



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO – UNICAP
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**PRODUÇÃO DE BLOCO DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO
MINERAL ADITIVADOS COM SAL ORGÂNICO À BASE DE ÓLEOS
VEGETAIS**

RAFAEL FILGUEIRA AMARAL

Recife – PE

Julho, 2023

RAFAEL FILGUEIRA AMARAL

**PRODUÇÃO DE BLOCO DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO
MINERAL ADITIVADOS COM SAL ORGÂNICO À BASE DE ÓLEOS
VEGETAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Recife – PE

Julho, 2023

A485p Amaral, Rafael Filgueira
 Produção de bloco de gesso e cinzas de carvão
 mineral aditivados com sal orgânico à base de óleos
 vegetais / Rafael Filgueira Amaral, 2023
 76 f. : il.

 Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de
 Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia
 Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2023.

 1. Gesso. 2. Cinza de carvão. 3. Sustentabilidade.
 4. Construção sustentável. I. Título.

 CDU 691.55

 Luciana Vidal - CRB 4/1338

**PRODUÇÃO DE BLOCO DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO
MINERAL ADITIVADOS COM SAL ORGÂNICO À BASE DE ÓLEOS
VEGETAIS**

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL FILGUEIRA AMARAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Civil.

Aprovado em: 07/07/2023

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Orientador e Presidente da Banca



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Titular Interno



Prof. Dr. Juliano Rodrigues Pappalardo
Titular Externo

Recife – PE

Julho, 2023

“Não há nada nobre em ser superior ao seu semelhante. A verdadeira nobreza é ser superior ao seu antigo eu”.

Ernest Hemingway

PRODUÇÃO DE BLOCO DE GESSO E CINZAS DE CARVÃO MINERAL ADITIVADOS COM SAL ORGÂNICO À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS

RESUMO

Um dos grandes desafios da humanidade é racionalizar o uso dos recursos ambientais, de forma a não comprometer a existência de gerações futuras – elaboração de processos e produtos sustentáveis. O gesso possui propriedades, como disponibilidade obtida de matérias-primas baratas, estabilidade volumétrica, isolamento acústico e térmico, resistência a incêndio, toxicidade baixa, entretanto, possui baixa resistência à absorção de água. Esta pesquisa teve como objetivo a racionalização de um processo de produção de bloco de divisória de gesso e cinzas de carvão mineral, aditivado com um sal orgânico à base de óleos essenciais, comercialmente denominado de DS-328 (Baba de Cupim Sintética) e Sulfato de Alumínio. Esse aditivo foi utilizado visando-se o emprego de bloco de divisórias, base de gesso, para áreas úmidas de edificações. Em razão da redução da quantidade de gesso foi essencial garantir o teor de semi-hidrato no gesso igual ou maior que 85,0%. As propriedades dos corpos de prova confeccionados foram avaliadas com auxílio de um planejamento experimental do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), através da aplicação do software STATISTICA da StatSoft, Versão 12. O compósito proposto teve seus corpos de prova a partir do endurecimento da pasta com uma relação água/gesso de 60% m/m (< teor água/gesso que a convencional). A formulação do compósito mostrou dependência com o tipo de variável resposta. Dessa forma, em média pode-se listar valores de: tempo de pega (TP) = 10,15 min; Resistência à compressão (RC) = 13,29 MPa e; Absorção de água (AA) = 11,65%. A adição do DS-328, auxiliado quimicamente com o sulfato de alumínio comercial (função de estabilização química), aumentou a resistência à compressão e melhorou o caráter hidrófobo do compósito em relação às propriedades do gesso puro. Os resultados obtidos com a mistura gesso-CCM aditivada com DS-328 levaram à redução do consumo de gesso por aproveitamento das cinzas de carvão mineral (passivo ambiental), dando origem a um novo material de blocos de divisória para áreas úmidas.

Palavras-chave: Bloco de gesso, Sustentabilidade, Gesso beta, Cinzas de carvão mineral, DS-328, DCCR.

PRODUCTION OF PLASTER BLOCK AND MINERAL CHARCOAL ASH ADDITIVE WITH ORGANIC SALT BASED ON VEGETABLE OILS

ABSTRACT

One of humanity's great challenges is to rationalize the use of environmental resources, so as not to compromise the existence of future generations – elaboration of sustainable processes and products. Gypsum has properties such as the availability of cheap raw materials, volumetric stability, acoustic and thermal insulation, fire resistance, low toxicity, however, it has low resistance to water absorption. The objective of this research was to rationalize a production process for the separation of gypsum and mineral coal ash, added with an organic salt based on essential oils, commercially known as DS-328 (Synthetic Termite Sludge) and Sulfate of Aluminum. This additive was used with a view to using partition blocks, based on plaster, for wet areas in buildings. An essential reason for reducing the amount of gypsum was to ensure that the semi-hydrate content in the gypsum was equal to or greater than 85.0%. The properties of the specimens made were evaluated with the aid of an experimental design of the type Rotational Composite Design (DCCR), through the application of the STATISTICA software from StatSoft, Version 12. The proposed composite had its specimens from the hardening of the paste with a water/plaster ratio of 60% m/m (< water/plaster content than the conventional one). The composite formulation showed dependence with the type of response variable. Thus, on average, values of: setting time (TP) = 10.15 min; Resistance to pain (RC) = 13.29 MPa e; Water absorption (AA) = 11.65%. The addition of DS-328, chemically aided with commercial aluminum sulfate (chemical stabilization function), increased the strength resistance and improved the hydrophobic character of the composite in relation to the properties of pure gypsum. The results obtained with the gypsum-CCM mixture added with DS-328 led to a reduction in gypsum consumption through the use of mineral coal ash (environmental liability), giving rise to a new material for separation blocks for ecological areas.

Keywords: Gypsum block, Sustainability, Beta gypsum, Coal ash, DS-328, DCCR.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO GESSO PARA OBTENÇÃO DE GESSO ENDURECIDO OU VOLTA À FORMA DE GIPSITA E CONSEQUENTE LIBERAÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO (Q)	17
FIGURA 2 – CONSUMO DE ENERGIA NAS INDUSTRIAS EM 2018.....	21
FIGURA 3 – ESQUEMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO CARVÃO MINERAL	22
FIGURA 4 – (A) PLANEJAMENTO (2 ²) COM UM PONTO CENTRAL E; (B) PLANEJAMENTO (2 ³) COM UM PONTO CENTRAL	29
FIGURA 5 – EXEMPLO DE UM PLANEJAMENTO DO TIPO DCCR PARA 2 NÍVEIS E 2 FATORES INDEPENDENTES.....	30
FIGURA 6 – EXEMPLO DE UM PLANEJAMENTO DO TIPO DCCR PARA 2 NÍVEIS E 3 FATORES INDEPENDENTES.....	30
FIGURA 7 – MEDIDOR DE UMIDADE E ÁGUA DE CRISTALIZAÇÃO	34
FIGURA 8 – MEDIDOR DE UMIDADE E ÁGUA DE CRISTALIZAÇÃO	35
FIGURA 9 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA DETERMINAR A MASSA UNITÁRIA: (A) COM RECIPIENTE PARA O GESSO; (B) SEM O RECIPIENTE	36
FIGURA 10 – ANALISADOR GRANULOMÉTRICO A LASER MODELO MASTERSIZER 2000.....	37
FIGURA 11 – DIAFRATÔMETRO DE RAIOS-X MODELO D2 PHASER	38
FIGURA 12 – PROCESSO DE MISTURA DOS COMPOSTOS.....	40
FIGURA 13 – ETAPAS DE PREPARO DOS CORPOS DE PROVA	40
FIGURA 14 – PROCESSO DE SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA	41
FIGURA 15 – APARELHO DE VICAT.	42
FIGURA 16 – PRENSA DE COMPRESSÃO AXIAL PARA CORPOS DE PROVA	43
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE PARETO PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA DOS CORPOS DE PROVA DO COMPÓSITO	47
FIGURA 18 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À SUPERFÍCIE DE RESPOSTA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E CCM LEVE.....	48
FIGURA 19 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E DE CCM LEVE PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO	48
FIGURA 20 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À SUPERFÍCIE DE RESPOSTA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E CCM PESADA	49
FIGURA 21 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E DE CCM PESADA PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO	49
FIGURA 22 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ NO COMPÓSITO.....	50
FIGURA 23 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO	50
FIGURA 24 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM LEVE E CCM PESADO	51

FIGURA 25 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E CCM PESADO PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO	51
FIGURA 26 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM LEVE E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ NO COMPÓSITO.....	52
FIGURA 27 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO	52
FIGURA 28 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À ABSORÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM PESADA E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ NO COMPÓSITO.....	53
FIGURA 29 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM PESADA E DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELO COMPÓSITO.....	53
FIGURA 30 – DIAGRAMA DE PARETO PARA O TEMPO DE PEGA	55
FIGURA 31 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E DE CINZAS LEVE.....	56
FIGURA 32 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE POUCA INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E CINZA LEVE	56
FIGURA 33 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E DE CINZAS PESADA.....	57
FIGURA 34 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E CINZA PESADA	57
FIGURA 35 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	58
FIGURA 36 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	58
FIGURA 37 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM LEVE E CCM PESADA	59
FIGURA 38 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E CCM PESADA	59
FIGURA 39 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM LEVE E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	60
FIGURA 40 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	60
FIGURA 41 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AO TEMPO DE PEGA EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM PESADA E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	61
FIGURA 42 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM PESADA E DE DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃	61
FIGURA 43 – DIAGRAMA DE PARETO PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	63
FIGURA 44 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E CCM LEVE	64
FIGURA 45 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E CCM LEVE.....	64

FIGURA 46 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E CCM PESADA.....	65
FIGURA 47 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E CCM PESADA	65
FIGURA 48 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AOS TEORES DE GESSO E DE DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$	66
FIGURA 49 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE GESSO E DE DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$	66
FIGURA 50 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE AOS TEORES DE GESSO E CCM LEVE E CCM PESADA.....	67
FIGURA 51 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E CCM PESADA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO COMPÓSITO	67
FIGURA 52 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DOS TEORES DE GESSO E CCM LEVE E DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$ DO COMPÓSITO.....	68
FIGURA 53 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM LEVE E DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$ PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO COMPÓSITO	68
FIGURA 54 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRESPONDENTE À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CCM PESADA E DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$	69
FIGURA 55 – PERFIS DAS CURVAS DE NÍVEL MOSTRANDO A NÃO EXISTÊNCIA DE INTERAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CCM PESADA E DS-328/ $Al_2(SO_4)_3$ PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA COMPÓSITO	69

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL 2 N	27
TABELA 2 – EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO PARA O USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	32
TABELA 3 - PLANEJAMENTO TIPO DCCR COM VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS	39
TABELA 4 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO ASSOCIADA ÀS VARIÁVEIS RESPOSTA DA FORMULAÇÃO DO COMPÓSITO GESSO-CCM ADITIVADO COM DS-328/AL ₂ (SO ₄) ₃ COM AS VARIÁVEIS RESPOSTAS.	44
TABELA 5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A ABSORÇÃO PERCENTUAL DE ÁGUA PELOS CORPOS DE PROVA DO COMPÓSITO.....	46
TABELA 6 – TABELAS DE ANOVA PARA O TEMPO DE PEGA DA PASTA QUE DÁ ORIGEM AOS CORPOS DE PROVA.....	54
TABELA 7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	CONSTRUÇÃO E MEIO AMBIENTE.....	13
2.1.1	Construção civil ambientalmente amigável	13
2.1.2	Materiais de Construção Civil Sustentável	13
2.2	GESSO	15
2.2.1	Considerações Gerais	15
2.2.2	Hidratação e pega do gesso	16
2.2.3	Composto à base de gesso.....	18
2.2.4	Aditivção de gesso.....	19
2.3	CINZAS DE CARVÃO MINERAL	20
2.3.1	Carvão mineral nas indústrias	20
2.3.2	Cinzas no setor termelétrico	22
2.3.3	Reaproveitamento de cinzas	23
2.4	ADITIVAÇÃO COM SAL ORGÂNICO	24
2.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1	NORMAS CONSULTADAS	32
3.2	DS-328 E SULFATO DE ALUMÍNIO COMERCIAL	32
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE GESSO.....	33
3.3.1	Umidade e água de cristalização	33
3.3.2	Granulometria do gesso.....	34
3.3.3	Massa unitária do gesso.....	36
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA CINZA	37
3.4.1	Análise granulométrica a laser	37
3.4.2	Difratômetro de Raios-X.....	37
3.4.3	Teor de umidade.....	38
3.4.1	Massa unitária da cinza	38
3.4.1	Análise por espectroscopia de absorção atômica	38
3.5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	39
3.5.1	Planejamento experimental	39

3.5.2	Confecção dos corpos de prova.....	39
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	41
3.6.1	Taxa de absorção de água por imersão total.....	41
3.6.2	Tempo de pega inicial e final	42
3.6.3	Resistência mecânica à compressão	43
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	44
4.1	EFEITO PRINCIPAL	45
4.1	ANOVA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	45
4.2	ANOVA DO TEMPO DE PEGA	54
4.3	ANOVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	62
5	CONCLUSÃO	70

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população humana e da indústria tem levado a uma maior geração de eletricidade, resultando na produção de grandes quantidades de resíduos da combustão do carvão, a cinza de carvão mineral (CCM), que é coletada dos gases de combustão após a queima de carvão, sendo um dos principais resíduos sólidos gerados na indústria de queima de carvão. As partículas de CCM são principalmente esféricas, com uma superfície lisa. A composição da CCM é principalmente composta por SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , Fe_2O_3 , MgO , K_2O e outros óxidos metálicos (LU et al., 2023). Em termos de composição de fases, além de uma grande quantidade de fase de vidro amorfo, a CCM também contém mulita, quartzo, calcita, magnetita e hematita. O mundo gera mais de 800 milhões de toneladas de CCM a cada ano. No entanto, uma grande quantidade de CCM é descarregada, o que causa sérios danos ao meio ambiente e ameaça à saúde humana.

O mineral Gipsita é um di-hidrato de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), abundantemente encontrado no Polo Gesseiro do Araripe (Alto Sertão Pernambucano), sendo nesta origem de alta qualidade, porém suas propriedades não estão sendo exploradas devidamente (FERREIRA; SOUZA; CARNEIRO, 2019). Quando parcialmente desidratado (por efeito térmico) o mineral Gipsita forma o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), o qual é um tipo de aglutinante que pode ser usado em arte, arquitetura, construção civil, proteção contra incêndio e aplicações médicas (FARIA, 2022). Um aglutinante é um material que atua como cola ou cimento quando misturado com agregado (por exemplo, areia) e água para formar uma pasta fresca, resultando em argamassa de reboco ou blocos de divisórias (ZOU et al., 2022). O gesso não só pode ser moldado em várias formas, mas tem excelente resistência à compressão, alta rigidez, baixa condutividade térmica e elétrica, é à prova de fogo e possui baixa toxicidade.

O desenvolvimento recente de compósitos reforçados com materiais locais nas áreas da Construção Civil e das Obras Públicas permitiu preencher estas lacunas nomeadamente no fabrico de painéis leves de gesso (GUEDRI et al., 2023). Atualmente existe uma grande variedade de materiais compósitos. A maioria deles utilizam materiais como resíduos de plásticos, alumina, resíduos de papel, fibras de coco, casca de arroz, etc. Contudo, tanto as resistências mecânicas quanto a resistência à absorção de água, com valores considerados impraticáveis para funções estruturais, reduzem as possibilidades de aplicações dos compósitos de gesso na proteção de áreas úmidas.

Materiais residuais são frequentemente utilizados para produzir materiais de construção, devido à redução de custos, economia de energia e possivelmente melhores produtos. Materiais compósitos cimentícios são geralmente produzidos selecionando ingredientes brutos com composições químicas complementares. Por exemplo, KAMPALA et al. (2014) estudaram as características físicas, mecânicas e de durabilidade de uma argila siltosa estabilizada com carbetto de cálcio (CC) e cinzas volantes (FA). Os resultados mostraram que a estabilização com CC e FA aumentou significativamente a resistência e a robustez da argila siltosa estabilizada. A dosagem ótima de CC e FA foi em torno de 7% e 20%, respectivamente. No entanto, a dosagem elevada de FA resultou em uma diminuição na resistência.

O desempenho de materiais sustentáveis com propriedades termo-mecânicas e acústicas adequadas à função para a qual foram criados depende dos componentes utilizados na formulação do compósito. Durante a preparação das amostras, são frequentemente utilizados subprodutos (como cinzas de carvão mineral), bem como resíduos orgânicos/inorgânicos (fosfógeno, lignocelulósico, vidro, plástico, etc.) e materiais reciclados provenientes de demolição de edifícios. Por exemplo, pesquisadores têm utilizado resíduos de gesso provenientes de processos de construção e demolição para produzir placas de gesso e gesso monolítico para paredes internas (BENJEDDOU et al., 2020). Além disso, outros pesquisadores utilizaram uma mistura de areia manufaturada reciclada (uma combinação de partículas de pedra natural e uma pequena proporção de argamassa antiga) e agregado miúdo reciclado proveniente de resíduos de concreto para produzir argamassa reciclada de alta qualidade, com alta resistência e boa durabilidade. Nesta pesquisa desenvolveu-se um compósito para produção de blocos ou tijolos de compósito de à base de gesso e cinzas de carvão mineral, com aditivação de óleos essenciais para adaptação do referido compósito a ambientes úmidos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Formular um compósito para produção de blocos de divisória composto de gesso e cinzas de carvão mineral, aditivado para se tornar um produto final com melhoria de propriedades em relação ao gesso puro, com foco principal em ambientes úmidos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir propriedades necessárias a um compósito gesso-cinzas de carvão mineral (CCM), com aditivação ambientalmente amigável;
- Confeccionar corpos de prova para testes de caracterização do compósito;

- Realizar experimentos laboratoriais e avaliar estatisticamente as propriedades dos corpos de prova, mediante a aplicação da metodologia de superfície de resposta (MSR);
- Definir um modelo de previsão para a formulação do compósito proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSTRUÇÃO E MEIO AMBIENTE

2.1.1 Construção civil ambientalmente amigável

Existe uma crescente preocupação na Construção Civil devido às atuais mudanças climáticas. Estudos demonstram que as emissões de dióxido de carbono provenientes de edifícios representam cerca de 40% das emissões globais anuais. Para reduzir o impacto ambiental do setor de construção, várias tendências em construções sustentáveis estão surgindo (SOVACOOOL et al., 2021). As novas técnicas de estabilização de resíduos estão sendo desenvolvidas, incluindo o uso de materiais como cinzas de forno de cimento (SALEH et al., 2021), nanomateriais, argilas naturais e polímeros para a produção de tijolos leves e como substâncias de estabilização para resíduos perigosos.

A construção ambientalmente amigável é um sistema construtivo que promove transformações consciente no entorno, de forma a atender as necessidades de uso do homem moderno, protegendo o meio ambiente e os recursos naturais, garantindo a qualidade de vida para as gerações futuras (SALEH et al., 2020). Sendo assim, o termo “construção civil sustentável” foi iniciado no setor da construção civil e atualmente é relevante para a sustentabilidade, embora ainda não seja muito praticado no Brasil. A construção civil sustentável engloba várias práticas voltadas para o meio ambiente, como: redução de resíduos na etapa de execução da obra, uso de recursos naturais, inserção de conceitos de racionamento de água e energia elétrica na fase de utilização do imóvel e no uso de materiais de construção sustentáveis (FÜCHSL; RHEUDE; DRÖDER, 2022).

2.1.2 Materiais de Construção Civil Sustentável

Os materiais utilizados em um empreendimento são parte fundamental de sua sustentabilidade. O design, método de construção e materiais escolhidos têm um impacto significativo nas emissões totais de carbono ao longo da vida útil de uma edificação (CONTRERAS et al., 2022). As emissões de carbono incorporadas podem representar mais emissões do que as emissões operacionais durante a vida útil de um edifício. O sistema estrutural de um edifício geralmente é a maior fonte de carbono incorporado, seja de aço, concreto ou ambos. A consideração dos materiais na fase inicial do projeto pode ajudar a reduzir as emissões de carbono pela edificação como um todo (FRANCO et al., 2022). Recomenda-se a utilização da avaliação do carbono ao longo da vida útil do ambiente construído, como uma

abordagem para identificar oportunidades de reduzir as emissões ao longo da vida útil de um edifício. Além disso, a Pirâmide de Materiais de Construção produzida pelo Centro de Arquitetura Industrializada é uma ferramenta útil para entender o impacto de diferentes materiais de construção e calcular as emissões de carbono.

A reutilização de materiais é preferível à reciclagem, pois requer menos energia incorporada. Quando materiais são reutilizados ou reciclados, é necessário inspecioná-los para garantir que sejam adequados para o projeto e não necessitem de reparos. Isso reduz a quantidade de matéria-prima utilizada na construção de um edifício e ajuda a preservar o caráter de um edifício ou área existente, especialmente em edifícios listados ou áreas de conservação (BEDARF et al., 2021).

Ao se obter materiais, é importante escolher produtos que minimizem os impactos na biodiversidade. Por exemplo, evitar madeira proveniente de áreas florestais exploradas de forma insustentável ou o uso de materiais como turfa, calcário exposto ao clima ou outros materiais provenientes de habitats vulneráveis. Materiais com longa vida útil são mais benéficos para o meio ambiente e proporcionam benefícios duradouros aos ocupantes do edifício (REF). Eles devem ter características de durabilidade, baixa manutenção e uso de agentes impermeabilizantes que não sejam prejudiciais ao meio ambiente

Aplicação sustentável da fibra do babaçu como isolamento acústico em painéis de gesso (ROCHA; CABRAL; SÁ, 2021). Que consiste na utilização de fibra do babaçu como agregado na confecção de placas de gesso como isolamento acústico. Este trabalho concluiu que em comparação com os parâmetros de adaptação no espectro sonora, foi perceptível um impacto significativo para um possível desempenho acústico.

Análise da viabilidade técnica da reutilização de resíduos de pedras ornamentais na fabricação de blocos de gesso sustentáveis (SILVA, 2019). Este trabalho tem a finalidade de estudar a viabilidade técnica de reutilização de pedras ornamentais (são pedras tipo mármore utilizadas em revestimento de paredes, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerário, pisos e soleiras) trituradas, para ser utilizada junto com o gesso, na fabricação de blocos de gessos. Tendo visto que, houve um acréscimo significativo nas propriedades físicas dos blocos analisados, no que se refere à: resistência à flexão, dureza e densidade.

Painéis desenvolvidos com resíduo de gesso e resíduo de algodão: uma alternativa para o desenvolvimento sustentável (KOZECHEN et al. 2015). Foi confeccionado painéis com resíduo de gesso proveniente da construção civil e resíduos gerados do beneficiamento do

algodão. As características obtidas nos ensaios realizados foi que apresentou com boa característica visual, com excelente resistência mecânica e resistente a ataque de fungos.

Em alguns casos, existem alternativas mais ecologicamente corretas ou versões de materiais e produtos de construção tradicionais disponíveis no mercado. A reutilização de edifícios existentes reduz a necessidade de obtenção, fabricação ou transporte de novos materiais para o local, resultando em menores emissões de carbono. Além disso, a reutilização de edifícios existentes pode resultar em soluções de design criativas que valorizam o caráter da área local (BERTOLAZZI et al., 2023; CONEJOS; LANGSTON; SMITH, 2012). Existem também versões de concreto com menor emissão de carbono, opções de tintas com menor emissão e vários tipos de iluminação LED. Novos produtos, materiais e tecnologias estão sendo desenvolvidos constantemente e devem ser considerados.

2.2 GESSO

2.2.1 Considerações Gerais

A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um mineral abundante e facilmente acessível na superfície da Terra e é amplamente utilizado como fonte de materiais de construção. O procedimento de produção não mudou fundamentalmente desde os tempos pré-históricos, e envolve o tratamento térmico do gesso a cerca de 160°C , induzindo a desidratação e recristalização para hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, bassanita ou "gesso de Paris"). O gesso forma uma pasta maleável quando misturado com água e solidifica-se em poucos minutos. O processo de endurecimento depende da re-hidratação gradual e, para uso, recristalização de volta à gipsita. O gesso endurecido final é tipicamente composto por agulhas interligadas de tamanho micrométrico (TROSSEILLE et al., 2022).

O gesso é um mineral encontrado naturalmente com a fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conhecido como dihidrato de sulfato de cálcio. Existem três níveis de hidratação: Anidrita com a fórmula química CaSO_4 , dihidrato com a fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gesso), hemidrato com a fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (gesso em pó). O gesso produzido ocorre essencialmente em duas formas: α -hemidrato e β -hemidrato. Sua reatividade com a água e a resistência dos produtos de hidratação dessas duas formas de hemidrato são diferentes. Estudos de infravermelho e difração não mostraram diferença em sua estrutura (SALIH; HUSSEIN, 2018). A fragilidade do produto de hidratação do α -hemidrato limita seu uso como material de

construção, e por isso o β -hemidrato, ou gesso de fundição, é amplamente utilizado. A baixa densidade e alta porosidade do gesso de fundição contribuem para a resistência ao fogo, desempenho acústico e regulação da umidade das paredes. Como o gesso é composto principalmente por β -hemidratos, ele ganhou grande importância industrial e tem motivado diversos pesquisadores a realizar estudos sobre o hemidrato de sulfato de cálcio.

