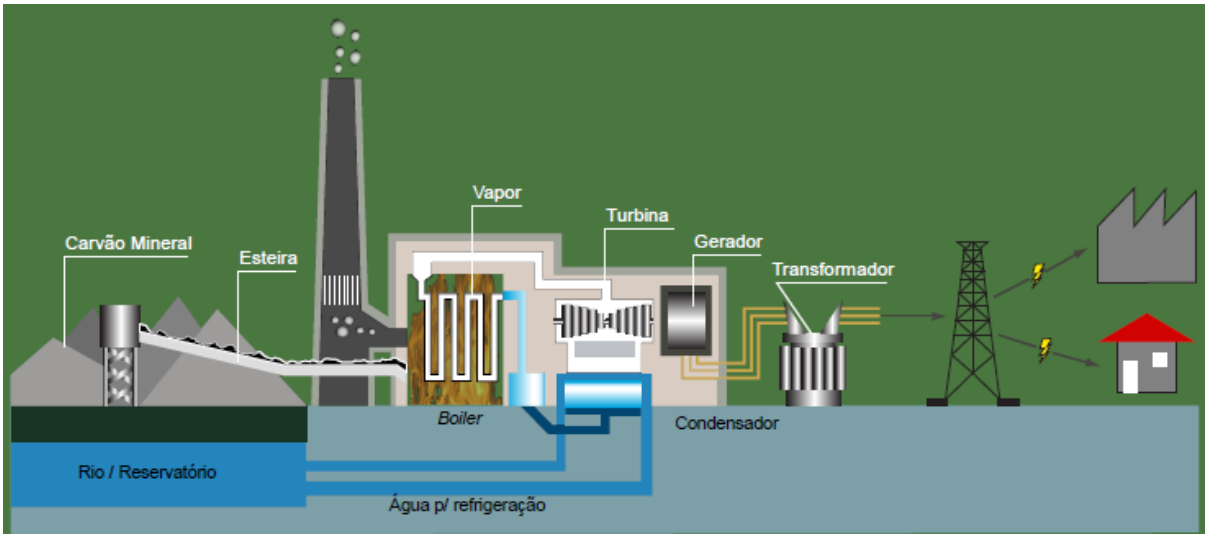


Figura 4 – Produção de energia elétrica utilizando carvão mineral
Fonte: Agência Nacional de Energia elétrica – ANEEL (2008)

A queima do carvão mineral em usinas termoelétricas acontece em caldeiras, onde a temperatura fica entre 1200 a 1300 ºC, em um ambiente oxidante que propicia a queima total do minério. Como resíduo da combustão observam-se as cinzas, que podem ser de dois tipos: cinzas de fundo (pesadas) e cinzas volantes (leves), são basicamente compostos de óxido de alumínio, óxido de silício, óxidos de ferro, oxido de cálcio e óxido de manganês (MATSINHE *et al*., 2015; SKORONSKI *et al*., 2015).

De modo geral, o carvão mineral pode ser queimado de forma pulverizada ou através de gaseificação em leito fluidizado. A cinza pesada é o resíduo que fica depositado no fundo das câmaras de combustão, e possui maior diâmetro. Já as cinzas leves são partículas finas (diâmetro médio<0,15 mm) originadas de carvão pulverizado ou fluidizado. Por serem leves são arrastadas pelo fluxo de gás efluente que vão em direção às chaminés. No processo de combustão, são instalados mecanismos para coletar as cinzas leves. Um exemplo de equipamento é o

precipitador eletrostático que transporta e armazena o material leve efluente da combustão (LOPES, 2011).

A Figura 5 representa um esquema de coleta de cinzas num forno de uma usina termoelétrica.

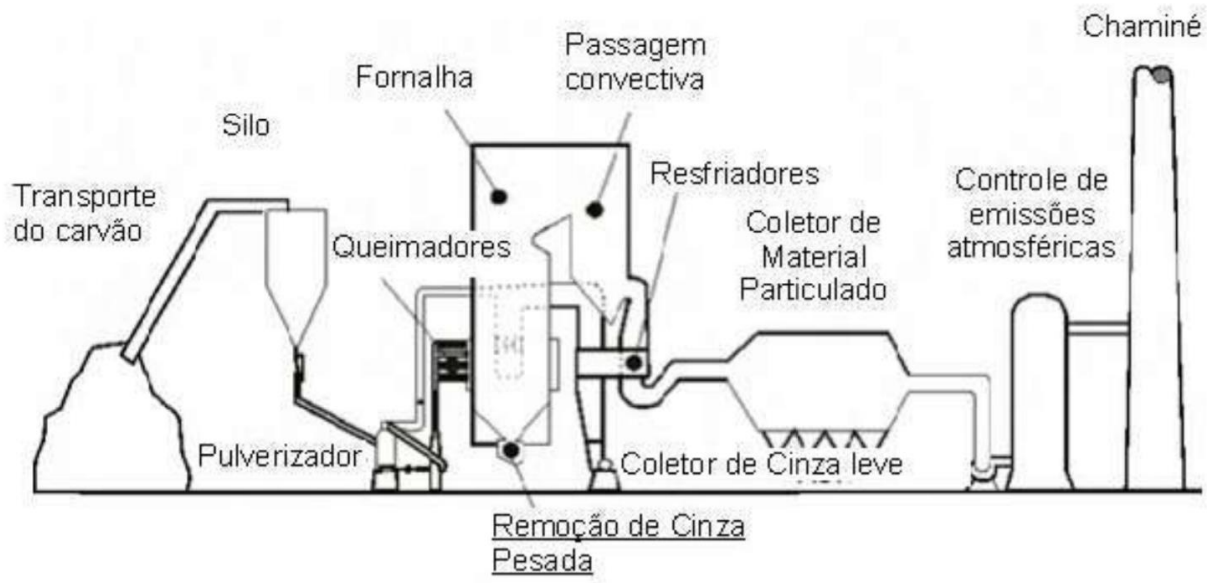


Figura 5 – Esquema da coleta de cinzas
Fonte: Lopes (2011).

No esquema da Figura 6, logo após a queima do carvão mineral, as cinzas pesadas ficam concentradas no fundo do queimador para serem recolhidas. Já as cinzas leves são coletadas por um precipitador antes do fluxo gasoso sair pela chaminé.

Estima-se que são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas por ano no Brasil, sendo que aproximadamente 80 % de resíduos são cinzas volantes (leves) e 20 % de cinzas pesadas. A deposição destes resíduos em bacias de sedimentação causam severos danos e potenciais riscos ao meio ambiente (DEPOI *et al*., 2005; IZIDORO & FUNGARO, 2007).

2.3.3 Reaproveitamento de cinzas

Segundo a norma NBR 12653 (2012), as cinzas são classificadas como resíduos sólidos e, portanto, o seu descarte requer rigoroso controle e monitoramento por parte das indústrias que geram esse material. Tanto as cinzas leves como as cinzas pesadas classificam-se como resíduo classe II – A – não inerte de acordo com a norma NBR 10004 (2004). Por conseguinte, devem ser rejeitadas em áreas

protegidas como aterros sanitários apropriados, caso não haja a possibilidade de reaproveitamento (WASEM *et al.*, 2015).

Reaproveitar rejeitos industriais para produzir novos materiais reduz o consumo de recursos naturais que seria utilizado como matéria prima, além de prolongar a vida útil de aterros sanitários reduzindo a quantidade de resíduos a serem descartados (SIQUEIRA *et al.*, 2012). De acordo com o autor anteriormente citado, realizar estudos voltados para o reaproveitamento de resíduos industriais como matéria prima em produtos da construção civil é uma alternativa viável do ponto de vista técnico, ambiental e econômico, porque tende a minimizar e até eliminar este resíduo.

Na literatura podem ser encontrados vários estudos relacionados ao reaproveitamento de cinzas de carvão mineral para produzir novos materiais de construção civil sustentáveis. Alguns títulos são citados abaixo.

Siqueira *et al.* (2012) estudaram a incorporação de cinzas provenientes da combustão de carvão mineral na produção de argamassa, substituindo parcialmente a adição de cimento. Neste trabalho, foram preparados corpos de prova retangulares medindo 5 cm x 10 cm utilizando agregado, cimento e cinzas nas proporções 0, 10, 20, 30 e 50 %. O parâmetro de comparação com argamassas comerciais foi a resistência a compressão do produto final. Como resultado, observou-se que a resistência diminui conforme o aumento da porcentagem de cinza. Apesar disso, constatou-se, através dos experimentos, que a melhor proporção para se obter um compósito de argamassa/cinza com boa resistência foi de 30 % em massa de cinza.

Com o objetivo de melhorar as características de determinado tipo de cerâmica vermelha, Zanin *et al.* (2013) formularam uma nova cerâmica adicionando cinzas leves de carvão mineral oriundas de uma usina termoelétrica. Em sua metodologia, foram preparadas misturas de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 % de cinzas em argila e produzidos corpos de prova de 6 cm x 2 cm x 0,5 cm. Os parâmetros observados foram perda ao fogo, densidade aparente, porosidade aparente, retração linear, absorção de água e resistência mecânica.

Já Skoronski *et al.* (2015) utilizaram cinzas pesadas de carvão mineral para produzir revestimento cerâmico e avaliou suas propriedades físicas. Seus experimentos consistiram em confeccionar corpos de prova com a adição de 1 a 30 % de cinzas e seus resultados foram comparados com os padrões exigidos por

normas (NBR 13818). Foi demonstrado que os experimentos que continham 1 a 10 % de cinzas apresentaram-se dentro dos padrões estipulados pela norma.

Nogueira (2011) avaliou a produção de blocos para a construção civil constituídos de cimento, areia e cinza. Observou-se a resistência mecânica como parâmetro de viabilidade de utilização. A composição que melhor respondeu foi o 1:1,5:1,5 (cimento:areia:cinza), pois apresentou bom desemprenho mecânico utilizando grande quantidade de resíduo, ou seja, os blocos de cinza volante podem ser utilizados na construção civil.

Apesar da grande quantidade de trabalhos envolvendo a adição de cinzas em materiais de construção e de compósitos de gesso com outros materiais, o levantamento do estado da arte não indicou estudos abordando a aplicação de cinzas oriundas da queima de carvão mineral em gesso. Desta forma, tudo indica que esta dissertação apresenta ineditismo e originalidade em termos de pesquisa científica.

2.4 Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é fundamentada na aplicação de técnicas matemáticas e estatísticas a fim de explicar os efeitos das variáveis independentes, sozinha ou em combinação, de um processo químico ou bioquímico. Essa técnica foi desenvolvida por Box e Wilson (1951) com o intuito de otimizar processos de fabricação industrial por intermédio de ajustes de modelos matemáticos (funções polinomiais lineares, quadráticas e outros) aos resultados experimentais gerados por planejamentos experimentais fatoriais. Todavia, atualmente a MSR é amplamente aplicada a várias áreas do conhecimento, sobretudo na ciência (PILKINGTON; PRESTON; GOMES, 2014).

A MSR possui basicamente dois objetivos finais: mostrar a relação entre as características de qualidade e o nível de entrada para entender o impacto das mudanças fatoriais nos valores de resposta; e determinar as condições ótimas de operação do sistema, ou determinar uma faixa de fatores para atender às necessidades operacionais (HUANG; HUNG; YANG, 2016).

Segundo Witek-krowiak *et al*. (2014), a MSR pode ser dividida em seis estágios: (1) seleção das variáveis independentes e possíveis respostas; (2) seleção da estratégia de projeto experimental; (3) execução de experimentos e obtenção de

resultados; (4) Adequação do modelo aos dados experimentais; (5) obtenção de gráficos de resposta e verificação do modelo através da análise de variância (*Analysis of Variance* – ANOVA); (6) determinação das condições operacionais ótimas para atender o objetivo.

O estágio 2 é uma das etapas mais importantes da MSR, visto que a seleção da estratégia de planejamento de experimentos (*Design of Experiments* – DOE) é onde pode ser diversificado todos os parâmetros significativos simultaneamente ao longo de um conjunto de experimentos projetados. Vários métodos de DOE têm sido aplicados para otimização, sendo os mais populares o delineamento composto central rotacional (DCCR), o projeto *Box-Behnken* (BB), a Matriz *Doehlert* (D), bem como o projeto *Plackett-Burman*, ou fatorial fracionário (usado para otimizações com muitas variáveis). Atualmente, os pesquisadores podem facilmente ter acesso a *software* que fornece um uso simples e claro desses métodos. Os programas mais populares para estudos e aplicações são o *Design Expert* (*Stat-Ease*, Inc.), *Minitab* (*Minitab*, Inc.), *Statistica* (*StatSoft*), JMP (SAS) e *Matlab* (*MathWorks*) (WITEK-KROWIAK *et al*., 2014).

O DCCR associa um planejamento fatorial completo ou fracionário com pontos centrais e pontos axiais. Os pontos axiais aparecem a uma distância α de seu ponto central, essa distância depende do número de variáveis envolvidas no estudo (k) e seu valor pode ser obtido através da Equação 2:

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \tag{2}$$

Resumidamente, em um DCCR todos os fatores devem estar em cinco níveis distintos (-α, -1, 0, +1, + α) (GHAFFARI-MOGHADDAM *et al.*, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Gesso e cinzas

As cinzas leve e pesada foram disponibilizadas pela usina termelétrica de Pecém, localizada na cidade de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará. As cinzas são provenientes da queima de carvão mineral em câmaras de combustível na geração de vapor que alimenta a planta de geração de energia elétrica. As cinzas pesadas foram recolhidas no fundo da própria câmara e as cinzas leves foram recolhidas ao longo do processo de combustão.

O pó de gesso usado nos testes foi do tipo beta adquirido em uma fábrica de gesso chamada SUPERGESSO S.A.

3.2 Caracterização do pó de gesso

3.2.1 Umidade e água de cristalização

A metodologia consistiu em usar um equipamento que utiliza a técnica de infravermelho para determinar a umidade. O equipamento usado foi uma Termo balança modelo GEHAKA IV 200, que mede a umidade por infravermelho. Para realizar a leitura, uma determinada massa de gesso foi colocada no equipamento a uma temperatura constante de 40 ºC (temperatura para a determinação da umidade), até que a indicação da balança permanecesse constante, aproximadamente 30 min. Para medir a água de cristalização, bastou alterar a temperatura do equipamento para 195 ºC, após a estabilização à 40 ºC, durante 30 min.

O valor considerado para umidade e água de cristalização foi a média de três determinações. A umidade, em porcentagem, foi calculada automaticamente pelo equipamento e seu valor mostrado através do *display*.

3.2.2 Granulometria do gesso

Para a análise granulométrica foi adotada a metodologia descrita nas normas NBR 12127 (1991). A metodologia consistiu em secar na estufa, entre 40 e 44 ºC, amostra de 210 g de gesso que posteriormente foi esfriada em dessecador. Tomou-se 100 g da amostra para realizar a análise em peneiras com aberturas de: 1,180 mm, 0,850 mm, 0,600 mm, 0,425 mm, 0,212 mm, 0,180 mm, 0,150 mm, 0,106 mm e 0,075

mm. A agitação das peneiras foi feita com o auxílio de um vibrador de peneiras da marca Bertel (Figura 13). O material retido em cada peneira foi pesado e calculado por:

$$Re = m / M \times 100 \quad (3)$$

Sendo: Re = material retido (%); m = resíduo na peneira (g); M = massa inicial (g).

O resultado de todo material retido em cada peneira foi disposto em um gráfico de distribuição dos tamanhos das partículas para observar sua granulometria.

Com base na distribuição de frequência foi estimado o diâmetro médio geométrico das partículas utilizando:

$$DMG = e^{\sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} \cdot \ln(\overline{D}_i)} \quad (4)$$

Sendo: DMG = Diâmetro médio geométrico; n = número de classes de tamanho; m_i = massa retida na peneira *i*; m = massa total; $\overline{D}_i$ = Diâmetro médio de cada faixa da peneira.

3.2.3 Massa unitária do gesso

A determinação da massa unitária foi regida pela norma NBR 12127 (1991). A metodologia consiste em passar determinada quantidade de gesso por um funil ligeiramente posicionado acima de um recipiente de volume conhecido (1 cm^3). A relação entre a quantidade de gesso adicionada para encher completamente o recipiente, sem compactar, e o volume do mesmo é definida como massa unitária, dada em $kg.m^{-3}$.

A média de três ensaios foi o valor representativo da massa unitária. A Equação 5 foi utilizada para realizar os cálculos.

$$MU = M/V \quad (5)$$

Sendo: MU = massa unitária ($kg \cdot m^{-3}$); M = massa do gesso (kg); V = volume do recipiente (m^3).

3.3 Caracterização das cinzas

3.3.1 Análise granulométrica a laser

A granulometria foi feita para caracterizar a distribuição de frequência das partículas da amostra de cinza leve e pesada. As amostras de cinza foram analisadas com a técnica a Laser para descrição de partículas. O equipamento utilizado foi um analisador granulométrico a laser modelo Mastersizer 2000.

As leituras foram realizadas em base úmida, numa faixa de 0,020 a 2000,000 µm, obscurecimento máximo de 2,51 % e limite de fração mássica de 0,984 %.

O resultado da análise foi processado através de um *software* do próprio equipamento que demonstrou a distribuição do tamanho das partículas em base volumétrica através de gráficos e tabelas.

3.3.2 Difratometria de Raios-X

A difração de Raios-X foi empregada com o intuito de identificar as fases minerais presentes nas amostras de cinzas já que elas precedem de um mineral.

Os difratogramas foram obtidos com um difratômetro de raios-x da marca Bruker D2 Phaser (Figura 16) e detector Bruker-Lynxeye, operando com 300 W (30 kV e 10 mA), irradiação Cu-$K\alpha_1$ (λ= 1,5406 Å); fenda primária: 0,4 mm; passo do goniômetro: 0,0202 °/s; tempo de contagem por passo: 1 s. Para tornar possível a leitura no difratômetro, as amostras foram preparadas passando-as em peneira de 200 Mesh (75 µm).

Os resultados foram apresentados por picos longos em gráficos, gerados pelo *software* do equipamento, que se diferem pela natureza do composto. Através da comparação dos picos é possível identificar de forma precisa dos principais compostos minerais presentes nas cinzas.

3.3.3 Teor de umidade

O teor de umidade foi medido através da mesma técnica do parágrafo 3.4.1.

3.3.4 Densidade das cinzas

A metodologia adotada foi a mesma para determinação da densidade do gesso presente no parágrafo 3.4.3.

3.3.5 Análise por espectroscopia de absorção atômica

Para as amostras de cinza leve e pesada foi utilizada a espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS – do inglês Flame Atomic Absorption Spectrometry), este tipo de análise determina as concentrações dos diferentes compostos metálicos presentes nas amostras.

Os seguintes elementos foram determinados: zinco, cobre, manganês, cromo, cádmio, chumbo, ferro, sódio e potássio. Suas concentrações foram dadas em ppm.

3.4 Planejamento dos experimentos

No presente estudo foi utilizada a metodologia de superfície de resposta que é uma técnica de otimização baseada na aplicação de planejamentos fatoriais. Como produto desta ferramenta, é obtido um modelo estatístico codificado em termos de variáveis de processo que possibilita a construção de uma superfície de resposta, que por sua vez, permite observar as melhores condições operacionais para produzir um pré-moldado de gesso e cinzas adequado visando a utilização na construção civil.

De acordo com o diagrama metodológico dos experimentos (Figura 6), a primeira etapa para planejar os experimentos foi a determinação dos fatores e respostas de interesse para o sistema estudado. As variáveis independentes estabelecidas são: relação água/gesso, fração mássica de cinzas leve e pesada na mistura e carga de prensagem uniaxial na fase de confecção dos corpos de prova; as variáveis resposta foram: resistência mecânica à compressão e flexão e taxa de absorção de água.

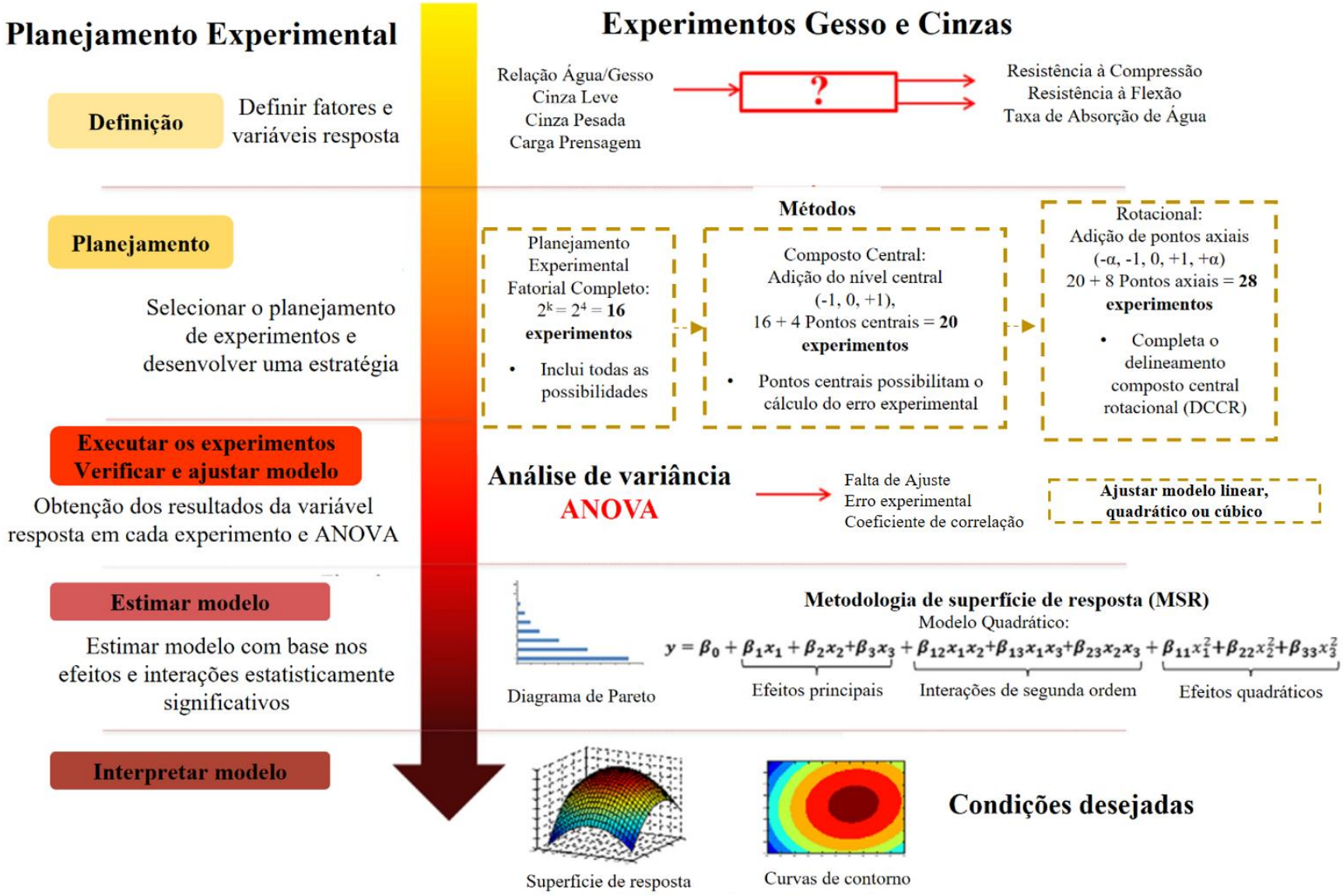


Figura 6 – Esquema MSR e planejamento dos experimentos aplicados ao gesso/cinza

Fonte: Adaptado de Witek-krowiak *et al*. (2014)

O planejamento experimental escolhido foi o delineamento composto central rotacional (DCCR) com os níveis e fatores envolvidos indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores e níveis para do DCCR aplicado

FATORES	**NÍVEIS**				
	-2	**-1**	**0**	**1**	**2**
kg Água/kg Gesso	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Fração mássica de Cinza Leve (%)	0	8	16	25	34
Fração mássica de Cinza Pesada (%)	0	8	16	25	34
Carga de Prensagem (MPa)	5	7,5	10	12,5	15

A relação água/gesso foi definida em valores pequenos e próximos da quantidade estequiométrica, pois a operação de moldagem por prensagem envolve pouca água na preparação dos corpos de prova (AVELAR, 2012). Já a composição gesso/cinza foi determinada de forma que não ultrapassasse 50 % em massa em relação às cinzas. Este valor foi escolhido para não comprometer as propriedades físico-químicas e mecânicas dos corpos de prova. A carga de prensagem uniaxial foi definida a partir da literatura (REAL, 2009; AVELAR, 2012) onde o nível da carga de prensagem uniaxial varia entre 5 e 15 MPa.

No planejamento em questão, foram adicionados 4 pontos centrais para possibilitar o cálculo do erro experimental e 8 pontos axiais como mostra a matriz decodificada de experimentos (Tabela 2).

Tabela 2 – Matriz de experimentos decodificada do DCCR

Ensaio	Fatores			
	kg Água/kg Gesso	Cinza Leve (%)	Cinza Pesada (%)	Carga de Prensagem (MPa)
01	0,15	8	8	7,5
02	0,15	8	8	12,5
03	0,15	8	25	7,5
04	0,15	8	25	12,5
05	0,15	25	8	7,5
06	0,15	25	8	12,5
07	0,15	25	25	7,5
08	0,15	25	25	12,5
09	0,25	8	8	7,5
10	0,25	8	8	12,5
11	0,25	8	25	7,5
12	0,25	8	25	12,5
13	0,25	25	8	7,5
14	0,25	25	8	12,5
15	0,25	25	25	7,5
16	0,25	25	25	12,5
17	0,10	34	16	10
18	0,30	34	16	10
19	0,20	0	16	10
20	0,20	34	16	10
21	0,20	16	0	10
22	0,20	16	34	10
23	0,20	16	16	5
24	0,20	16	16	15
25	0,20	16	16	10
26	0,20	16	16	10
27	0,20	16	16	10
28	0,20	16	16	10

Os experimentos foram feitos pela mesma pessoa; os equipamentos, materiais e componentes da mistura foram os mesmos ao longo de toda a pesquisa; e os respectivos ensaios foram feitos de forma aleatória. Todos esses critérios foram adotados para evitar desvios operacionais nos resultados alcançados.