O gesso é considerado um dos materiais de construção mais antigos, cujo uso remonta a vários milhares de anos atrás. Os impactos ambientais negativos crescentes da indústria de cimento e os altos custos associados à fabricação e transporte de cimentos Portland tornaram o gesso uma alternativa eficaz aos produtos cimentícios perigosos (LIMA JÚNIOR, 2022). A disponibilidade abundante e a natureza ubíqua do gesso, tanto como mineral natural quanto como subproduto de várias indústrias químicas, fizeram com que os produtos de gesso ganhassem impulso nas últimas décadas. Embora o gesso tenha se mostrado o melhor e mais econômico material de construção devido às suas excelentes propriedades físicas, ele possui várias limitações, como alta permeabilidade à água, natureza porosa, baixa resistência à compressão, baixa resistência à flexão e tração (SOPHIA; SAKTHIESWARAN; GANESH, 2016). Os produtos de gesso são comparados a produtos convencionais, tornando-os adequados para aplicações internas. Diversos pesquisadores têm realizado investigações para melhorar o desempenho do gesso e estender seu uso para exteriores, por meio do uso de aditivos apropriados para modificar a natureza hidrofílica do gesso, tornando-o um material durável para uma vida útil mais longa.

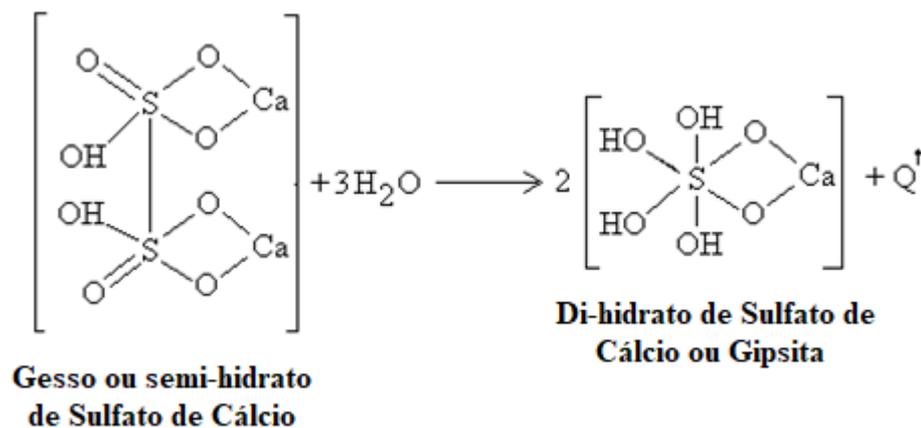
2.2.2 Hidratação e pega do gesso

A utilização do gesso pela construção civil gera um grande volume de resíduos. No entanto, o gesso é um material que apresenta propriedades altamente competitivas no mercado. A principal causa da geração desse resíduo é o rápido endurecimento das misturas que contêm altos teores de gesso (acima de 40%). A incorporação de resíduo de gesso às pastas provoca a aceleração no processo de endurecimento, podendo aumentar ainda mais o volume de resíduos gerados (PERES, BENACHOUR; SANTOS, 2008).

Leury e Williamson (1994a) observaram que após mistura com água o gesso combina-se com a mesma para voltar ao di-hidrato original através de uma reação de hidratação rápida, acompanhada de forte elevação de temperatura e de ligeiro aumento de volume (gonflement) através de um fenômeno conhecido como “pega”. O mecanismo de pega pode ser explicado da seguinte maneira: após seu contato com a água, uma parte do semi-hidrato contido no gesso

dissolve-se rapidamente. Sua combinação com uma e meia moléculas de água, para formar di-hidrato, o qual é cerca de cinco vezes menos solúvel que o semi-hidrato (2,3 a 2,65 g/l), resulta na formação de uma solução supersaturada (Figura 1). A cristalização do di-hidrato é muito rápida. A mistura adquire uma consistência pastosa que permite sua trabalhabilidade por alguns minutos. Dessa forma, parte do semi-hidrato cristalizado libera uma certa quantidade de água que age sobre a outra parte ainda não cristalizada e assim por diante. A consistência da pasta aumenta pouco a pouco e quando a cristalização finaliza o gesso é “preso”.

Figura 1 – Reação de hidratação do gesso para obtenção de gesso endurecido ou volta à forma de gipsita e consequente liberação do calor de hidratação (Q)



Para melhor entender a ação das substâncias modificadoras do tempo de pega, aceleradoras ou retardadoras, Leury e Williamson (1994b) observaram que quando um gesso faz pega, a mesma o faz em presença de três fenômenos distintos e básicos:

- Dissolução do semi-hidrato de sulfato de cálcio - o qual pode ser considerado em um fenômeno de dissolução de um corpo em água, com a penetração de moléculas desses corpos entre as moléculas da água. As moléculas da água defendem-se contra esta penetração, a qual é proporcional à tensão superficial da água. Partindo então deste princípio, deve-se entender que todo aumento da tensão superficial da água diminui a velocidade de dissolução do gesso e, portanto, provoca um retardamento da pega. Ao contrário, toda redução da tenção superficial provoca a aceleração da dissolução e, consequentemente, a aceleração da pega.
- Hidratação do semi-hidrato - esta permanecerá constante na solução até que haja gesso ainda não dissolvido no sistema. No momento em que não reste mais gesso para dissolver é que a velocidade de hidratação poderá ser avaliada. Pode-se então estimar a referida velocidade média dentro de um intervalo de tempo infinitamente pequeno. A partir deste momento a

concentração de semi-hidrato na solução vai diminuindo porque haverá hidratação do mesmo, não havendo mais semi-hidrato para ser dissolvido.

- **Cristalização do di-hidrato** - cuja pobre solubilidade em água provoca sua precipitação ao estado de cristais. Como toda cristalização pode ser inicializada pela presença de cristais na solução. No caso do gesso são os cristais de gipsita que aceleram este processo. Infelizmente isto acontece muitas vezes pela presença de não cozidos no gesso produzido. Uma solução para problemas como estes é o controle severo da granulometria do material à entrada do forno (compatível com a condição de tiragem) ou de um cozimento suficientemente lento para a obtenção de uma conversão mais satisfatória.

2.2.3 Composto à base de gesso

Existe crescente interesse nos compósitos de gesso nas últimas décadas, especialmente devido às fontes naturais abundantes de gesso em todo o Nordeste do Brasil. Após sua desidratação térmica parcial, esse material possui propriedades de isolamento térmico e acústico amplamente conhecidas e podem ser aprimorados variando sua porosidade, seja por meio de espuma ou pela adição de agentes orgânicos ou inorgânicos. Diferentes tipos de rejeitos podem ser adicionados ao gesso para modificar suas propriedades físicas, como a condutividade térmica (grânulos de gel de sílica expandida) ou para reforçar a estrutura (fibras de vidro, fibras de carbono, etc.), são os compósitos à base de gesso (ARGALIS; BUMANIS; BAJARE, 2023). Atualmente, as opções que apoiam o meio ambiente estão ganhando mais defensores, o que leva ao ressurgimento dos enchimentos orgânicos, como a serragem. Esse material bruto e de fácil acesso pode ser mineralizado adicionalmente para criar as propriedades físicas e mecânicas desejadas do material de construção, além de facilitar a compactação das misturas de gesso durante a formação de amostras para testes laboratoriais.

Existem três métodos diferentes de produção de compósitos de gesso: moldagem por despejo, moldagem e método subaquático; sendo que a moldagem por despejo é reconhecida como o método mais vantajoso aplicado em pesquisas, permitindo determinar a inter-relação entre as propriedades dos compósitos endurecidos e a composição e propriedades físicas das misturas de gesso. Além disso, esse método garante uma distribuição mais uniforme das partículas do enchimento. Estudos existentes usam diferentes tipos de fibras orgânicas e inorgânicas (FANTILLI; JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA; DENIS, 2021).

2.2.4 Aditivação de gesso

A velocidade de rehidratação de um gesso é inversamente proporcional à sua temperatura de calcinação. Assim, os semi-hidratos reidratam mais rápido que as anidritas. Para modificar as propriedades de um gesso comercial, de modo a facilitar seu manuseio na obra quando é usado com função de revestimento, é então necessário considerar importantes aspectos como (BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999):

- O semi-hidrato reidrata rapidamente e por isto começa a reidratar ao cabo de três minutos e termina em um tempo de quinze a vinte minutos, despreendendo calor. Portanto, o tempo disponível para o manuseio deste material é demasiado curto, necessitando-se para aumentá-lo da adição de substâncias retardadoras de hidratação.
- Aplicando-se a pasta de gesso sobre uma superfície porosa, o gesso se separa porque parte da água necessária à recristalização (rehidratação) é absorvida pela superfície. Desta forma, é necessário o emprego de retentores de água, para garantir que a recristalização seja homogênea e correta.
- Em determinadas formulações ou sistemas de aplicação o material tem tendência a formar aglomerados ao ser amassado com água, sendo necessário melhorar sua trabalhabilidade. Para isto deve-se adicionar substâncias aeradores ou umectantes.
- A aderência do gesso sobre certos suportes é, às vezes, demasiadamente fraca, permitindo desagregações. O emprego de reforçadores de aderência permite sanar tais deficiências.
- Em algumas ocasiões é necessário aumentar a fluidez da pasta de gesso, ou aumentar as suas resistências à flexão e à compressão. Neste caso é necessário o emprego de fluidificantes.

Existem muitos produtos que podem retardar a pega, tais como: ácido cítrico, ácido tartárico, fosfato sódico, bórax, queratina, entre outros. Porém, o verdadeiramente importante é não enfatizar exclusivamente este retardamento, uma vez que se deve também objetivar uma recristalização homogênea, um intervalo de trabalhabilidade adequado e que o final do processo não seja brusco (AMATHIEU; BOISTELLE, 1986).

Aceleradores são substâncias que aumentam a saturação, além da capacidade de germinação e a velocidade de cristalização. São aceleradores de hidratação, agindo sobre a saturação e a cristalização do semi-hidrato: os ácidos HCl, H₂SO₄, HNO₃; os sais de ácidos KCl > NaCl > MgCl₂ > AlCl₃; os sais de sódio F⁻ > Cl⁻ > Br⁻ > NO₃⁻ > SO₄²⁻; os sulfatos de K > NH₄

> Na > Ca > Cu > Al. São aceleradores de hidratação, agindo sobre a germinação: o gesso fino, os sulfatos de cálcio e os cristais ultrafinos (PANPA; JINAWATH, 2006).

2.3 CINZAS DE CARVÃO MINERAL

2.3.1 Carvão mineral nas indústrias

Carvão é uma rocha sedimentar combustível oriunda de matéria orgânica. Os processos que convertem a matéria orgânica em combustíveis (ação de microorganismos, pressão, temperatura e tempo), através de distintos e consecutivos estágios, são chamados de carbonificação. Os estágios de formação do carvão são os seguintes: vegetação, turfa, linhito (baixo grau de carbonificação), carvão e antracito (alto grau de carbonificação) (OSÓRIO E.; VILELA A. C. F.; SAMPAIO C. H., 2008).

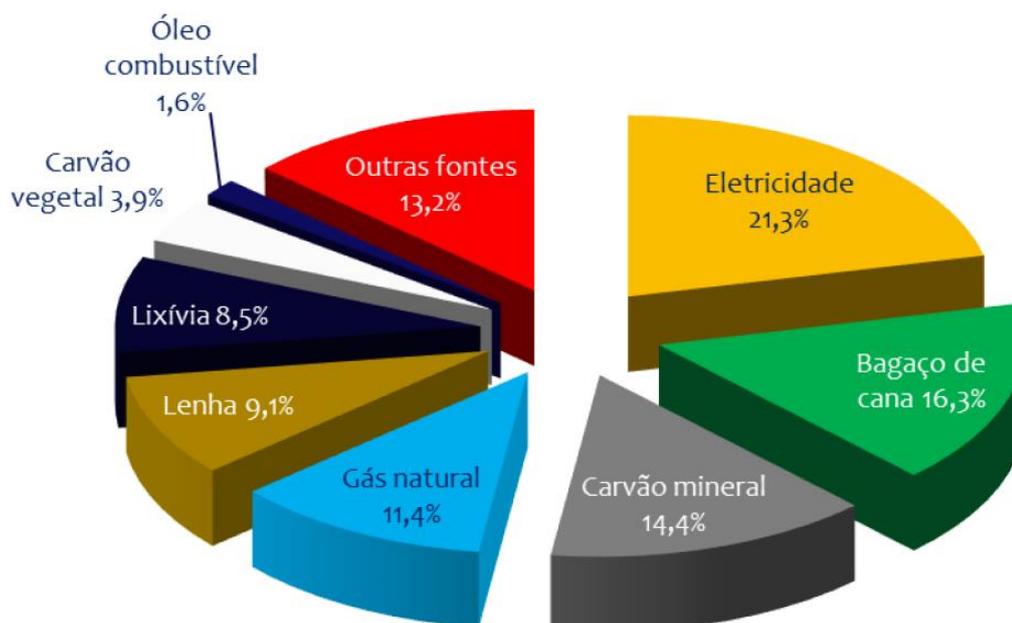
O carvão mineral é proveniente da decomposição da matéria orgânica durante milhões de anos, sob condições de temperatura e pressão ideais para a formação do composto. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o consumo do carvão mineral está bastante aquecido devido a disponibilidade de reservas como também a qualidade do carvão, medida pela capacidade de produção de calor.

Nas indústrias termelétricas é comum a utilização do carvão mineral para a produção de energia térmica. O problema está na grande quantidade da cinza gerada por essas indústrias, proveniente da combustão do carvão mineral, que é prejudicial à saúde e ao meio ambiente e sem local adequado para armazenar esses resíduos. Com isso, vem despertando o interesse dos pesquisadores para que encontre uma maneira de reutilizar essas cinzas.

Segundo (OBERSCHELP, PFISTER, *et al.*, 2018), a poluição do ar ocupa a quarta colocação como causa de mortes globais, sendo a combustão de carvão o maior contribuinte. No processo de combustão é liberado partículas finas no ar que pode entrar nos pulmões humanos e causar câncer, acidente vascular cerebral e outras doenças respiratórias e cardiovasculares. O Enxofre contido no carvão, associado a causa de chuva ácida, e o óxido de nitrato, são tóxicos e contribuem para o aquecimento global e acidificação terrestre.

Em 2018, o carvão mineral está posicionado em terceiro lugar em relação as fontes de energia mais utilizada nas indústrias com 14,4 % do total da matriz de energia industrial (Figura 2). Dados fornecidos pelo Balanço Energético Nacional (BEM) de 2019, levantamento feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME, 2019).

Figura 2 – Consumo de energia nas indústrias em 2018



Fonte: Balanço Energético Nacional – DNPM (2019)

As classes são divididas em subclasses. Subclasses de mais alta qualidade são definidas por teores de carbono e de materiais voláteis, excluindo umidade e materiais minerais. Meta-antracite é a subclasse de mais alta qualidade com o maior teor de carbono (>98%) e a menor inclusão de materiais voláteis (<2%). Antracite é a seguinte com 92 - 98% carbono e 2 - 8% voláteis. Semi-antracite contém 86 - 92% carbono e 8 - 14% voláteis. As classes de mais baixa qualidade contêm altos teores de materiais voláteis e de umidade e, conseqüentemente, de baixas frações de carbono e baixos valores caloríficos. A última classe, linhito, refere-se a carvão em processo inicial de metamorfose com altos teores de umidade e de materiais voláteis e baixo valor calorífico. As classes betuminoso, sub-betuminoso e linhito são divididas em cinco, três e duas subclasses, respectivamente. As subclasses do betuminoso são baixo-volátil, médio-volátil e alto-volátil A, B e C; as do sub-betuminoso são A, B e C; e as do linhito são A e B. Subclasses mais baixas são definidas pelo valor calorífico (VIEIRA, S. R.; PETRACONI FILHO, G., 2008).

Os carvões são divididos segundo a norma ASTM-D388 em quatro classes: linhítico, sub-betuminoso, betuminoso e antracítico. A siderurgia brasileira a coque utiliza há anos uma classificação baseada apenas na matéria volátil (MV) e que teve sua origem na má aplicação da norma ASTM-D388. Nela os carvões são classificados (em base seca) em alto voláteis (MV>31%), médio voláteis (24%<MV) e baixo voláteis (MV<20%) (OSÓRIO E.; VILELA A.

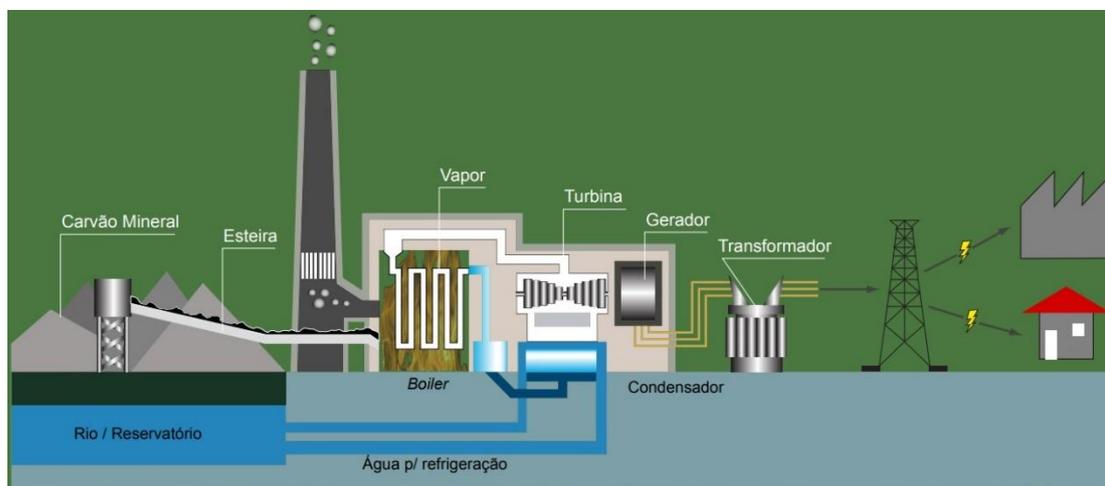
C. F.; SAMPAIO C. H., 2008).

2.3.2 Cinzas no setor termelétrico

A combustão do carvão nas centrais térmicas produz mais de 800 milhões toneladas de cinzas volantes em todo o mundo anualmente. A disposição de quantidades tão grandes de cinzas se tornou um problema (CHIGONDO, GUYO, *et al.*, 2013).

Segundo (ANEEL), além do preparo e queima do carvão, o processo de produção de energia através da queima do carvão mineral se dá basicamente da seguinte maneira: o carvão é extraído do solo, fragmentado e armazenado em silos para, posteriormente, ser transportado e armazenado em pó, o que permitirá melhor aproveitamento térmico ao ser colocado para queima nas fornalhas de caldeiras. O calor liberado por esta queima é transformado em vapor ao ser transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha. A energia térmica (ou calor) contida no vapor é transformada em energia mecânica (ou cinética), que movimentará a turbina do gerador de energia elétrica. A Figura 3 mostra um o processo de produção de energia elétrica com a utilização do carvão mineral.

Figura 3 – Esquema do processo de produção de energia elétrica através do carvão mineral



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2019)

Segundo (MALLMAN, 1996), há dois tipos de cinza proveniente da queima do carvão, são elas: a cinza pesada (bottom ash) e a cinza volante ou leve (fly ash). A primeira possui granulometria mais grosseira do que a segunda, sendo frequentemente retirada por um fluxo de água das grandes caldeiras das usinas térmicas. E podem ter elevado teor de carbono não queimado, de 5% a 20%. A cinza leve, é constituída por partículas finas, geralmente baixa massa específica, e são arrastadas pelos gases produzidos na combustão. A maior parte dessas

partículas são retiradas por sistemas de captação como filtros de tecidos, precipitadores eletrostáticos e outros.

A cinza volante de carvão é um subproduto micro particulado esférico da combustão de carvão. É composto principalmente de aluminossilicato amorfo e outros minerais cristalinos como mulita, quartzo, hematita e magnetita (CHIGONDO, GUYO, *et al.*, 2013).

2.3.3 Reaproveitamento de cinzas

A (NBR12653, 1992) define e classifica a cinza de carvão mineral da seguinte maneira: é um resíduo finamente dividido que resulta da combustão de carvão mineral pulverizado. É classificado como material pozolânico que, por si só, possui pouco ou nenhuma atividade aglomerante, e na presença da água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedade aglomerantes. Segundo (NBR10004, 2004), a norma de resíduos sólidos, classifica a cinza de carvão mineral em resíduo classe II A – não inertes.

O aproveitamento de resíduos industriais destinados à construção civil é uma alternativa viável do ponto de vista técnico e econômico, pois tende a minimizar ou até mesmo eliminar estes resíduos (SIQUEIRA, SOUZA, & SOUZA, 2012).

No campo da pesquisa, em busca de inovações tecnológicas voltado para o meio ambiente e reaproveitamento de resíduos industriais, há pesquisas na literatura relacionadas a utilização da cinza de carvão mineral em materiais da construção civil, como apresentado a seguir:

- (KNISS, COSTA, QUONIAM, & SANTOS, 2019) fizeram um mapeamento das aplicações científicas e tecnológicas, em escala global, das cinzas de carvão, na produção de materiais vítreos e cerâmicos. O método utilizado para a coleta dos dados foi a bibliometria, ou seja, uma pesquisa de informações em banco de dados. O resultado obtido foi que, os produtos derivados do reaproveitamento de cinzas são potencialmente mais econômicos e melhores que os seus similares produzidos a partir de matérias-primas virgens.

- (MARGON, 2002) pesquisou a influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento, com o objetivo principal de investigar a viabilidade de incorporar a cinza pesada na dosagem de argamassa de revestimento, através de curvas granulométricas. As conclusões deste trabalho foram: a incorporação da cinza pesada, em substituição à areia nas argamassas, pode ser otimizada pela composição granulométrica dos componentes (agregados e aglomerantes) através da curva granulométrica gerada pelo

método; a argamassa com a cinza de carvão apresentou uma boa trabalhabilidade mesmo com a redução de água, aumentando a compactidade a resistência à compressão e apresentou baixa absorção de água; confirma que cinzas oriundas de diferentes processos termelétricos apresentam comportamento diferentes quando usadas na composição de argamassa em substituição à areia; a cinza possui características minerais satisfatórias.

- (PILAR, SCHANKOSKI, et al., 2016) avaliaram a influência da incorporação da cinza pesada moída proveniente da combustão do carvão mineral, em pasta de cimento Portland. A cinza foi incorporada a pasta, substituindo o cimento em teores de 10%, 30% e 50%, com as relações água/aglomerante, em massa, de 0,35 e 0,40. As pastas foram testadas por termogravimetria, resíduo insolúvel e resistência à compressão. Foi observado que a cinza pesada moída pode substituir cimento em até 50% sem redução da resistência mecânica.

- Segundo (GRAY, LADWIG, et al., 2016), o concreto produzido com a adição de cinzas volantes de carvão é mais forte e mais durável do que o concreto convencional (apenas o cimento). E defende que a cinza volante é utilizada para construções de aterros estruturais, estabilização de resíduos e solidificação, recuperação de minas e para fabricação de cimento.

Visto que, através de pesquisas presentes na literatura, a cinza de carvão mineral pode ser uma fonte de matéria prima para diversas confecções de materiais direcionado para a construção civil. Porém, o levantamento do estado da arte não indicou abordagem a aplicação da cinza de carvão mineral, aditivada com o DS-328 e sulfato de alumínio comercial, em gesso. Com isso, este presente trabalho pode apresentar ineditismo e originalidade em termos de pesquisa científica.

2.4 ADITIVAÇÃO COM SAL ORGÂNICO

Uma breve revisão da literatura relacionada à melhoria da propriedade de resistência mecânica e resistência à água pelo gesso é iniciada por Aberle e colaboradores (2010). Neste os referidos autores afirmam que a aplicação interna de gesso é maior do que as aplicações externas, por causa da menor resistividade à água de gesso. Dessa forma, usando alguns aditivos hidrofobizantes tais como, ácidos graxos, emulsão de cera, resina de alquil silício, alquil oxi silanos, entre outras, poder-se-á reduzir significativamente a absorção de água e conseguir um aumento de aplicação de gesso na exposição ao tempo.

Segundo Ahmad e colaboradores (2015) melhorias nas propriedades do gesso foram

conseguidas usando sílica ativa como aditivo. Propriedades como porosidade, resistência à compressão e densidade aparente foram modificadas com adição de sílica ativa com gesso, em diferentes razões gesso/água. Se a proporção água/gesso era aumentada, a resistência à compressão e densidade aparente era reduzida e a porosidade aumentada. Se a relação água/gesso era reduzida a resistência à compressão e densidade aparente aumentava e a porosidade diminuía.

Pervyshin e colaboradores (2017) fez verificações sobre a dosagem de vários aditivos sintéticos como escória de alto-forno, pó de cerâmica, cimento Portland, cal e superplastificantes. Esses aditivos levaram a um aumento do nível das propriedades físico-químicas do produto em relação ao gesso convencional. Propriedades do gesso aditivado como densidade, durabilidade e também ligeiramente resistência à água melhoraram.

Khalil, Tawfik e Hegazy (2018) forneceram informações sobre compostos de gesso morfológicamente modificado como a resistência à compressão e as características de resistência à água aumentadas usando aditivos como areia natural, sílica ativa, sílica gel, casca de arroz, escória granulada de alto forno, carbonato de cálcio e poli vinil acetato. Foram preparadas amostras misturando-se o gesso diferentes percentuais de cada aditivo. Depois de curar por 14 dias, observou-se que os compósitos de gesso não só param a deterioração devido à imersão em água, como também essa resistência à água foi ligeiramente melhorada.