A matriz decodifica dos experimentos (Tabela 2) assim como o tratamento estatístico dos resultados foram feitos usando o *software Statistica* 12.0 com licença disponibilizada pelo Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco.

Primeiramente os dados foram adicionados na plataforma *Experimental Design* do *software* onde foi utilizada a ferramenta específica para planejamento composto central e superfícies de resposta. A metodologia de análise dos dados consistiu, primeiramente, em efetuar uma análise de variância (ANOVA) para observar a variância explicada, o erro experimental e o coeficiente de ajuste do modelo estatístico proposto. Após esta etapa foi feito um diagrama de pareto, a fim de analisar os efeitos estatisticamente significativos baseado na estatística t (*Student*). Paralelamente, um modelo quadrático foi gerado para cada variável resposta utilizando apenas os fatores estatisticamente significativos.

Como forma de mostrar a variação do modelo estatístico proposto em relação aos resultados obtidos, os valores experimentais foram plotados em função dos valores estimados pelo modelo. E, por fim, foram geradas as superfícies de resposta e curvas de contorno para determinar em quais pontos é possível obter pré-moldados de gesso e cinza com boas características mecânicas utilizando-se a maior quantidade de cinzas em sua composição.

Ressalta-se que toda a análise dos dados feita neste estudo levou em consideração um nível de 95 % de confiança estatística ($\alpha = 0,05$).

3.5 Preparação dos corpos de prova

Todos os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados de acordo com a norma NBR 12129 (1991). Conforme a metodologia, 1500 g de gesso foram passados por uma peneira de 2 mm com auxílio de um pincel para eliminar os aglomerados de gesso.

A mistura entre o pó de gesso e as cinzas foi padronizada colocando os dois materiais em um recipiente cilíndrico de porcelana e misturados com movimentos circulares através de um mancal da marca Groschopp modelo 4060 Viersen. As rotações tiveram uma frequência de 80 rpm e duração de 10 min, tempo necessário para homogeneização completa.

A adição de água foi feita com o auxílio de um recipiente com tampa dotada de borrifador, de forma que o umedecimento da mistura gesso/cinza fosse uniforme. A mistura foi pesada antes e depois do umedecimento para certificar a quantidade de água adicionada. Os sólidos umedecidos foram transferidos imediatamente para uma fôrma apropriada de aço inoxidável para a operação de prensagem.

A fôrma é constituída de uma base com dimensões 8 x 2 x 20 cm (Figura 7a) e uma câmara que recebe a massa de gesso/cinza que possui 4 x 16 x 15 cm de dimensões (Figura 7b). A câmara possui uma tampa perfeitamente ajustável no topo para que a prensagem seja de forma uniaxial. A retirada do material prensado foi feita pela desmontagem do molde a partir de parafusos presentes na câmara de prensagem.

(a) (b)

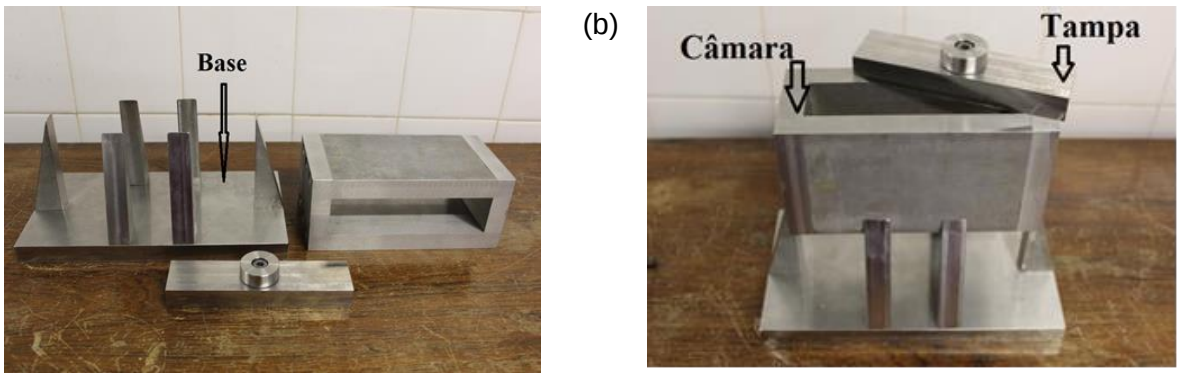


Figura 7 – Fôrma para prensagem. (a) Base da peça. (b) Câmara e tampa da peça

Para a operação de prensagem, o molde munido da mistura foi prensado por uma prensa hidráulica automática apropriada para imprimir uma carga de prensagem especificada pela matriz de experimentos (Tabela 2).

Após a prensagem, os corpos de prova foram identificados na sua superfície lateral e colocados para secar em estufa à temperatura de 45 ºC, até massa constante – aproximadamente 72 horas. Atingida a massa constante, os mesmos foram colocados em dessecador por um período de no mínimo 24 horas, sendo retirados

apenas no momento dos ensaios (Figura 8). A Figura 9 ilustra as etapas empregadas para a produção dos corpos de prova.

Figura 8 – Corpos de prova de gesso/cinza prismáticos

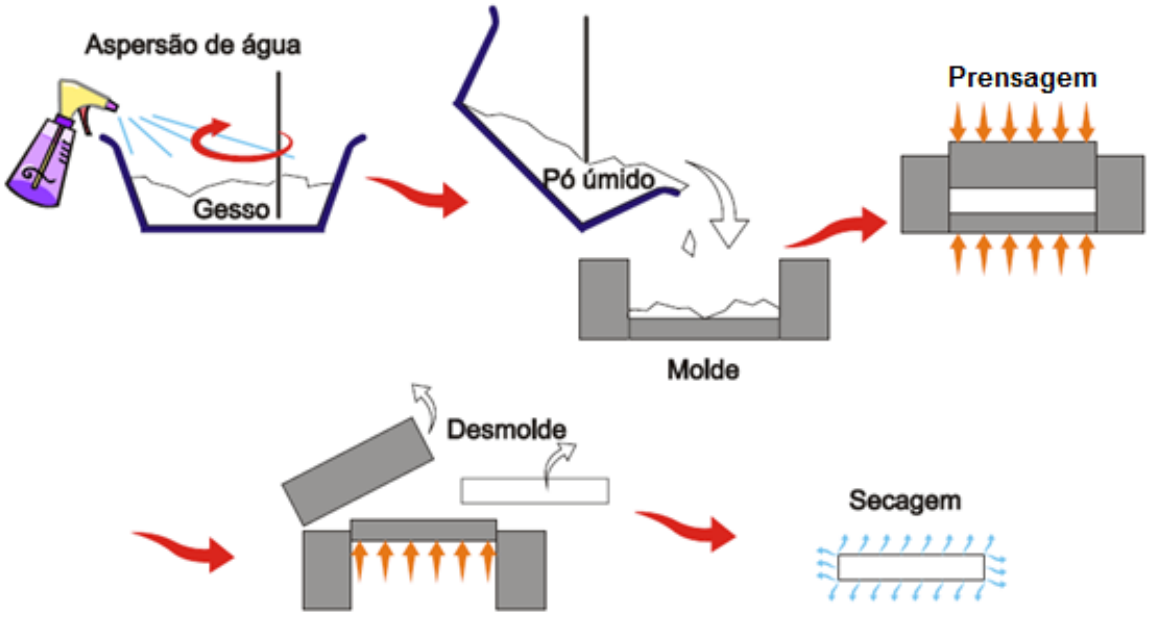


Figura 9 – Etapas da preparação dos corpos de prova
Fonte: Adaptado de Avelar (2012)

A porcentagem mássica de gesso, cinza leve e cinza pesada, assim como a quantidade de água adicionada à mistura e a carga de prensagem aplicada ao corpo de prova foram de acordo com a matriz decodificada de experimentos (Tabela 2) citada no parágrafo 3.2.

3.6 Caracterização do compósito gesso e cinzas

3.6.1 Tempo de pega inicial e final

Para a determinação do tempo de pega foi usada a metodologia descrita pela norma NBR 12128 (1991) - Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso. A metodologia consiste em utilizar o aparelho de Vicat a fim de definir o tempo que o gesso leva para começar a endurecer e o tempo que o mesmo fica enrijecido ao ponto de não ser mais manipulado (moldado).

O aparelho consiste em uma agulha de 1 mm² de seção transversal nominal e 50 mm de comprimento, sustentada na extremidade de uma haste móvel. O tempo inicial de pega é caracterizado pelo instante em que a agulha estaciona a 1 mm da base. O tempo final de pega é caracterizado pelo instante em que a agulha não mais penetra na pasta, deixando apenas uma leve impressão.

Foi analisado o tempo de pega do gesso puro e das misturas gesso e cinzas em diferentes proporções.

3.6.2 Resistência mecânica à compressão

Para a realização dos ensaios de compressão, foram adotados os procedimentos descritos na norma NBR 12129 - Gesso para construção civil – Determinação das propriedades mecânicas (2014).

De acordo com a norma, a prensa pode ser de qualquer tipo, desde que possibilite a distribuição uniforme da carga e a aplicação dos esforços à peça testada de modo progressivo e sem choque. Além disso, a prensa ainda deve possuir um dispositivo para o controle da velocidade de aplicação de carga e ter resolução de 100 N. A prensa utilizada foi da marca SOLOTEST, modelo SERVO PLUS (Figura 10).

As faces de trabalho dos corpos de prova foram previamente medidas com uma precisão de 1 mm a fim de calcular sua área, em seguida foram submetidos a uma aplicação de carga numa taxa de 500 N/s até a ruptura.

Os resultados foram obtidos dividindo-se a carga máxima observada durante o ensaio pela área da face exposta à pressão, desta forma a resistência a compressão foi dada em MPa.

Figura 10 – Prensa hidráulica automática para testes mecânicos

3.6.3 Resistência mecânica à flexão

Foi utilizado a norma NBR 12142 (1991) – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos, esse teste consiste em utilizar três pontos como medida indireta da ruptura à flexão. A máxima tensão de flexão, suportada pelo corpo de prova durante o ensaio, foi registrada pela mesma prensa hidráulica utilizada para a resistência à compressão, porém com a utilização de um suporte que apoiou o corpo de prova em dois pontos (Figura 11). A expressão de cálculo utilizada foi (Equação 6):

$$\sigma_{TF} = \frac{3 \cdot P_{máx} \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (6)$$

Em que: σ_{TF} = resistência à tração na flexão (MPa); $P_{máx}$ = força máxima atingida durante o ensaio (N); L = distância entre os apoios (mm); b = largura do corpo de prova (mm); d = altura do corpo de prova (mm)

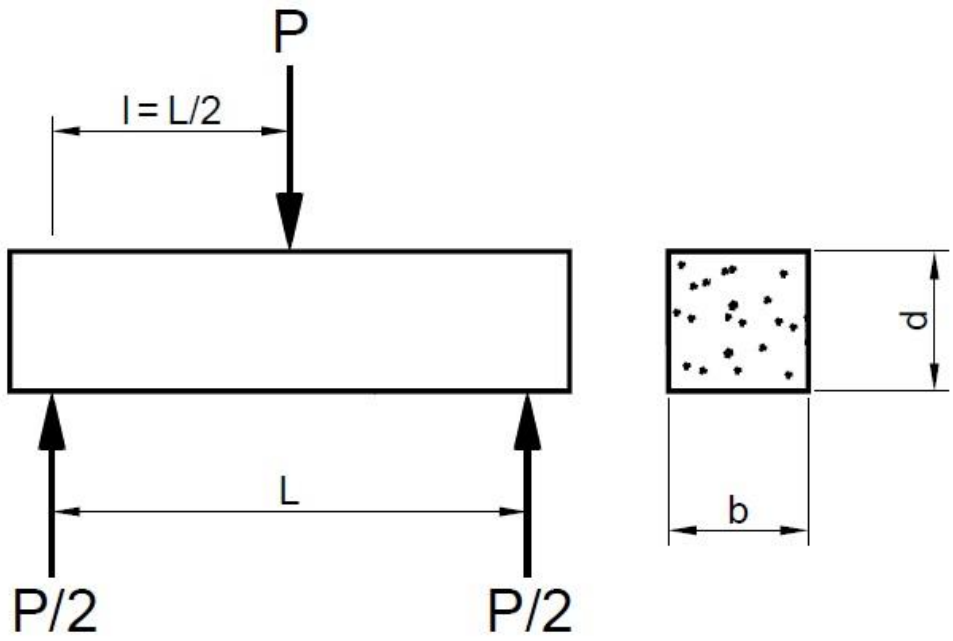


Figura 11 – Esquema com geometria utilizada no cálculo da resistência à tração na flexão

3.6.4 Taxa de absorção de água

A determinação da taxa de absorção de água foi realizada seguindo a metodologia descrita pela norma NBR 6220 (1997) – Determinação de absorção de água em materiais densos conformados, que consiste em imergir corpos de prova em água previamente aquecida até a ebulição. O fundamento deste método reside na diferença de massa antes e depois da imersão dos corpos de prova na água.

Os corpos de prova foram secados previamente em estufa, entre 105 ºC e 110 °C, até constância de massa, depois foram pesados, obtendo-se assim a massa do corpo seco. Os corpos de prova foram submergidos em água por um período de tempo de 2 horas, após este período os mesmos foram pesados novamente, obtendo-se a massa do corpo úmido.

A diferença de massa dos corpos de prova, antes e depois da imersão, é igual a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova. A taxa porcentual de absorção de água é determinada pela Equação 7 a seguir.

$$AA = \frac{M_U - M_S}{M_S} X100 \quad (7)$$

Sendo: AA = taxa de absorção de água (%); M_U = massa do corpo de prova úmido (g); M_S = massa do corpo de prova seco (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do pó de gesso

4.1.1 Características físico-químicas do pó de gesso

Na Tabela 3, as características físico-químicas do gesso utilizado no presente trabalho são determinadas e comparadas com as exigências mínimas estabelecidas pela norma NBR 13207 (1994) – Gesso para Construção Civil, com a finalidade de observar a viabilidade técnica do gesso utilizado nos ensaios. Os experimentos foram efetuados em triplicata e o valor tomado para as propriedades físico-químicas do gesso é a média aritmética das três determinações. Observa-se que os valores médios para umidade, água de cristalização e massa unitária estão dentro dos padrões de exigência da norma supracitada, à vista disso, o gesso foi considerado apto para ser usado no estudo.

Tabela 3 – Características físico-químicas do pó de gesso

Determinações	**Valor Médio**	**NBR 13207**
Umidade (%)	1,2 ± 0,1	Máx 1,3
Água de Cristalização (%)	5,8 ± 0,2	4,2 a 6,2
Massa Unitária ($kg.m^{-3}$)	719 ± 2	> 700

4.1.2 Granulometria do gesso usado

A análise granulométrica foi expressa em dois gráficos, um para distribuição dos tamanhos das partículas (Figura 12), que mostra a quantidade retida em cada peneira e outro da distribuição cumulativa, que indica o percentual de passantes em cada peneira (Figura 13).

Ao analisar as Figuras 12 e 13 conclui-se que aproximadamente 67,87 % das partículas ficaram retidas nas peneiras com abertura de malha entre 212 µm e 180 µm e que apenas 9,8 % das partículas possuem diâmetro menor que 90,5 µm. A partir da distribuição dos tamanhos das partículas foi possível estimar o diâmetro médio das partículas que teve um valor de 239 µm, estimativa feita a partir da Equação 4, que representa o diâmetro médio geométrico.

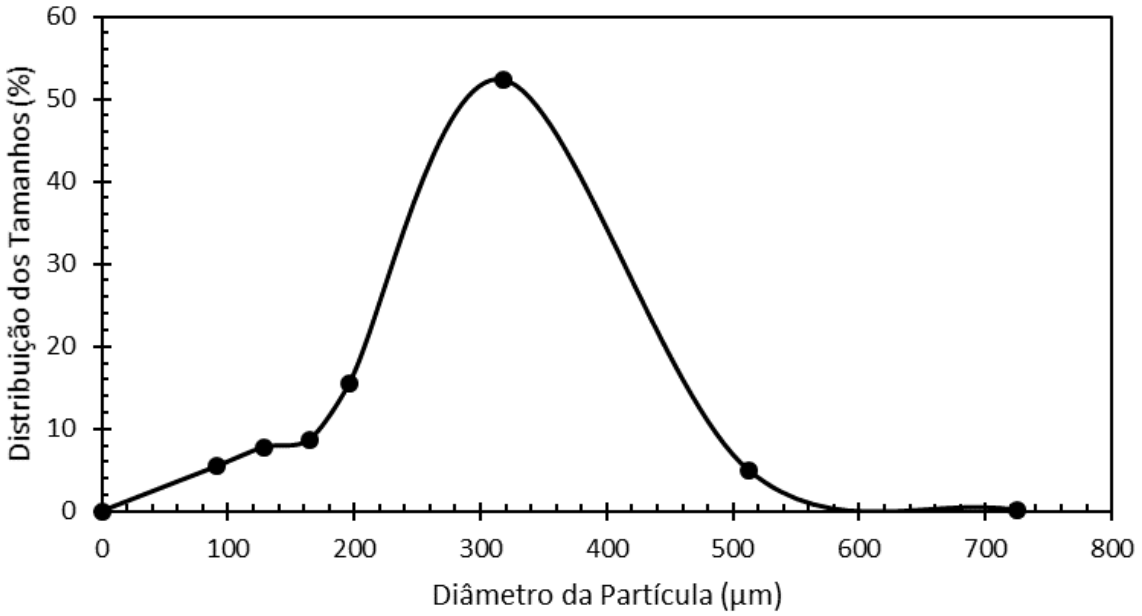


Figura 12 – Distribuição das partículas de gesso retidas em cada peneira

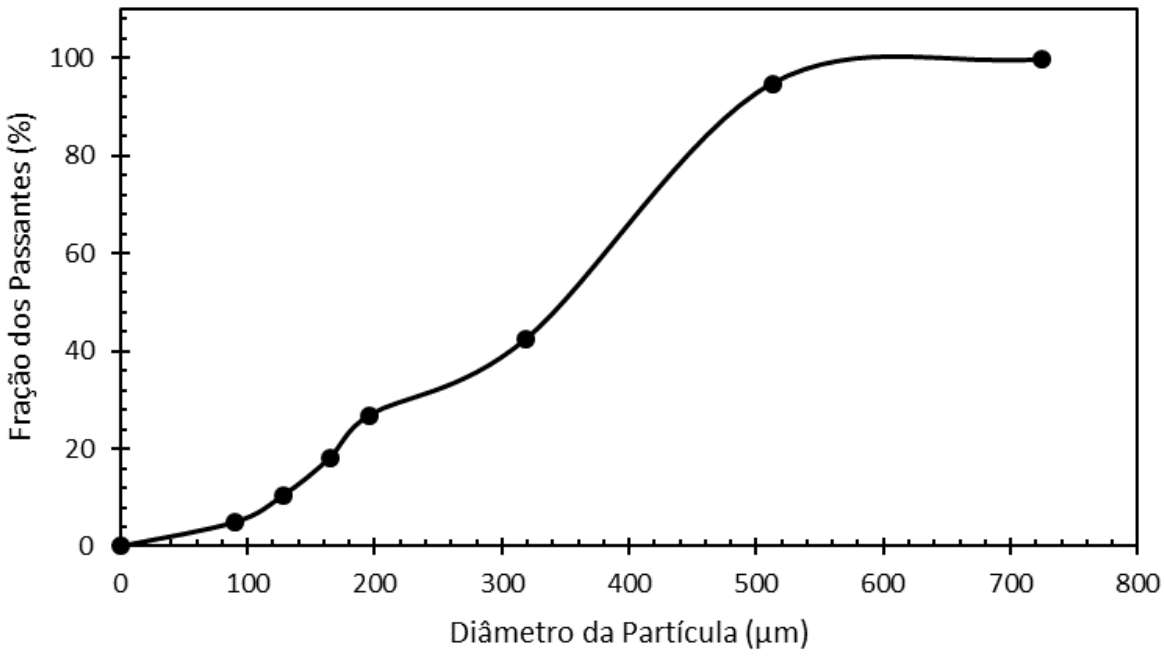


Figura 13 – Distribuição das partículas de gesso passantes em cada peneira

4.2 Características das cinzas

4.2.1. Umidade e densidade

Os ensaios de umidade e massa unitária das cinzas foram realizados em triplicata e seus resultados colocados na Tabela 4. Os valores estimados como umidade e densidade foram a média aritmética de três determinações.

A umidade percentual da cinza leve foi 64,6 % maior que a da cinza pesada. De acordo com Lopes (2011), isso ocorre pelo fato das cinzas pesadas permanecerem no fundo das câmaras de combustão no momento da queima do carvão mineral, desta forma as cinzas pesadas tendem a ter um percentual de umidade menor.

Em relação a densidade não houve uma diferença significativa entre as duas médias observadas nos dois tipos de resíduo sólido.

Tabela 4 – Resultados da umidade e densidade das cinzas

Determinações	**Cinza Leve**	**Cinza Pesada**
Umidade (%)	2,3 ± 0,3	0,80 ± 0,02
Densidade ($kg.m^{-3}$)	600 ± 3	680 ± 4

4.2.2 Granulometria das cinzas

De acordo com a distribuição dos tamanhos das partículas mostrada na Figura 14, as partículas de cinza leve se distribuem da seguinte forma: 10 % das partículas possuem diâmetro menor que 2,02 μm, 50 % das partículas possuem diâmetro menor que 7,15 μm e 90 % das partículas possuem diâmetro menor que 40,31 μm; com isso o diâmetro médio das partículas, baseado no diâmetro médio geométrico, possui um valor igual a 7,06 μm.

Ao analisar a Figura 14, conclui-se que as partículas de cinza pesada se distribuem da seguinte forma: 10 % das partículas possuem diâmetro menor que 2,28 μm, 50 % das partículas possuem diâmetro menor que 8,76 μm e 90 % das partículas possuem diâmetro menor que 41,78 μm; assim o diâmetro médio de geométrico para as partículas de cinza pesada apresenta um valor igual a 8,16 μm.

Os resultados do diâmetro médio das partículas de cinza estão de acordo com os trabalhos de Matsinhe *et al*. (2015), Skoronski *et al*. (2015) e Lopes (2011) que mostram que a cinza leve possui diâmetro médio menor que o da cinza pesada, e por esse motivo são arrastadas pelo fluxo gasoso, enquanto as pesadas ficam depositadas no fundo das câmaras de combustão.

A análise também demonstrou que as partículas de cinza leve e pesada possuem área superficial específica de 1,30 m^2g^{-1} e 1,12 m^2g^{-1} respectivamente.

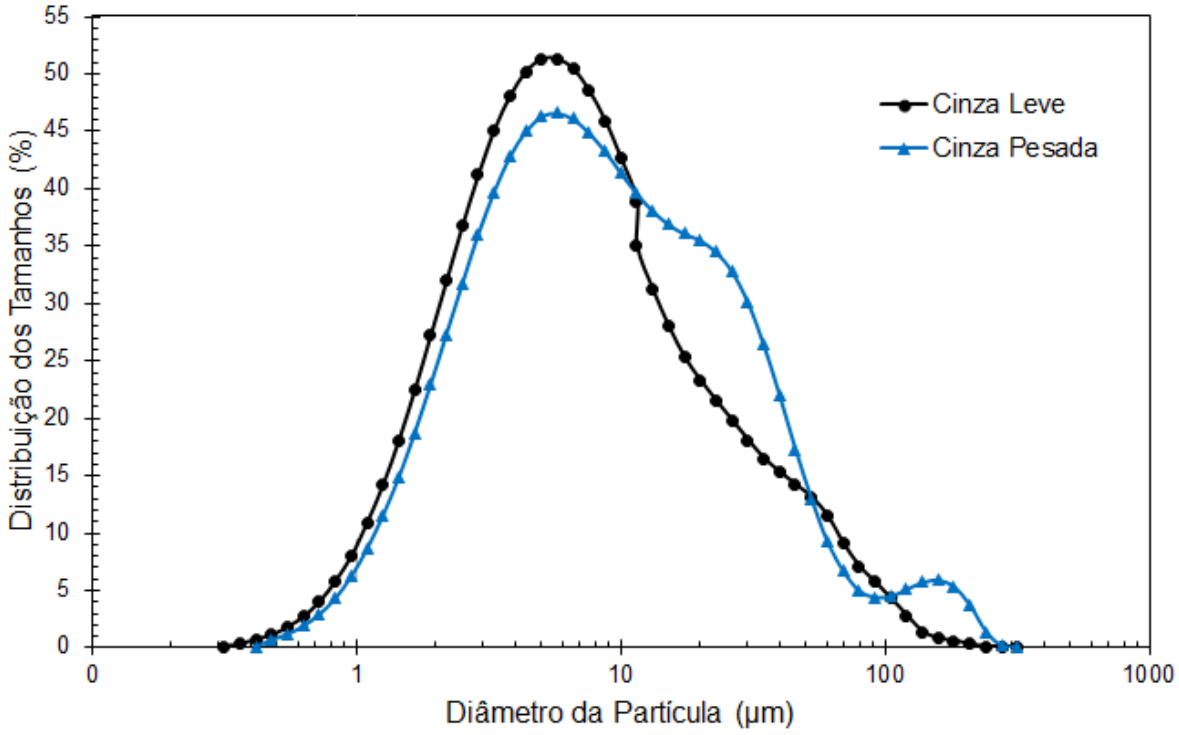


Figura 14 – Distribuição das partículas de cinza leve e pesada

4.2.3 Difratometria de Raios-X

Através do difratograma da Figura 15, correspondente à cinza leve, foi verificada a presença dos seguintes compostos minerais: quartzo, nontronita, gismondina, gipsita, portlandita e berlinita. Já a Figura 16 (difratograma da cinza pesada) mostra a presença dos seguintes minerais: schwertmannite; gismondina; gipsita; hematita; berlinita e quartzo.