Uma das técnicas usadas para estabilização de solos, usados na construção de paredes, ou pavimentação de aeroportos localizados em zonas rurais é o uso do montículo ou ninho de cupim (SANTOS, et al., 2018). Isso demonstrou a necessidade e a importância do desenvolvimento de uma técnica que minimize os custos de implantação. Uma das alternativas de que se dispõe para viabilizar técnica e economicamente a construção de obras é melhorar as propriedades do revestimento (solo, paredes) existente, de modo a criar um novo material capaz de atender da melhor forma às exigências de um projeto. Portanto, a necessidade de atender ao mercado de engenharia, que aspira por soluções que reduzam custos, leva à busca pelo desenvolvimento de novos materiais. Como por exemplo desenvolveu-se o DS-328 a baba de cupim sintética para este tipo de estabilização (DYNASOLO, 2018). O emprego desta tecnologia vem tendo um incremento notável no mundo, e no Brasil já foram construídos importantes obras rodoviárias, aeroportuárias, hidráulicas e industriais a mais de 30 (trinta) anos, com expressivos resultados.

O produto DS-328 é um sal orgânico derivado de uma composição química de óleos

vegetais. É um líquido de coloração verde, densidade mínima a 25° C de 1,035 g/cm³, com pH mínimo de 10,5 em solução a 1%, totalmente solúvel em água. Foi criado e patentado em 1972 pela empresa Dynasolo S.A. Indústria e Comércio, após 12 anos de pesquisa para o desenvolvimento do produto. Em contato com os reagentes e o solo, forma um composto metal-orgânico insolúvel e permanente, cuja ação se exerce por uma coesão estável entre as partículas do solo.

As partículas finas do agregado miúdo e do gesso, devido a sua composição mineralógica, têm em suas superfícies excesso de íons negativos (ânions), pelos quais são atraídos os íons positivos (cátions) da água, aderindo-os fortemente, formando a água absorvida. Quanto mais espessa a camada mais se distancia das superfícies das partículas, diminuindo assim, a intensidade do campo elétrico e a energia térmica das moléculas de água, faz com que essas partículas, que tem a forma lamelar, se movimentem e provoquem um desequilíbrio entre elas, promovendo uma expansão do solo e por consequência, diminuindo sua resistência.

Portanto, a maneira de estabilizarmos um solo ou uma argamassa será conseguir reduzir ou eliminar a adsorção. O DS-328, por sua composição química, tem um enorme potencial de troca iônica. Quando se introduz, pequenas quantidades do produto em água se ativam os íons H⁺ e (OH)⁻ da água que provoca um intercâmbio de suas cargas elétricas com as partículas de solo, provocando na água absorvida um rompimento do enlace eletroquímico, desprendendo-as e convertendo-as em água livre, a qual drena por gravidade, evaporação e compactação. Esta reação eletroquímica de troca iônica provoca a aproximação das partículas, a qual é estável e permanente.

A estabilização físico-química realizada com produtos como o DS-328, quando aplicada com a racionalidade necessária, promove um grande advento nas construções em nosso País, possibilitando a execução de pavimentos e revestimentos seguros, econômicos e duráveis, sem prejudicar o meio ambiente. Salienta-se que tais produtos não possuem qualquer componente agressivo às pessoas, plantas ou animais, não sendo tóxico, corrosível ou inflamável (FARIA; BATTISTELLE; NEVES, 2016).

O DS-328, originou-se devido às condições das estradas que as chuvas causavam tornando intransitáveis, isso na década de 50 a qual a maior parte da malha rodoviária do Brasil era constituída de vias de terra (LATERSOLO, 2015). Havia equipes responsáveis pela manutenção dessas vias, a qual parte dela tinha como função de desmanchar as casas de cupim

que presentes nas margens da estrada, e aplicar a baba do cupim nas partes mais críticas da via, tornando um solo mais estável. Com isso, despertou-se a necessidade de desenvolver um produto em laboratório, com o intuito de substituir a baba de cupim que incorporado com o solo constitui-se uma camada de pavimentação mais estável, surgindo o DS-328.

2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Um planejamento experimental com k fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado um planejamento fatorial 2^k (SARAMAGO et al., 2008). Consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental para, em seguida, analisar e interpretar os efeitos principais e de interação entre os fatores investigados. Assim, podem-se identificar as melhores condições de obtenção do produto ou de realização do processo em estudo. Para exemplificar esse tipo de procedimento considera-se um planejamento fatorial de N fatores (x_1, x_2 e x_N) e dois níveis (+1 e -1). A matriz de planejamento para um planejamento fatorial 2^N é apresentada na Tabela 1 a seguir (DEVOR et al, 1992; RODRIGUES e IEMMA, 2005):

Tabela 1 - Matriz de planejamento experimental fatorial 2^N

Teste	Fatores de controle				Resposta (Y_i)
	X_1	X_2	...	X_N	
1	-1	-1		-1	Y_1
2	+1	-1		-1	Y_2
3	-1	+1		-1	Y_3
...
N	+1	+1	...	+1	Y_N

O planejamento experimental foi desenvolvido por Ronald Aylmer Fisher na Inglaterra por volta de 1920 (LOGOTHETIS; WYNN, 1989). Nessa época o planejamento experimental era utilizado, principalmente, em pesquisas agrícolas. Mas foi a partir do ano de 1950, que o planejamento experimental começou a ser amplamente utilizado em estudos tecnológicos, na indústria, em Biologia, em Medicina, em Química etc. Ultimamente, é largamente considerado

como uma das mais importantes técnicas utilizadas para o desenvolvimento de novos produtos. Esses planejamentos foram desenvolvidos inicialmente para estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, onde o erro experimental, em geral, é bem pequeno e as condições do experimento são mais facilmente controláveis (BOX; WILSON, 1951; MATEUS et al., 2001).

Muitos pesquisadores e profissionais discutiram como analisar e usar o planejamento experimental na prática (LIM, 1990; LOCHNER; MATAR, 1990). Entretanto, existe de fato uma diferença entre a técnica de planejamento experimental e sua prática. De acordo com Carlsson (1996) a conscientização, o conhecimento e o uso de modelos de planejamentos experimentais ainda eram muito pouco, mesmo nas mais bem sucedidas empresas.

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas para desenvolvimento, melhoria e otimização de produtos e processos (MONTGOMERY; BETTENCOURT JR, 1977). Essas técnicas são orientadas à análise de experimentos planejados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem das respostas de interesse através de superfícies n-dimensionais. Após a construção de modelos para a resposta, o interesse recai na busca do ajuste ótimo, isto é, na busca de regiões que conduzam a um valor mínimo, máximo ou nominal, conforme a característica da resposta em questão.

As maiores aplicações da MSR são encontradas em situações particulares da Engenharia, onde diversas variáveis de entrada influenciam potencialmente o desempenho ou características da qualidade do processo, também denominadas de respostas. As variáveis de entrada são chamadas de variáveis independentes e estão sujeitas ao controle do pesquisador. O objetivo principal da MSR consiste da estratégia experimental para estudar as influências dessas variáveis independentes, do desenvolvimento de um modelo estatístico empírico que correlacione a resposta e variáveis do processo e de métodos de otimização para encontrar os valores das variáveis de processo que produzam valores desejáveis dessas respostas, principalmente quando essas variáveis controláveis, ou fatores, são a níveis contínuos. Após a construção de modelos para a resposta, o interesse do pesquisador recai na busca do ajuste ótimo, ou seja, na busca de regiões que conduzam a um valor mínimo, máximo ou nominal, conforme a característica desejável da resposta em questão.

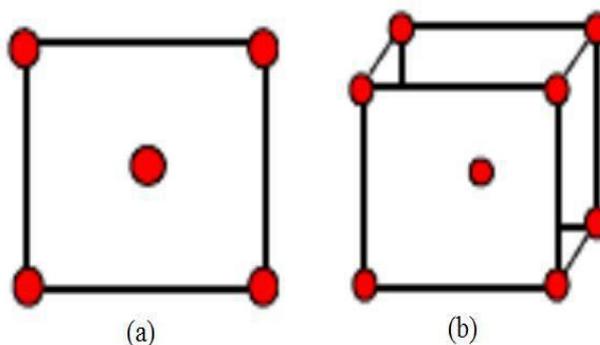
A proposta da MSR é responder questões gerais referentes ao comportamento da resposta dentro de um intervalo de interesse e, em particular, mapear regiões de alto desempenho. Os estudos envolvem três etapas principais (WU e HAMADA, 2000): a) planejar

o experimento, distribuindo adequadamente os pontos experimentais; b) estimar os coeficientes da equação da superfície de resposta e; c) explorar a superfície de resposta encontrando o ajuste dos fatores que otimiza a resposta. Conforme Wu e Hamada (2000) a estratégia de análise supõe que a resposta Y possa ser representada por uma função polinomial das variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_n . Entre os modelos possíveis estão o modelo linear, o modelo quadrático e, também, modelos não lineares. Os coeficientes dos modelos podem ser estimados mais eficientemente se for usado um planejamento experimental adequado para a coleta de dados. Por exemplo, para ajustar modelos lineares, toda a classe de experimentos 2^k é particularmente eficiente. Permitem fracionamento, blocagem e a suposição de linearidade que podem ser testadas acrescentando-se alguns pontos centrais (Figura 4).

Para o ajuste de modelos quadráticos, recomenda-se um Delineamento Composto Central Rotacional, o qual tem como base um planejamento do tipo 2^k , exige um número pequeno de ensaios, pode contemplar blocagem, rotacionalidade e ortogonalidade, conforme se exemplifica na Figura 4 (MONTGOMERY, 1991). Como pode ser visto na Figura 4 o DCCR é a soma de um experimento 2^k mais uma estrela, mais pontos centrais. Por isso o nome projeto composto. Os pontos da parte fatorial (2^k) permitem a estimativa de termos lineares e interações. Os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros. Dessa forma, geralmente um DCCR consiste de três partes:

- a. Parte fatorial, ou seja, 2^k vértices de um cubo k dimensional, (ou uma fração desses vértices) com coordenadas $\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1$;
- b. A parte em estrela, 2^k vértices com coordenadas $0, \dots, \pm\alpha, \dots, 0$;
- c. No ponto central, com coordenadas $0, 0, \dots$

Figura 4 – (a) Planejamento (2^2) com um ponto central e; (b) Planejamento (2^3) com um ponto central

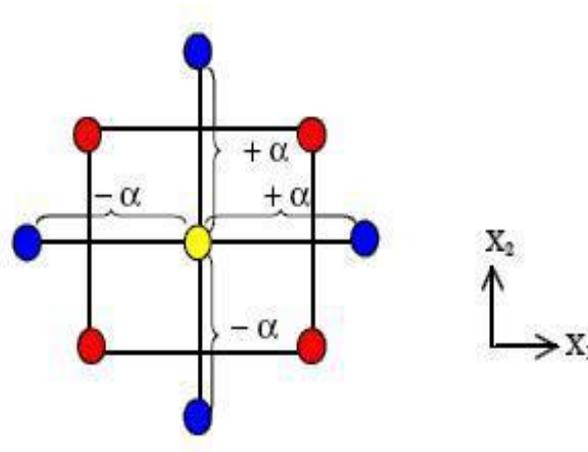


Fonte: Adaptada de Galdámez (2002)

Se for necessário, o planejamento pode contemplar repetições do ponto central (Figura 5 e Figura 6), aumentando os graus de liberdade do termo de erro, ou seja, permitindo uma avaliação mais precisa da variância experimental. O valor de alfa pode ser definido de modo que o projeto tenha algumas propriedades interessantes. Por exemplo, alfa pode ser calculado para atribuir rotacionalidade ou ortogonalidade ao planejamento (OEHLERT, 2000). Um planejamento rotacional assegura a mesma precisão nas estimativas de Y para todos os pontos do espaço amostral. Para atribuir rotacionalidade ao projeto, o valor de alfa deve ser definido usando (RODRIGUES e IEMMA, 2005):

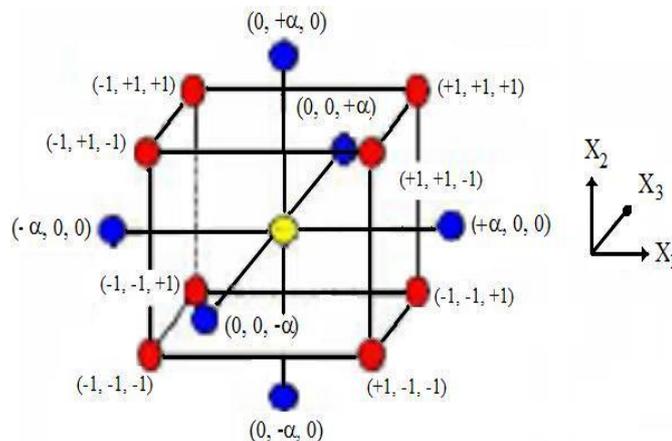
$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (1)$$

Figura 5 – Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 2 fatores independentes



Fonte: Adaptada de Galdámez (2002)

Figura 6 – Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 3 fatores independentes



Fonte: Adaptada de Galdámez (2002)

Outra possibilidade é atribuir ao projeto à condição de ortogonalidade. Dessa maneira, as estimativas dos coeficientes de termos lineares e quadráticos resultam independente, ou seja, essas estimativas não se alteram quando algum termo é eliminado do modelo. Para atribuir ortogonalidade ao projeto, o valor de alfa deve ser definido usando (BOX et al., 2005):

$$\alpha = \left\{ \frac{[(2^k+T)F^{1/2} - (2^k)T^{1/2}]}{4n^2} \right\} \quad (2)$$

Em que F refere-se ao número de pontos da parte fatorial (2^k), T é o número de pontos adicionais (estrela mais pontos centrais), multiplicado pelo número de repetições n. Por fim, os DCCR's são particularmente eficientes quando existe a necessidade de blocagem. Nesse caso, o projeto é normalmente dividido em dois: (i) um bloco contendo a parte fatorial e (ii) o outro bloco contendo a parte em estrela.

Os pontos centrais são utilizados para assegurar o mesmo número de ensaios em cada bloco. Para assegurar que os blocos sejam ortogonais entre si, o que irá permitir extrair o efeito entre blocos, caso exista, basta ter o mesmo número de ensaios em cada bloco e definir o valor de α usando:

$$\alpha = \sqrt{2^{k-1}} \quad (3)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 NORMAS CONSULTADAS

A norma (NBR13207, 1994), regulamenta a utilização do gesso na construção civil.

Para utilização desta norma, é necessário determinar as seguintes propriedades do gesso conforme as respectivas normas:

- (NBR12127, 1991) – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio;
- (NBR12128, 1991) – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas da pasta – Método de ensaio;
- (NBR12129, 1991) – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades mecânicas – Método de ensaio.

A Tabela a seguir mostra as exigências com relação as propriedades físicas e mecânicas do gesso para a construção civil.

Tabela 2 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para o uso na construção civil

Determinação físicas e mecânicas	Unidade	Limites
Resistência à compressão (NBR 12129)	Mpa	> 8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	> 30,00
Massa unitária (NBR 12127)	Kg/M ³	> 700,00

3.2 DS-328 E SULFATO DE ALUMÍNIO COMERCIAL

O DS-328 e o Sulfato de Alumínio comercial foram adquiridos por doação e as informações descritas a seguir foram fornecidas pelo fabricante de cada material.

O DS-328 é um produto fabricado pela DYNOSOLO, de estado físico líquido de cor esverdeada; densidade de 1.040 kg/m³ a 25°C; totalmente solúvel em água; resfriamento (0°C a 5°C, 3 horas) não turva, não precipita não muda de estado físico; sólidos totais a 105°C é de 40%; insolúveis em álcool etílico é de 1% no máximo; pH (solução 1%) é de 10,5 no mínimo;

vida útil devidamente acondicionado é de 15 anos. O produto pode ser adquirido comercialmente em tambores lacrados com 200 Kg. Neste caso foi gentilmente cedido pelo fabricante.

O Sulfato de Alumínio é um produto bastante utilizado como agente floculante, servindo para purificar água e nos resíduos de tratamento de esgoto, além de também servir para a manufatura de papéis. O produto é um sal obtido através da reação entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de alumínio, ou entre o mesmo ácido e o alumínio metálico. Como se trata de um sal, o sulfato de alumínio possui características próprias, como, por exemplo:

- É um produto iônico;
- Em água, passa por dissociação;
- À temperatura ambiente, é um produto sólido;
- Seu sabor é salgado.

Como características particulares, o sulfato de alumínio é branco, solúvel em água, tendo um ponto de fusão igual a 770°C e densidade de 2,672 g/ml, não apresentando, porém, ponto de ebulição.

A produção do sulfato de alumínio envolve determinados processos químicos e, dessa forma, sua fabricação vai depender de alguns fenômenos, ou reações químicas, específicas. Os principais métodos de produção do sulfato são os seguintes:

- Reação de neutralização, um processo em que um ácido reage com uma base, originando daí um sal e água. Isso ocorre quando o hidróxido de alumínio reage com o ácido sulfúrico, produzindo o sulfato de alumínio e água.
- Reação de simples troca, um processo em que uma substância química reage quando em contato com uma substância composta. Para que isso ocorra, é necessário colocar o ácido sulfúrico junto ao alumínio metálico para conseguir a formação de sulfato de alumínio e de gás hidrogênio.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE GESSO

3.3.1 Umidade e água de cristalização

Para determinar a umidade e a água de cristalização, foi utilizado um termo balança de modelo GEHAKA 200 (Figura 7), equipamento que mede a umidade do material por

infravermelho. O método do ensaio consiste em colocar uma determinada quantidade de massa do pó de gesso no interior do equipamento, a uma temperatura constante de 40°C durante aproximadamente 30 minutos, tempo para que a indicação da balança permaneça constante. Após a determinação da umidade, eleva-se a temperatura do equipamento de 40°C para 195°C, para determina a água de cristalização. Os valores obtidos consistem na média de três valores de três amostra do mesmo material, determinados pelo equipamento.

Figura 7 – Medidor de umidade e água de cristalização



Fonte: GEHAKA IV 200

3.3.2 Granulometria do gesso

O ensaio de granulometria do gesso é normatizado pela (NBR12127, 1991), que consiste em secar 210g da amostra na estufa à temperatura entre 40 e 44 C e posteriormente resfriada em dessecador. Foi utilizado 100 g da amostra para realização da 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. As peneiras foram agitadas com o auxílio de um vibrador de peneiras de marca Bertel (Figura 8). O material que ficou retido em cada peneira foi pesado em calculado pela equação a seguir:

$$Re = \frac{m}{M \times 100} \quad (4)$$

Em que:

- Re = Material retido (%);
- m = Resíduo na peneira (g);
- M = Massa inicial (g).

Figura 8 – Medidor de umidade e água de cristalização



Os resultados obtidos foram apresentados em um gráfico de distribuição dos tamanhos das partículas para observar sua granulometria.

Para efeito de cálculo do diâmetro médio geométrico das partículas, com base na distribuição de frequência estimado, foi utilizado a equação a seguir:

$$DMG = e^{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} \times \ln(\overline{D_i})} \quad (5)$$

Em que:

- DMG = Diâmetro médio geométrico;
- n = Número de classes de tamanho;
- m_i = Massa retida na peneira;
- m = Massa total;
- $\overline{D_i}$ = Diâmetro médio de cada faixa da peneira.

3.3.3 Massa unitária do gesso

Para a determinação da massa unitária do gesso, foi utilizado a norma (NBR12127, 1991) – Determinação das características físicas do pó de gesso. O ensaio consiste em passar uma determinada quantidade da amostra por um funil posicionado acima de um recipiente de volume conhecido (1,0 cm³), sem que a amostra que se posicionou no interior do recipiente não seja compactada (Figura 9). A massa unitária é definida pela relação entre a quantidade de material adicionado para encher completamente o recipiente e o volume do mesmo.

O valor representado da massa unitária foi a média de três ensaios. Para efeito de cálculo, foi utilizado a equação a seguir:

$$MU = \frac{M}{V} \quad (6)$$

Onde:

- MU = Massa unitária (Kg.m-3);
- M = Massa do gesso (Kg);
- V = Volume do recipiente (m³).

Figura 9 – Equipamento utilizado para determinar a massa unitária: (a) com recipiente para o gesso; (b) sem o recipiente



(a)



(b)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA CINZA

3.4.1 Análise granulométrica a laser

Para caracterizar a distribuição de frequência das partículas da amostra da cinza de carvão mineral, foi feita a análise granulométrica, com o auxílio de um analisador granulométrico a laser modelo Mastersizer 2000 (Figura 10).

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

Através de tabelas e gráficos processados pelo software do próprio equipamento que demonstra a distribuição do tamanho das partículas em base volumétrica, é analisado os resultados.

Figura 10 – Analisador granulométrico a laser modelo Mastersizer 2000



3.4.2 Difratorômetro de Raios-X

Para identificar as fases minerais presentes nas amostras de cinza de carvão mineral, foi utilizado o difratômetro de raio-x, já que o material a ser analisado precede de um mineral. Os equipamentos utilizados para esta análise foram um difratômetro de raios-x de marca Bruker D2 PHASER (Figura 11) e o detector Bruker-Lynxeye, operado com 300 W (30 Kv e 10 mA), irradiação Cu-K α 1 ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$); fenda primária: 0,4 mm; passo do goniômetro: 0,0202 $^\circ/\text{s}$; tempo de contagem por passo: 1 segundo. As amostras foram preparadas passando-as em peneiras de 200 Mesh (75 μm). Os resultados foram gerados pelo software do equipamento, apresentando picos longos no gráfico, que se difere pela natureza do composto. É possível identificar de forma precisa os principais compostos minerais presentes na cinza de carvão mineral, comparando os picos apresentados.

Figura 11 – Diafratômetro de Raio-x modelo D2 PHASER



3.4.3 Teor de umidade

A metodologia adotada para determinar o teor de umidade na cinza de carvão mineral foi a mesma apresentada no parágrafo 4.5.1.

3.4.1 Massa unitária da cinza

Para a determinação da massa unitária da cinza de carvão mineral, foi a mesma adotada apresentada no parágrafo 4.5.3.

3.4.1 Análise por espectroscopia de absorção atômica

Na análise por espectroscopia de absorção atômica da cinza de carvão mineral, foi utilizado a espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS – Flame Atomic Absorption Spectrometry), a qual determina as concentrações dos variados compostos metálicos presentes na amostra em análise.

Os elementos detectados na amostra da cinza de carvão mineral, apresentados na concentração dadas em ppm (partes por milhão), foram os seguintes elementos: zinco, cobre, manganês, cromo, cádmio, chumbo, ferro, sódio e potássio.

3.5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

3.5.1 Planejamento experimental

Para caracterização dos corpos da mistura constituída de gesso, cinza leve, cinza pesada e DS-328 + sulfato de alumínio utilizou-se um planejamento experimental, do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). O DCCR foi do tipo 2^4 , onde se identifica 4 variáveis. Os fatores ou vereáveis independentes foram o teor de gesso (g), o teor de cinzas de carvão mineral leve (g), o teor de cinzas pesada de carvão mineral (g) e o teor de DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura). A Tabela 3 a seguir ilustra as variáveis codificadas e reais do DCCR adotado, dentro das faixas de valores conforme experimentos laboratoriais de sondagem.

Tabela 3 - Planejamento tipo DCCR com variáveis codificadas e reais

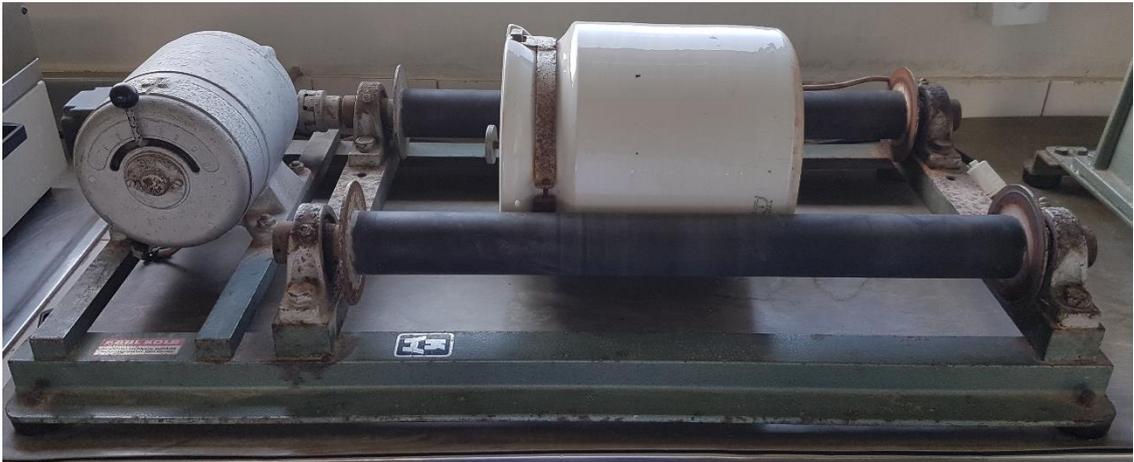
FATORES	NÍVEL				
	-2	-1	0	1	2
G (g)	40	50	60	70	80
CL (g)	0	5	10	15	20
CP (g)	0	5	10	15	20
DS-328/Al₂(SO₄)₃ (g/kg da amostra)	0,52	1,58	2,64	3,70	4,76

3.5.2 Confeção dos corpos de prova

De início, adotar uma quantidade mínima de 1.500g da amostra, necessária para a determinação das propriedades mecânicas, e passá-la através de uma peneira de 2,0 mm com auxílio de um pincel. Procedimento baseado na norma (NBR12129, 1991).

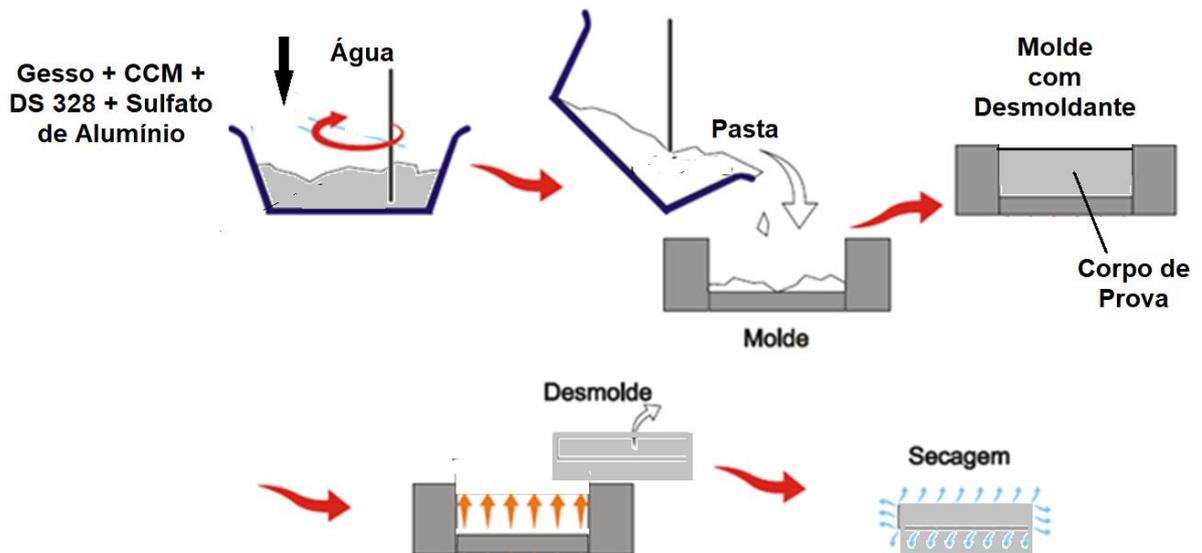
A mistura dos compostos (gesso, cinza e resíduo), procedeu através de um mancal de marca Karl Kolb (Figura 12), na qual os materiais foram depositados em um recipiente cilíndrico de porcelana e misturados com movimentos circulares por 10 minutos com torção de 80 rpm.

Figura 12 – Processo de mistura dos compostos



Para a produção da pasta, a água é despejada em um recipiente onde foi adicionado as soluções de DS-328 com sulfato de alumínio, previamente homogeneizado. Depois, é polvilhada a mistura sobre a água no período de 1 minuto, deixando em repouso por 2 minutos, e posteriormente misturar durante 1 minuto com movimentos circulares até forma uma pasta homogênea, e despejada nas formas do corpo de prova indicada para cada tipo de ensaio (Figura 13). Procedimento normatizado pela (NBR12128, 1991).

Figura 13 – Etapas de preparo dos corpos de prova



Após o desmolde dos corpos de prova, os mesmos foram colocados em dessecador com o intuito de protegê-los da umidade, sendo retirados apenas no momento dos ensaios. (Figura 14).

Figura 14 – Processo de secagem dos corpos de prova



3.6 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

3.6.1 Taxa de absorção de água por imersão total

O método utilizado para a determinação de absorção de água por imersão total, foi baseado na norma (NBR9778, 1987) para argamassa e concreto endurecidos, tomando-se algumas mudanças pertinentes, considerando as especificações da matéria-prima, pois a realização desse ensaio com gesso ainda não foi normatizada pela ABNT. A absorção de água em gesso puro fica em torno de 35 a 45% (GONÇALVES; FERRAZ, 2014).

Foram moldados quatro corpos de provas de cada mistura. Após desmoldadas, foram secadas na estufa por 6 dias em uma temperatura de 50°C. Com o material seco, foi determinado o peso de cada corpo de prova e depois foram submetidos a imersão total em água durante 24 horas. Ao serem retirados da água, descansar o material por 10 minutos em temperatura ambiente para que o excesso de água escoar, e assim determinar o peso das amostras úmidas. Em função da equação a seguir, foi determinado a porcentagem de absorção de água.

$$AA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 (\%) \quad (8)$$

Em que:

- AA (%) = taxa de absorção de água após imersão;
- Mu = massa do corpo de prova saturado após imersão;

- M_s = massa do corpo de prova seco em estufa.

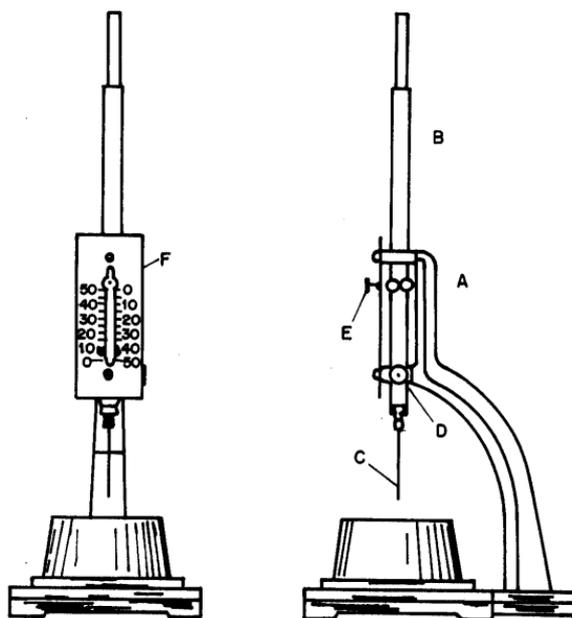
3.6.2 Tempo de pega inicial e final

Para determinar as propriedades físicas da pasta de gesso, foi utilizado como referência a norma (NBR12128, 1991), a qual regulamenta o ensaio de tempo de pega. Esta metodologia tem como objetivo determinar o tempo de início de pega – tempo decorrido do momento em que a mistura entrou em contato com a água até que a agulha do aparelho de Vicat penetre aproximadamente 1 mm acima da base da amostra – e o tempo final de pega – tempo decorrido do momento em que a mistura entrou em contato com a água até que a agulha não mais deixar impressões na superfície da pasta. Em geral os gessos nacionais tem:

- Início de pega: entre 3 e 16 minutos;
- Fim de pega: entre 5 e 30 minutos.

O aparelho de Vicat consiste em um suporte que sustenta uma haste móvel, que tem uma agulha acoplada de 1mm² de seção transversal nominal e 50 mm de comprimento (Figura 15). Esta agulha é penetrada na pasta que está depositada em um recipiente cônico de diâmetro interno de base 70mm, do topo de 60mm e altura de 40 mm. A base para o molde deve ser uma placa de vidro.

Figura 15 – Aparelho de Vicat.



Fonte: Adaptada da NBR 12128(1991)

3.6.3 Resistência mecânica à compressão

Segundo a norma (NBR12129, 1991), este ensaio tem como objetivo determinar a resistência mecânica a compressão, em função da carga de ruptura em corpos de prova, com o auxílio de uma prensa (Figura 12). O equipamento necessário para a realização deste ensaio consiste em uma prensa de capacidade de carga superior a 20.000 N, de exatidão mínima de 200 N, placas de aplicação de carga de área mínima de 2.500mm² e curso mínimo de 100mm. Os corpos de prova foram moldados em forma que permite a moldagem de 3 amostras simultâneo, de formato cúbico de 50,0 mm de aresta. A norma prevê uma resistência à compressão para o gesso entre 10 MPa e 27 MPa

Para definir o resultado final de resistência a compressão em Mpa de cada amostra, é dada pela formula a seguir.

$$R = \frac{P}{S} \quad (7)$$

Onde:

- R = Resistência a compressão, em Mpa;
- P = Carga de ruptura do corpo de prova, em Newtons;
- S = Área de seção transversal de aplicação da carga, em milímetros quadrados.

Figura 16 – Prensa de compressão axial para corpos de prova



4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Com base na Tabela 4, onde apresentou-se os níveis codificados para os fatores de um planejamento experimental do tipo DCCR de 2^4 , confeccionou-se uma matriz de planejamento correspondente, mostrada pela Tabela 4. Desta tabela, observou-se os seguintes efeitos:

Tabela 4 - Matriz de planejamento associada às variáveis resposta da formulação do compósito gesso-CCM aditivado com DS-328/Al₂(SO₄)₃ com as variáveis respostas.

ENSAIO	Variáveis Independentes				Variáveis Resposta		
	G (g)	CL (g)	CP (g)	DS/S (g/kg)	TP	RC	AA
1	50,0	5,0	5,0	1,58	15,41	8,92	17,2
2	50,0	5,0	5,0	3,70	11,83	11,75	13,05
3	50,0	5,0	15,0	1,58	12,85	10,71	14,32
4	50,0	5,0	15,0	3,70	12,35	11,40	13,45
5	50,0	15,0	5,0	1,58	12,55	10,96	13,99
6	50,0	15,0	5,0	3,70	12,27	11,21	13,68
7	50,0	15,0	15,0	1,58	12,78	10,76	14,03
8	50,0	15,0	15,0	3,70	11,36	12,11	12,66
9	70,0	5,0	5,0	1,58	17,08	8,06	18,88
10	70,0	5,0	5,0	3,70	14,01	9,94	15,43
11	70,0	5,0	15,0	1,58	14,25	9,65	16,01
12	70,0	5,0	15,0	3,70	13,98	10,76	14,25
13	70,0	15,0	5,0	1,58	12,87	10,69	14,35
14	70,0	15,0	5,0	3,70	12,57	10,95	14,01
15	70,0	15,0	15,0	1,58	13,44	10,24	15,05
16	70,0	15,0	15,0	3,70	12,48	11,03	13,91
17	40,0	10,0	10,0	2,64	11,11	12,23	15,4
18	80,0	10,0	10,0	2,64	13,85	9,93	15,89
19	60,0	0,0	10,0	2,64	14,38	9,40	16,32
20	60,0	20,0	10,0	2,64	12,44	11,06	13,87
21	60,0	10,0	0,0	2,64	13,82	10,78	14,23
22	60,0	10,0	20,0	2,64	12,07	11,39	12,72
23	60,0	10,0	10,0	0,52	11,55	11,91	12,88
24	60,0	10,0	10,0	4,76	9,91	13,88	11,05
25	60,0	10,0	10,0	2,64	9,89	13,37	11,47
26	60,0	10,0	10,0	2,64	10,61	12,96	12,32
27	60,0	10,0	10,0	2,64	9,89	13,92	11,02
28	60,0	10,0	10,0	2,64	10,11	12,75	12,03
29	60,0	10,0	10,0	2,64	10,24	13,44	11,41

*TP – Tempo de pega (min); RC – Resistência à compressão (MPa); AA – Absorção de água (%)

4.1 EFEITO PRINCIPAL

Em relação ao tempo de pega os efeitos principais dos fatores percentual da cinza leve, percentual de cinza pesada e teor DS-328/Sulfato de Alumínio comercial (50% m/m) induziram, em média, à redução dessa variável resposta. Como em testes fora do planejamento observou-se que a presença de CCM já reduzia o tempo de pega do gesso, conforme Pedrosa Neto (2017), observou-se que o DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ serviu também como aditivo acelerador do tempo de pega.

Para a resistência à compressão os efeitos dos fatores percentual da cinza leve, percentual de cinza pesada e teor de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ induziram, em média, ao aumento dessa variável resposta. A explicação provável pode ser atribuída à uma menor porosidade resultante em função de uma granulometria com partículas menores de cinza leve, uma vez que a cinza pesada apresentar grãos maiores que os da cinza leve. Além disso, o fato de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ser utilizado na compactação de solos, acelerando a hidratação, é motivo para se prever um aumento dessa resistência.

Sobre a absorção de água os efeitos dos fatores percentual da cinza leve, percentual de cinza pesada e teor de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ induziram à redução dessa variável resposta, induzindo a valores comparáveis às melhores performances de moldagem por prensagem uniaxial do compósito gesso/CCM (PEDROSA NETO, 2017). A explicação provável pode então ser atribuída ao efeito principal do aditivo DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Como de se esperar, o percentual de gesso induziu ao aumento do tempo de pega e absorção de água. Já com a resistência à compressão ocorreu o inverso. A explicação para este efeito pode ser atribuída à uma maior quantidade de moléculas de semi-hidrato (gesso) para serem hidratadas a moléculas de di-hidrato (gipsita), sendo esse semi-hidrato responsável por boa parte da porosidade do compósito.

As análises das tabelas de variância (ANOVA), referentes à cada variável resposta, auxiliou na identificação de cada efeito principal e interações entre as variáveis (efeitos de segunda e ordens mais elevadas).

4.1 ANOVA DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a variável Absorção de Água (TP), pelo método da imersão total do corpo de prova do compósito, os resultados da Tabela de ANOVA (Tabela 5) apresenta um coeficiente de determinação (R^2) explicando 90,77% da variabilidade do fenômeno. O coeficiente de regressão

permitiu o aceite do ajuste, uma vez que se mostrou acima de 0,7 (0,9527). No caso, não houve falta de ajuste (Lack of fit) uma vez que o valor de p ficou acima de 0,05, indicando que o desvio entre pontos experimentais e previstos estariam bem representados pelo valor de R^2 . Um erro experimental pouco maior que 3% (3,05%), $[0,27/(1,08+7,766)]$, consolidou os critérios propostos por Fisher e permitiu a adoção do modelo de previsão para esta variável resposta.

Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção percentual de água pelos corpos de prova do compósito

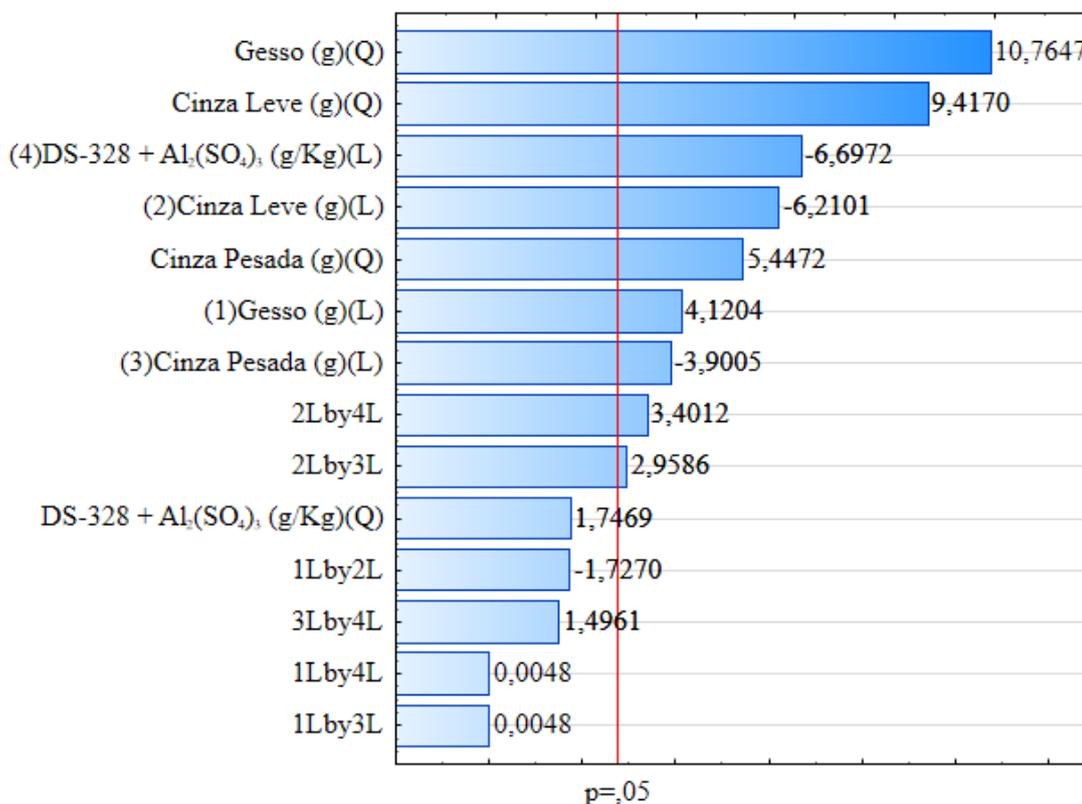
Factor	SS	df	MS	F	p
(1) Gesso (g)(L)	4,58500	1	4,58500	16,9784	0,014607
Gesso (g)(Q)	31,29359	1	31,29359	115,8807	0,000422
(2) Cinza Leve (g)(L)	10,41484	1	10,41484	38,5663	0,003421
Cinza Leve (g)(Q)	23,94812	1	23,94812	88,6803	0,000709
(3) Cinza Pesada (g)(L)	4,10854	1	4,10854	15,2140	0,017534
Cinza Pesada (g)(Q)	8,01301	1	8,01301	29,6723	0,005517
(4) DS-328 + Al ₂ (SO ₄) ₃ (g/Kg)(L)	12,11260	1	12,11260	44,8532	0,002586
DS-328 + Al ₂ (SO ₄) ₃ (g/Kg)(Q)	0,82419	1	0,82419	3,0520	0,155561
1L by 2L	0,80551	1	0,80551	2,9828	0,159226
1L by 3L	0,00001	1	0,00001	0,0000	0,996392
1L by 4L	0,00001	1	0,00001	0,0000	0,996392
2L by 3L	2,36391	1	2,36391	8,7536	0,041610
2L by 4L	3,12406	1	3,12406	11,5684	0,027246
3L by 4L	0,60451	1	0,60451	2,2385	0,208946
Lack of Fit	7,76632	10	0,77663	2,8759	0,160190
Pure Error	1,08020	4	0,27005		
Total SS	95,87054	28			

Dos efeitos principais apenas o efeito quadrático do teor de DS-328/Al₂(SO₄)₃ não se mostrou estatisticamente importante. Como faz parte do compósito como aditivo, este componente favorece economicamente o processo, limitando o teor dessa substância a valores pouco menores que este, contribuindo técnica e economicamente para o processo (RESCIC et al., 2021). Dos 6 efeitos secundários apenas 2 não se mostraram significativos, as interações entre o gesso e os percentuais de cinza pesada e o teor de DS-328. Portanto, pode-se variar qualquer destes fatores sem se esperar variações nos efeitos principais dos demais. Contudo, as interações entre os demais efeitos secundários alertam para um cuidado especial na modificação de qualquer dos fatores.

A Figura 17 mostra o diagrama de Pareto feito através dos dados obtidos nos ensaios de

absorção de água por imersão total dos corpos de prova. Através deste diagrama podem ser definidos, com 95 % de confiança, os efeitos significativos sobre a absorção percentual de água. Os elementos significativos foram, gesso, cinza leve, cinza pesada, DS-328 + Sulfato de cálcio comercial, à exceção do termo quadrático representando o teor do aditivo. Também suas interações não se mostraram estatisticamente importantes para a absorção percentual de água.

Figura 17 – Diagrama de Pareto para a absorção percentual de água dos corpos de prova do compósito



A partir dos efeitos analisados o modelo estatístico que descreve a absorção de água a partir das variáveis de controle utilizadas é dado pelo seguinte modelo de previsão:

$$AA(\%) = 11,650 + 0,874xG + 2,196xG^2 - 1,317xCL + 1,921xCL^2 - 0,827xC + 1,111xC^2 - 1,421xD + 0,769xCLxC + 0,884xCLxD \quad (11)$$

Sendo: AA = Absorção de Água (%); G = Gesso (g); CL = Cinza Leve (g); C = Cinza Pesada (g); D = DS-328 + Sulfato de Alumínio (g/Kg).

Os gráficos de superfícies de resposta (Figuras de 18 a 29) são apresentados a seguir, ilustrando em detalhes as faixas de aumento e redução, para a absorção de água em função de diferentes combinações dos fatores de controle, definidas pela formulação do compósito.

Figura 18 – Superfície de resposta correspondente à superfície de resposta em função dos teores de gesso e CCM leve

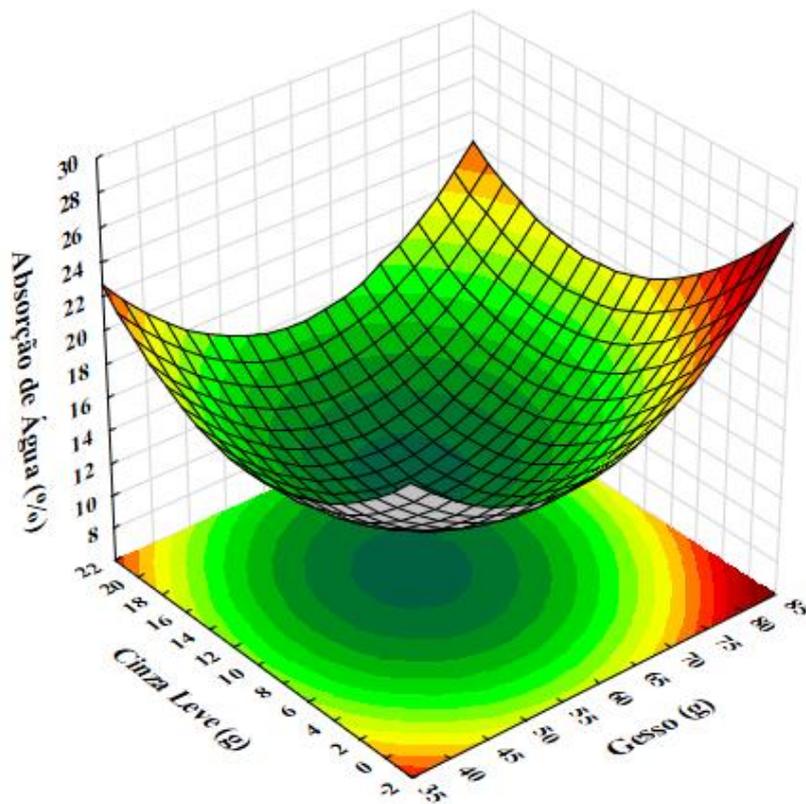


Figura 19 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e de CCM leve para a absorção percentual de água pelo composto

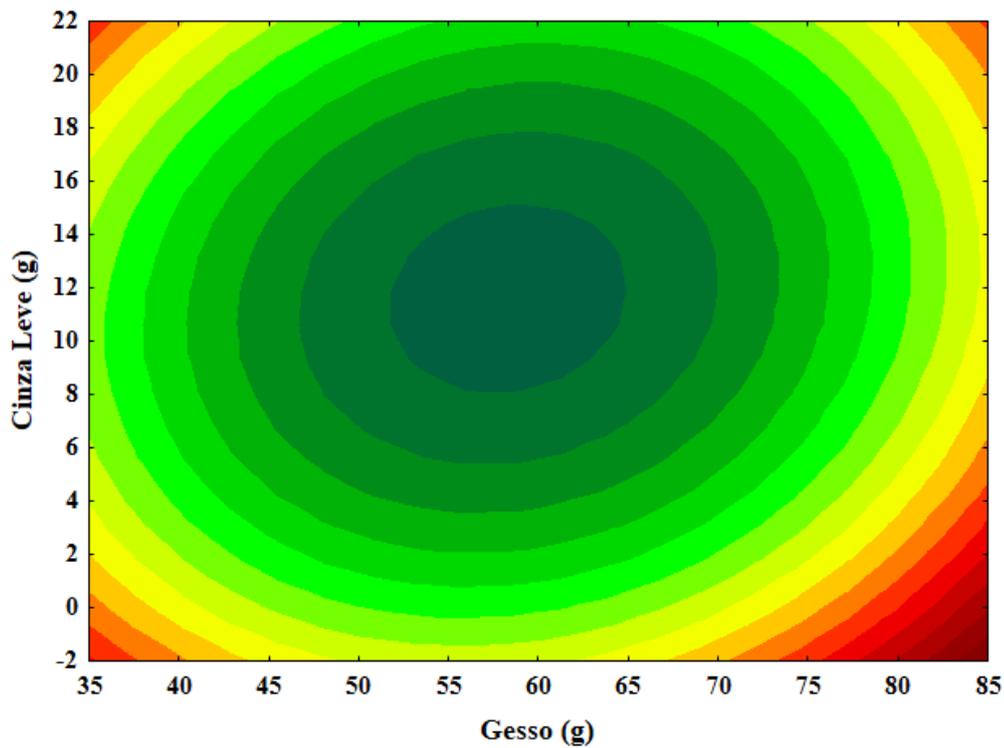


Figura 20 – Superfície de resposta correspondente à superfície de resposta em função dos teores de gesso e CCM pesada

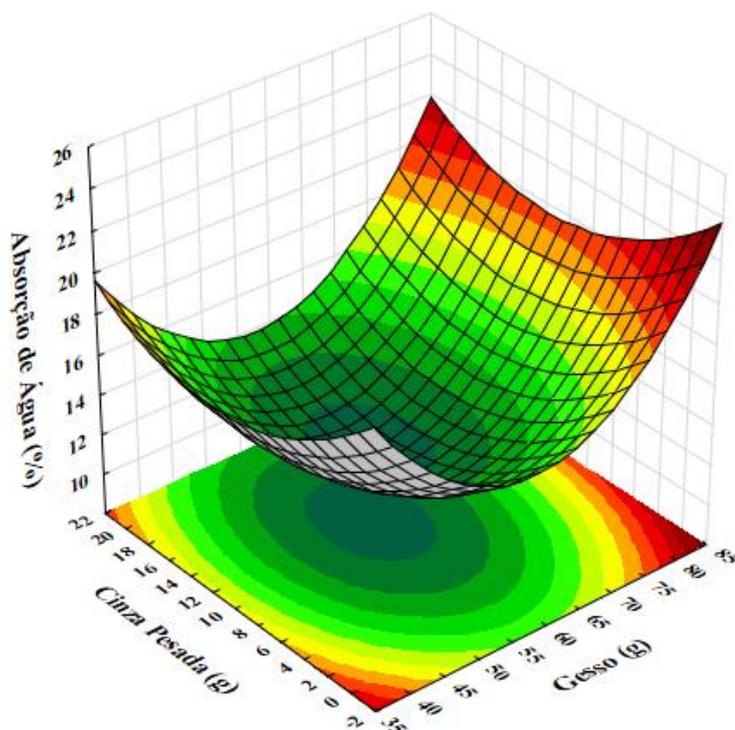


Figura 21 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e de CCM pesada para a absorção percentual de água pelo composto