Os compostos minerais encontrados, tanto na cinza leve quanto na cinza pesada, não representam risco potencial ao meio ambiente.

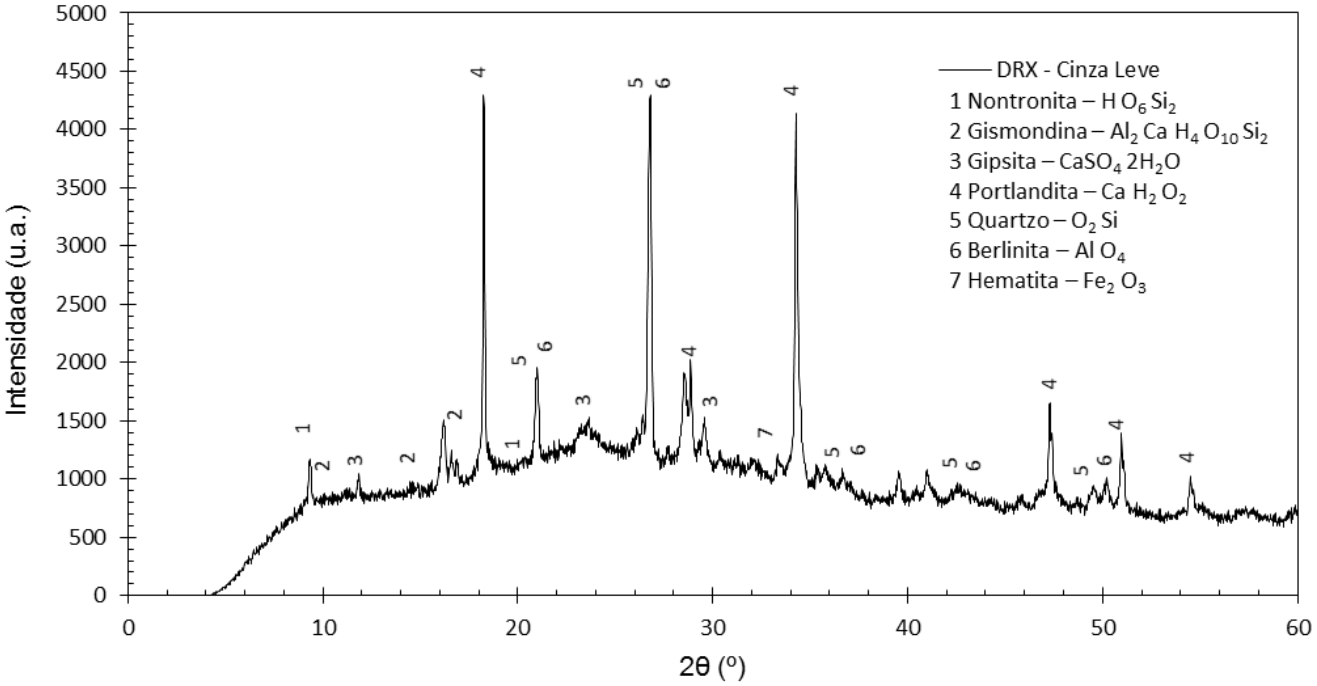


Figura 15 – Difratograma de Raios-X da Cinza Leve

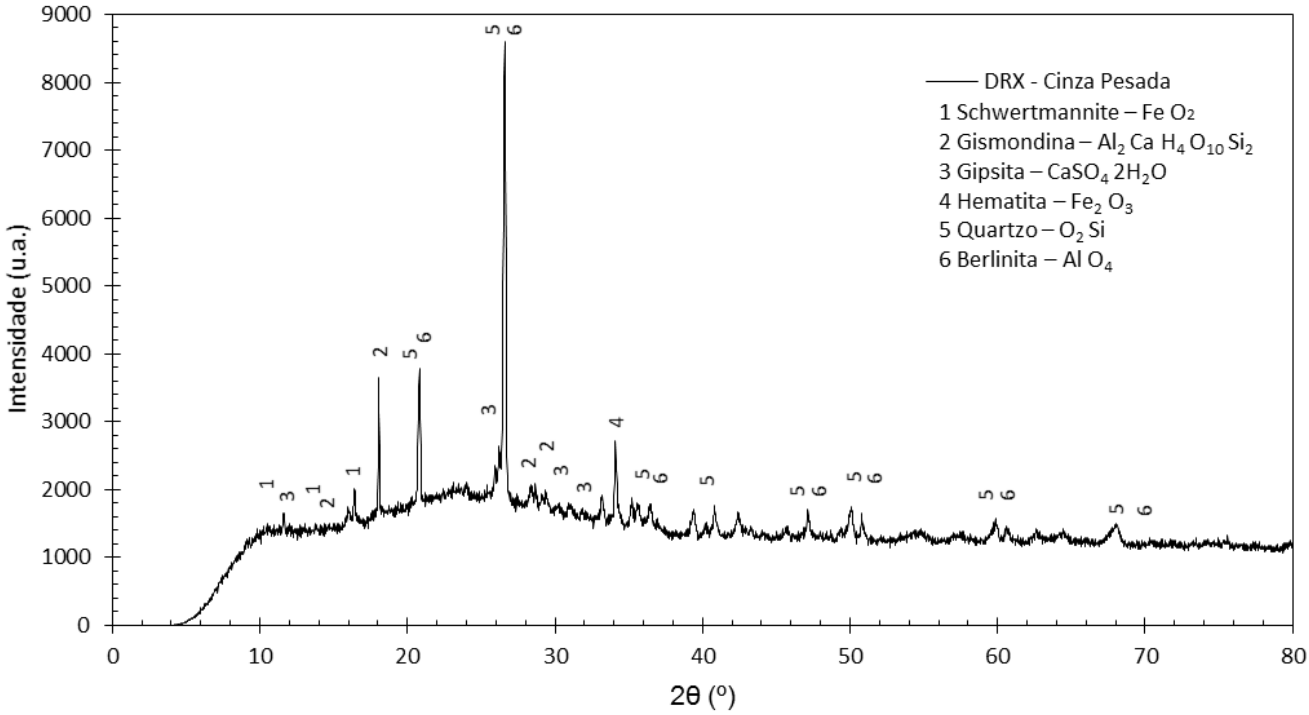


Figura 16 – Difratograma de Raios-X da Cinza Pesada

4.2.4 Análise por espectroscopia de absorção atômica

Como pode ser visto na Tabela 5 todos os elementos analisados estão em pequenas quantidades (máximo de 3,57 %), sendo que alguns não puderam ser identificados por não possuírem uma quantidade mínima que possibilitasse a leitura no equipamento (limite de detecção) é o caso do cromo (Cr), chumbo (Pb) e o cádmio (Cd). A ausência destes compostos é um aspecto positivo para a formulação do produto, pois tais metais são considerados tóxicos e podem causar problemas para à biodiversidade local e até à saúde humana.

Os elementos ferro (Fe), sódio (Na) e potássio (K) são os que aparecem em maior quantidade nas cinzas em relação aos outros metais. A presença destes metais, em pequena quantidade, não oferece potenciais riscos ao meio ambiente.

Tabela 5 – Resultado quantitativo da espectroscopia de absorção atômica

Determinações	**Média Cinza Leve**		**Média Cinza Pesada**	
	ppm	**%**	**ppm**	**%**
Zinco (Zn)	267 ± 8	0,025	332 ± 5	0,03
Cobre (Cu)	80,8 ± 0,4	0,01	74,3 ± 0,5	0,01
Manganês (Mn)	284 ± 9	0,03	295 ± 6	0,03
Cromo (Cr)	0	0	0	0
Cádmio (Cd)	0	0	0	0
Chumbo (Pb)	0	0	0	0
Ferro (Fe)	32395 ± 61	3,24	35693 ± 84	3,57
Sódio (Na)	7276 ± 15	0,725	8375 ± 43	0,84
Potássio (K)	13331 ± 81	1,335	15147 ± 57	1,515

4.3 Características do compósito gesso e cinzas

4.3.1 Tempo de pega inicial e final

Com o intuito de investigar o efeito que as cinzas proporcionam no tempo de pega do gesso foi feito uma série de experimentos para avaliar o tempo de pega inicial e final para diferentes composições de gesso e cinza

A composição da mistura variou entre 0 % e 50 % em massa de cinzas no gesso. À medida que foi adicionado cinza leve ou pesada ao gesso observou-se um decaimento no tempo de pega inicial e final, desta forma as cinzas atuaram como aceleradores de pega como mostram os gráficos das Figuras 17 e 18.

Em comparação ao gesso sem cinzas, os resultados mostraram que adicionar 50 % de cinza leve ao pó de gesso diminui em 66 % o tempo de pega inicial e 65 % o tempo de pega final, já a mistura contendo a mesma proporção de cinza pesada diminui em 49 % o início de pega e 43 % o fim de pega. Ao fazer o teste em uma mistura contendo 25 % de cinza leve, 25 % de cinza pesada e 50 % de gesso, observou-se uma diminuição no tempo de pega inicial de 60 % e 58 % no tempo de pega final.

Diante destes resultados, conclui-se que a melhor mistura é composta por cinza pesada e gesso, pois mostrou menos impacto no tempo de pega em relação às outras misturas. Todavia, a mistura contendo os dois tipos de cinza se mostra mais atraente em termos ambientais pois há a possibilidade de reutilizar os dois tipos de resíduo.

Gonçalves e Ferraz (2014) também investigaram o que acontece com o tempo de pega ao adicionar novos materiais à pasta de gesso. Os resultados encontrados pelos autores foram próximos aos apresentados nesta dissertação, entretanto com apenas 10 % de resíduo incorporado à pasta de gesso; nesta condição a pasta de gesso expressou um decaimento de 60,8 % no tempo de pega inicial e 68,3 % no tempo de pega final. Com esta comparação, as cinzas podem ser consideradas atraentes em termos de tempo de pega, pois podem ser incorporadas em até 50 % em massa sem comprometer a trabalhabilidade do gesso.

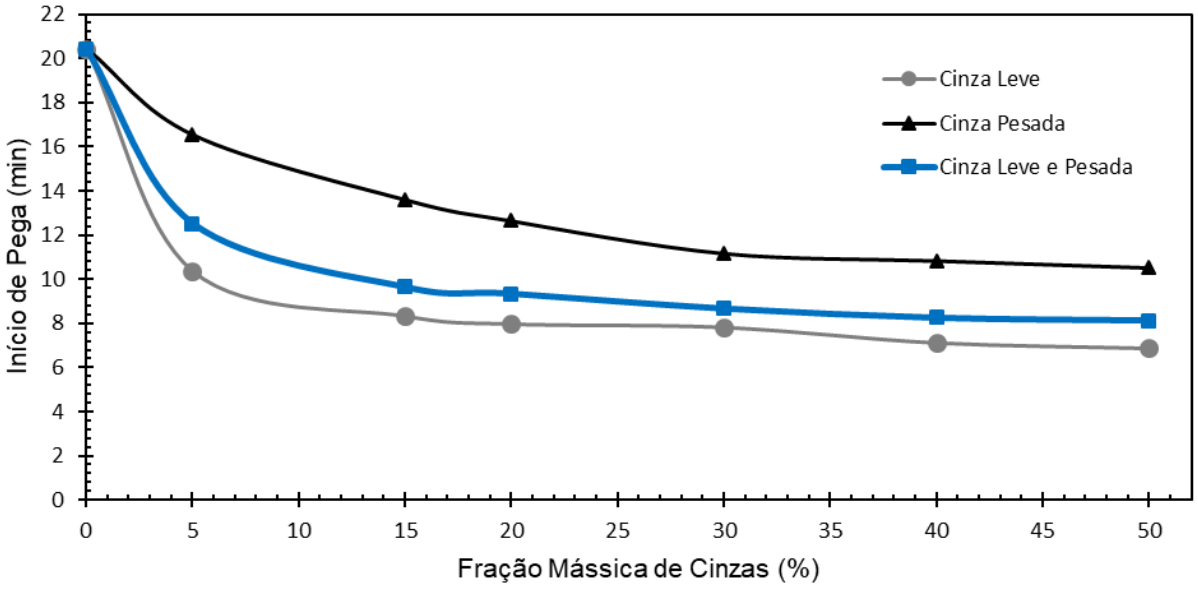


Figura 17 – Tempo de pega inicial em função da composição da mistura

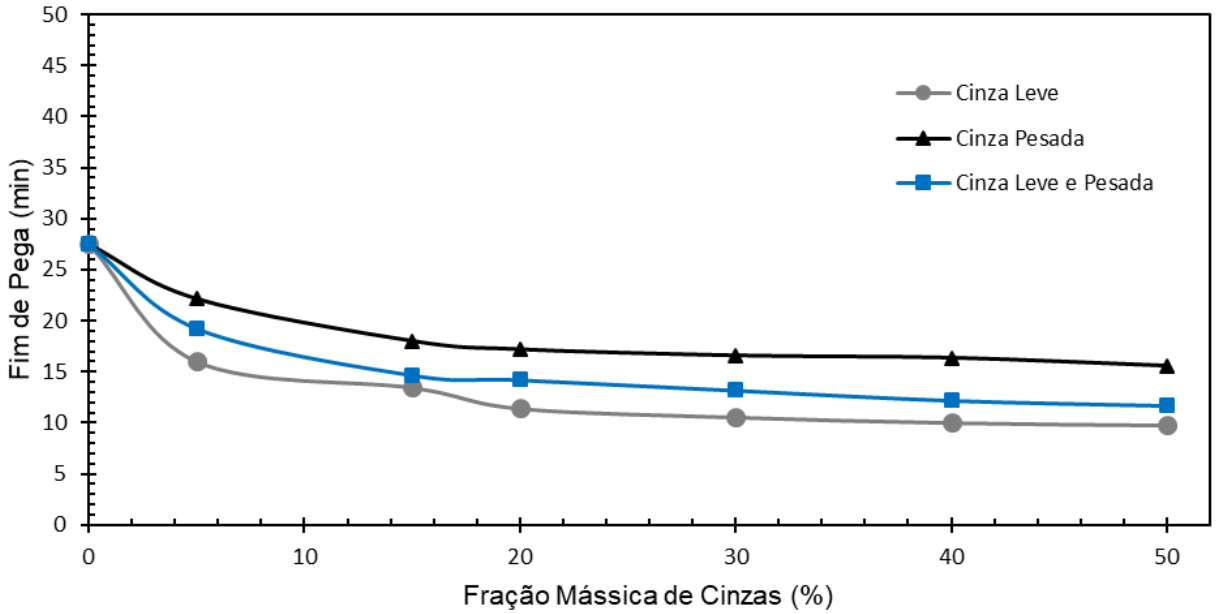


Figura 18 – Tempo de pega Final em função da composição da mistura.

4.3.2 Resistência mecânica à compressão

Os resultados do delineamento composto central rotacional (DCCR) para resistência à compressão dos corpos de prova estão dispostos no apêndice A dessa dissertação. Os dados experimentais foram submetidos a uma análise de variância cujo resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de Variância para resistência à compressão do gesso/cinza

Fatores	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	$F_{95\%}$	Valor-P	R^2	Falta de Ajuste
kg água / kg Gesso (linear)	1	58,4357	58,4357	45,7605	0,006601	-	-
kg água / kg Gesso (quadrático)	1	44,1472	44,1472	34,5714	0,009816	-	-
Cinza Leve (%) (linear)	1	146,0853	146,0853	114,398	0,001747	-	-
Cinza Leve (%) (quadrático)	1	0,0650	0,0650	0,0509	0,835971	-	-
Cinza Pesada (%) (linear)	1	77,0753	77,0753	60,3571	0,004437	-	-
Cinza Pesada (%) (quadrático)	1	0,5617	0,5617	0,4399	0,554588	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (linear)	1	58,4279	58,4279	45,7544	0,006602	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (quadrático)	1	3,6201	3,6201	2,8349	0,190826	-	-
1L by 2L	1	0,7952	0,7952	0,6227	0,487666	-	-
1L by 3L	1	1,9885	1,9885	1,5572	0,300603	-	-
1L by 4L	1	0,1708	0,1708	0,1338	0,738838	-	-
2L by 3L	1	9,4220	9,4220	7,3783	0,072776	-	-
2L by 4L	1	2,0885	2,0885	1,6355	0,290902	-	-
3L by 4L	1	6,5592	6,5592	5,1365	0,108286	-	-
Falta de Ajuste	10	82,7525	8,2753	6,4803	0,075476	-	-
Erro Puro	3	3,8310	1,2770	-	-	-	-
Total	27	494,7799	-	-	-	**0,82501**	**0,63655**

Segundo os dados da Tabela 6, o coeficiente de regressão (R^2) para o modelo estatístico que descreva a resistência à compressão foi considerado satisfatório, explicando 82,50 % da variância e um coeficiente de ajuste de 63,65 % para os experimentos. Conclui-se, então, que o modelo quadrático poderá descrever de forma satisfatória a resistência à compressão dos corpos de prova.

Para avaliar os efeitos significativos foi analisado o diagrama de pareto que descreve os efeitos padronizados tanto lineares quanto quadráticos da variável resposta em questão (Figura 19). Observando a Figura 19, conclui-se que apenas os

termos lineares de cinza leve (%), cinza pesada (%), relação água/gesso e carga de prensagem (MPa), além do termo quadrático da relação água/gesso foram estatisticamente significativos, considerando um nível de confiança de 95 %. Portanto, apenas esses efeitos deverão compor o modelo estatístico para estimar a resistência à compressão.

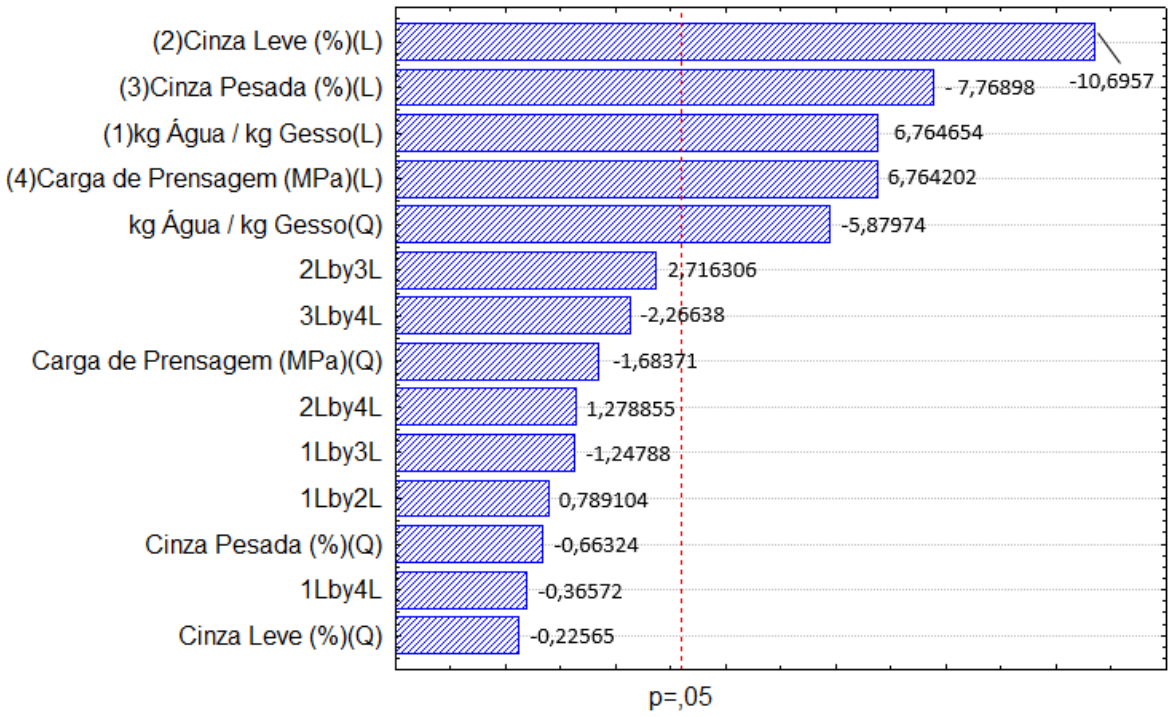


Figura 19 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (resistência à compressão)

Ao observar a Figura 19, constata-se que os fatores de interação não possuem significância estatística, portanto, a previsão da resistência à compressão pode ser baseada na variação de apenas um dos fatores.

A partir dos coeficientes de regressão (Tabela 7), o modelo estatístico que descreve a resistência à compressão, a partir das variáveis originais codificadas, é dada pela Equação 8:

$$Y = 13{,}46016 + 1{,}56039x_1 - 1{,}35627x_1^2 - 2{,}46716x_2 - 1{,}79206x_3 + 1{,}56029x_4 \quad (8)$$

Sendo: Y = Resistência à Compressão (MPa); x_1 = kg Água/kg Gesso; x_2 = Fração Mássica de Cinza Leve (%); x_3 = Fração Mássica de Cinza Pesada (%); x_4 = Carga de Prensagem (MPa).

Tabela 7 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para resistência à compressão

Fatores	Coeficientes	Erro Padrão	Intervalos de Confiança	
			- 95 %	+ 95 %
Média / Interação	13,46016	0,565019	11,66201	15,25830
kg água / kg Gesso (linear)	1,56039	0,230668	0,82630	2,29448
kg água / kg Gesso (quadrático)	-1,35627	0,230668	-2,09036	-0,62218
Cinza Leve (%) (linear)	-2,46716	0,230668	-3,20125	-1,73307
Cinza Pesada (%) (linear)	-1,79206	0,230668	-2,52615	-1,05797
Carga de Prensagem (MPa) (linear)	1,56029	0,230668	0,82620	2,29438

A Figura 20 mostra uma comparação entre os valores experimentais e os valores estimados da resistência à compressão. Este gráfico foi utilizado para a verificação do modelo proposto, os ajustes dos pontos foram feitos baseando-se no método dos mínimos quadrados. Observa-se que os pontos experimentais estão bem distribuídos em torno da reta que representa os valores estimados para resistência à compressão.

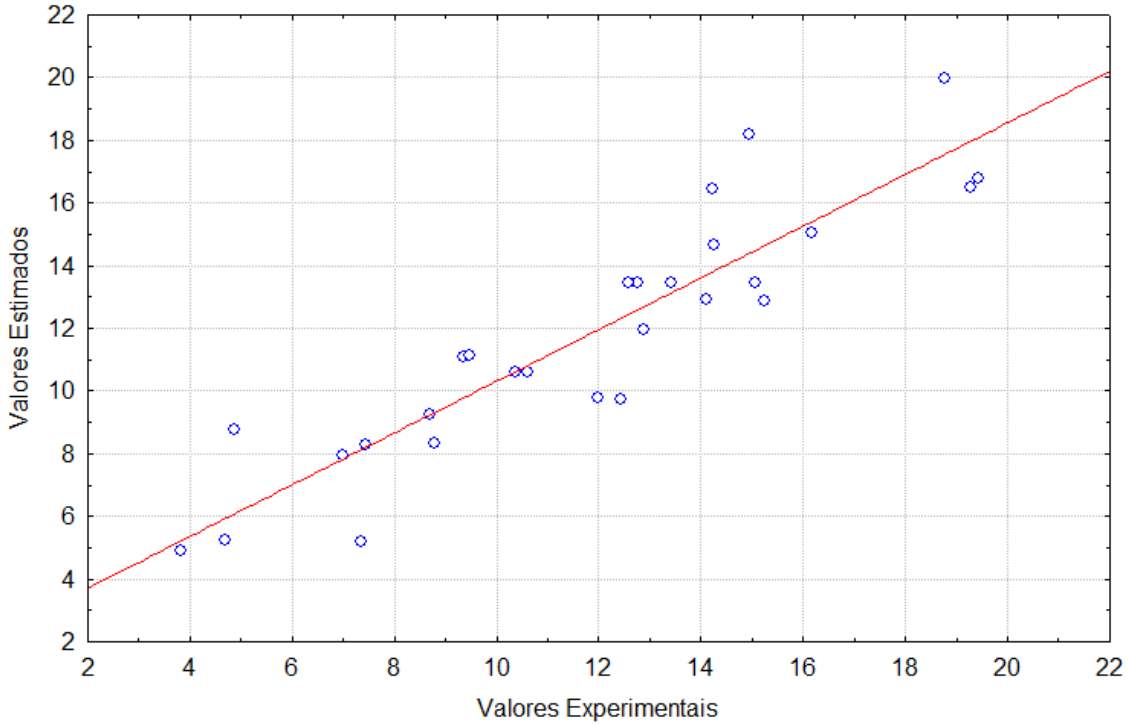


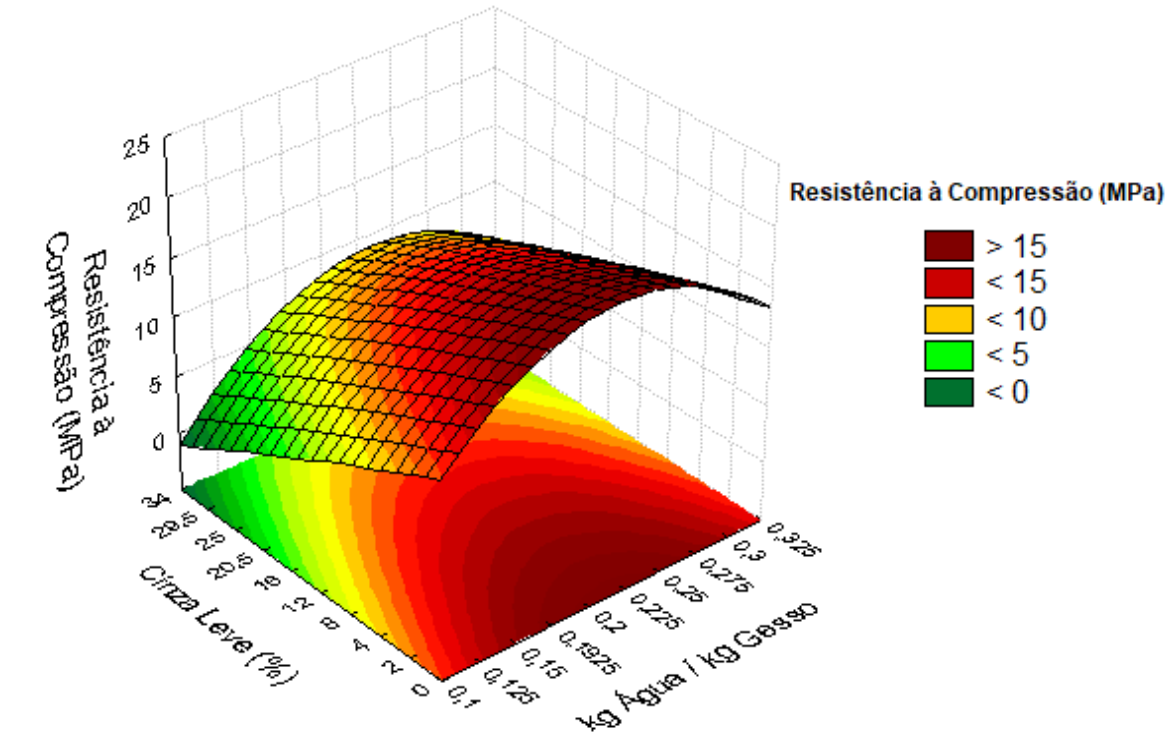
Figura 20 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para resistência à compressão (MPa)

As superfícies de resposta juntamente com as curvas de contorno para cada par de variável (Figura 21 a 26) evidenciam tal fato, pois a quantidade de cinzas na mistura não tem efeito sobre as outras variáveis, por conta disso os valores de relação água/gesso e carga de prensagem que maximizam a resistência à compressão sempre são os mesmos independentemente da quantidade de cinzas na mistura. Esses valores são 0,23 para relação água/gesso e 15 MPa para carga de prensagem, tais valores foram quantificados a partir do modelo estatístico gerado (Equação 8).

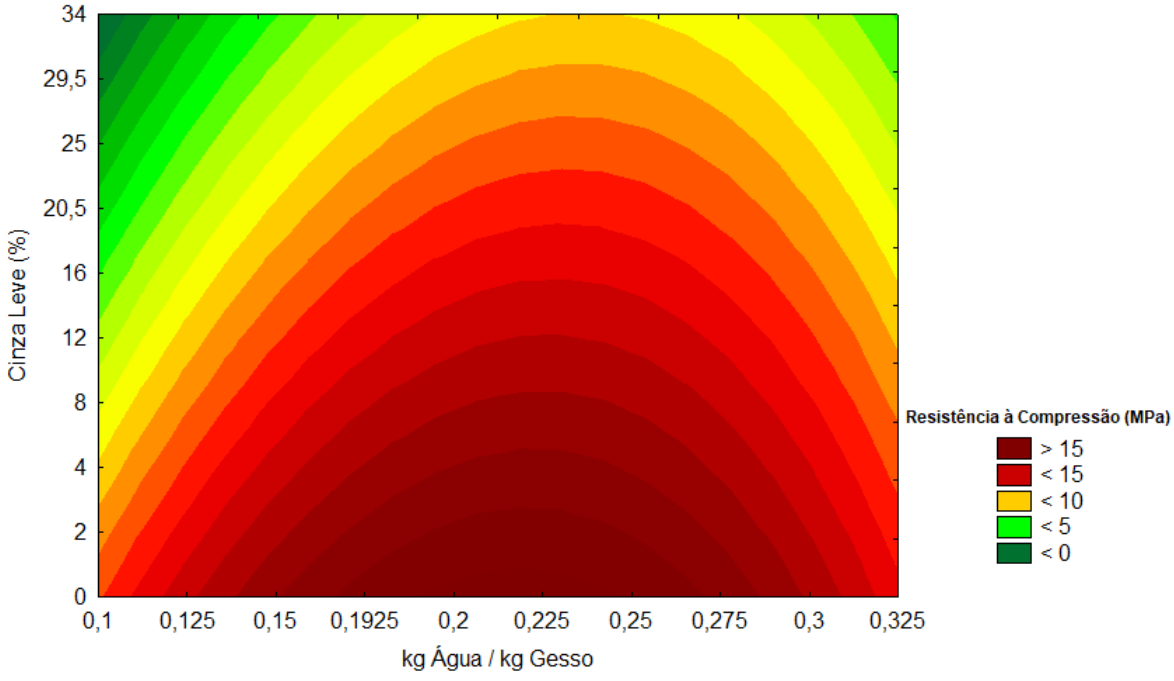
Os gráficos da Figura 21 a 26 foram gerados em pares de variáveis, fixando as outras duas no respectivo ponto central, totalizando seis gráficos. Ao observar todos os gráficos, constata-se que os melhores resultados para resistência à compressão estão na região onde a carga de prensagem é máxima (nível +2), a relação água/gesso em torno do ponto central (nível 0) e a quantidade de cinzas é mínima (nível -2).

O melhor resultado para o compósito gesso e cinzas foi quando a resistência à compressão chegou a um valor de 13,45 MPa, as condições operacionais do referido corpo de prova foram: relação água/gesso de 0,23, 16 % de cinza leve, 34 % de cinza pesada e uma carga de compressão de 15 MPa. Os gráficos também mostraram que a cinza leve tem um impacto negativo maior que a cinza pesada sobre resistência à compressão.

Real (2009), encontrou pré-moldados de gesso convencionais, produzidos por prensagem, com resistência à compressão de 29 MPa, obtidos com uma relação água/gesso de 0,35 e uma carga de prensagem de 20 MPa. Em termos de comparação com o gesso/cinza, por ser uma mistura, mostraram-se ser menos resistentes. Todavia, testes feitos com pré-moldados de gesso convencionais (sem operação de prensagem) apresentaram resistência à compressão de 8,2 ± 0,3 MPa, assim os pré-moldados de gesso e cinza (com operação de prensagem) ainda apresentam resultados satisfatórios em termos de aplicabilidade na construção civil.

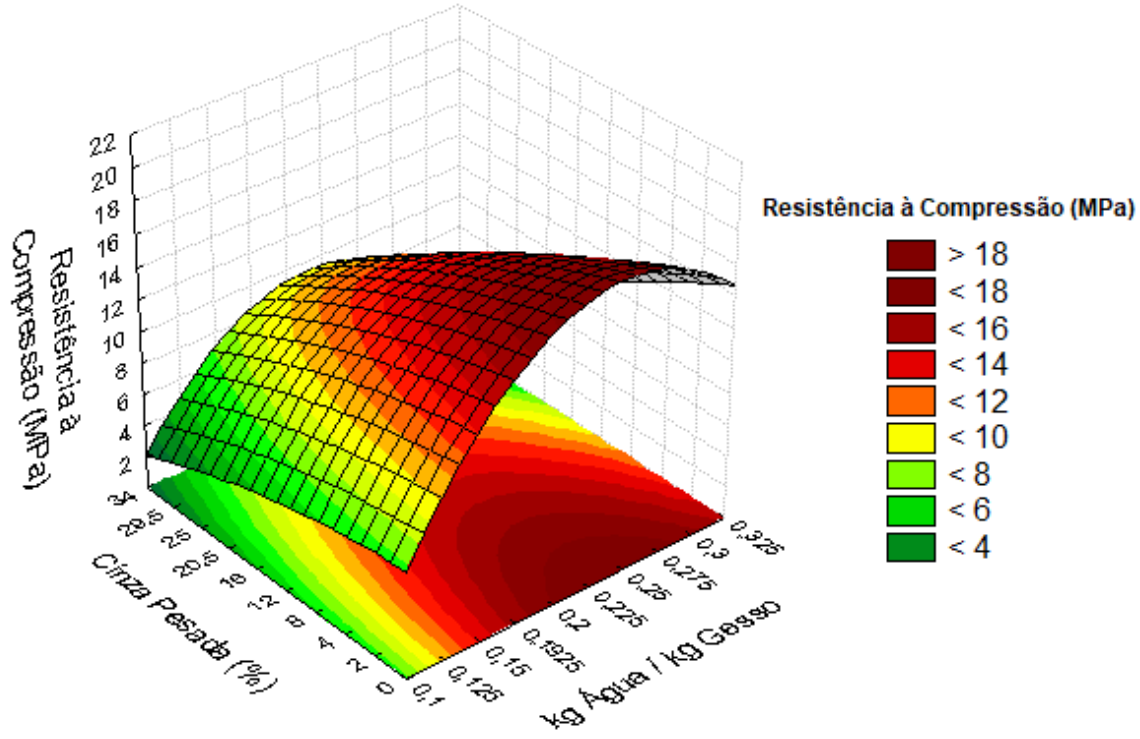


(a)

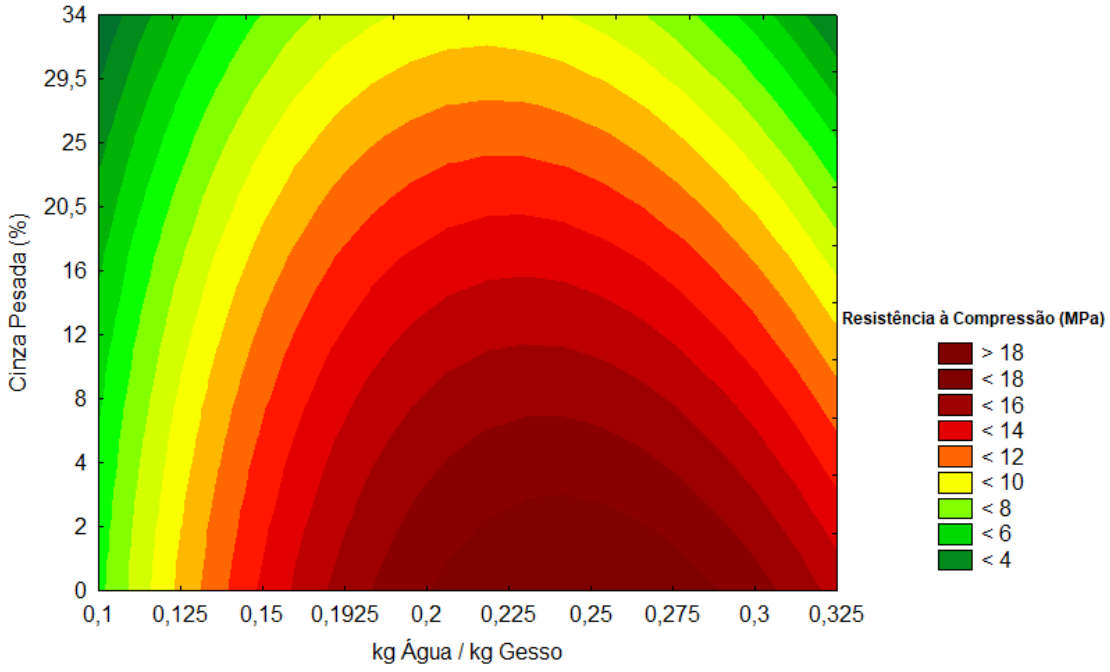


(b)

Figura 21 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

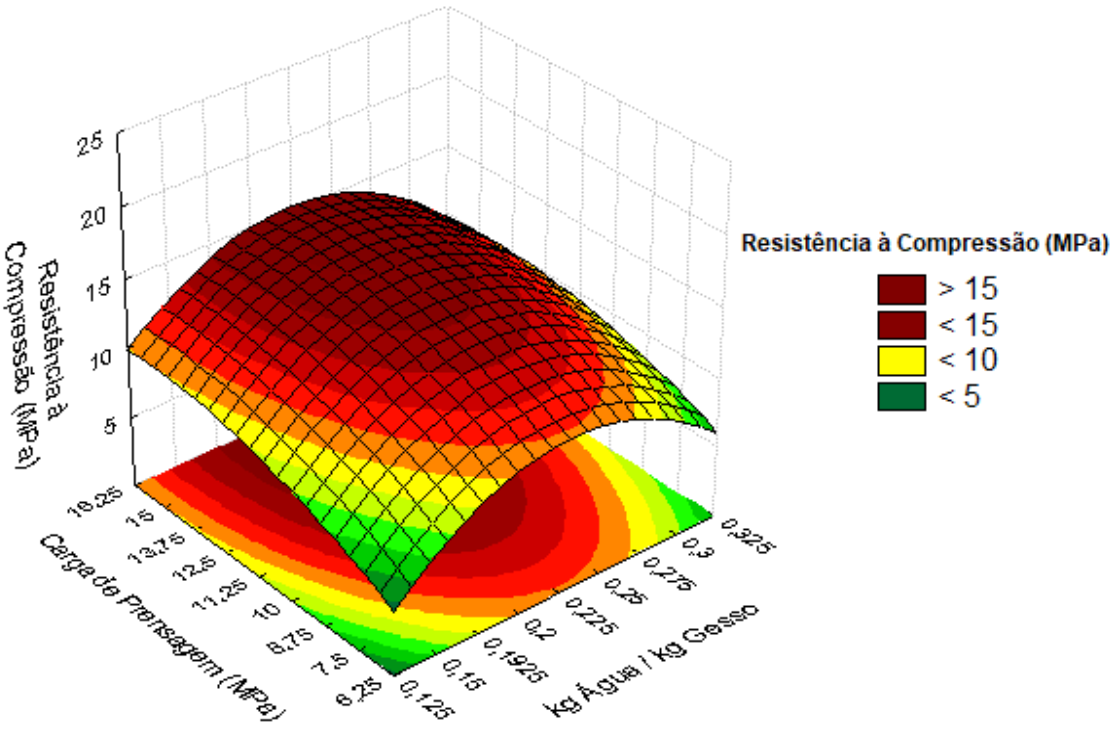


(a)

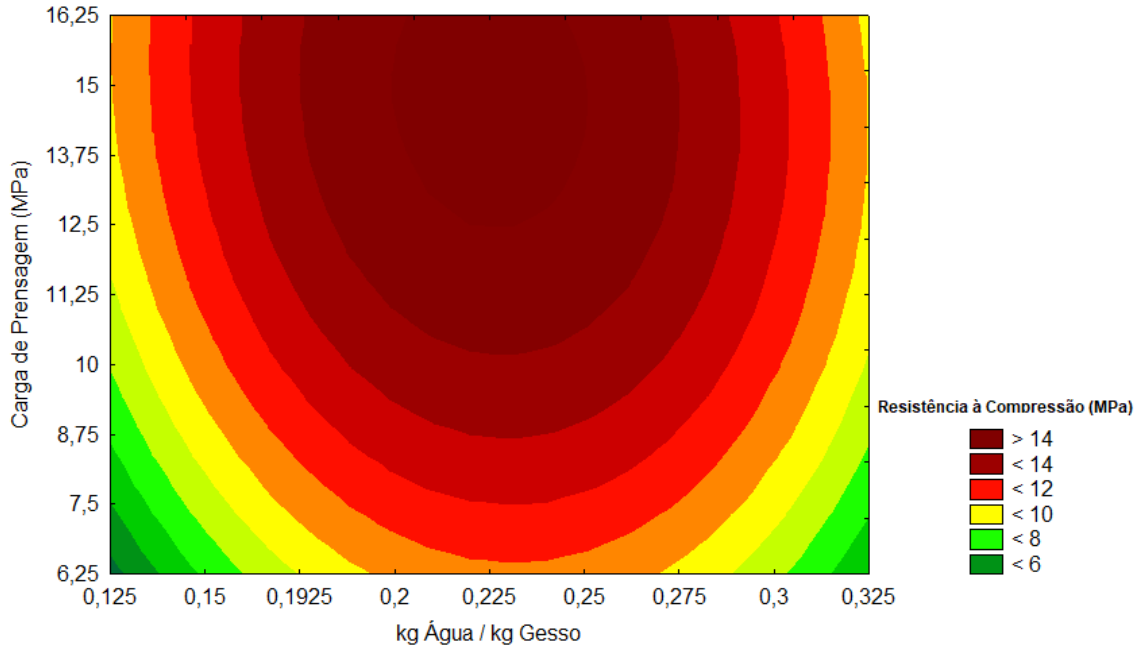


(b)

Figura 22 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

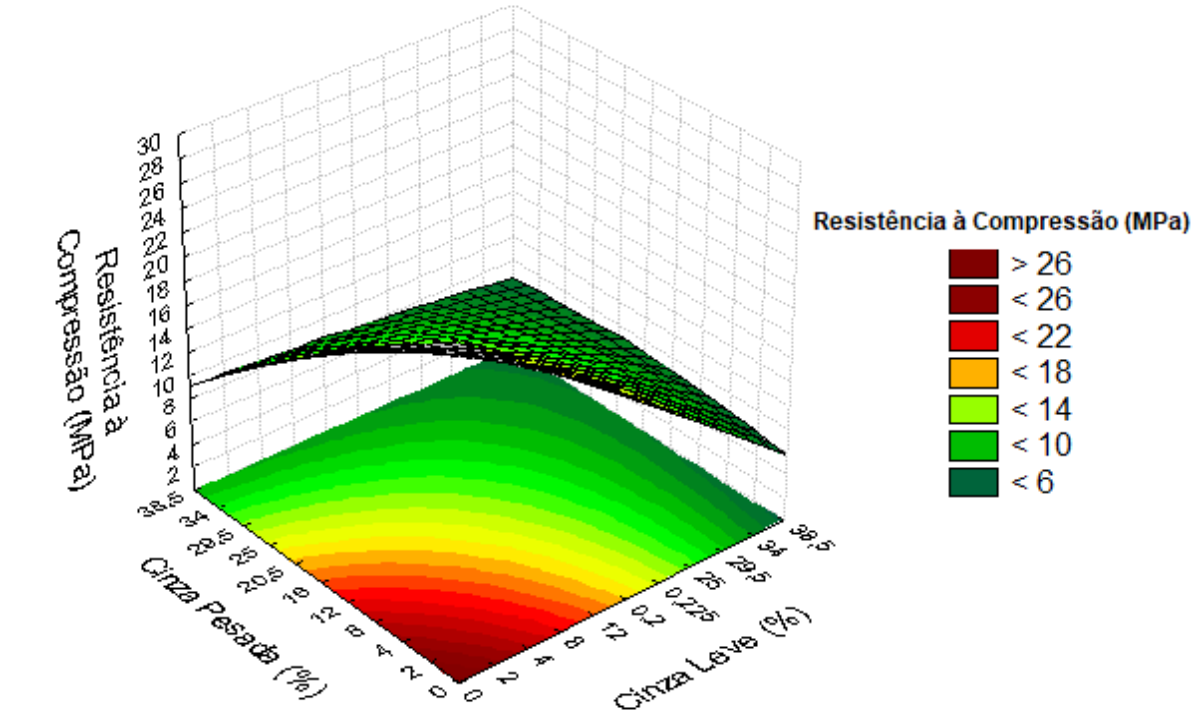


(a)

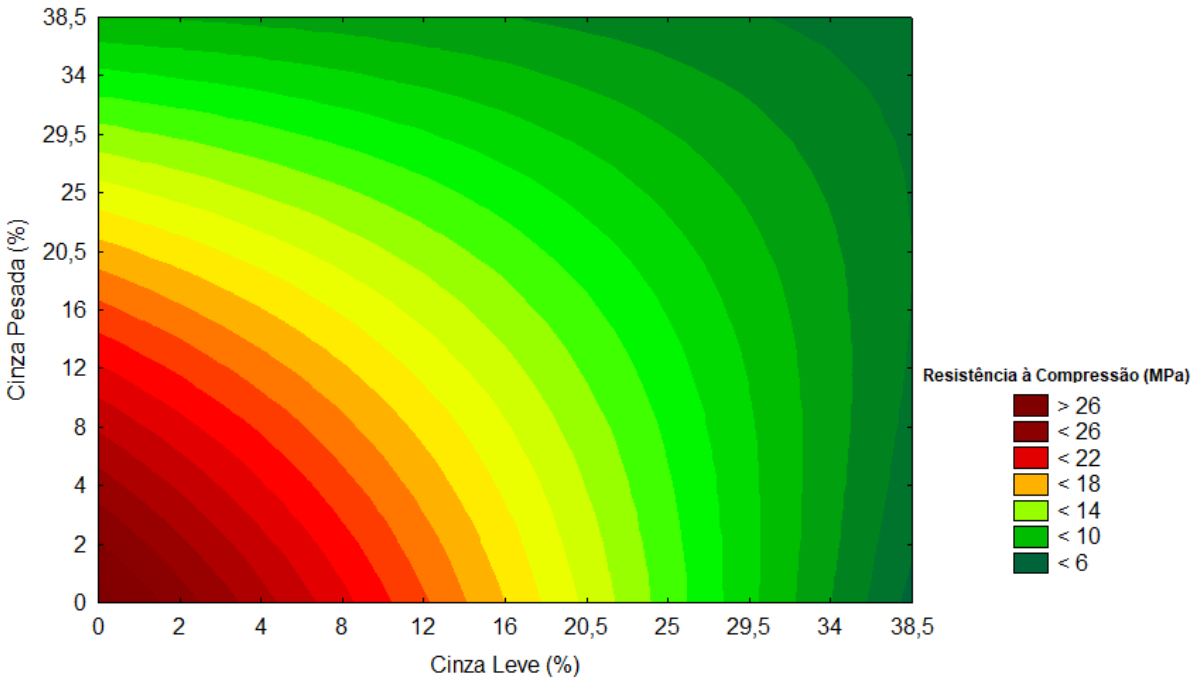


(b)

Figura 23 – Perfil da resistência à compressão em função da relação água/gesso e carga de prensagem (MPa) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

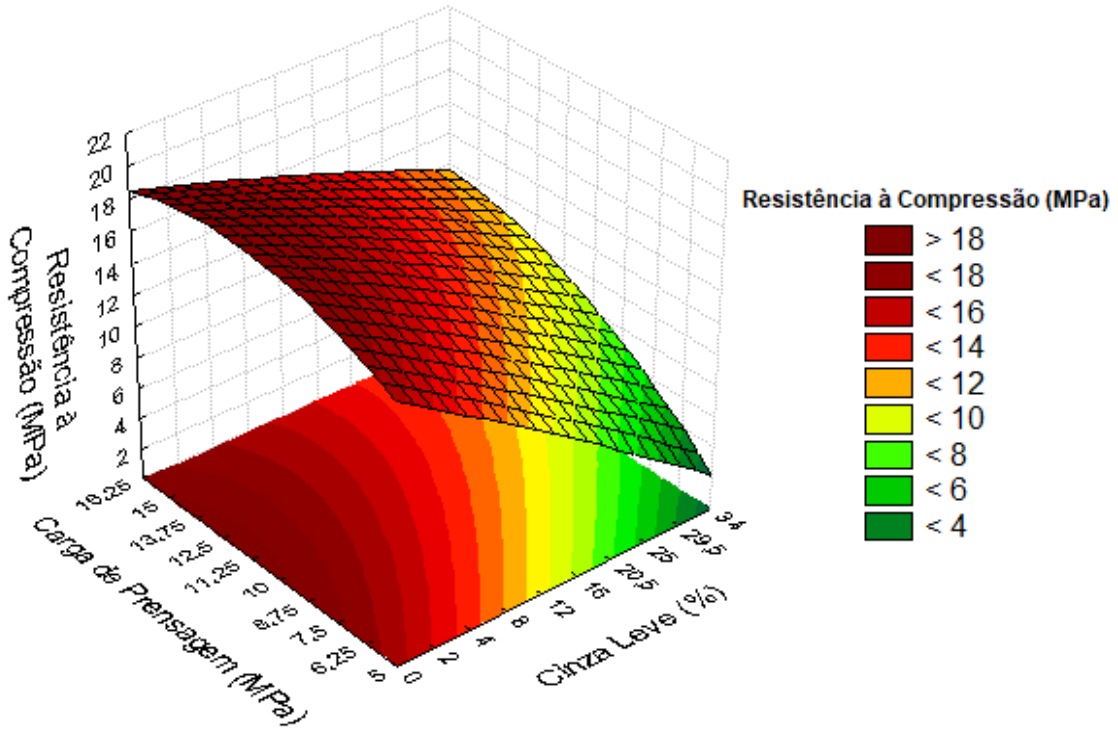


(a)