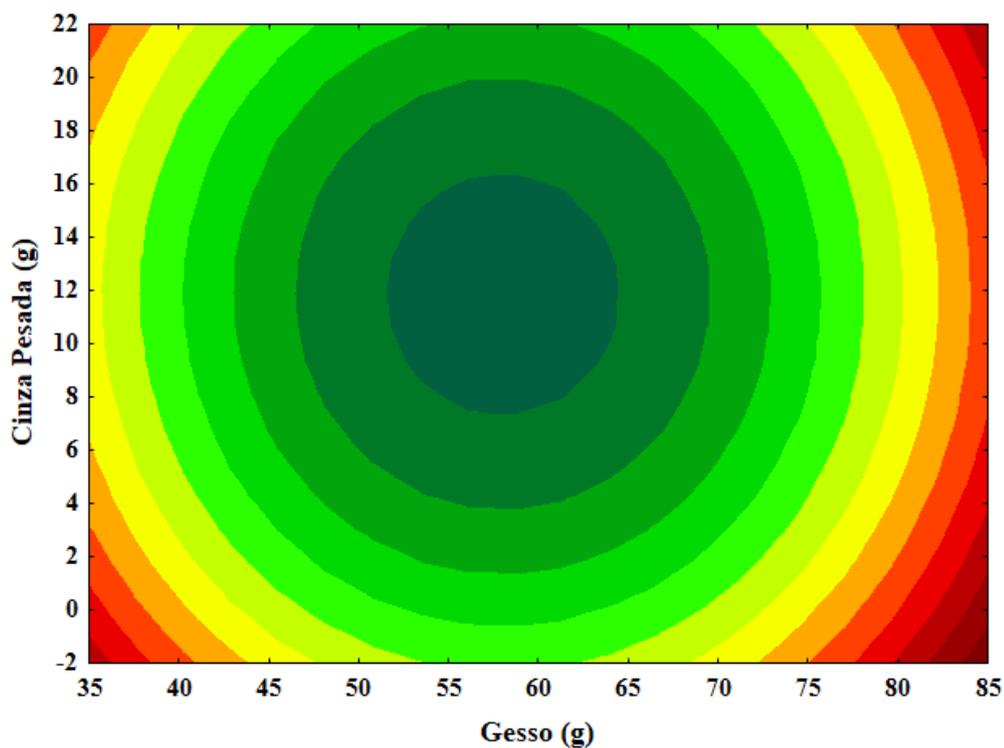


Figura 22 – Superfície de resposta correspondente à absorção de água em função dos teores de gesso e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no compósito

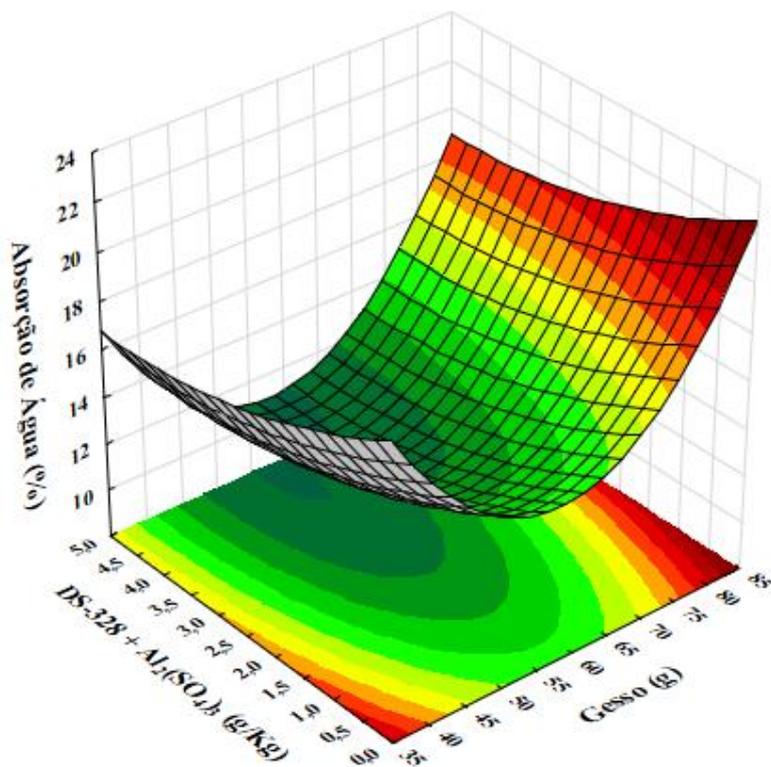


Figura 23 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para a absorção percentual de água pelo compósito

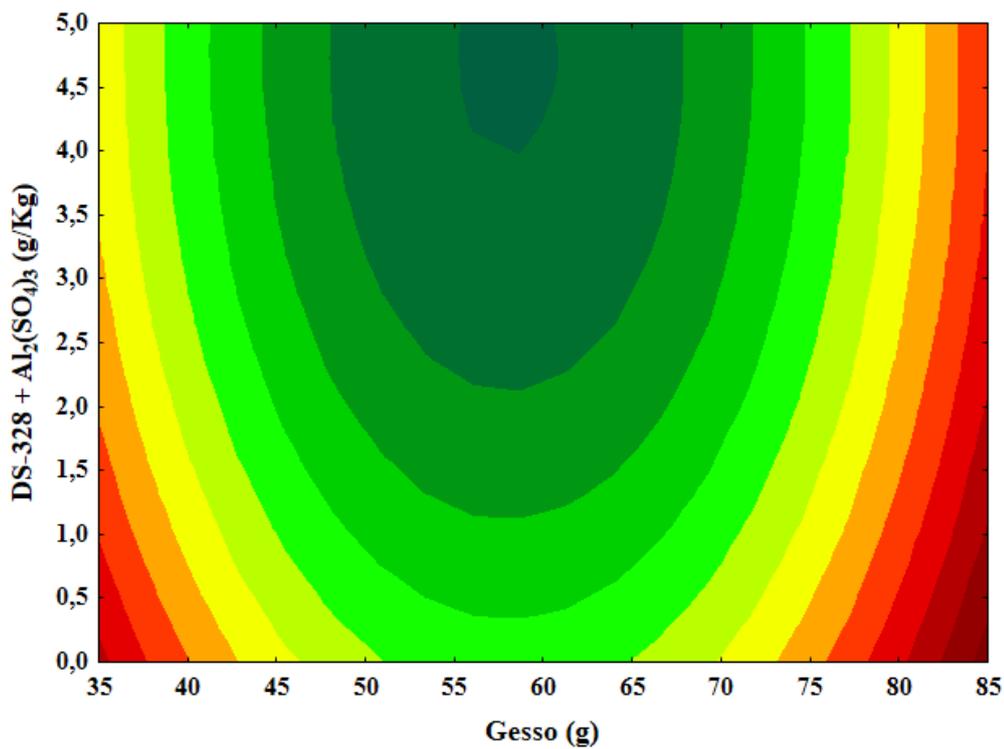


Figura 24 – Superfície de resposta correspondente à absorção de água em função dos teores de CCM leve e CCM pesado

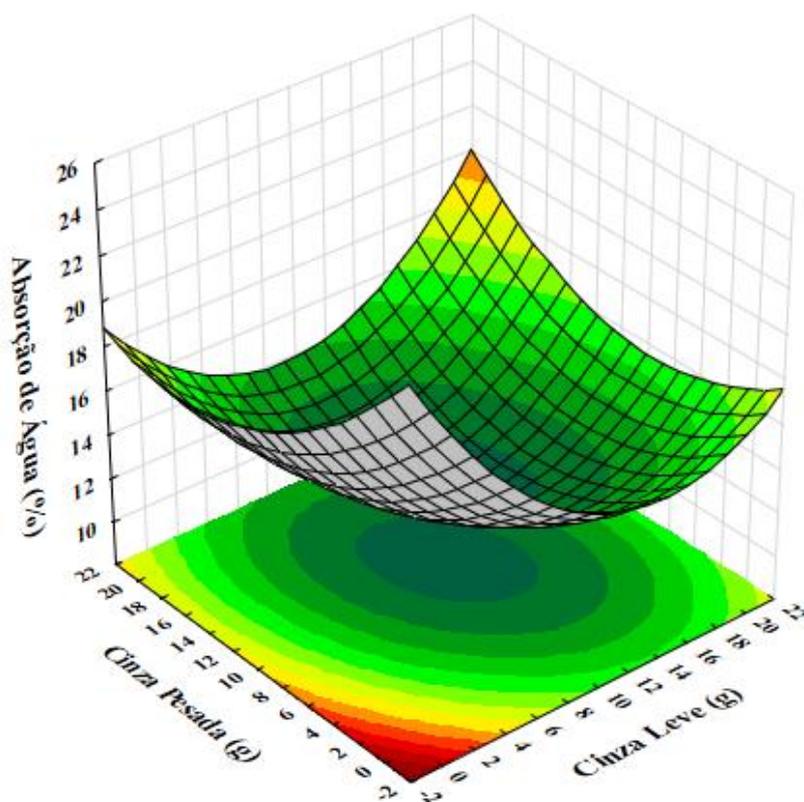


Figura 25 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de interação entre os teores de CCM leve e CCM pesado para a absorção percentual de água pelo compósito

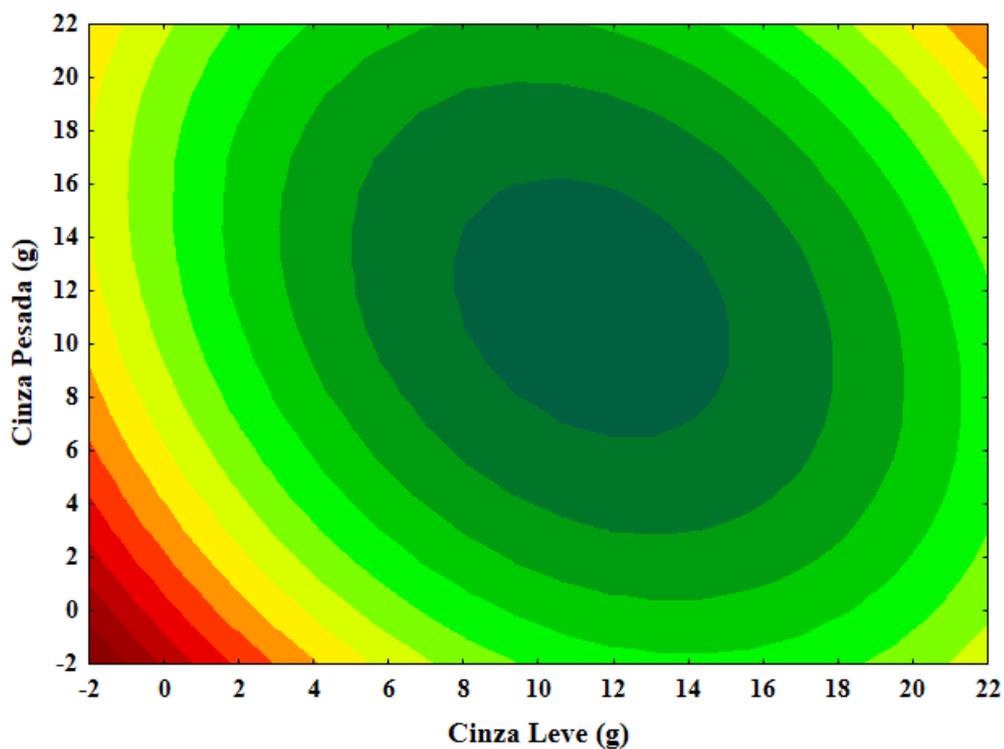


Figura 26 – Superfície de resposta correspondente à absorção de água em função dos teores de CCM leve e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no compósito

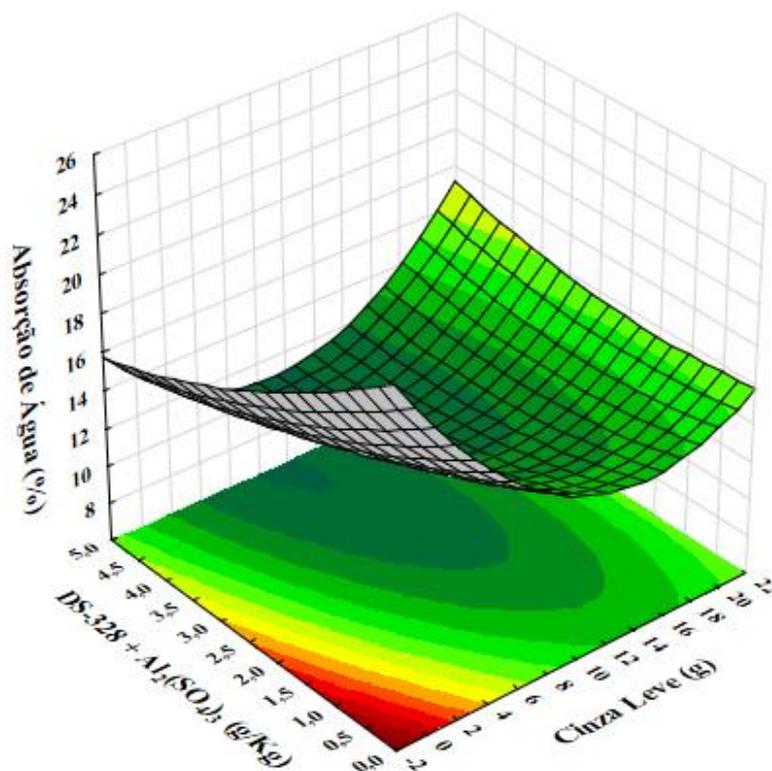


Figura 27 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de interação entre os teores de CCM leve e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para a absorção percentual de água pelo compósito

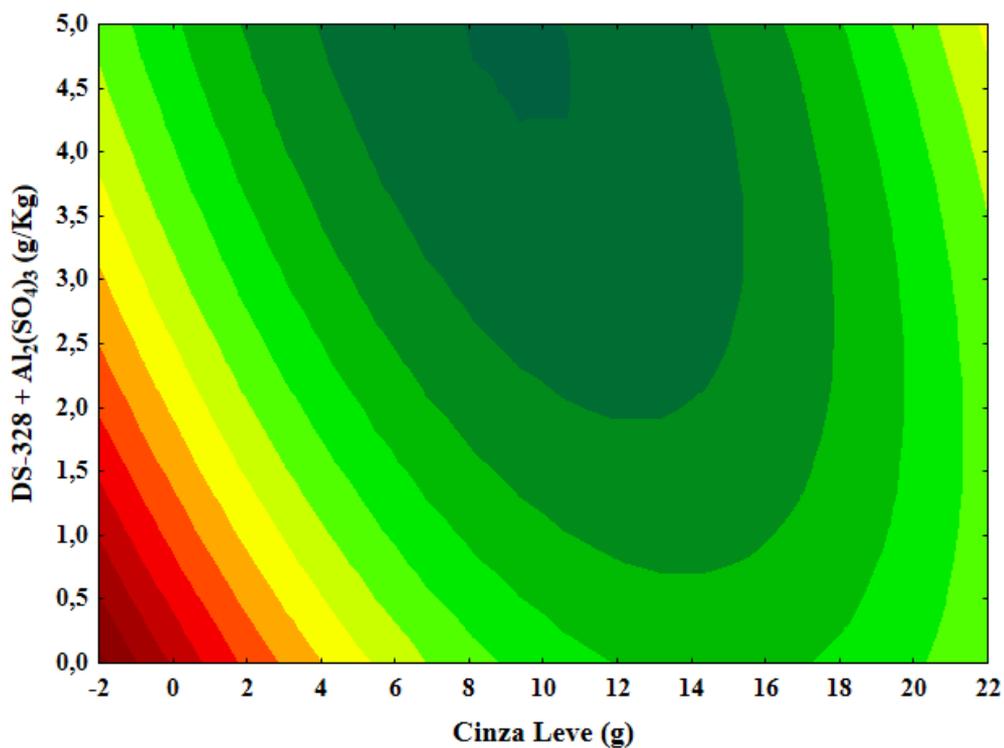


Figura 28 – Superfície de resposta correspondente à absorção de água em função dos teores de CCM pesada e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no compósito

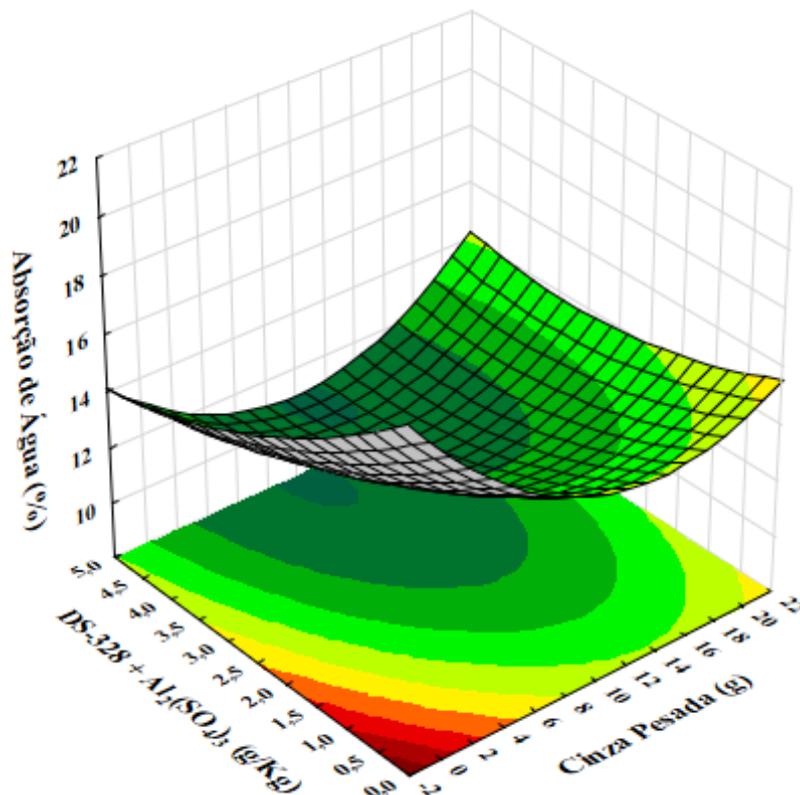
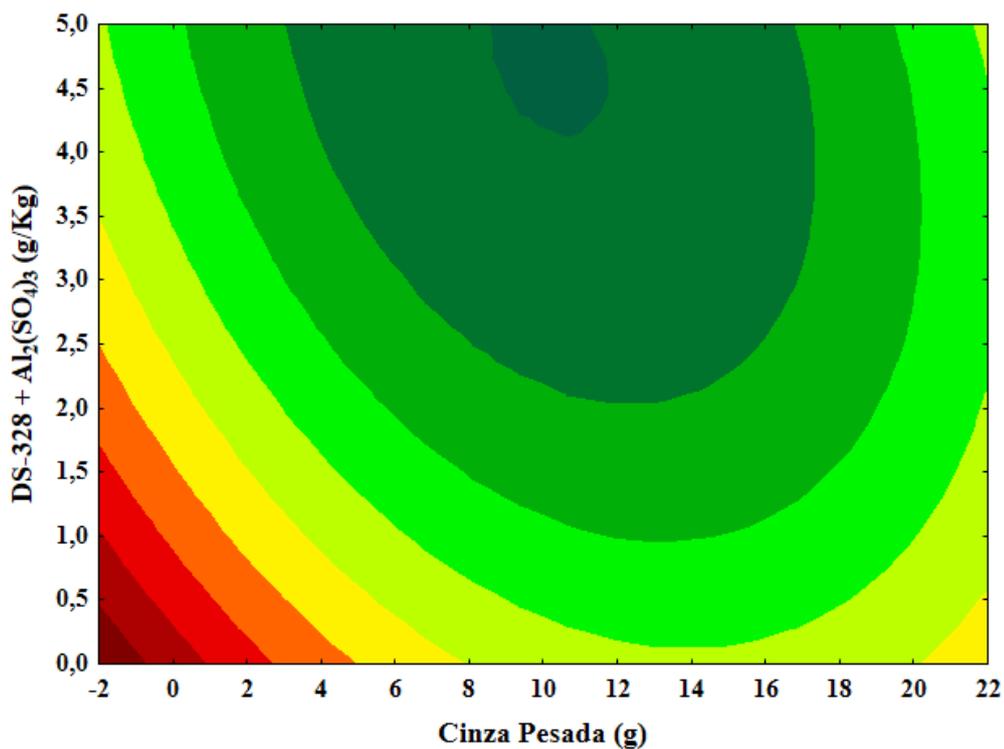


Figura 29 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de CCM pesada e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para a absorção percentual de água pelo compósito



4.2 ANOVA DO TEMPO DE PEGA

Para a variável Tempo de Pega (TP) da pasta constituída dos componentes que deram origem aos corpos de prova os resultados apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) explicando 89,37 % da variabilidade do fenômeno. O coeficiente de regressão permitiu o aceite do ajuste, uma vez que se mostrou acima de 0,7 (0,9453). No caso da falta de ajuste (Lack of fit) o valor de p ficou abaixo de 0,05, mas foi muito próximo, indicando que o desvio entre pontos experimentais e previstos poderiam ser desprezados. Um erro experimental p menor que 1% (0,99%), [0,09/(0,36+8,66)], permitiu a adoção do modelo de previsão para esta variável resposta.

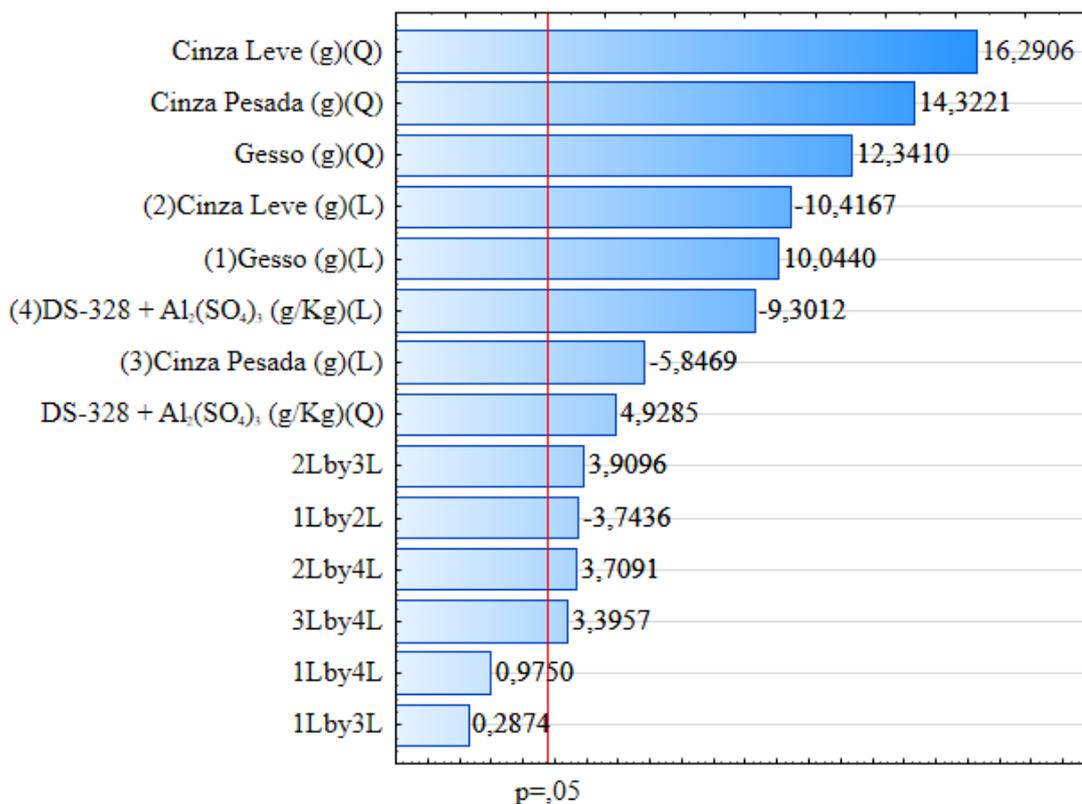
Dos 6 efeitos secundários apenas 2 não se mostraram significativos, as interações entre o gesso e os percentuais de cinza pesada e o teor de DS-328. Portanto, pode-se variar qualquer desses fatores sem se esperar variações nos efeitos principais dos demais. Contudo, as interações entre os demais efeitos secundários alertam para um cuidado especial na modificação de qualquer dos fatores.

Tabela 6 – Tabelas de ANOVA para o tempo de pega da pasta que dá origem aos corpos de prova

Factor	SS	df	MS	F	p
(1) Gesso (g)(L)	9,08547	1	9,08547	100,8820	0,000553
Gesso (g)(Q)	13,71624	1	13,71624	152,3006	0,000248
(2) Cinza Leve (g)(L)	9,77232	1	9,77232	108,5086	0,000480
Cinza Leve (g)(Q)	23,90065	1	23,90065	265,3849	0,000083
(3) Cinza Pesada (g)(L)	3,07884	1	3,07884	34,1864	0,004267
Cinza Pesada (g)(Q)	18,47349	1	18,47349	205,1236	0,000138
(4) DS-328 + Al₂(SO₄)₃ (g/Kg)(L)	7,79141	1	7,79141	86,5133	0,000743
DS-328 + Al ₂ (SO ₄) ₃ (g/kg)(Q)	2,18764	1	2,18764	24,2908	0,007881
1L by 2L	1,26217	1	1,26217	14,0147	0,020058
1L by 3L	0,00744	1	0,00744	0,0826	0,788057
1L by 4L	0,08563	1	0,08563	0,9508	0,384733
2L by 3L	1,37660	1	1,37660	15,2853	0,017399
2L by 4L	1,23902	1	1,23902	13,7577	0,020670
3L by 4L	1,03852	1	1,03852	11,5314	0,027383
Lack of Fit	8,66059	10	0,86606	9,6164	0,021486
Pure Error	0,36024	4	0,09006		
Total SS	84,89935	28			

Na confirmação gráfica dos valores da Tabela de ANOVA (tabela 6), a Figura 30 mostra o diagrama de Pareto, confirmando graficamente os resultados da ANOVA. Através deste diagrama podem ser definidos, com 95 % de confiança, os efeitos significativos sobre o tempo de pega dos corpos de prova. Foram considerados significativos o gesso, cinza leve, cinza pesada, DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura). Assim como, as interações do gesso com a cinza leve, cinza leve com a cinza pesada, cinza leve com DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura) e a cinza pesada com DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura), desconsiderando apenas as interações do gesso com a cinza pesada e gesso com DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura).

Figura 30 – Diagrama de Pareto para o tempo de pega



A partir dos efeitos estimados obtém-se a equação do modelo quadrático que descreve de forma eficiente o tempo de pega dos corpos de prova testados, fornecendo o seguinte modelo de previsão:

$$TP(\text{min}) = 10,147 + 1,231xG + 1,454xG^2 - 1,276xCL + 1,919xCL^2 - 0,716 + 1,688 - 1,139xD + 0,581xD^2 - 0,562xGxCL + 0,587xCLxC + 0,556xCLxD + 0,509xCxD$$

(9)

Sendo: TP = Tempo de Pega (min); G = Gesso (g); CL = Cinza Leve (g); C = Cinza Pesada (g); D = DS-328 + Sulfato de Alumínio (g/kg).

Os gráficos de superfícies de resposta (Figuras de 31 a 42) são apresentados a seguir, ilustrando em detalhes as faixas de aumento e redução para os tempos de pega em função de diferentes combinações dos fatores de controle.

Figura 31 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de gesso e de cinzas leve

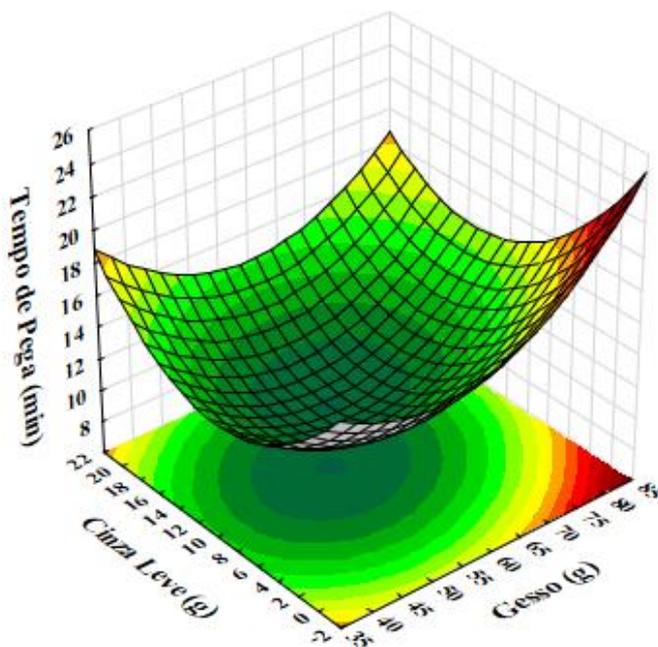


Figura 32 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de pouca interação entre os teores de gesso e cinza leve

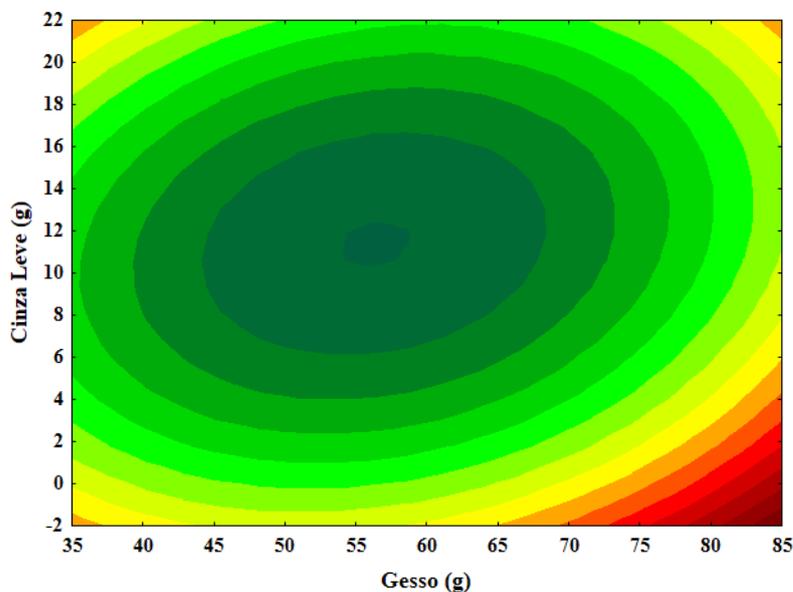


Figura 33 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de gesso e de cinzas pesada

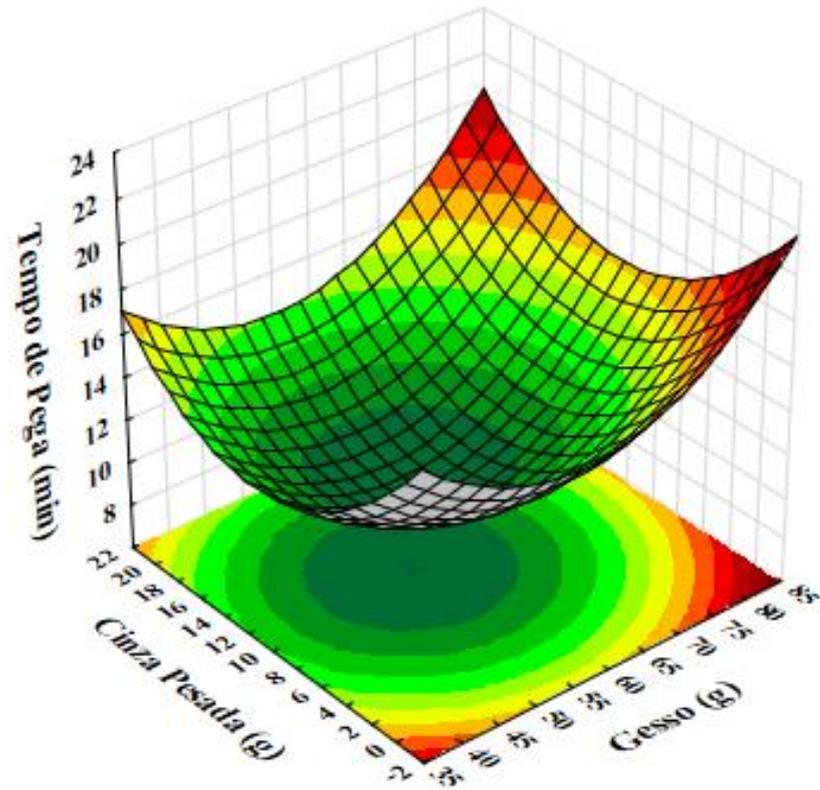


Figura 34 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e cinza pesada

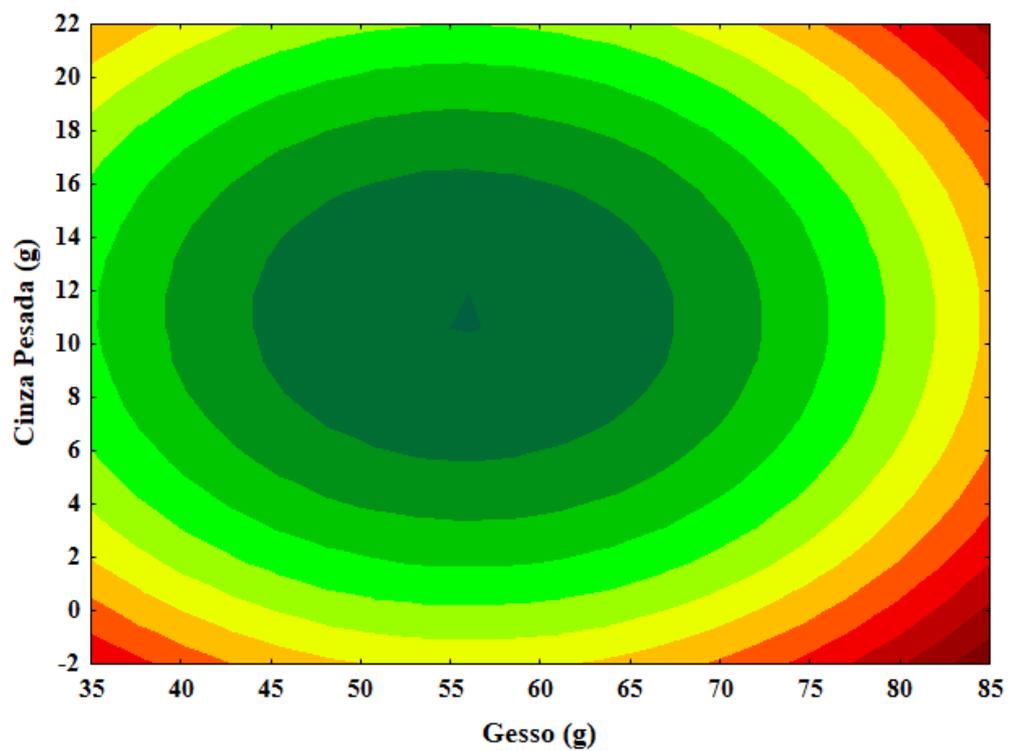


Figura 35 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de gesso e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

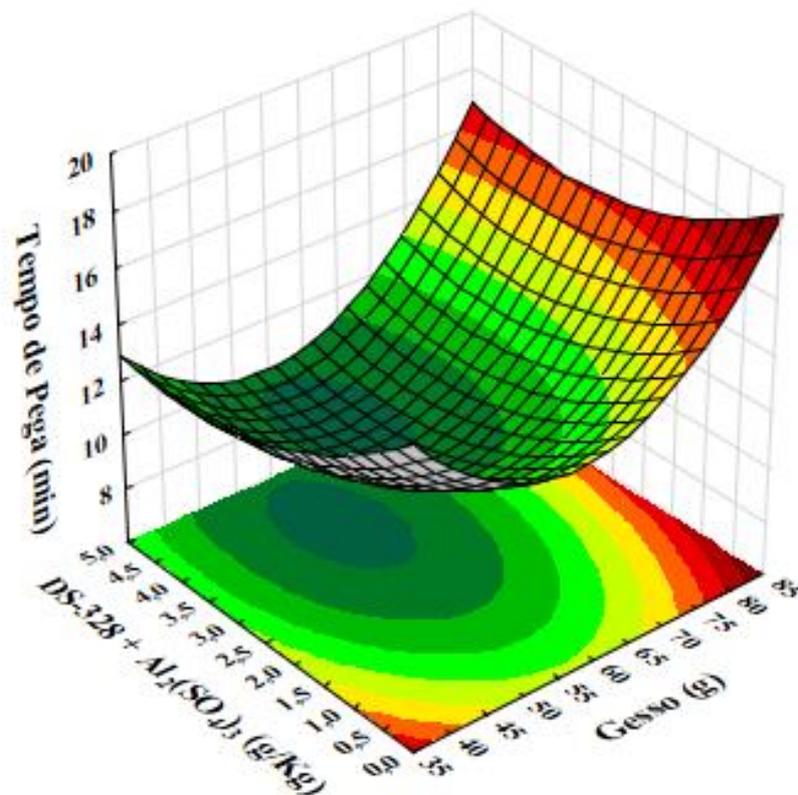


Figura 36 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

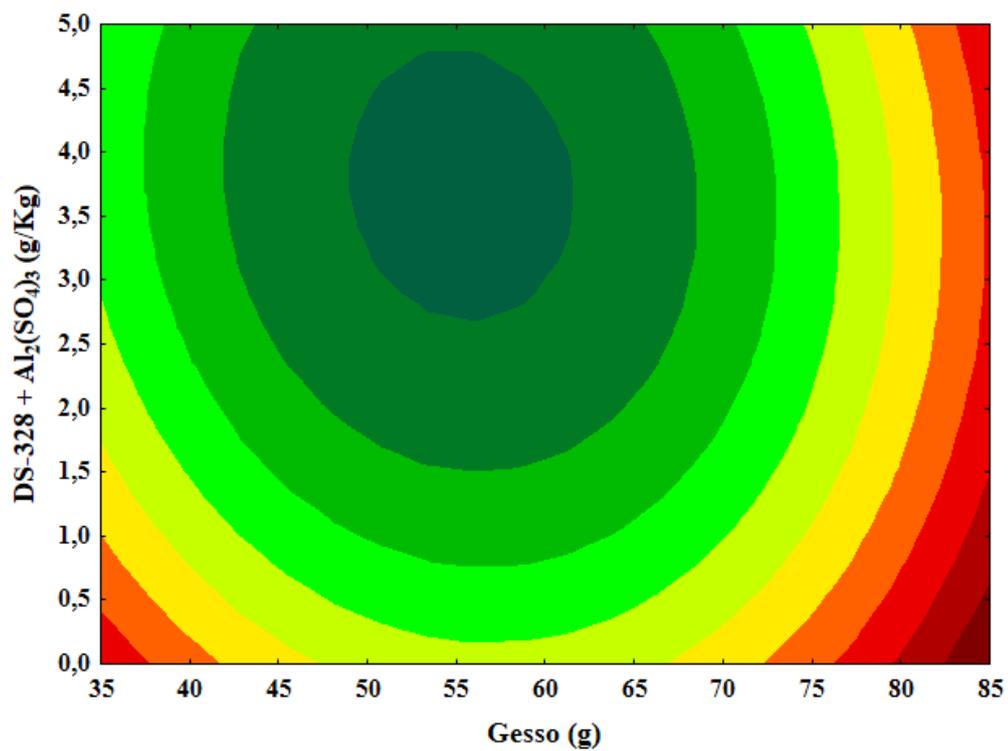


Figura 37 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de CCM leve e CCM pesada

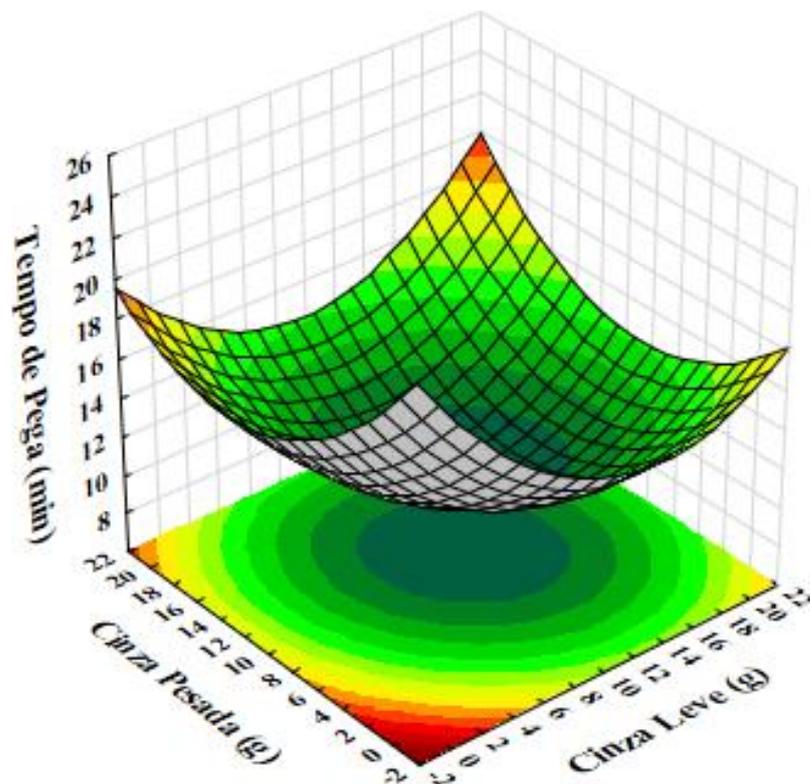


Figura 38 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de interação entre os teores de CCM leve e CCM pesada

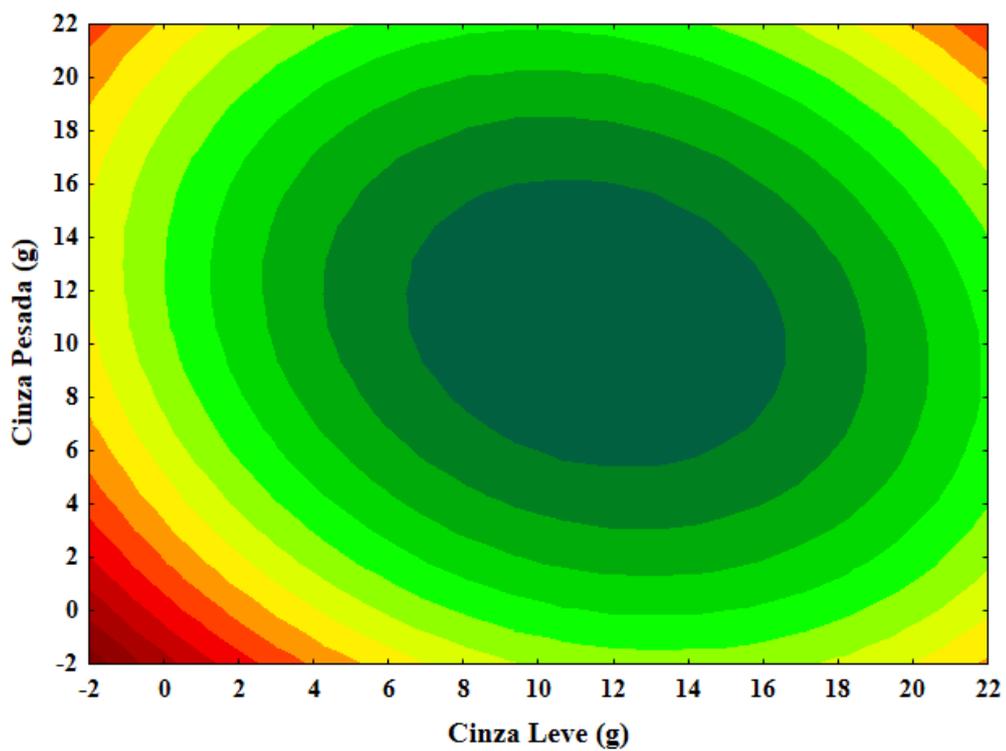


Figura 39 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de CCM leve e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

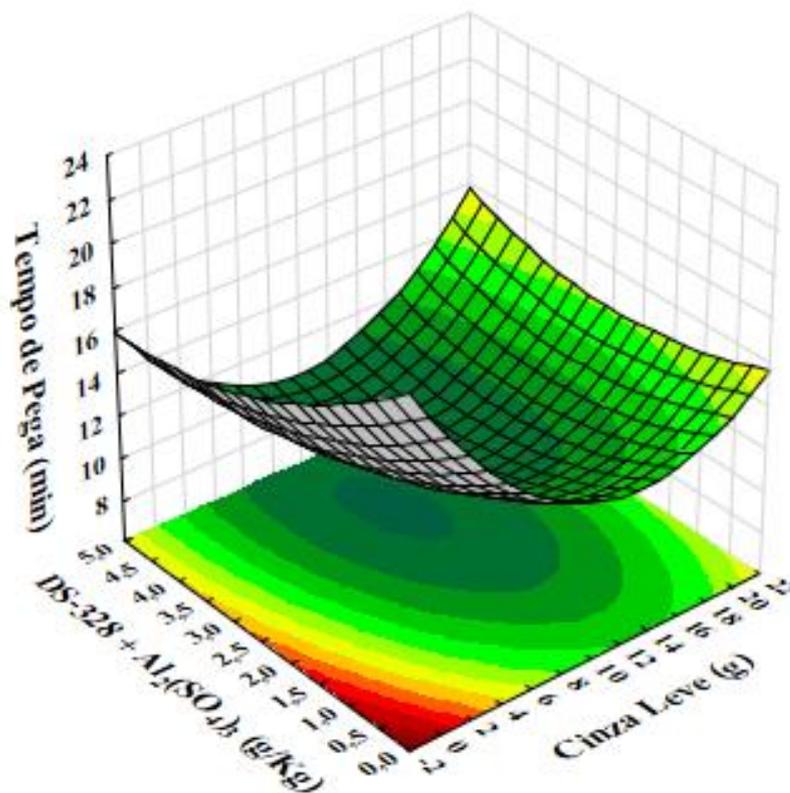


Figura 40 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de interação entre os teores de CCM leve e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

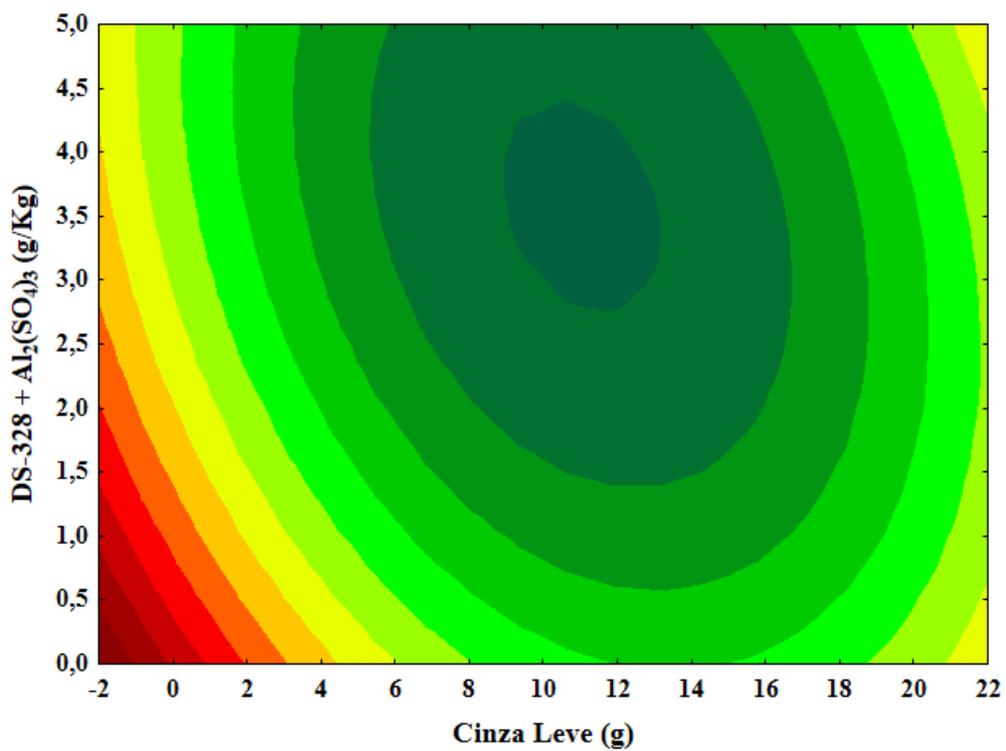


Figura 41 – Superfície de resposta correspondente ao tempo de pega em função dos teores de CCM pesada e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

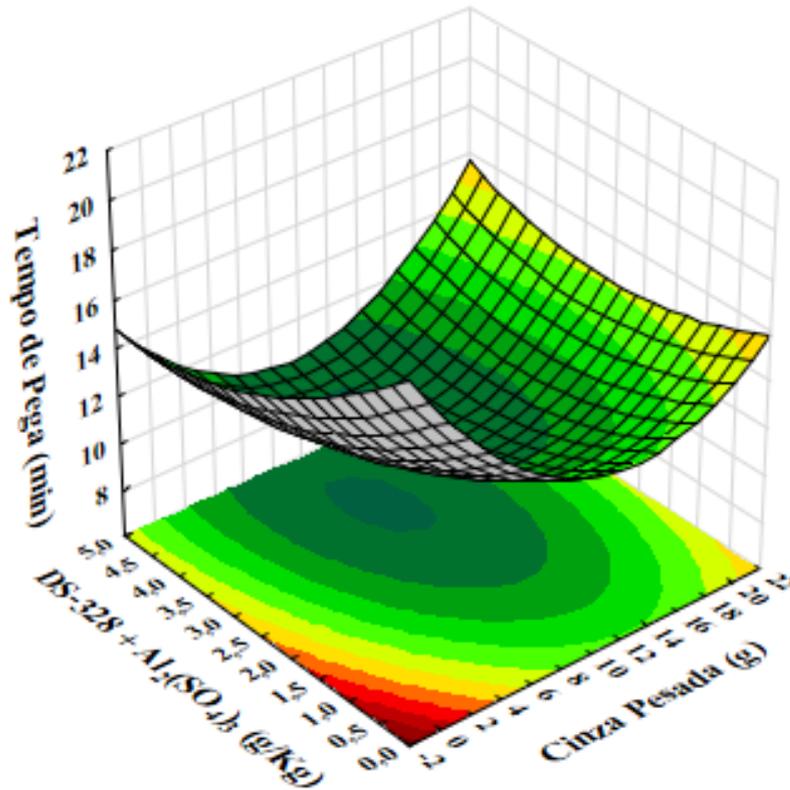
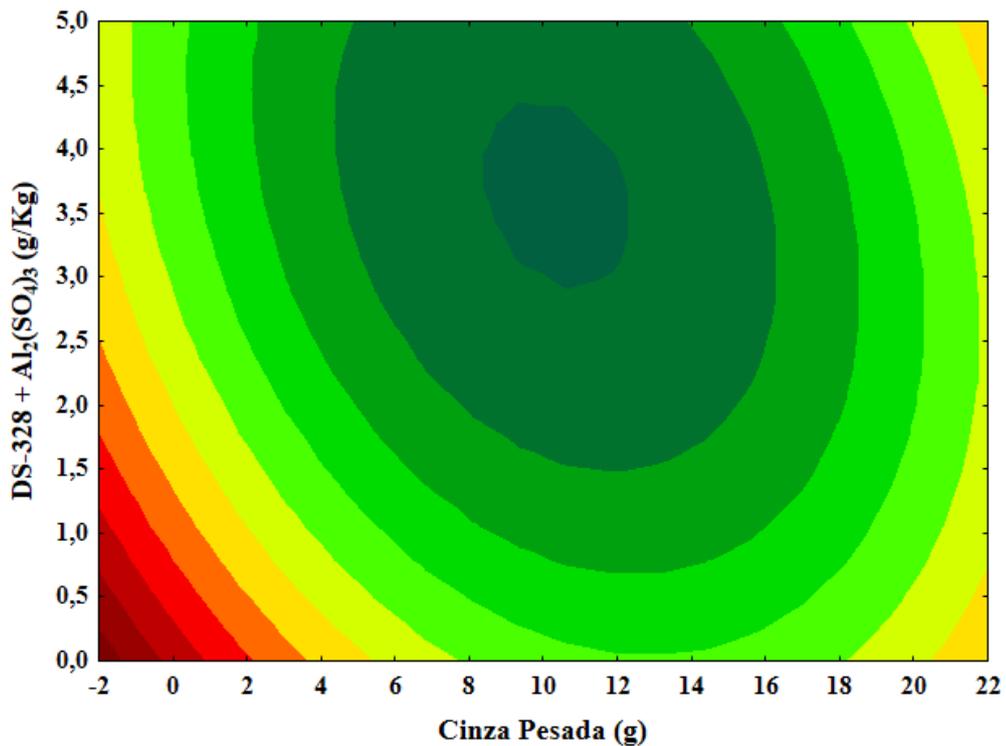


Figura 42 – Perfis das curvas de nível mostrando a existência de interação entre os teores de CCM pesada e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$



4.3 ANOVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para a Resistência à Compressão (RC) os resultados da ANOVA apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) explicando 89,92 % da variabilidade do fenômeno (tempo de pega). O coeficiente de regressão permitiu o aceite do ajuste, uma vez que se mostrou bem acima de 0,7 (0,9482). No caso da falta de ajuste (Lack of fit) o valor de p ficou acima de 0,05, demonstrando uma melhor performance entre dados experimentais e teóricos. Um erro experimental p menor que de 1% (0,33%), $[0,02/(0,82+5,08)]$, permitiu a adoção do modelo de previsão para esta variável resposta.