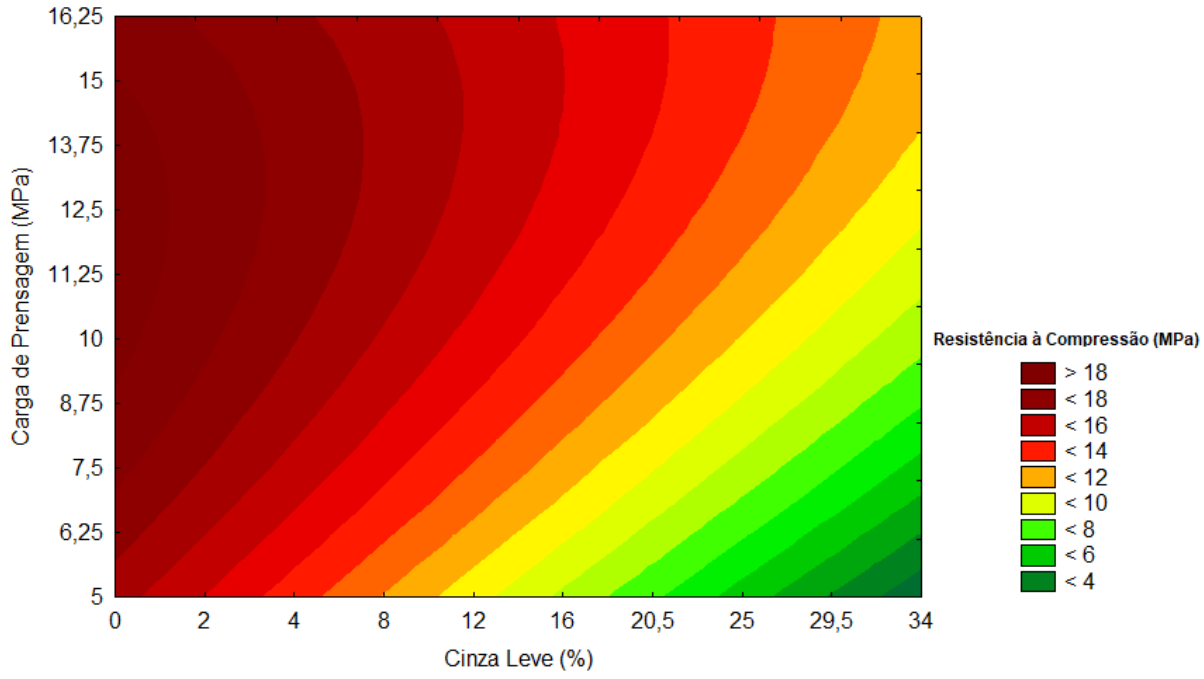


(b)

Figura 24 – Perfil da resistência à compressão em função da fração mássica de cinza leve (%) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

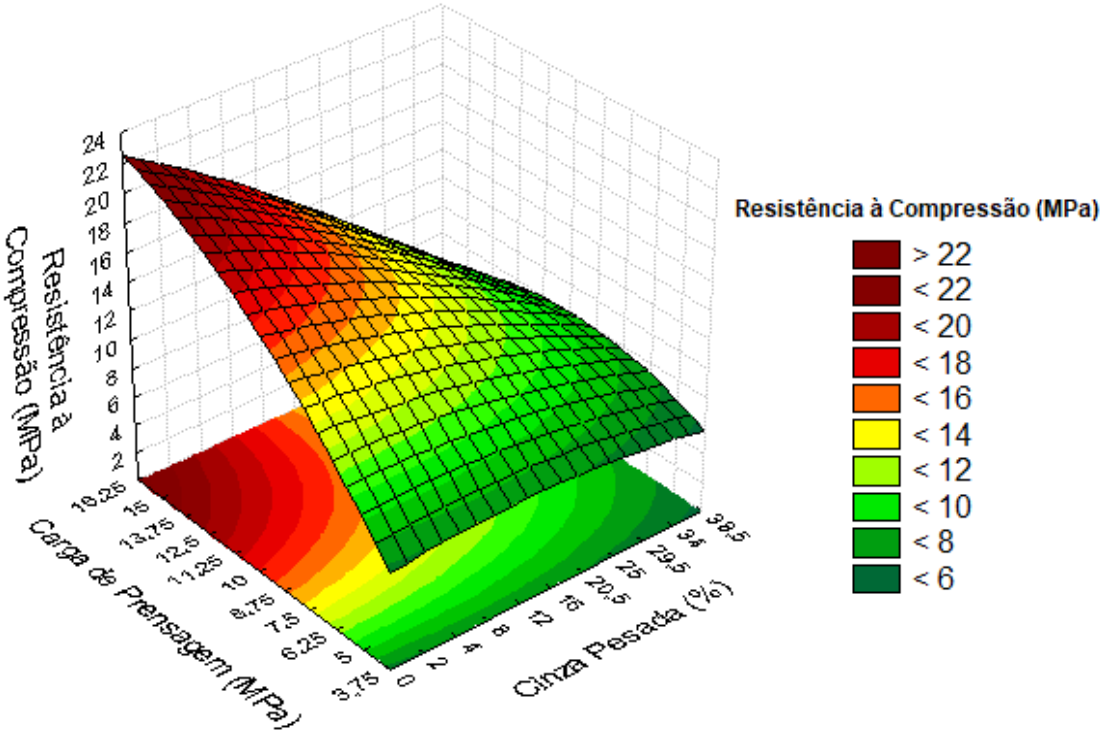


(a)

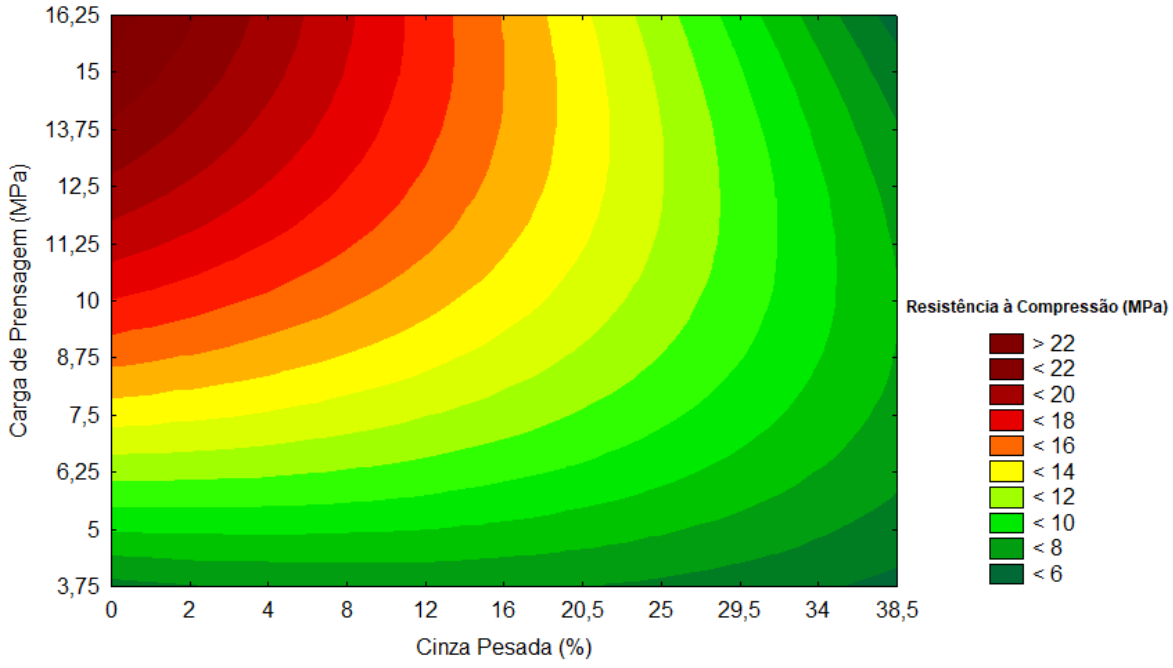


(b)

Figura 25 – Perfil da resistência à compressão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno



(a)



(b)

Figura 26 – Perfil da resistência à compressão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

4.3.3 Resistência mecânica à flexão

Os resultados experimentais do DCCR para resistência à flexão dos corpos de prova estão dispostos no apêndice A dessa dissertação. Tais resultados foram submetidos a uma análise de variância cujo resultados estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise de Variância para resistência à flexão do gesso/cinza

Fatores	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	$F_{95\%}$	Valor-P	R^2	Falta de Ajuste
Kg água / kg Gesso (linear)	1	1,28301	1,28301	5,90935	0,093254	-	-
Kg água / kg Gesso (quadrático)	1	3,70271	3,70271	17,05407	0,025757	-	-
Cinza Leve (%) (linear)	1	10,83194	10,83194	49,89021	0,005834	-	-
Cinza Leve (%) (quadrático)	1	0,37780	0,37780	1,74009	0,278776	-	-
Cinza Pesada (%) (linear)	1	9,64882	9,64882	44,44094	0,006882	-	-
Cinza Pesada (%) (quadrático)	1	0,16645	0,16645	0,76663	0,445713	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (linear)	1	12,48409	12,48409	57,49973	0,004758	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (quadrático)	1	0,00696	0,00696	0,03205	0,869321	-	-
1L by 2L	1	0,00122	0,00122	0,00560	0,945041	-	-
1L by 3L	1	1,04626	1,04626	4,81892	0,115690	-	-
1L by 4L	1	0,29417	0,29417	1,35488	0,328584	-	-
2L by 3L	1	0,40995	0,40995	1,88814	0,263076	-	-
2L by 4L	1	0,05858	0,05858	0,26980	0,639353	-	-
3L by 4L	1	0,26520	0,26520	1,22149	0,349744	-	-
Falta de Ajuste	10	7,28351	0,72835	3,35467	0,173932	-	-
Erro Puro	3	0,65135	0,21712	-	-	-	-
Total	27	49,80246	-	-	-	**0,84067**	**0,66909**

Segundo os dados da Tabela 8, o coeficiente de regressão (R^2) para o modelo estatístico que descreva a resistência à compressão foi considerado satisfatório, explicando 84,07 % da variância e um coeficiente de ajuste de 66,91 % para os

experimentos. Conclui-se, então, que o modelo quadrático pode descrever de forma eficiente a resistência à flexão dos corpos de prova.

A Figura 27 mostra o diagrama de pareto feito através dos dados obtidos nos ensaios de resistência à flexão, através deste diagrama podem ser definidos, com 95 % de confiança, os efeitos significativos sobre a resistência à flexão dos corpos de prova. Foram considerados significativos: os termos lineares de cinza leve (%), cinza pesada (%) e carga de prensagem (MPa) e o termo quadrático da relação água/gesso.

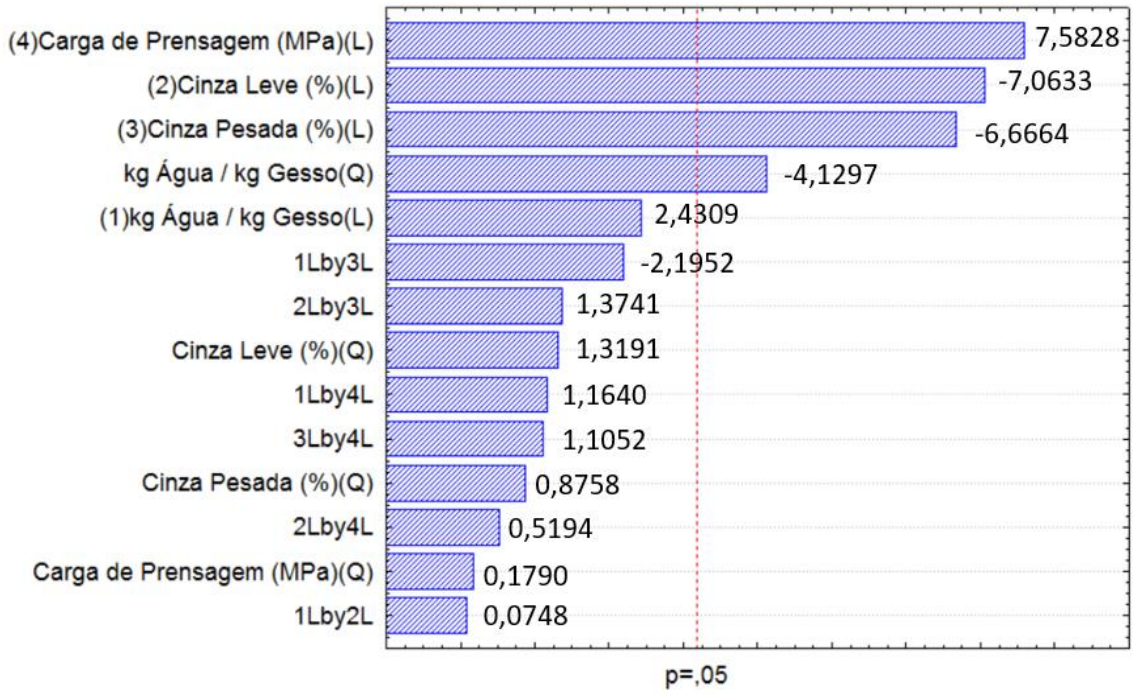


Figura 27 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (resistência à flexão)

A partir dos coeficientes de regressão (Tabela 9), o modelo estatístico que descreve a resistência à flexão, a partir das variáveis originais codificadas, é dada pela Equação 9:

$$Y = 5{,}698340 - 0{,}392784x_1^2 - 0{,}671812x_2 - 0{,}634062x_3 + 0{,}721228x_4 \quad (9)$$

Sendo: Y = Resistência à Flexão (MPa); x_1 = kg Água / kg Gesso; x_2 = Fração Mássica Cinza Leve (%); x_3 = Fração Mássica de Cinza Pesada (%); x_4 = Carga de Compressão (MPa).

Tabela 9 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para resistência à flexão

Fatores	Coeficientes	Erro Padrão	Intervalos de Confiança	
			- 95 %	+ 95 %
Média / Interação	5,698340	0,232978	4,956899	6,439781
kg água/kg Gesso (quadrático)	-0,392784	0,095113	-0,695476	-0,090092
Cinza Leve (%) (linear)	-0,671812	0,095113	-0,974504	-0,369120
Cinza Pesada (%) (linear)	-0,634062	0,095113	-0,936754	-0,331370
Carga de Prensagem (MPa) (linear)	0,721228	0,095113	0,418536	1,023920

A Figura 28 mostra uma comparação entre os valores experimentais e os valores estimados para a resistência à flexão. Este gráfico foi utilizado para verificar o modelo proposto. Observa-se que os pontos experimentais ficaram bem distribuídos em torno da reta que representa os valores estimados. Assim, conclui-se que o modelo pode ser usado para estimar a resistência à flexão de corpos de prova formados por gesso e cinzas.

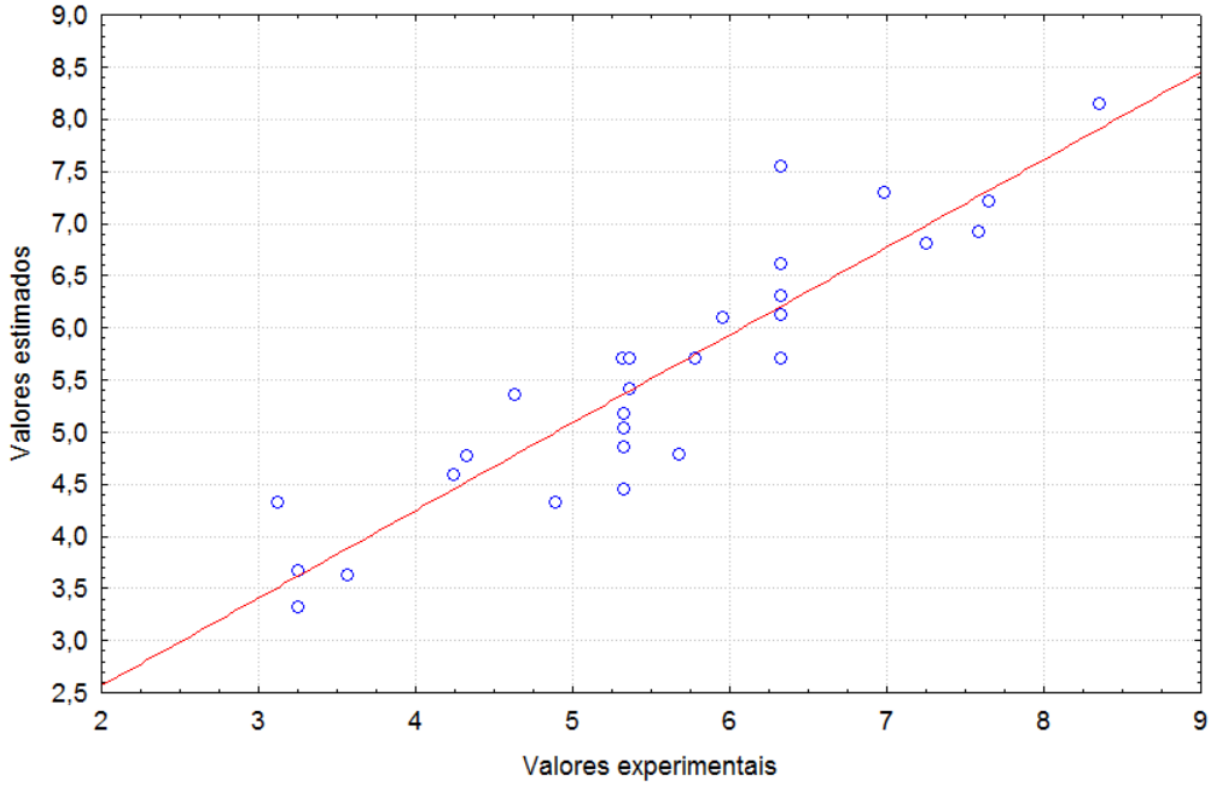


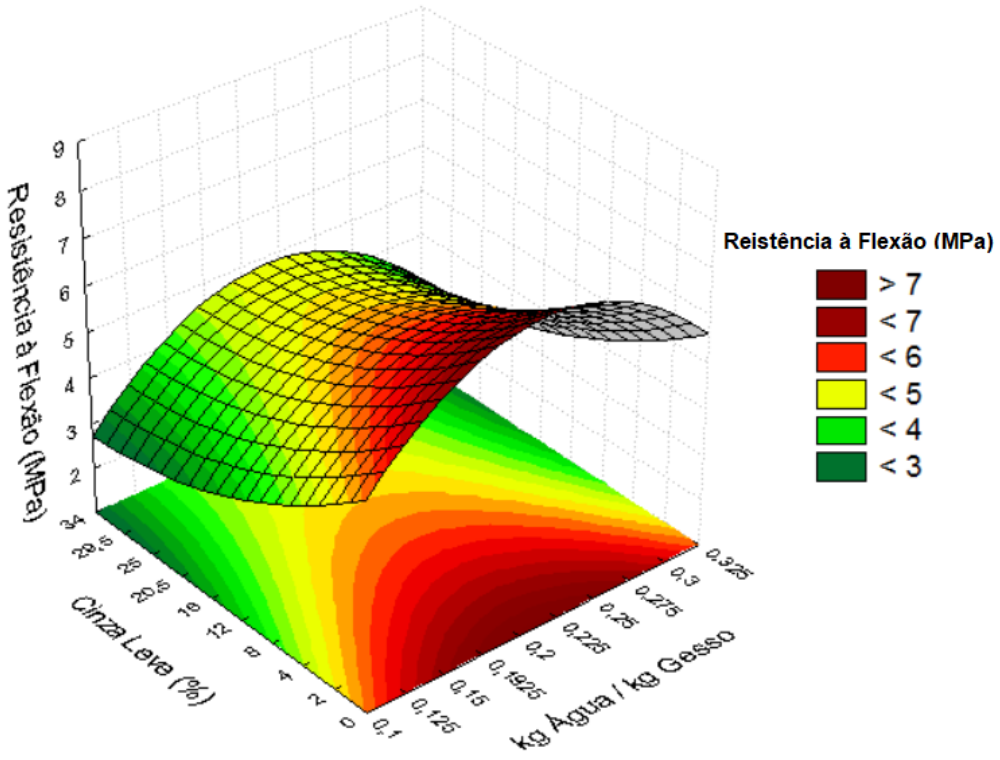
Figura 28 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para resistência à flexão

Os gráficos da Figura 29 a 34 mostram o comportamento da resistência à flexão para cada par de variável, fixando as outras duas no respectivo ponto central. Ao observar todos os gráficos, constata-se que os melhores resultados para resistência à flexão estão na região onde a carga de prensagem é máxima (nível +2), a relação água/gesso em torno do ponto central (nível 0) e a quantidade de cinzas é mínima (nível -2).

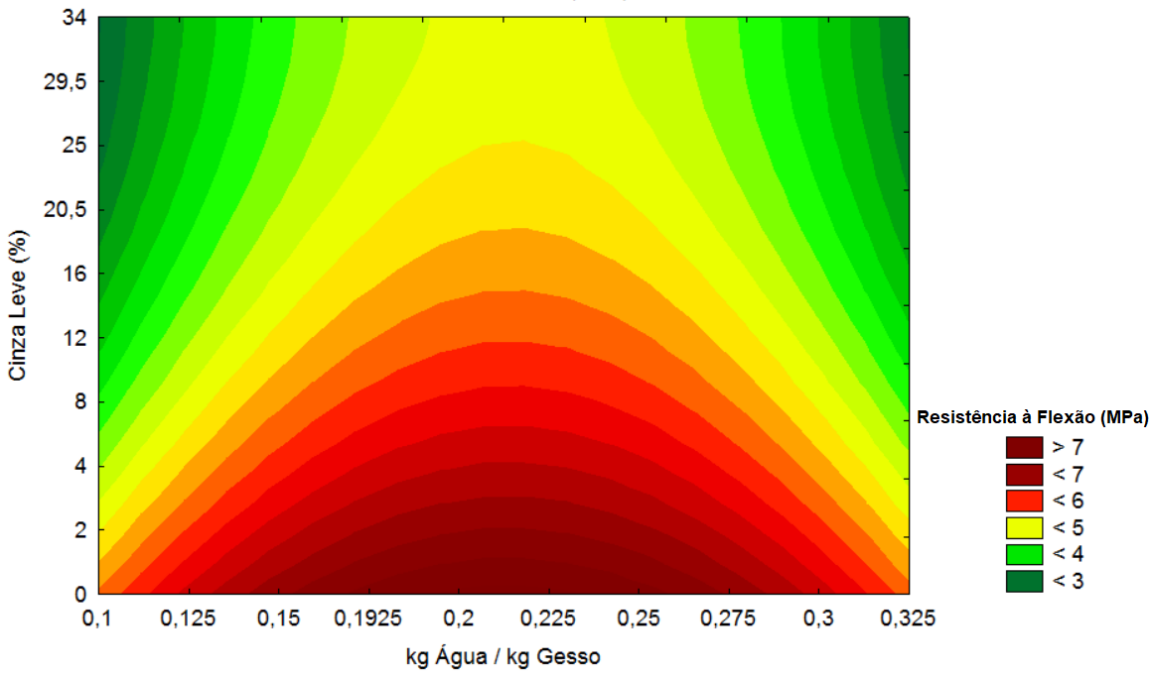
A otimização da resistência à flexão para corpos de prova formados por gesso e cinza ficou a cargo do modelo estatístico gerado pelo método de mínimos quadrados. Com 95 % de confiança, as condições para que se possa obtenha um pré-moldado com alta resistência à flexão utilizando o máximo de cinza são: relação água/gesso de 0,20, 16 % de cinza leve, 34 % de cinza pesada e uma carga de compressão de 15 MPa.

Real (2009) realizou experimentos de flexão com corpos de prova compactados contendo apenas gesso. O melhor resultado para resistência à flexão foi obtido com um corpo de prova feito com uma relação água/gesso de 0,35 uma carga de prensagem de 20 MPa, obtendo uma resistência à flexão igual a 9,22 MPa. Testes feitos com pré-moldados convencionais mostraram que sua resistência à flexão destes é em média 2,3 ± 0,2 MPa.

Considerando a comparação entre os resultados, é possível afirmar que o gesso cinza moldado por prensagem mecânica nas condições ótimas pode ser utilizado como material de construção civil sustentável na forma de pré-moldados à base de gesso.