O resultado obtido, para a resistência à compressão, através de uma análise de variância pelo o DCCR, estão apresentados na tabela a seguir.

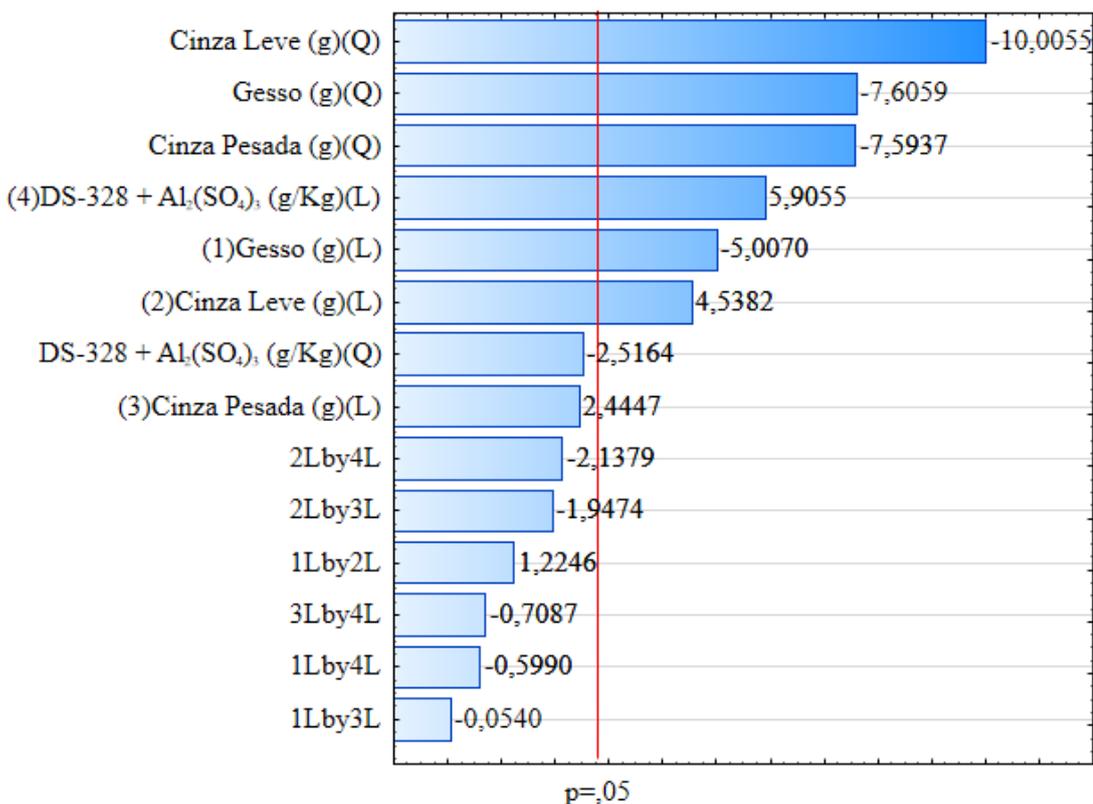
Tabela 7 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão dos corpos de prova

Factor	SS	df	MS	F	p
(1) Gesso (g)(L)	5,15179	1	5,15179	25,0702	0,007453
Gesso (g)(Q)	11,88783	1	11,88783	57,8498	0,001604
(2) Cinza Leve (g)(L)	4,23232	1	4,23232	20,5958	0,010511
Cinza Leve (g)(Q)	20,57205	1	20,57205	100,1099	0,000561
(3) Cinza Pesada (g)(L)	1,22825	1	1,22825	5,9770	0,070841
Cinza Pesada (g)(Q)	11,84973	1	11,84973	57,6644	0,001613
(4) DS-328 + Al₂(SO₄)₃ (g/Kg)(L)	7,16682	1	7,16682	34,8759	0,004115
DS-328 + Al ₂ (SO ₄) ₃ (g/Kg)(Q)	1,30127	1	1,30127	6,3324	0,065606
1L by 2L	0,30820	1	0,30820	1,4998	0,287894
1L by 3L	0,00060	1	0,00060	0,0029	0,959513
1L by 4L	0,07374	1	0,07374	0,3589	0,581420
2L by 3L	0,77937	1	0,77937	3,7927	0,123314
2L by 4L	0,93932	1	0,93932	4,5710	0,099312
3L by 4L	0,10322	1	0,10322	0,5023	0,517608
Lack of Fit	5,08335	10	0,50833	2,4737	0,198422
Pure Error	0,82198	4	0,20549		
Total SS	58,63601	28			

Nenhum dos 6 efeitos secundários mostrou-se favorável a uma interação significativa estatisticamente. Portanto, pode-se variar qualquer desses fatores sem se esperar variações nos efeitos principais dos demais na obtenção de uma resistência à compressão desejada. Contudo, faz-se necessário lembrar que a absorção de água pode ser afetada em função desta propriedade depender de efeitos secundários entre 4 dos fatores existentes.

A Figura 43 mostra o diagrama de Pareto feito através dos dados obtidos nos ensaios de resistência a compressão, através deste diagrama podem ser definidos, com 95 % de confiança, os efeitos significativos sobre a resistência a compressão dos corpos de prova. Foram considerados significativos o gesso, cinza leve, cinza pesada e o DS-328 + Sulfato de cálcio comercial (g/kg da mistura). Apenas o efeito principal da CCM pesada apresentou-se levemente irrelevante.

Figura 43 – Diagrama de Pareto para a resistência à compressão dos corpos de prova



Com relação aos efeitos secundários o diagrama de Pareto confirmou a não existência de interações secundárias. A partir dos efeitos estimados pela ANOVA, o modelo estatístico que descreve a resistência à compressão, a partir das variáveis originais codificadas, é dada pelo seguinte modelo de previsão:

$$RC(\text{MPa}) = 13,288 - 0,927xG - 1,354xG^2 + 0,839xCL - 1,781xCL^2 - 1,352 + 1,093xD \quad (10)$$

Sendo: RC = Resistência à Compressão (MPa); G = Gesso (g); CL = Cinza Leve (g); C = Cinza Pesada (g); D = DS-328 + Sulfato de Alumínio (g/Kg).

Os gráficos de superfícies de resposta (Figuras de 44 a 55) são apresentados a

seguir, ilustrando em detalhes as faixas de aumento e redução para a resistência à compressão em função de diferentes combinações dos fatores de controle.

Figura 44 – Superfície de resposta correspondente à resistência à compressão em função dos teores de gesso e CCM leve

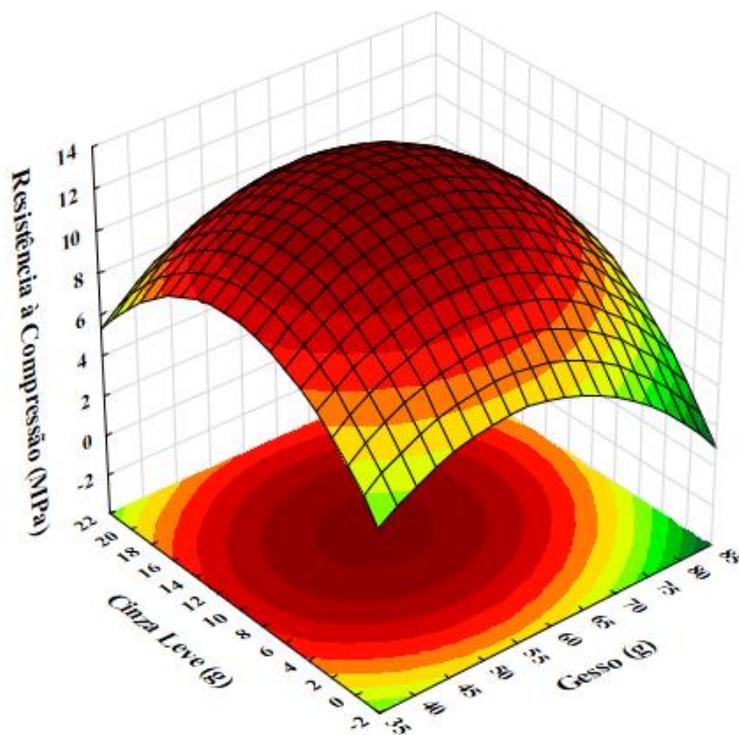


Figura 45 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e CCM leve

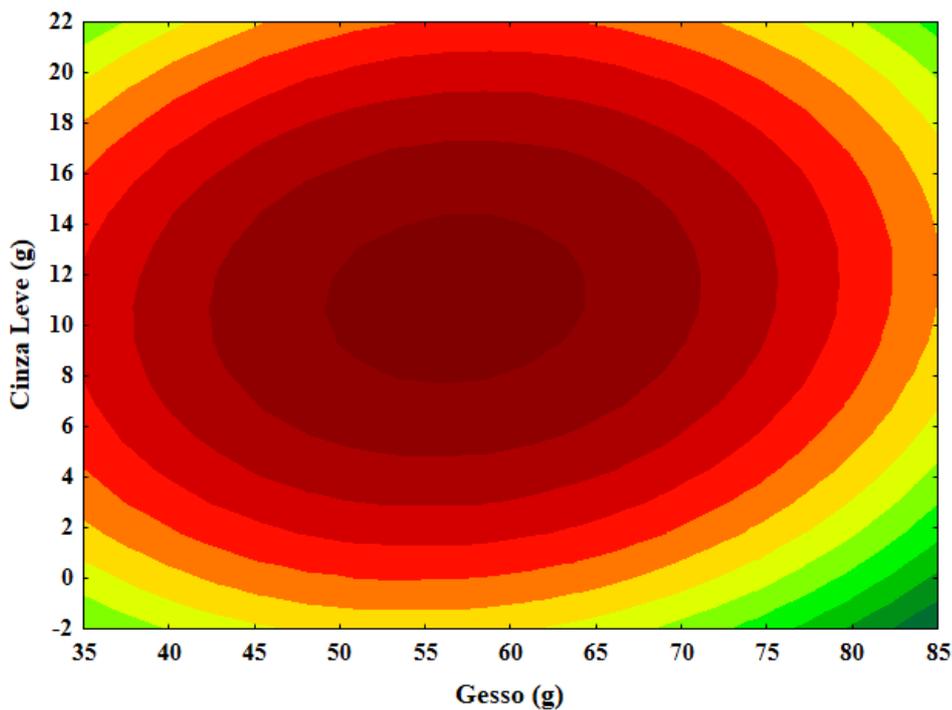


Figura 46 – Superfície de resposta correspondente à resistência à compressão em função dos teores de gesso e CCM pesada

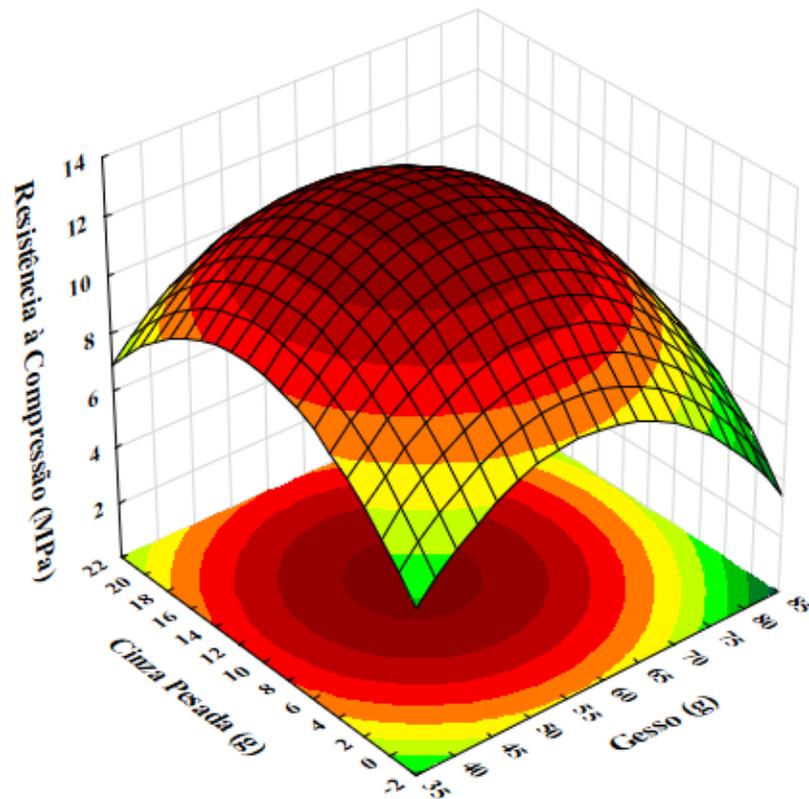


Figura 47 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e CCM pesada

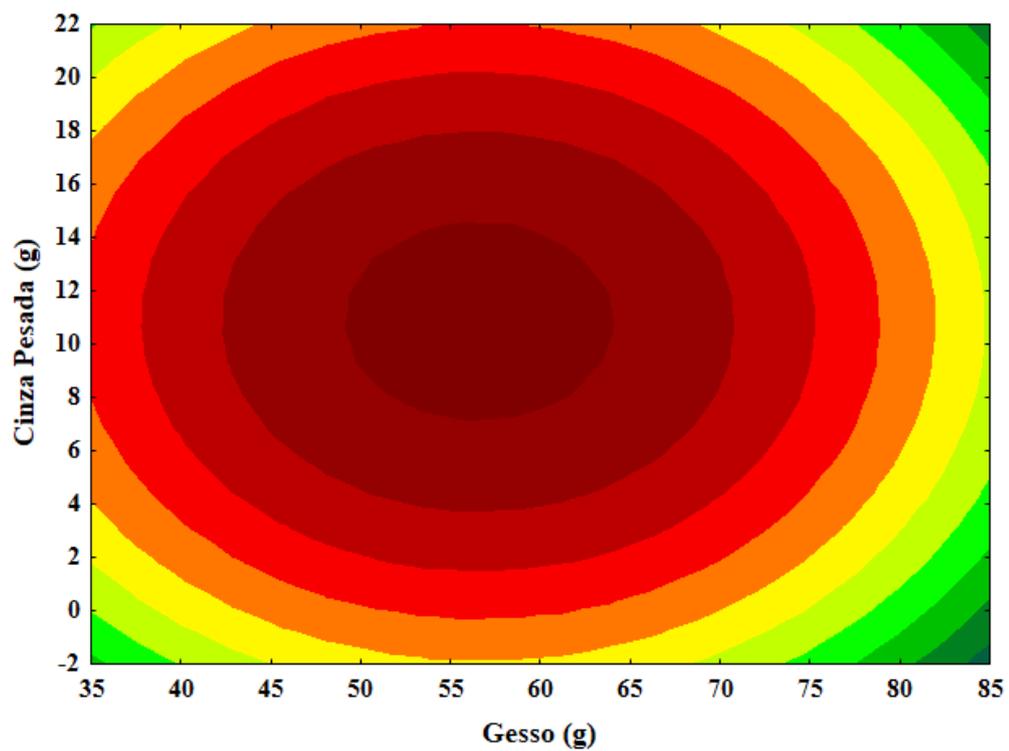


Figura 48 – Superfície de resposta correspondente aos teores de gesso e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

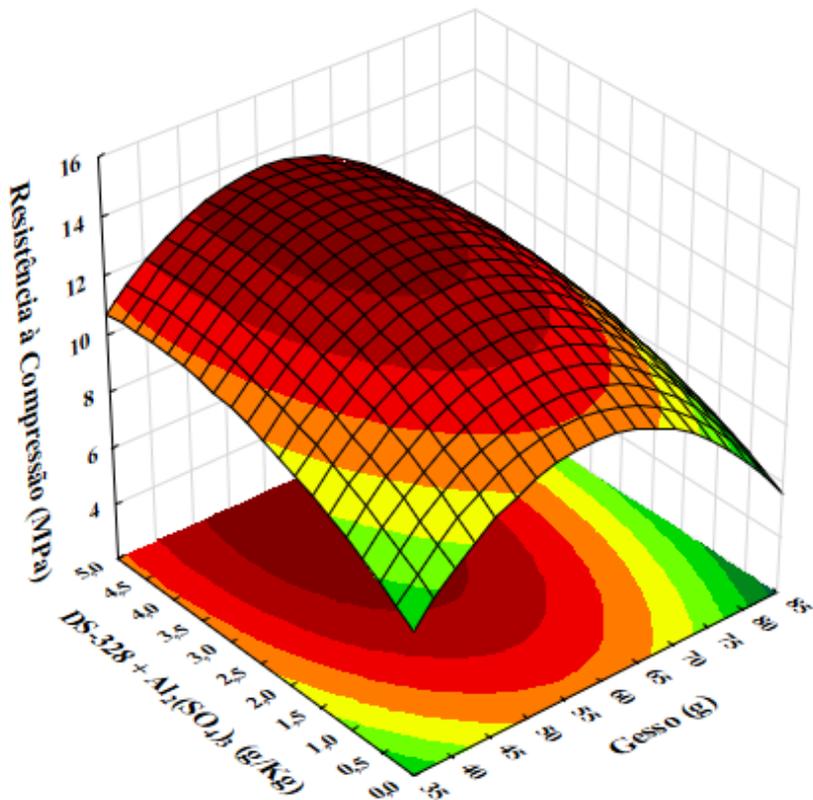


Figura 49 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de gesso e de DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

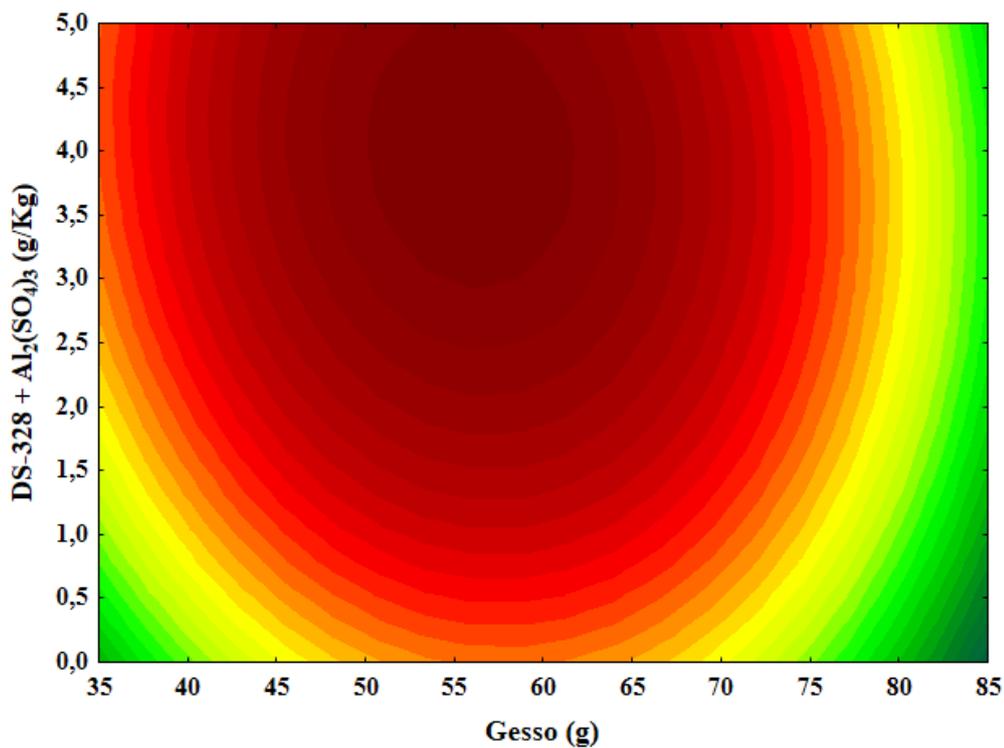


Figura 50 – Superfície de resposta correspondente aos teores de gesso e CCM leve e CCM pesada

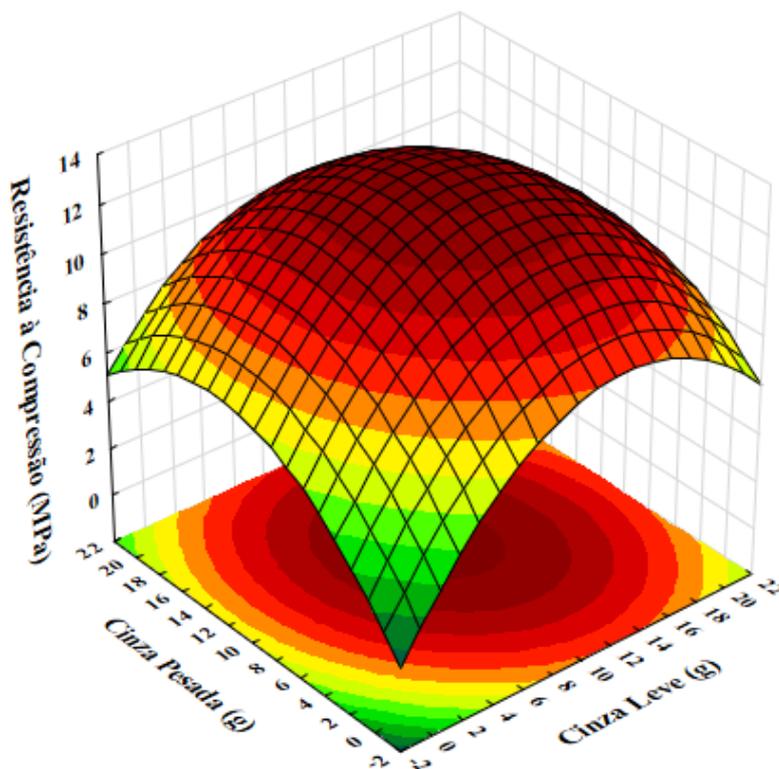


Figura 51 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de CCM leve e CCM pesada para a resistência à compressão no compósito