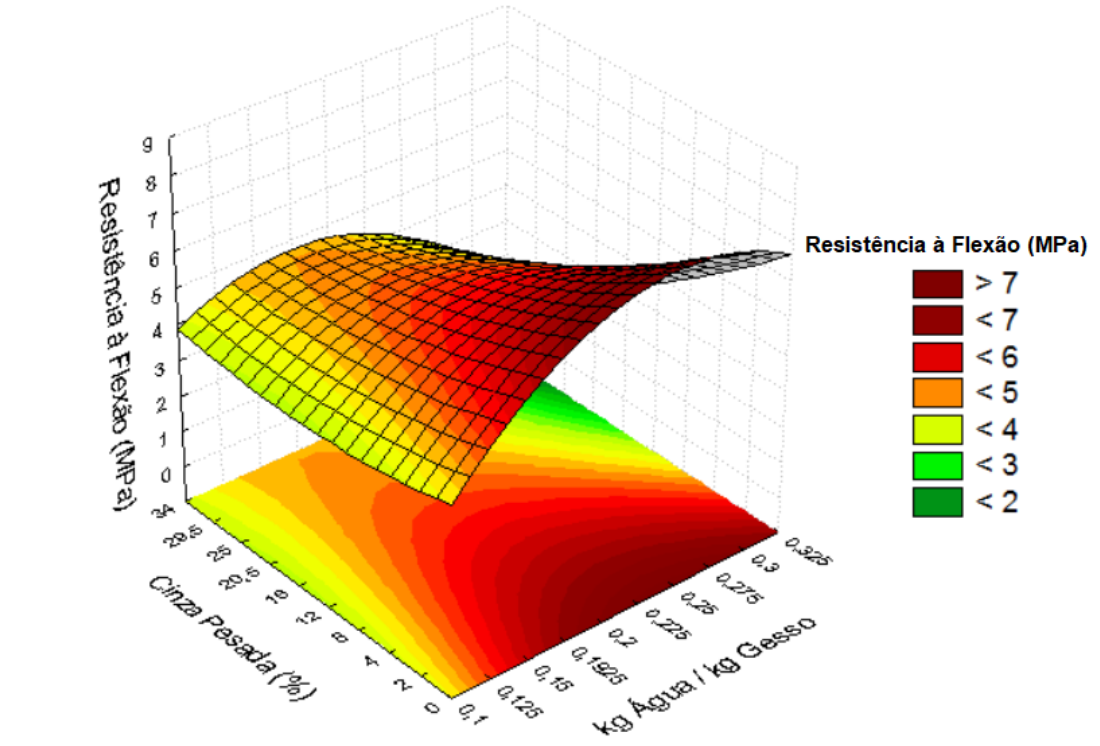


(a)

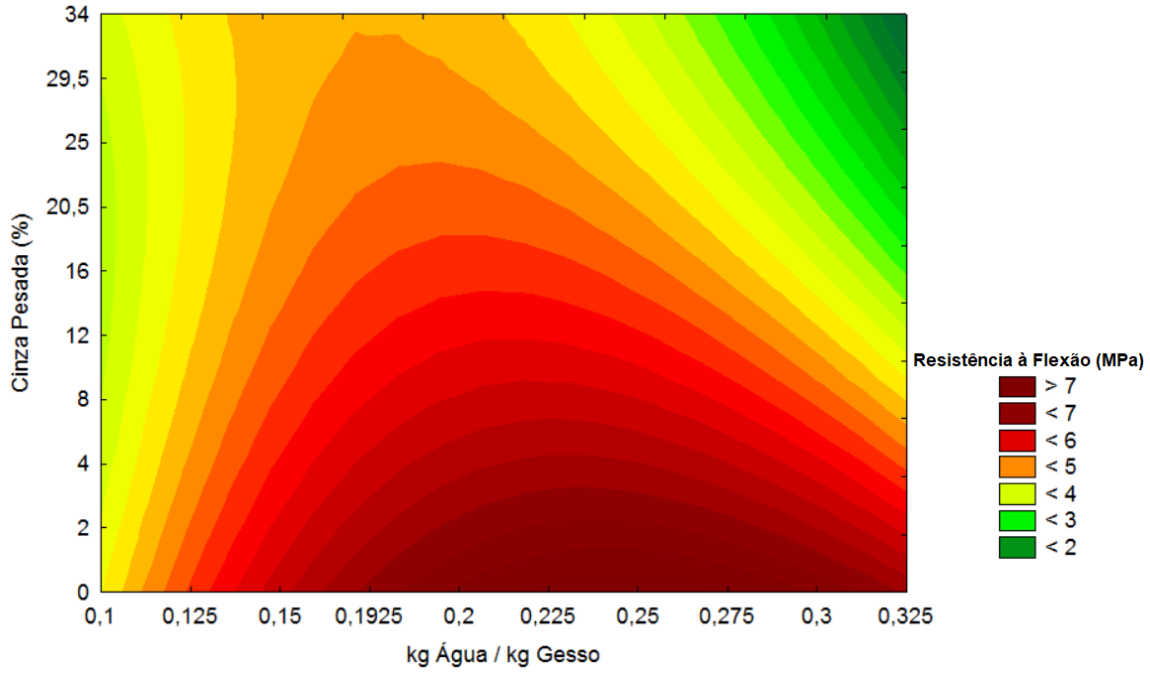


(b)

Figura 29 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza leve (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

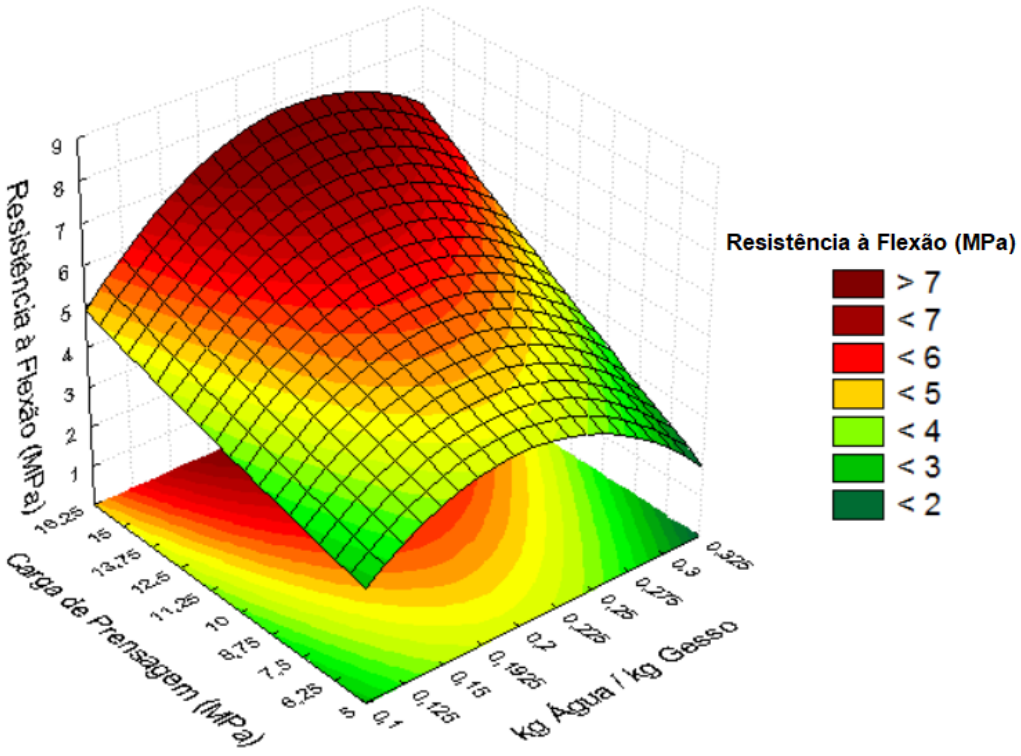


(a)

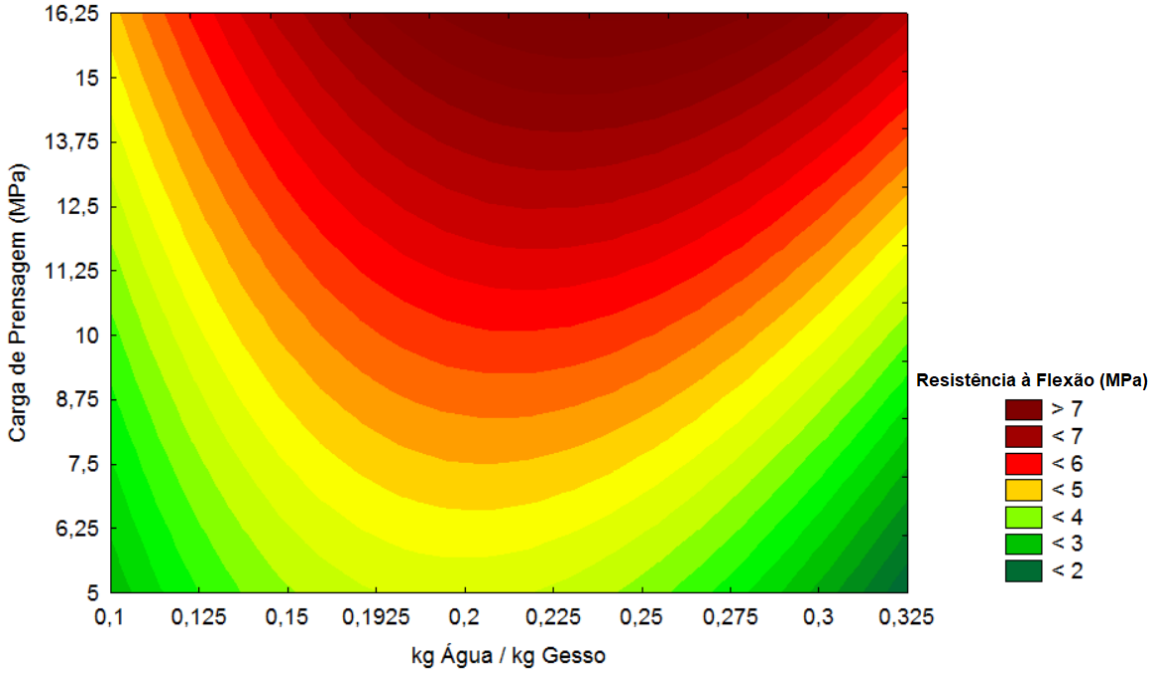


(b)

Figura 30 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza pesada (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno



(a)



(b)

Figura 31 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e relação água/gesso (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

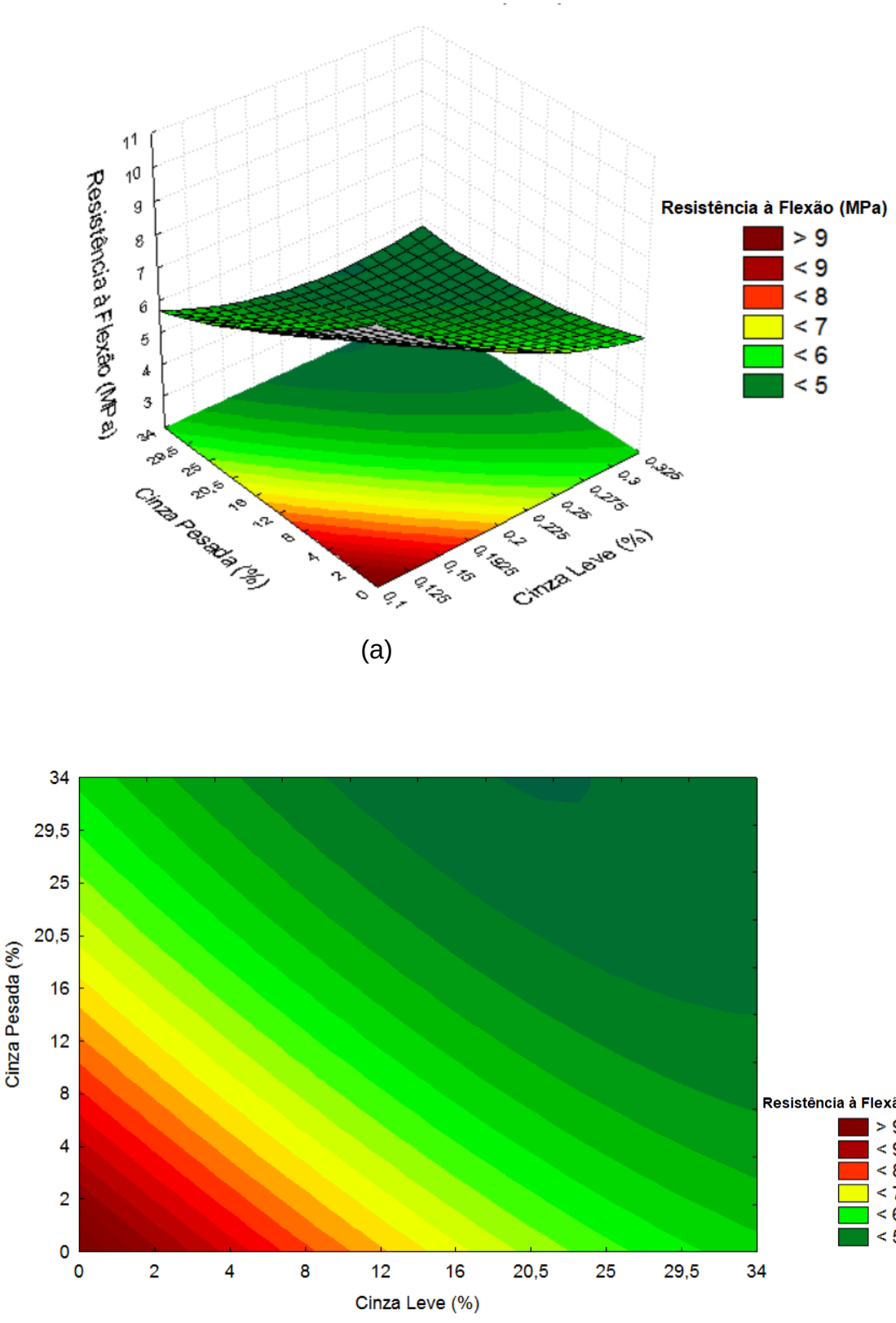
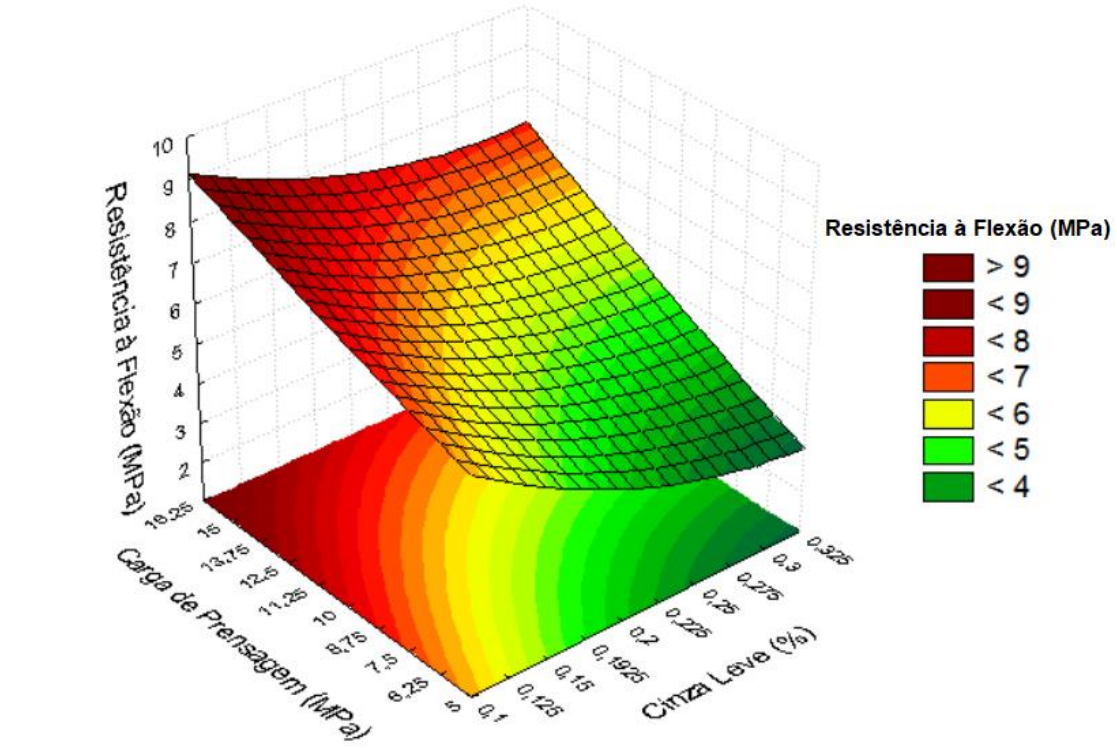
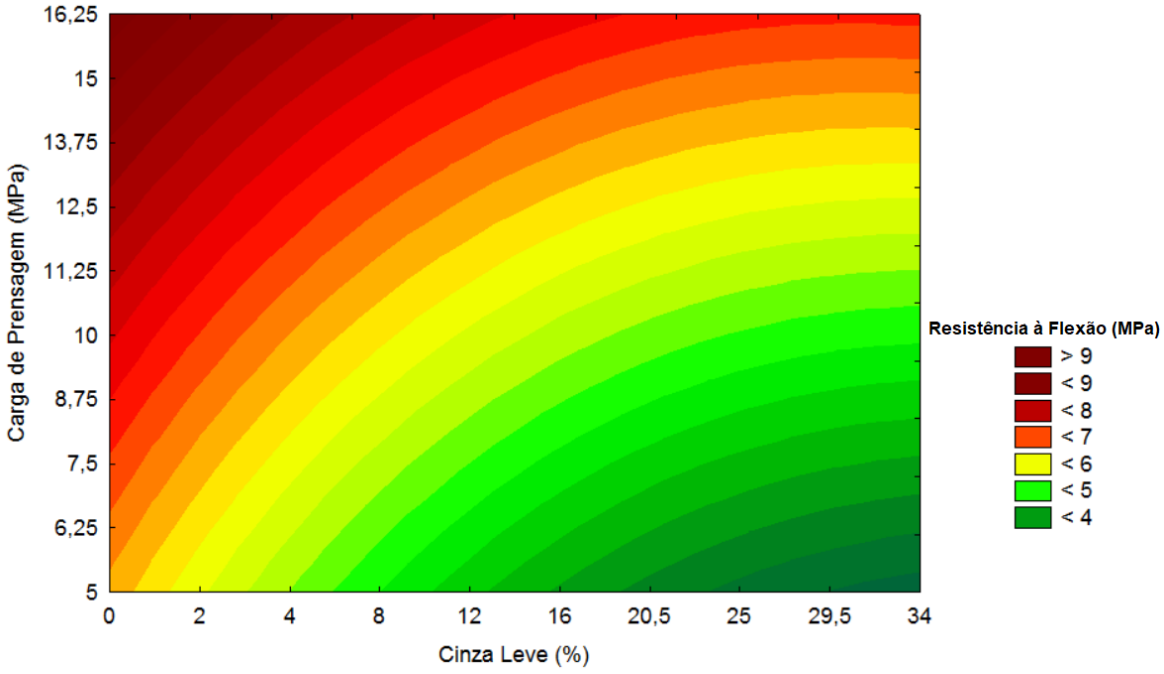


Figura 32 – Perfil da resistência à flexão em função da fração mássica de cinza pesada (%) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

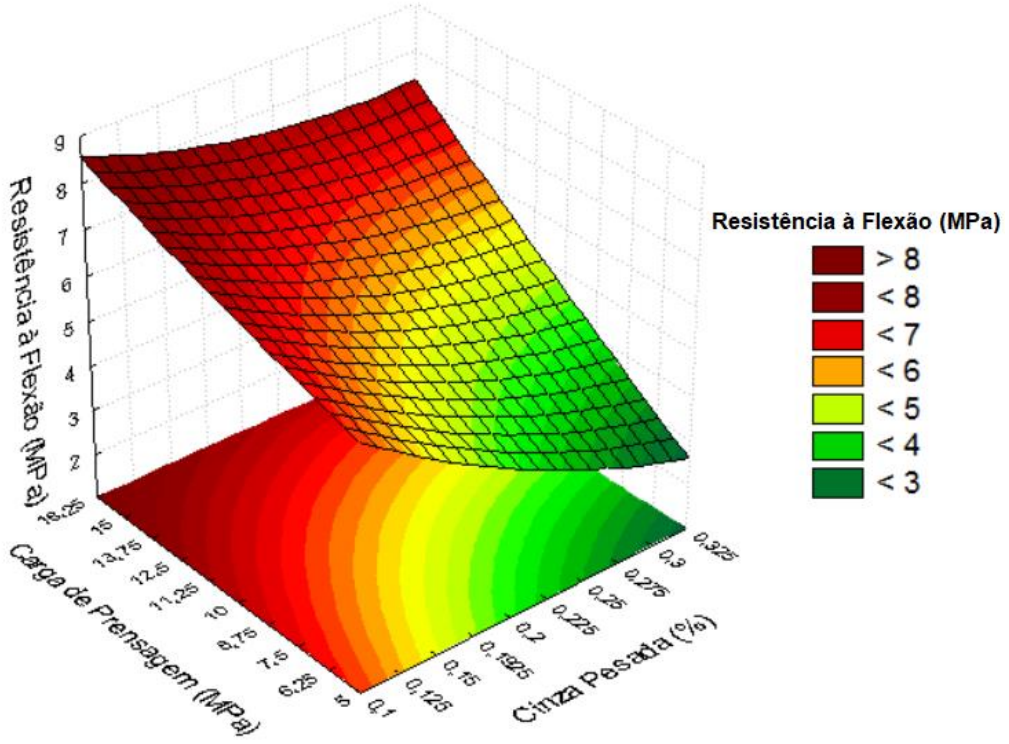


(a)

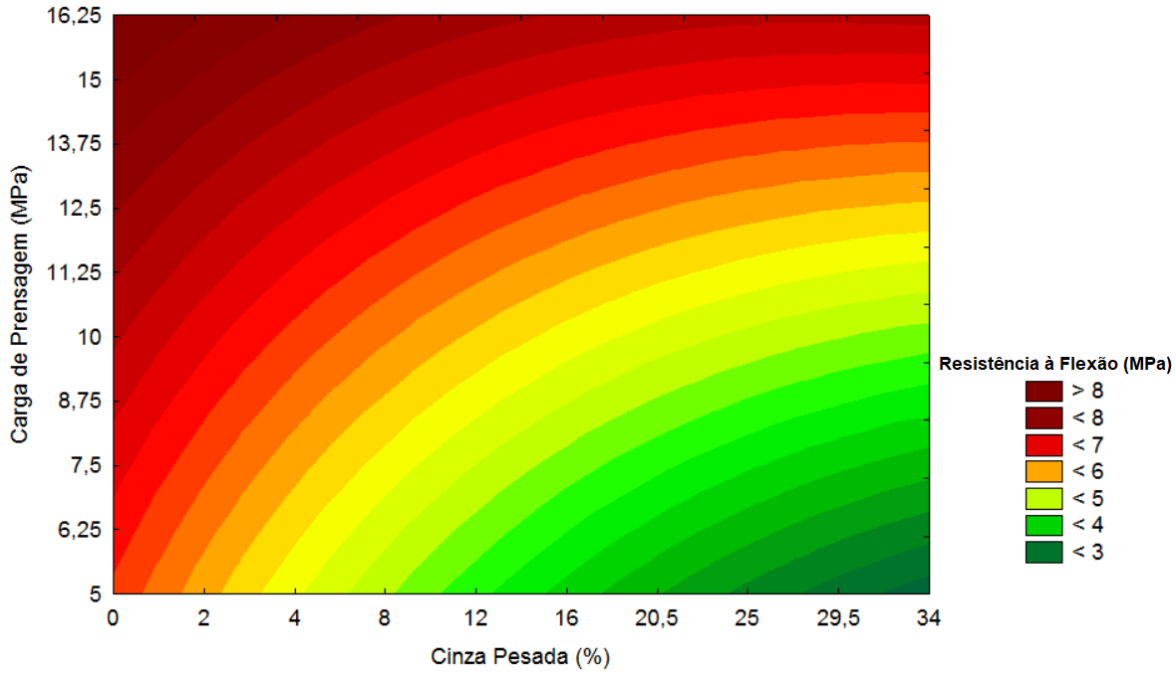


(b)

Figura 33 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno



(a)



(b)

Figura 34 – Perfil da resistência à flexão em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – relação água/gesso em 0,20 e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

4.3.4 Taxa de absorção de água

Os resultados experimentais para taxa de absorção de água dos corpos de prova estão dispostos no apêndice A dessa dissertação. Os referidos dados foram submetidos a análise de variância cujos resultados estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise de Variância para taxa de absorção de água do gesso/cinza

Fatores	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	$F_{95\%}$	Valor-P	R^2	Falta de Ajuste
kg água / kg Gesso (linear)	1	23,9843	23,9843	118,6106	0,001657	-	-
kg água / kg Gesso (quadrático)	1	16,9325	16,9325	83,7371	0,002759	-	-
Cinza Leve (%) (linear)	1	107,0200	107,0200	529,2505	0,000180	-	-
Cinza Leve (%) (quadrático)	1	0,2839	0,2839	1,4040	0,321368	-	-
Cinza Pesada (%) (linear)	1	0,1191	0,1191	0,5888	0,498743	-	-
Cinza Pesada (%) (quadrático)	1	19,5736	19,5736	96,7982	0,002232	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (linear)	1	16,2415	16,2415	80,3200	0,002932	-	-
Carga de Prensagem (MPa) (quadrático)	1	0,5876	0,5876	2,9060	0,186794	-	-
1L by 2L	1	0,9266	0,9266	4,5822	0,121784	-	-
1L by 3L	1	0,0027	0,0027	0,0133	0,915330	-	-
1L by 4L	1	6,2152	6,2152	30,7361	0,011570	-	-
2L by 3L	1	0,0016	0,0016	0,0078	0,935232	-	-
2L by 4L	1	6,3946	6,3946	31,6236	0,011120	-	-
3L by 4L	1	0,0589	0,0589	0,2913	0,626870	-	-
Falta de Ajuste	10	37,8534	3,7853	18,7198	0,017210	-	-
Erro Puro	3	0,6066	0,2022	-	-	-	-
Total	27	230,8239	-	-	-	**0,83338**	**0,65394**

Segundo os dados da Tabela 10, o coeficiente de regressão (R^2) para o modelo estatístico que descreva a resistência à compressão foi considerado satisfatório, explicando 83,34 % da variância e um coeficiente de ajuste de 65,39 % para os experimentos. Conclui-se, então, que o modelo quadrático pode descrever de forma eficiente a taxa de absorção de água dos corpos de prova.

O diagrama de pareto (Figura 35), apresenta de forma objetiva os efeitos que são estatisticamente significativos para a absorção de água. Percebe-se que os efeitos lineares de cinza leve (%), relação água/gesso, carga de prensagem (MPa), além dos efeitos quadráticos cinza pesada (%) e relação água/gesso são estatisticamente significativos. A Figura 35 também indica efeitos de segunda ordem, pois há dois efeitos de interação entre as variáveis: uma entre cinza leve (%) e carga de prensagem (MPa) e outra entre relação água/gesso e carga de prensagem (MPa).

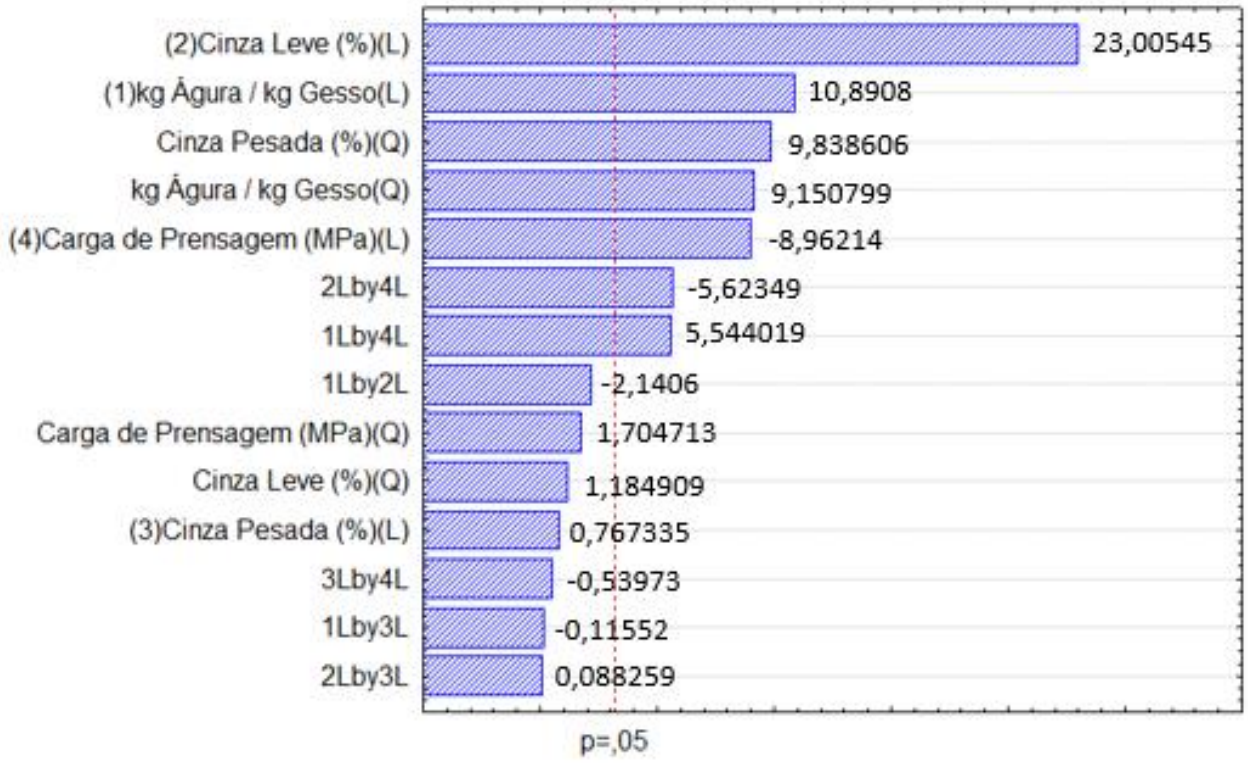


Figura 35 – Diagrama de pareto para os efeitos padronizados (taxa de absorção de água)

A estimativa da variável resposta (taxa de absorção de água) pode ser feita a partir de uma combinação quadrática das variáveis originais codificadas. Seus coeficientes são calculados pelo método dos mínimos quadrados e apenas os efeitos estatisticamente significativos são incluídos no modelo estatístico.

A Tabela 11 mostra os coeficientes de regressão dos efeitos considerados significativos, com 95 % de nível de confiança.

Tabela 11 – Coeficientes de regressão dos fatores significativos para taxa de absorção de água

Fatores	Coeficientes	Erro Padrão	Intervalos de Confiança	
			- 95 %	+ 95 %
Média / Interação	19,29205	0,224839	18,57652	20,00759
(1) kg água / kg Gesso (linear)	-0,99967	0,091790	-1,29179	-0,70756
kg água / kg Gesso (quadrático)	0,83995	0,091790	0,54784	1,13207
(2) Cinza Leve (%) (linear)	2,11167	0,091790	1,81956	2,40379
Cinza Pesada (%) (quadrático)	0,90309	0,091790	0,61097	1,19520
(4) Carga de Prensagem (MPa) (linear)	-0,82264	0,091790	-1,11475	-0,53052
1L by 4L	0,62326	0,112420	0,26549	0,98103
2L by 4L	-0,63219	0,112420	-0,98996	-0,27442

Com isso, o modelo estatístico que descreve a taxa de absorção de água dos corpos de prova de gesso e cinza pode ser representado pela Equação 10:

$$Y = 19{,}292 - 0{,}999x_1 + 0{,}839x_1^2 + 2{,}112x_2 + 0{,}903\,x_3^2 - 0{,}822x_4 + 0{,}623x_1x_4 - 0{,}632x_2x_4 \quad (10)$$

Sendo: Y = Absorção de água (%); x_1 = kg Água/kg Gesso; x_2 = Fração Mássica de Cinza Leve (%); x_3 = Fração Mássica de Cinza Pesada (%); x_4 = Carga de Prensagem (MPa).

Com o conhecimento do modelo que descreve a taxa de absorção de água dos corpos de prova, foi possível comparar os valores estimados e os valores experimentais através de um gráfico (Figura 36). Pode ser observado neste gráfico que os pontos experimentais estão distribuídos homogeneamente em torno da reta que representa os valores estimados para a taxa de absorção de água.

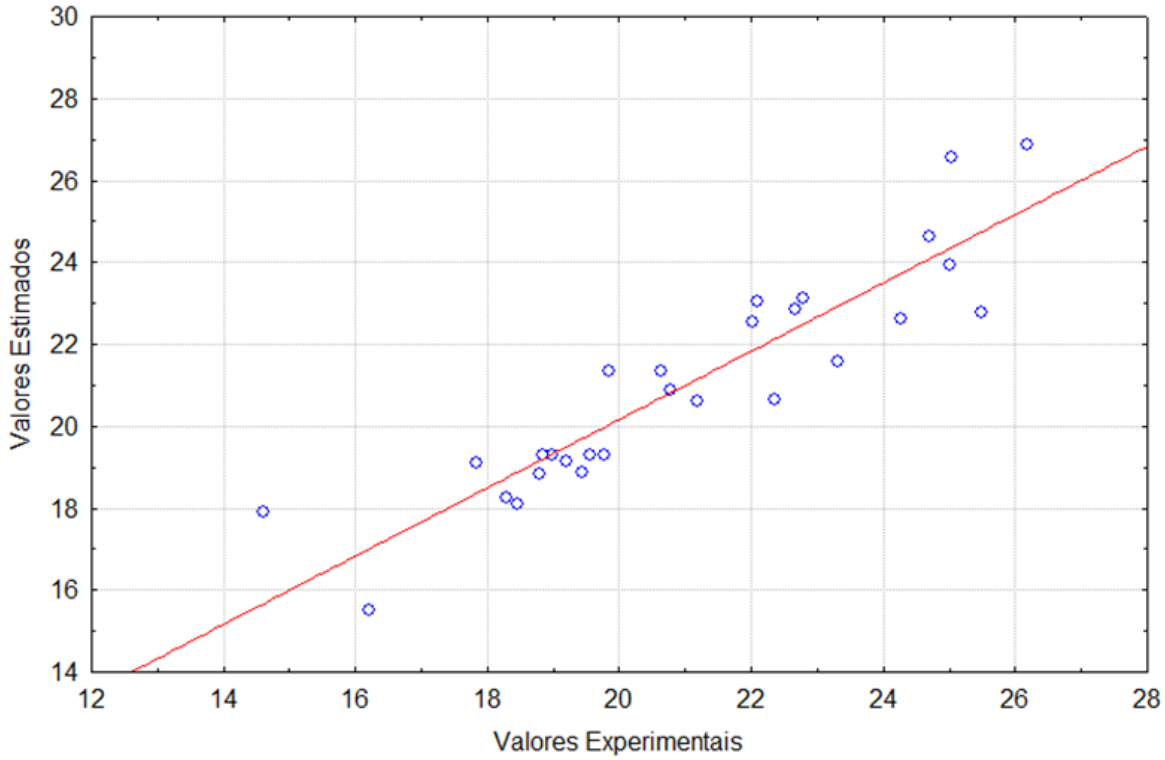


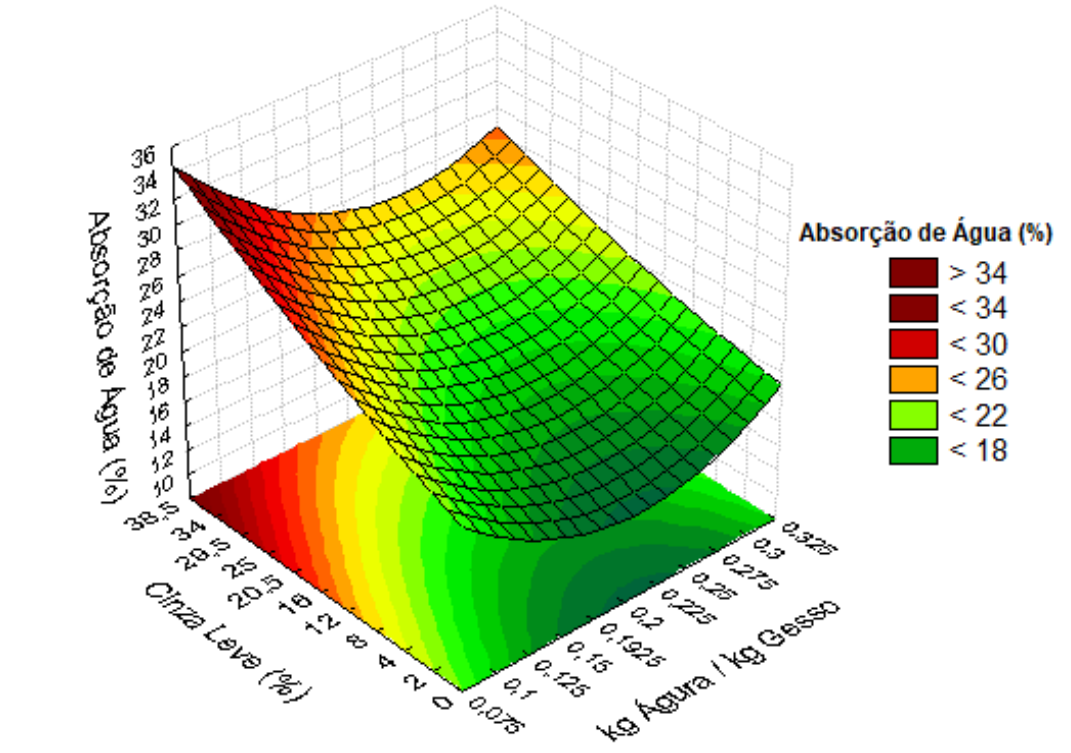
Figura 36 – Comparação entre os valores experimentais e estimados para taxa de absorção de água

As superfícies de resposta elaboradas para a taxa de absorção de água (Figura 37 a 42) foram geradas em pares de variáveis, fixando as outras duas nos respectivos pontos centrais. Ao observar todos as superfícies de resposta, constatou-se que as menores taxas de absorção de água dos corpos de prova ficaram na região onde a carga de prensagem é máxima (nível +2), a relação água/gesso em torno do ponto central (nível 0), a quantidade de cinzas pesada em torno do ponto central (nível 0) e a quantidade de cinza leve é mínima (nível -2).

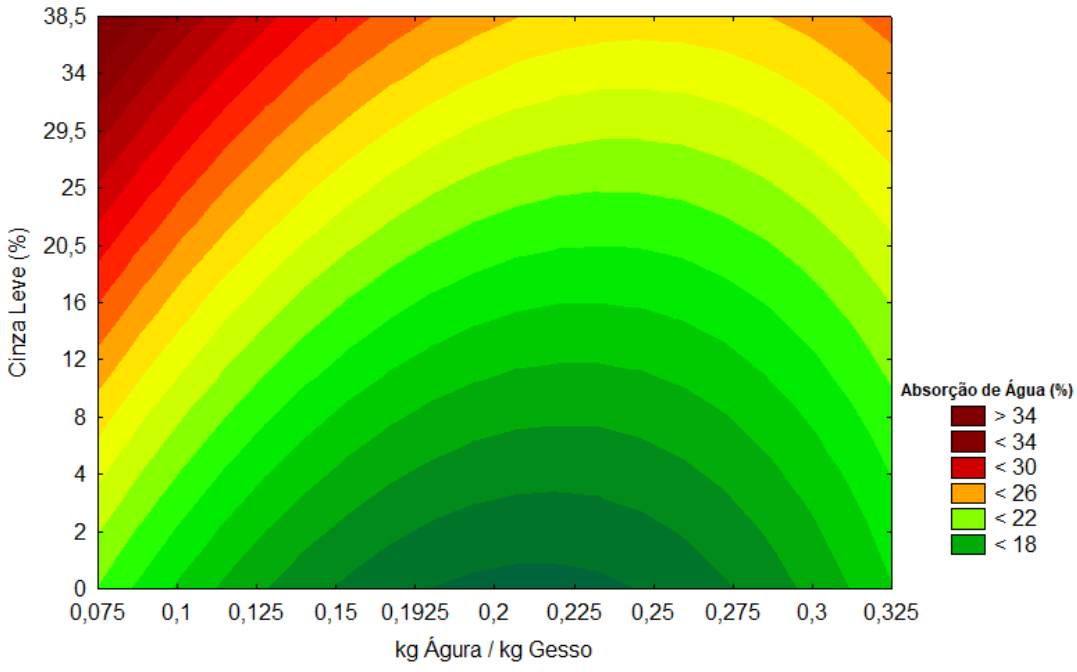
A partir da metodologia de superfície de resposta, pode ser estimado as condições para otimizar a variável em questão. O ponto ótimo para se formular um gesso cinza com a menor taxa de absorção de água e a maior quantidade de cinzas no gesso é quando a relação água/gesso é 0,20, a carga de prensagem é de 15 MPa, a fração de cinza leve é de 34 % e a fração de cinza pesada é de 16 %, podendo possuir um valor de 19,40 % de absorção de água, considerando 95 % de nível de confiança.

Ensaios realizados com pré-moldados de gesso convencionais mostraram que a taxa de absorção média para esse material é igual a 30,2 ± 0,7 %. A taxa de absorção de água observada nos corpos de prova de gesso e cinza foram menores,

em relação aos convencionais, por conta da operação de prensagem mecânica que promove a compactação dos cristais de gesso, desta forma a peça passa a possuir menos espaços vazios, diminuindo a quantidade de água que pode ser absorvida por ela.

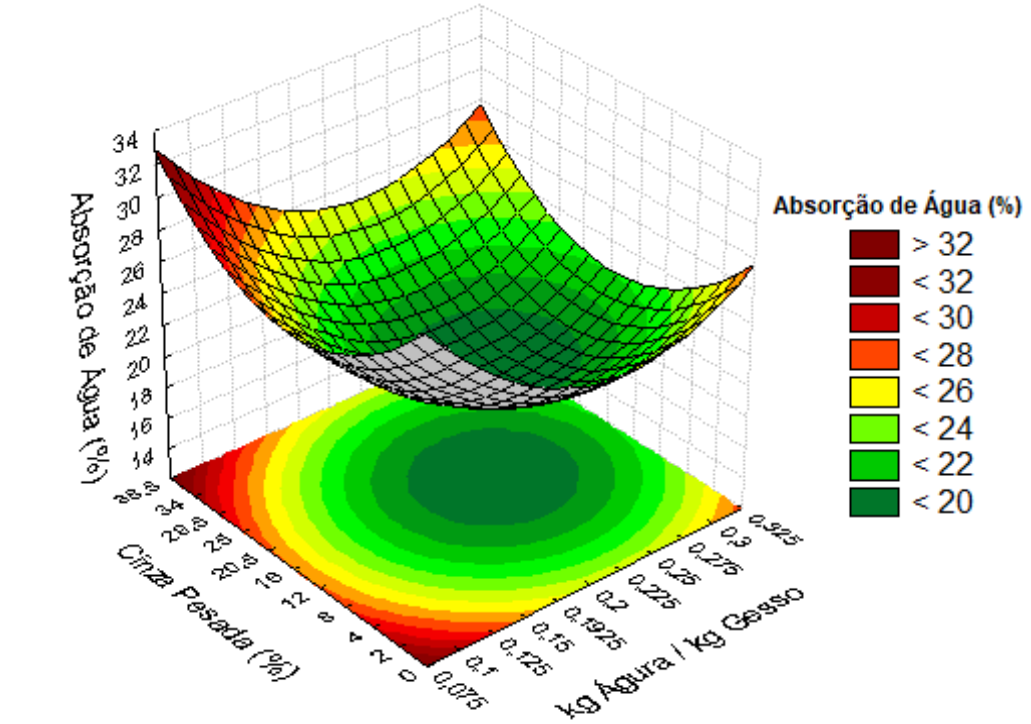


(a)

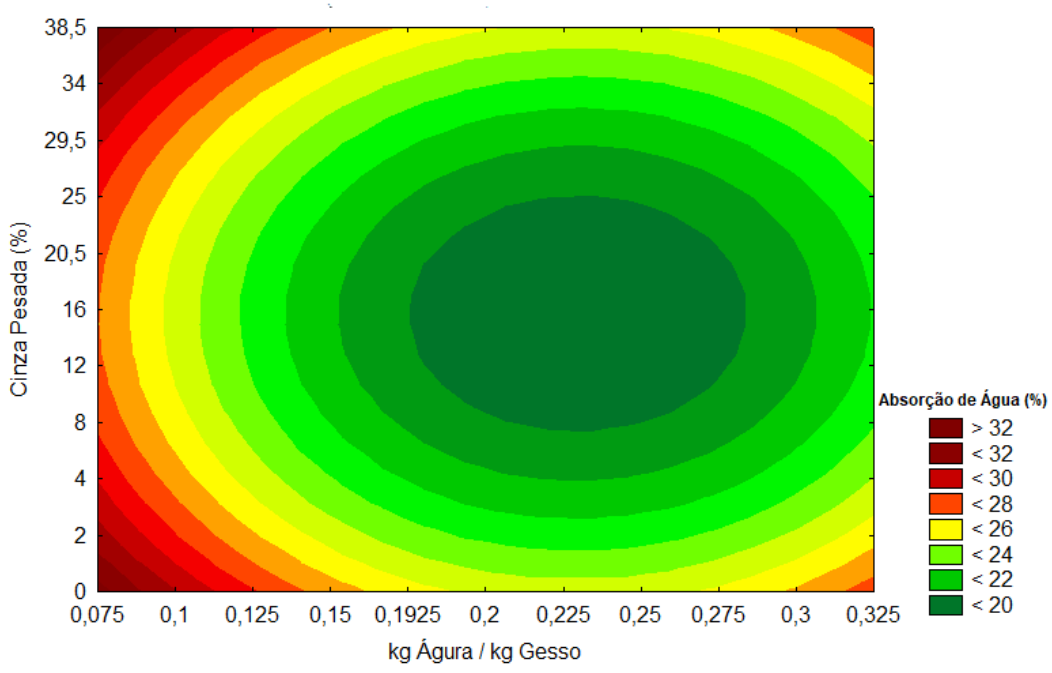


(b)

Figura 37 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza leve (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

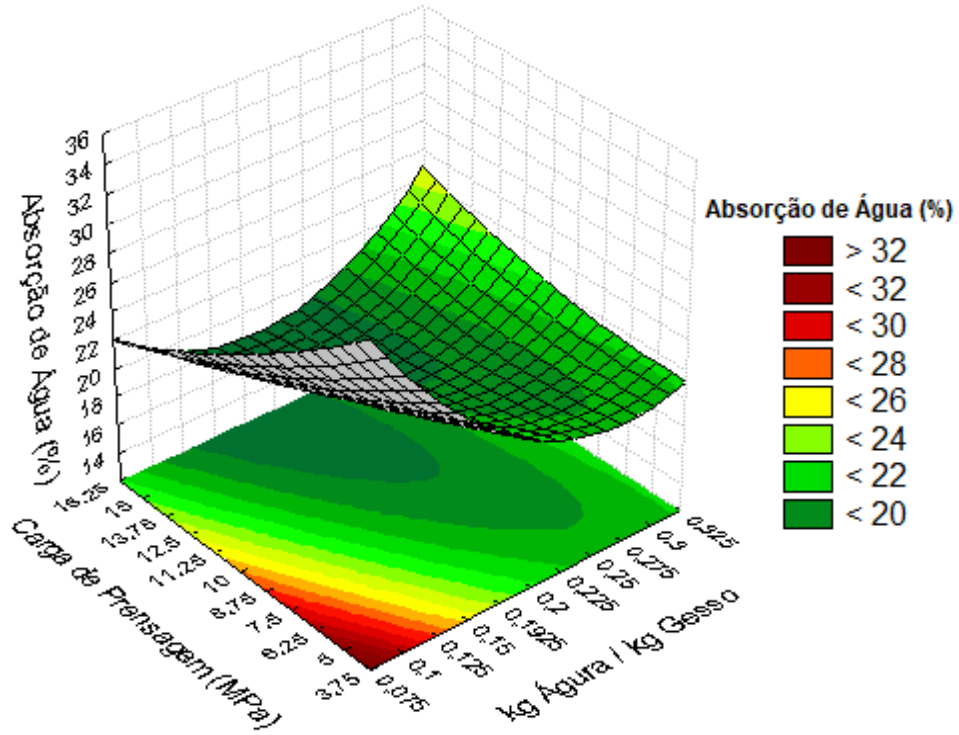


(a)

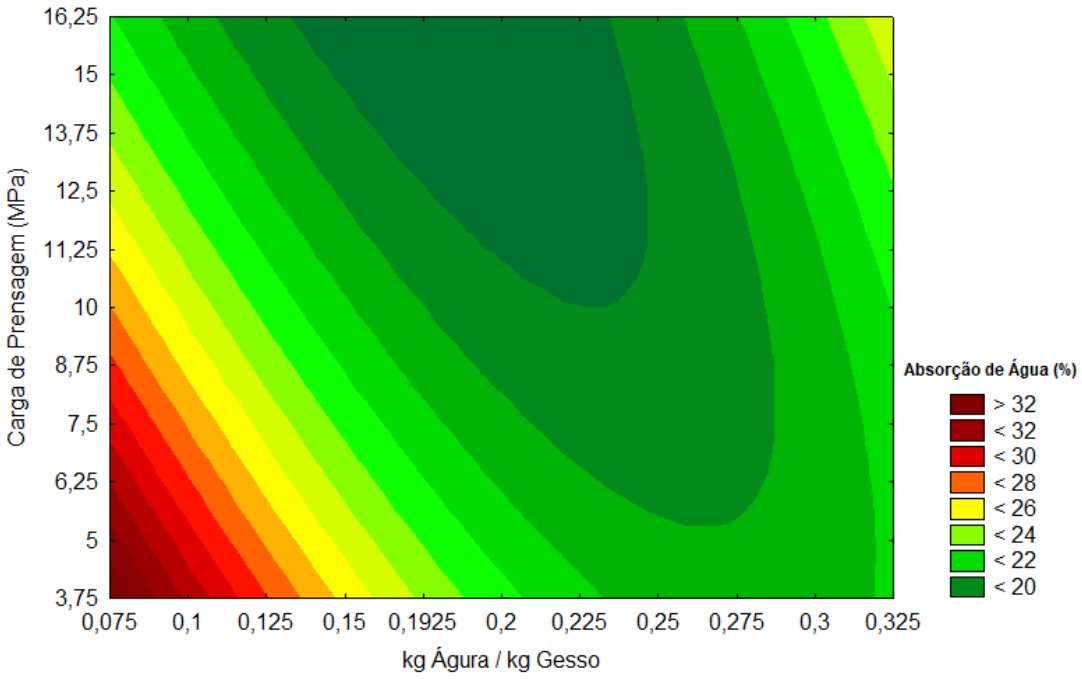


(b)

Figura 38 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza pesada (%) e relação água/gesso (parâmetros fixados – carga de prensagem em 10 MPa e fração mássica de cinza leve em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

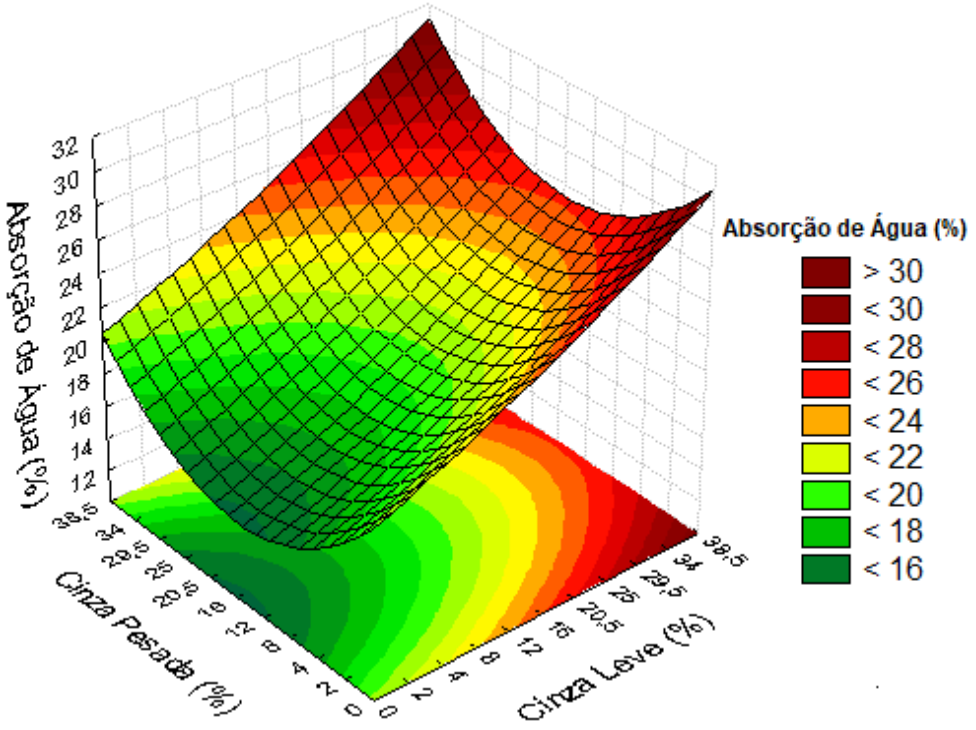


(a)

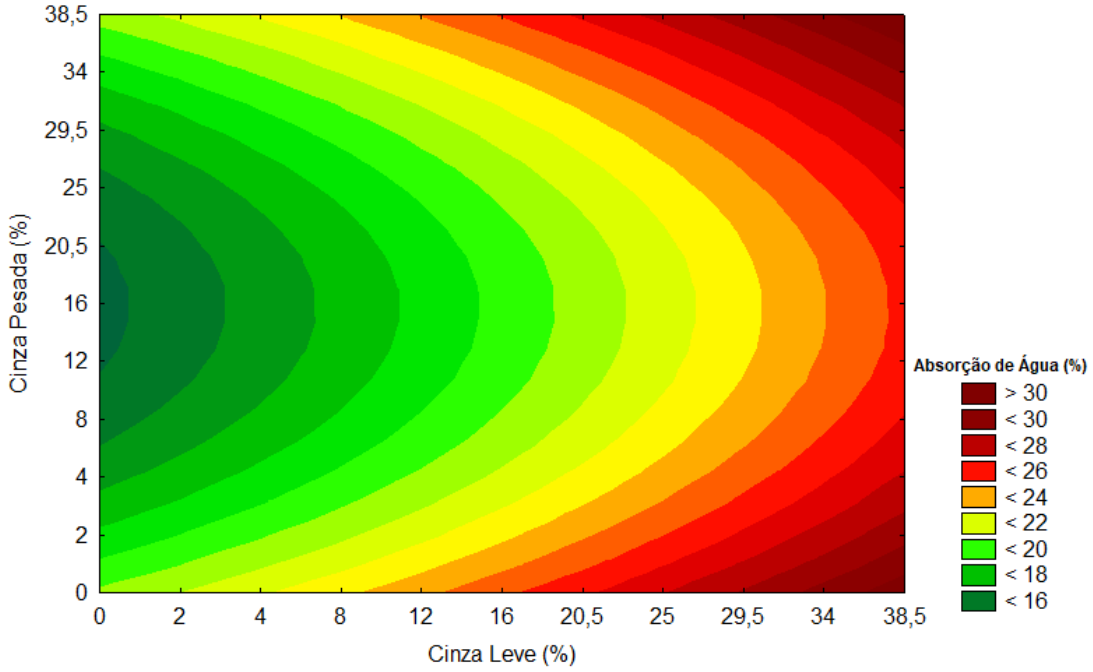


(b)

Figura 39 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e relação água/gesso (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e fração mássica de cinza pesada em 16 %). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

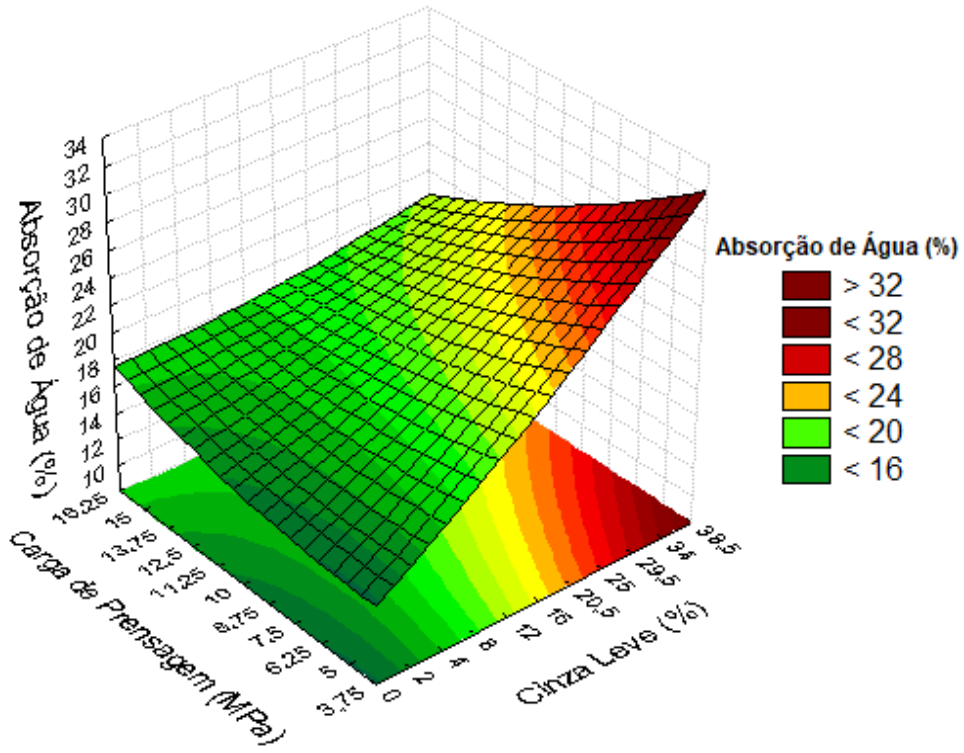


(a)

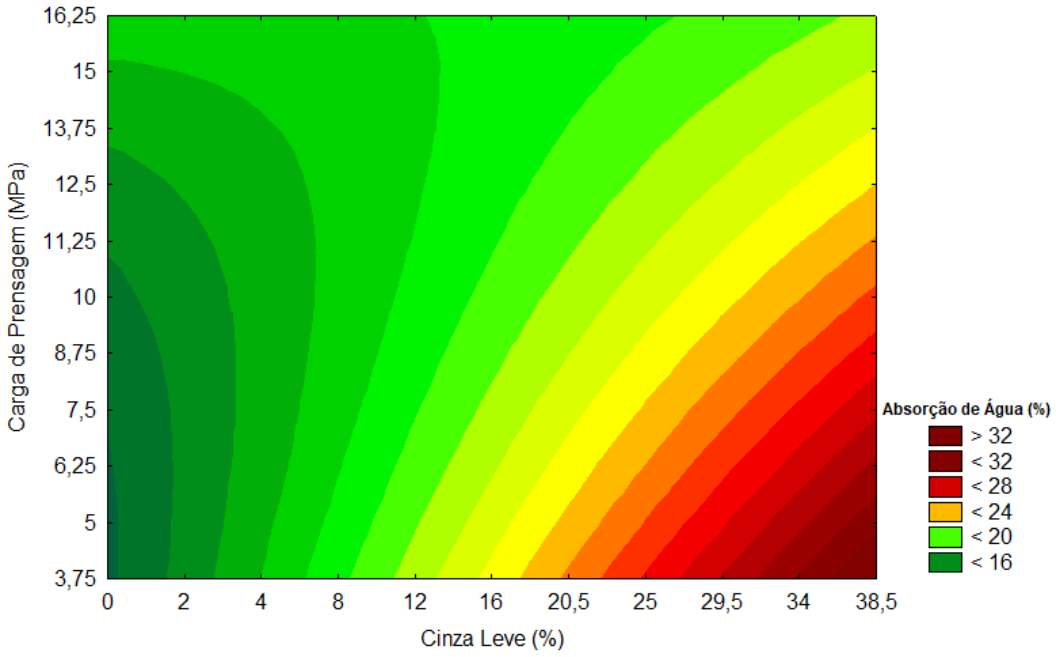


(b)

Figura 40 – Perfil da taxa de absorção de água em função da fração mássica de cinza leve (%) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – Carga de prensagem em 10 MPa e relação água/gesso em 0,20). (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

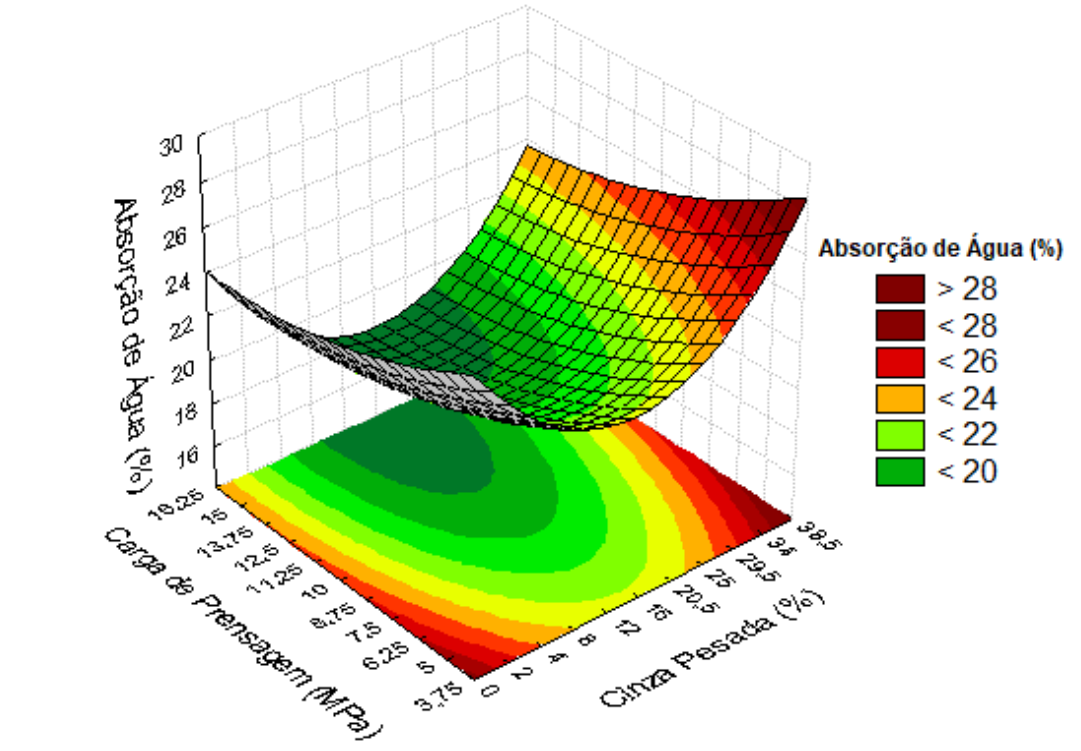


(a)

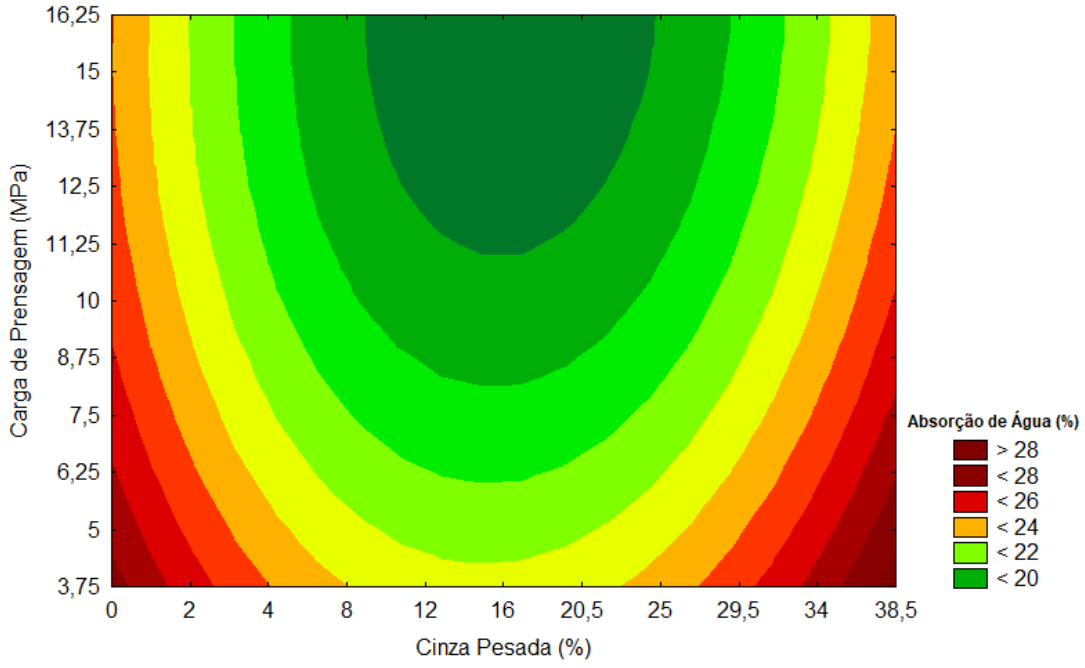


(b)

Figura 41 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza leve (%) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza pesada em 16 % e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno



(a)



(b)

Figura 42 – Perfil da taxa de absorção de água em função da carga de prensagem (MPa) e fração mássica de cinza pesada (%) (parâmetros fixados – fração mássica de cinza leve em 16 % e relação água/gesso em 0,20. (a) Superfície de resposta. (b) Curvas de contorno

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 Conclusões

Através dos resultados, conclui-se que o compósito desenvolvido neste trabalho, obtido a partir de 25% em massa de cinza leve, 25% em massa de cinza pesada e 50% em massa de gesso beta, relação água/gesso de 0,25 e carga de prensagem de 12,5 MPa, apresentou resultados superiores em relação ao gesso convencional em termos dos seus principais parâmetros técnicos (resistência à compressão, resistência à flexão e taxa de absorção de água).

De acordo com os resultados, pode-se concluir que a variável mais relevante no estudo foi a carga de prensagem uniaxial. Do ponto de vista técnico, corpos de prova formulados com o compósito de gesso e cinzas, confeccionados com altas cargas de prensagem uniaxial promovem a compactação das partículas de cinza e dos cristais de gesso, diminuindo os espaços vazios na microestrutura, tornando-os mais resistentes em termos mecânicos, além de absorverem menos água em relação aos pré-moldados de gesso convencionais.

Levando em consideração a questão da sustentabilidade, a relação água/gesso também é um fator importante para a produção de pré-moldados de gesso e cinza, pois a relação água/gesso, que definiram os melhores resultados (0,20 a 0,25) para as propriedades estudadas, é inferior a quantidade utilizada por pré-moldados de gesso convencionais, que é de 0,70. Dessa forma, a produção industrial de gesso combinado às cinzas, nas mesmas condições estudadas neste trabalho, pode representar uma grande economia de água para formular produtos com propriedades físico-químicas e mecânicas mais atraentes que a dos pré-moldados de gesso convencionais.

Os resultados também mostraram que pode ser adicionado até 50 % em massa de cinzas no gesso sem comprometer tecnicamente as propriedades físico-químicas e mecânicas do material. Neste contexto, as cinzas provenientes da queima de carvão mineral representam uma alternativa promissora em termos ambientais pela sua redução em aterros sanitários. Já em questões econômicas, utilizar metade de cinzas na composição de um pré-moldado significa reduzir de forma significativa o custo com matéria prima.

Também pôde ser concluído que as cinzas funcionam como acelerador de pega, ou seja, os pré-moldados formulados com gesso e cinza necessitam de menos tempo para endurecer em relação aos convencionais, este item pode ser considerado como uma vantagem por otimizar o tempo de aplicação do material, porém, também pode ser considerado uma desvantagem pela possibilidade de aumentar o desperdício, pelo pouco tempo disponível para manipular a pasta da mistura (compósito).

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Frente às conclusões, podem ser listadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de gesso reciclado proveniente de resíduo da construção e demolição (RCD) na obtenção de um compósito formado por gesso RCD e cinzas de carvão mineral;
- Fazer um estudo de viabilidade econômica, no que tange a logística das cinzas e custo de operação para a produção industrial do compósito proposto.
- Uma melhor caracterização do gesso em termos microscópicos, sobretudo a aplicação da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observar as mudanças dos cristais de gesso nos diferentes corpos de prova;
- Analisar a aplicação de aditivos químicos no novo compósito para melhorar algumas propriedades físico-químicas e mecânicas da peça.

REFERÊNCIAS

AKADIRI, P. O. Understanding barriers affecting the selection of sustainable materials in building projects. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 86–93, 2015.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, p. 315-376, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6220. **Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, densidadede massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida**. Rio de Janeiro: 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12127. **Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do Pó**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12128. **Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da Pasta**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12129. **Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12142. **Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro: 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12653. **Materiais - Pozolanicos**. Rio de Janeiro: 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004. **Resíduo sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13207. **Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: 1994.

AVELAR, T. **Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir De Gesso de Baixo Desempenho Mecânico**. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UNICAP, 2012.

BALTAR, L. M.; BALTAR, C. A. M.; BENACHOUR, M. Effect of carboxymethylcellulose on gypsum re-hydration process. **International Journal of Mineral Processing**, v. 125, p. 5–9, 2013.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V; SANTOS, G. A.; JUAZEIRO, C. Caracterização química , mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, v. 60, n. 356, p. 501–508, 2014.

BISSOLI-DALVI, M.; DE ALVAREZ, C. E.; HOFMAN, I. D. O.; FUICA, G. E. S. Sistematização de indicadores de sustentabilidade como ferramenta auxiliar ao projetista na seleção dos materiais de construção. **Arquitetura Revista**, v. 9, n. 2, p. 99–111, 2013.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 13, n. Series B, p. 1–45, 1951.

BRISTOT, V. M.; GRUBER, V.; BRISTOT, V.; GRUBER, V.; FILHO, L. Estudo para Utilização de Prensagem Uniaxial de Ação Simples para Compactação de Corpos Moedores Utilizada na Indústria de Placas de Revestimento Cerâmico. **Revista Iberoamericana de ingeniería Mecánica**, v. 18, n. 1, p. 47–55, 2014.

DEPOI, F. S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W. D. Caracterização de Carvões e suas Cinzas Provenientes da Região Sul do Brasil Resultados e Discussão. **25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, 2005.

DIAS, D.; MOREIRA, C. Compósitos De Gesso Reforçados Com Fibra De Curauá E Mucilagem Da Babosa - Ensaio De Absorção. **XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2012.

DNPM. **Sumário Mineral 2015**. v. 35. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 135 p., 2015.

GAN, X.; ZUO, J.; YE, K.; SKITMORE, M.; XIONG, B. Why sustainable construction? Why not? An owner's perspective. **Habitat International**, v. 47, p. 61–68, 2015.

GHAFFARI-MOGHADDAM, M.; YEKKE-GHASEMI, Z.; KHAJEH, M.; RAKHSHANIPOUR, M.; YASIN, Y. Application of response surface methodology in enzymatic synthesis: A review. **Russian Journal of Bioorganic Chemistry**, v. 40, n. 3, p. 252–262, 2014.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE, L. F. De; SÜFFERT, T. Carvão fóssil. **Estudos Avançados**, v. 12, n. 33, p. 89–106, 1998.

GONÇALVES, I.; FERRAZ, A. Estudo do Efeito de Materiais Impermeabilizantes de Origem Vegetal na Pasta de Gesso. **Evolvere Scientia**, v. 3, n. 1, p. 76–83, 2014.

HISERODT, E. Types of coal. **The new American**, v. 28, n. 6, p. 14, 2012.

HUANG, M.; HUNG, Y.; YANG, Z. Validation of a method using Taguchi , response surface , neural network , and genetic algorithm. **Measurement**, v. 94, p. 284–294, 2016.

IZIDORO, J.; FUNGARO, D. Utilização de Resíduos de Usinas Termoelétricas a Carvão na Síntese de Zeólitas e sua Aplicação na Remoção de Zn 2+ e Cd 2+ em Água. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 9, n. 3, p. 101–106, 2007.

KATSNEL'SON, L. M.; KERBEL', B. M. Determination of the Optimal Uniaxial Pressing Pressure for Ceramic Powders. **Glass and Ceramics**, v. 70, n. 9–10, p. 319–323, 2014.

LOPES, L. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, RJ: PUC-Rio, 2011.

MACÊDO, A.; MARTINS, M. A Sustentabilidade Urbana sob a Ótica da Construção Civil: Um Estudo nas Empresas Construtoras de Campina Grande-PB. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 139–157, 2015.

MATSINHE, J. V.; MARTINS, G. M.; LINHARES, R. H.; RIELLA, H. G.; KUHNEN, N. C.; UAMUSSE, M. M. Uso de Cinza Pesada Resultante da Queima de Carvão Mineral na Formulação de Materiais Vítreos: Efeito de Fundantes. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo. **Anais**... São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

NOGUEIRA, J. **RECICLANDO CINZAS Estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado.** Dissertação de Mestrado. São Carlos, SP: USP, 2011.

OLIVEIRA, M.; BARBOSA, N.; TORRES, S.; LEAL, A.; SILVA, C. Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 684–689, 2012.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 729–737, 2013.

PILKINGTON, J. L.; PRESTON, C.; GOMES, R. L. Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) towards efficient extraction of artemisinin from Artemisia annua. **Industrial Crops & Products**, v. 58, p. 15–24, 2014.

REAL, J. **Determinação de condições operacionais adequadas para produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica**. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UNICAP, 2009.

RIVERO, A.; BÁEZ, A.; NAVARRO, J. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. **Construction and Building Materials**, v. 55, n. 2014, p. 146–152, 2014.

ROCHA, C. A. F. J.; SANTOS, S. C. A.; SOUZA, C. A. G.; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. F. Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. **Cerâmica**, v. 58, n. 345, p. 43–52, 2012.

ROJEK, J.; NOSEWICZ, S.; JURCZAK, K.; CHMIELEWSKI, M.; BOCHENEK, K.; PIETRZAK, K. Discrete element simulation of powder compaction in cold uniaxial pressing with low pressure. **Computational Particle Mechanics**, v. 3, n. 4, p. 513–524, 2016.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 275–279, 2012.

SKORONSKI, E.; SOUZA, D. H.; SANTOS, S. dos; CESINO, J. C.; GHISLANDI, M. G. Avaliação das propriedades físicas de revestimentos cerâmicos produzidos com resíduo da indústria cerâmica (cinza pesada de carvão mineral). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 239–244, 2015.

SOARES, J. **Estudo microestrutural do gesso-alfa produzido pelo processo hidrotérmico e calcinação a seco e sua influência nas propriedades mecânicas pós hidratação**. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UFPE, 2005.

TESKE, S.; GONÇALVES, P. F. A.; NAGALLI, A. Desenvolvimento de modelo conceitual de telha ecológica a partir de resíduos de PET e gesso da construção. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 190–198, 2015.

TRETTO, D. O que é Sustentabilidade. **Revista de Administração de Roraima**, v. 4, n. 2, p. 115–117, 2014.

WASEM, A.; BÔER, S. C.; SABEDOT, S.; CUNHA, A. C. B. da. Adsorção de nitrogênio amoniacal de efluentes industriais pela zeólita Na-P1 sintetizada a partir da cinza pesada de carvão mineral. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 193–202, 2015.

WITEK-KROWIAK, A.; CHOJNACKA, K.; PODSTAWCZYK, D.; DAWIEC, A.; POKOMEDA, K. Bioresource Technology Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 150–160, 2014.

WU, P.; XIA, B.; PIENAAR, J.; ZHAO, X. The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review. **Building and Environment**, v. 77, p. 160–168, 2014.

ZANIN, T. L.; KLITZKE, W.; LUZ JR., L. F. L. Estudo da influência da adição de cinzas de carvão mineral nas propriedades da cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 231–234, 2013.

APÊNDICE

APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tabela A1 - Resultados experimentais do DCCR referentes às propriedades do compósito gesso/cinza

Ensaio	Fatores				Respostas		
	kg Água/kg Gesso	Cinza Leve (%)	Cinza Pesada (%)	Carga de Prensagem (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Taxa Absorção de Água (%)
01	0,15	8	8	7,5	14,11	6,22	21,19
02	0,15	8	8	12,5	19,43	7,58	17,85
03	0,15	8	25	7,5	12,00	5,68	20,78
04	0,15	8	25	12,5	9,36	5,96	19,20
05	0,15	25	8	7,5	4,69	4,89	25,03
06	0,15	25	8	12,5	10,61	4,63	22,02
07	0,15	25	25	7,5	7,35	3,57	26,17
08	0,15	25	25	12,5	7,00	5,32	24,27
09	0,25	8	8	7,5	19,28	7,26	14,61
10	0,25	8	8	12,5	18,76	8,35	19,43
11	0,25	8	25	7,5	12,88	5,44	18,47
12	0,25	8	25	12,5	15,25	6,37	18,79
13	0,25	25	8	7,5	12,44	5,51	22,66
14	0,25	25	8	12,5	14,26	6,30	19,84
15	0,25	25	25	7,5	7,44	3,25	22,80
16	0,25	25	25	12,5	10,37	5,36	20,62
17	0,10	34	16	10	3,83	3,25	24,70
18	0,30	34	16	10	9,48	4,25	22,36
19	0,20	0	16	10	14,95	6,77	16,21
20	0,20	34	16	10	8,79	5,59	25,01
21	0,20	16	0	10	14,23	6,98	25,48
22	0,20	16	34	10	8,70	4,33	22,09
23	0,20	16	16	5	4,87	3,12	23,31
24	0,20	16	16	15	16,17	7,66	18,29
25	0,20	16	16	10	13,42	5,38	18,98
26	0,20	16	16	10	12,76	5,36	19,57
27	0,20	16	16	10	15,07	6,31	19,77
28	0,20	16	16	10	12,59	5,79	18,85