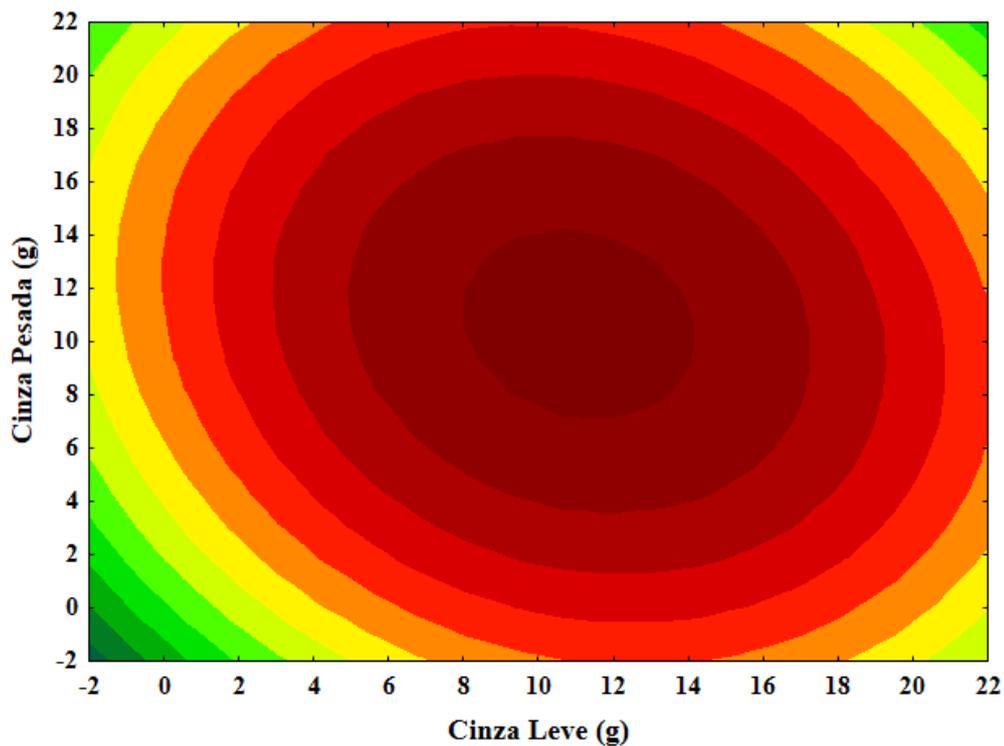


Figura 52 – Superfície de resposta para a resistência à compressão em função dos teores de gesso e CCM leve e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ do compósito

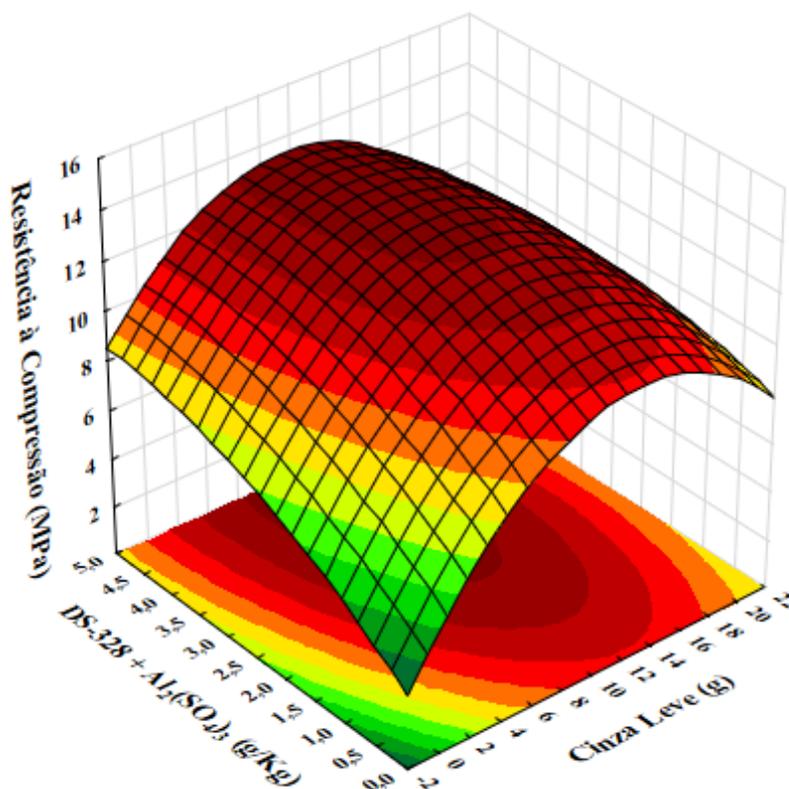


Figura 53 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de CCM leve e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para a resistência à compressão do compósito

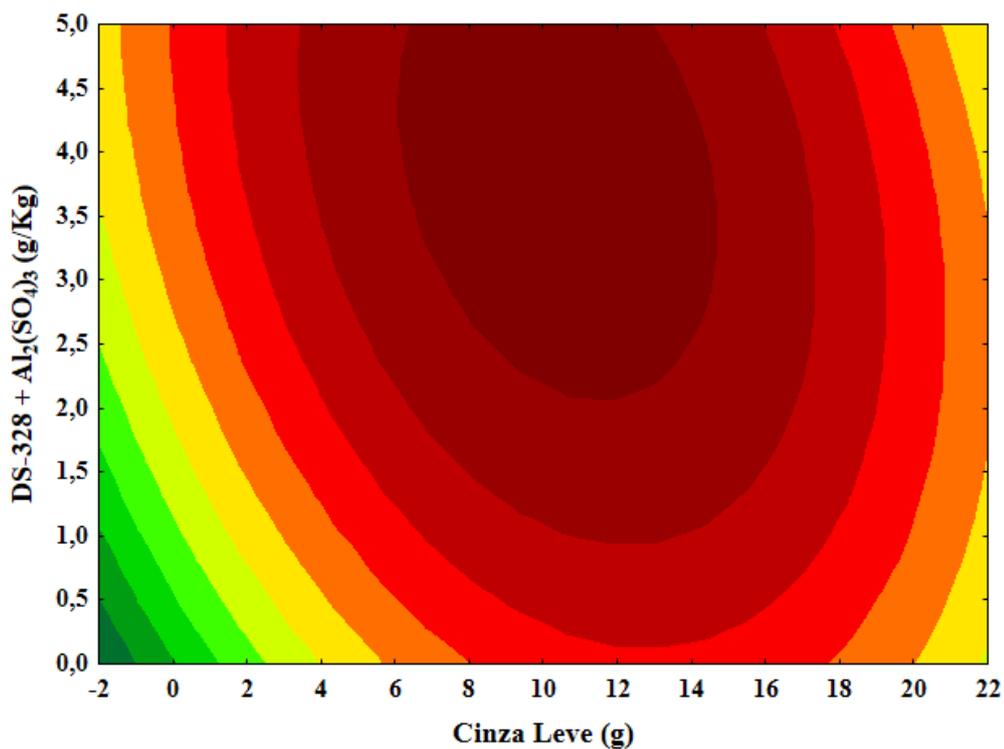


Figura 54 – Superfície de resposta correspondente à resistência à compressão em função dos teores de CCM pesada e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

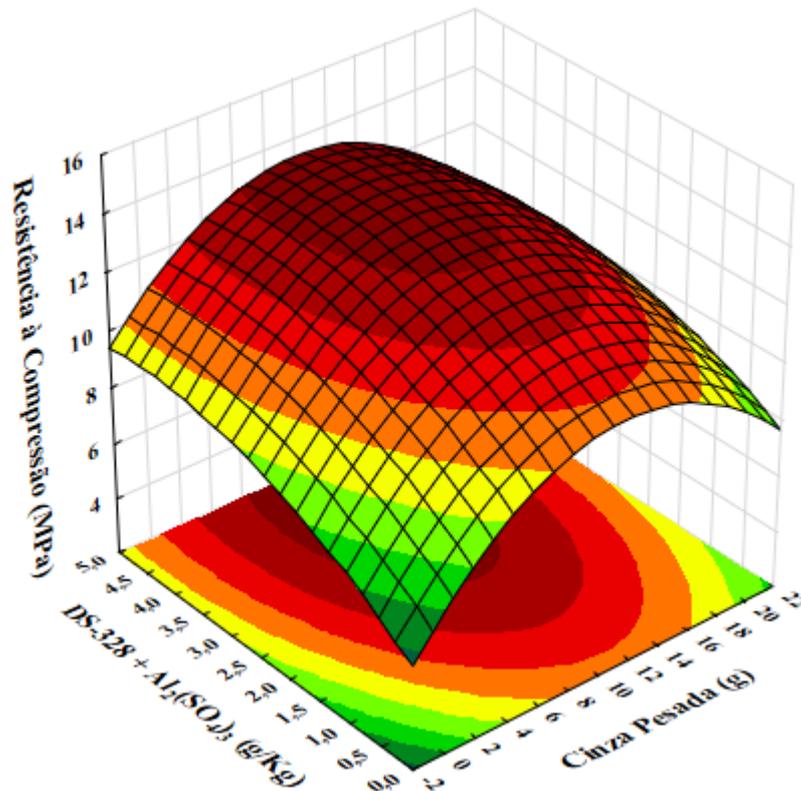
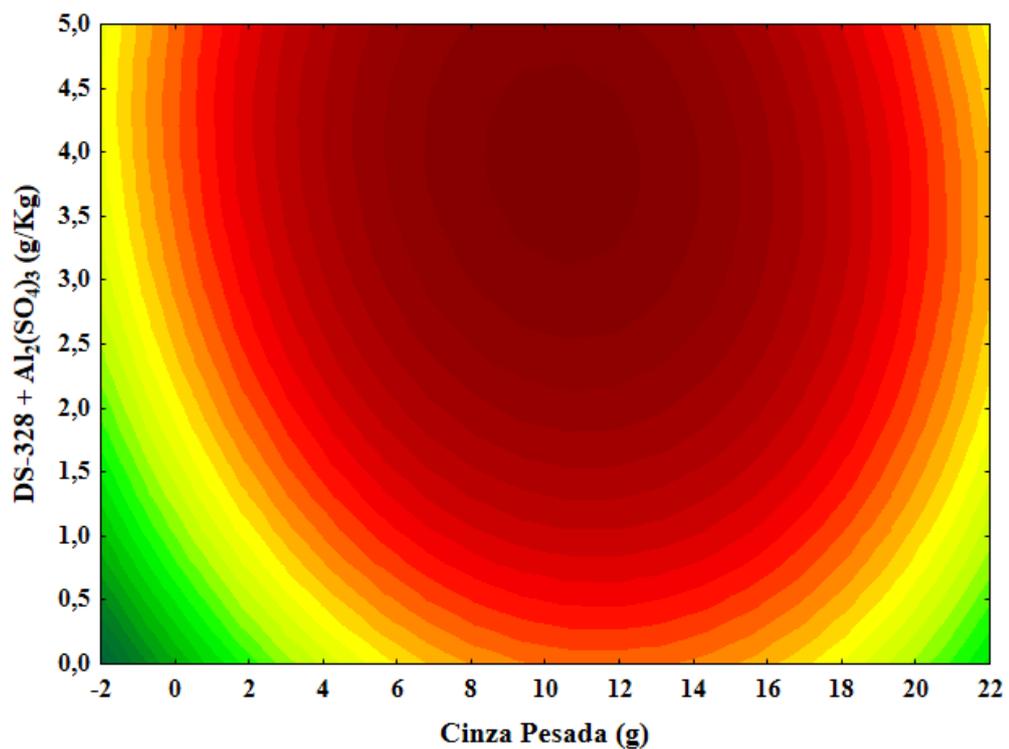


Figura 55 – Perfis das curvas de nível mostrando a não existência de interação entre os teores de CCM pesada e DS-328/ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para a resistência à compressão para compósito



5 CONCLUSÃO

Foi formulado um compósito à base de gesso com cinzas de carvão mineral. Para adaptação ao novo material de construção optou-se pela aditivação com óleos essenciais, comercialmente conhecido como DS-328 (Baba de Cupim Sintética). O uso de CCM (passivo ambiental) encapsulada e um aditivo de óleo essenciais tornam o compósito ambientalmente amigável.

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada, reduzindo-se o número de experimentos e permitindo observar efeitos individuais (principais) de cada variável de controle (fator) e as interações entre tais fatores, resultando em propriedades para o novo compósito.

Foi validado um modelo de previsão para cada variável resposta (Tempo de pega, Resistência à compressão e Absorção de água), com base nas hipóteses estatísticas de análise de variância (ANOVA). Uma comparação entre os três modelos para o compósito permite perceber a necessidade de se elaborar formulações com base na função mais desejada para função componente construtivo.

Os picos e as depressões obtidas nos gráficos de superfícies de resposta indicam pontos de máximos e mínimos locais. E sobre estes valores pode-se afirmar que:

- O ponto de máximo da resistência à compressão (13 MPa) indica um valor ótimo, uma vez que se encontra numa região acima de 8 MPa;

- O ponto de mínimo de absorção de água indica um ponto ótimo, uma vez que o gesso comum possui uma absorção média de água em torno de 55%, tendo havido uma redução média de cerca de 79%;

- No caso do tempo de pega médio de 10 min, uma vez que a norma define uma faixa de 5 a 20 minutos, pode-se considerar um ponto ótimo desde que se trabalhe com a confecção de pré-moldados utilizando-se uma máquina do tipo carrossel.

Dentro de previsões para futuros trabalhos encontram-se:

- Uso de planejamento de mistura para definição de quantidades adequadas de gesso, CCM leve e CCM pesada, com estudo da aditivação com DS-328 posterior à esta etapa;
- Análises de MEV para identificação de melhores combinações granulométricas na definição de melhores características desejadas para o compósito.

REFERÊNCIAS

ABERLE T., EMMENEGGER P., VALLÉE F., HERSCHKE L. (2010), New Approaches to Increase Water Resistance of Gypsum Based Building Materials, **Drymix Mortar Yearbook**, pp. 44–53.

AHMAD S. D.; AL-RIDHA, A.A.A; HUSSEIN, H.H. Improvement of gypsum properties using S.F. additive. **International Journal of Science and Research (IJSR)**: 2319-7064 Index Copernicus Value (2015): 78.96 | Impact Factor (2015): 6.391

AMATHIEU, L, BOISTELLE, R. Improvement of the mechanical properties of set plasters by means of four organic additives inducing {101} faces. *J Cryst Growth* 1986; 79: 169–169.

ANEEL. (s.d.). Agência Nacional de Energia Elétrica. Acesso em 4 de Novembro de 2019, disponível em http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf.

ARGALIS, P.P.; BUMANIS, G.; BAJARE, D. Gypsum Composites with Modified Waste Expanded Polystyrene. *J. Compos. Sci.* 2023, 7, 203. <https://doi.org/10.3390/jcs7050203>

BADENS, E, VEESLER, S, BOISTELLE, R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. *J Crys Growth* 1999; 198: 704–709.

BEDARF, P.; DUTTO, A.; ZANINI, M.; DILLENBURGER, B. Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes. *Autom. Constr.* 2021, 130, 103861. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103861>

BENJEDDOU, O.; SOUSSI, C.; BENALI, M.; ALYOUSEF, R. Experimental investigation of a new ecological block made by mixing gypsum plaster and desert sand. *Arab. J. Sci. Eng.* 2020, 45, 4037–4052. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04362-4>

BERTOLAZZI, A. ; D’AGNOLO, E. ; FATTORI, G. ; PICCINATO, A. ; CROATTO, G. ; TURRINI, U. 2023. ‘Nested-building as an effective strategy for the reuse of reinforced concrete industrial buildings. The case of the ex-Manifattura Tabacchi factory in Verona (1930-65)’. *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 8(special issue 2), pp. 56-65. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.18801>

BOX, E. P.; HUNTER, G.; STUART, J.; HUNTER, G. W. *Statistics for experiments*. New Jersey: John Willey and Sons, Inc., 2005.

BOX, G. E .P; WILSON K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. *J. R. Statist. Soc., B.* 13 1 – 45, 1951.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. *Planejamento de experimentos usando a estatística*, E-papers Serviços Editoriais Ltda, Rio de Janeiro, 2003. 260p.

CARLSSON, M., Conceptual and Empirical Aspects of TQM Implementaion in Engineering Organizations, The “R&D Management” Conference, Quality and R&D, Twente Quality Center, 6-8 March, Enschede, The Netherlands, 1996, pp. 84-99.

CHIGONDO, M., GUYO, U., SHUMBA, S., CHIGONDO, F., NYAMUNDA, B., MOYO, M., & NHARINGO, T. (Agosto de 2013). IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ). Synthesis and Characterisation of Zeolites From Coal Fly Ash (CFA)., Vol. 3.

CONEJOS, S.; LANGSTON, C. A.; SMITH, J. (2012). Designing for future building: Adaptive reuse as a strategy for carbon neutral cities. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 3(2), 33-52. <https://doi.org/10.18848/1835-7156/CGP/v03i02/37103>

CONTRERAS, G.S.; LEZCANO, R.A.G.; FERNÁNDEZ, E.J.L.; SANZ, C.M.I. Building Materials and Their Impact on the Environment. *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 15, 2022, no. 1, 51 – 61 HIKARI Ltd, www.m-hikari.com <https://doi.org/10.12988/ces.2022.91945>

DEVOR, R. E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J. W. *Statistical quality design and control – Contemporary concepts and methods*. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

DYNASOLO. DS328: A Tecnologia da baba de cupim na construção Civil. Disponível em: <http://dynasolo.com.br/ds328s.htm>. Acessado em: 29 março.2018.

FANTILLI, A.P. ; JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D.E. ; DENIS, P. Bio-Fibres as a Reinforcement of Gypsum Composites. *Materials (Basel)*. 2021 Aug 25;14(17):4830. doi: 10.3390/ma14174830. PMID: 34500919; PMCID: PMC8432728.

FARIA, O.B.; BATTISTELLE, R. A. G.; NEVES, C. Influência da adição de “baba de cupim sintética” na resistência à compressão e absorção de água de solo-cimento compactado. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 127-136, jul/set. 2016.

FARIA, P. (2022) *Earth plasters - The influence of composition for IAQ and comfort*. In: 1st International RILEM Conference on Earthen Construction, 18-19 March 2022, Paris, France.

FERREIRA, F. C.; SOUSA, J. G. G. de; CARNEIRO, A. M. P. Caracterização mecânica do gesso para revestimento produzido no Polo Gesso do Araripe. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 207-221, out./dez. 2019.

FRANCO, J.A.B.; DOMINGUES, A.M.; DE ALMEIDA AFRICANO, N.; DEUS, R.M.; BATTISTELLE, R.A.G. Sustainability in the Civil Construction Sector Supported by Industry 4.0 Technologies. *Challenges and Opportunities. Infrastructures* 2022, 7, 43. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030043>

FÜCHSL, S.; RHEUDE, F.; RÖDER, H. (2022). Life cycle assessment (lca) of thermal insulation materials: A critical review. *Clean. Mater.* 5, 100119. doi:10.1016/j.clema.2022.100119

GALDÁMEZ, E. V. C. Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos plásticos. Dissertação de Mestrado, 137 p. Escola de Engenharia da Universidade Federal de São Carlos, julho de 2002.

GONÇALVES, I.; FERRAZ, A. Estudo do Efeito de Materiais Impermeabilizantes de Origem Vegetal na Pasta de Gesso. *Evolvere Scientia*, 2014.

GRAY, D., LADWIG, K., MORTIMER, M., BERNICK, K., PALS, N., MORE, J., . . . BRADLEY, L. J. (2016). American Coal Ash Association - ACAA. Acesso em 20 de Novembro de 2019, disponível em <https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ASH01-2016.pdf>

GUEDRI, A.; YAHYA, K.; HAMDI, N.; BAEZA-URREA, O.; WAGNER, J.-F.; ZAGRARNI, M.F. Properties Evaluation of Composite Materials Based on Gypsum Plaster and Posidonia Oceanica Fibers. *Buildings* 2023, 13, 177. <https://doi.org/10.3390/buildings13010177>

GUEDRI, A.; YAHYA, K.; HAMDI, N.; BAEZA-URREA, O.; WAGNER, J.-F.; ZAGRARNI, M.F. Properties Evaluation of Composite Materials Based on Gypsum Plaster and Posidonia Oceanica Fibers. *Buildings* 2023, 13, 177. <https://doi.org/10.3390/buildings13010177>

KAMPALA, A.; HORPIBULSUK, S.; PRONGMANEE, N.; CHINKULKIJNIWAT, A. Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue–fly ash stabilized clay. *J. Mater. Civ. Eng.* 2014, 26, 633–643.

KHALIL, A.A.; TAWFIK, A.; HEGAZY, A.A., Plaster composites modified morphology with enhanced compressive strength and water resistance characteristics, *Construction and Building Materials* 167:55–64, April 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165

KNISS, C. T., COSTA, P. R., QUONIAM, L., & SANTOS, A. M. (Jan./Abr. de 2019). Utilização do resíduo resultante da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas na produção de novos materiais: uma análise a partir de artigos científicos e de patentes.

KOZECHEN, A. P.; ÁLECIO, J. L. C.; MELLO, R. V. C.; COELHO, T. M.; MATSUDA, C. K. (2015) Painéis desenvolvidos com resíduo de gesso e resíduo de algodão: uma alternativa para o desenvolvimento sustentável. VIII EEPA – ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL.

LATERSOLO. Técnicas de construção de pavimentos- Parte 1 Sub-base e Bases. 2015. Disponível em: <http://www.latersolo.com.br/wp-content/uploads/2015/03/T%C3%A9cnicas-de-Constru%C3%A7%C3%A3o-de-Pavimentos-Parte-I.pdf>. Acessado em: 11 setembro de 2019.

LEWRY, I. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster: Part III the effect of additives and impurities. *Journal of Materials Science* 29(23):6085-6090 · May 1994a.

LEWRY, I. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster: Part I The hydration of calcium sulphate hemihydrate *Journal of Materials Science* 29(20):5279-5284 · October 1994b.

LIM, T. E. Quality Improvement Using Experimental Design, *International journal of quality e reliability management*, Vol. 7, No. 1, pp. 70 e 76, 1990.

LIMA JÚNIOR, J.G. Caracterização mecânica de compósitos cimentícios modificados com borracha de pneu tratada com diferentes tipos de látex José Gonçalves de Lima Júnior - São Paulo, 2022. p. 84 Dissertação (Mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação Stricto Sensu – 2022.

LOCHNER, R. H. and MATAR, J.R., Designing for quality: An Introduction to the Best of Taguchi and Western, Methods of Statistical Experimental Design, London: Chapman and Hall, 1990.

LOGOTHETIS, N.; WYNN, H. P., Quality through design: experimental design. Oxford: Clarendon Press, 1989.

LU, X.; LIU, B.; ZHANG, Q.; WEN, Q.; WANG, S.; XIAO, K.; ZHANG, S. Recycling of Coal Fly Ash in Building Materials: A Review. *Minerals* 2023, 13, 25. <https://doi.org/10.3390/min13010025>

MALLMAN, J. E. (Julho de 1996). Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curada pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante.

MARGON, P. V. (Maio de 2002). Influência do uso das cinzas de carvão mineral de temelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas.

MATEUS, N. B. O delineamento composto central e sua viabilidade de uso em algumas áreas de pesquisa. 98 p. 2001. Dissertação de (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A.. Viabilidade de uso do delineamento composto central. *Acta Scientiarum*, Maringá, Paraná, Brasil, v23, n.6, p. 1537-1546, 2001.

MME. (2019). Ministério de Minas de Energia. Acesso em 4 de Setembro de 2019, disponível em Empresa de Pesquisa - EPE. Balanço Energético Nacional - BEN 2019 - Ano base 2018.: <https://ben.epe.gov.br/>

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 3rd. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1991. 649 p.

MONTGOMERY, D. C.; BETTENCOURT JR, V. M. Multiple response surface methods in computer simulation. *SIMULATION*, 29(4), 113 – 121, October 1, 1977.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; Response surface methodology, Wiley: New York, 2002.

NBR10004. (2004). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.

NBR12127. (1991). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

NBR12128. (1991). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Determinação das propriedades físicas da pasta – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

NBR12129. (1991). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Determinação das propriedades mecânicas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

NBR12653. (1992). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro.

NBR13207. (1994). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Gesso para construção. Rio de Janeiro, RJ.

NBR9778. (1987). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Em Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios. Rio de Janeiro, RJ.

OBERSCHELP, C., PFISTER, S., RAPTIS, C., & HELLWEG, S. Global emission hotspots of coal power generation. Institute of Environmental Engineering · September 2018.

OEHLERT, G. W. (2000) A First Course in Design and Analysis of Experiments, W. H. Freeman and Company, New York, NY

OSÓRIO E. ; VILELA A. C. F. ; SAMPAIO C. H. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, 2008.

PANPA, W.; JINAWATH, S. Effect of additives on the properties of α -hemihydrate. Advances in Cement Research 18(4):145-152 · January 2006.

PEDROSA NETO, M.G. Produção de Pré-Moldados por Prensagem Uniaxial à Base de Gesso e Cinzas de Carvão Mineral. Dissertação de Mestrado (117 p.), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, 11 de agosto de 2017.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. Gesso: Produção e utilização na construção civil. 2.ed. Recife: Sebrae, 2008.

PERVYSHIN, G.N.; YAKOVLEV, G.I.; GORDINA, A.F.; KERIENE, J.; POLYANSKIKH, I.S.; FISCHER, H-B.; RACHIMOVA, N.R.; BURYANOV, A.F. WaterResistant gypsum composition with man-made modifiers, Procedia Engineering 172 (2017) 867 – 874. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.087

PILAR, R., SCHANKOSKI, R. A., MORO, A. D., & REPETTE, W. L. (Março de 2016). Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída.

RAMOS, M. C. (2011) O gesso na escultura contemporânea: A história e a técnica. ULFBA.

RESCIC, S.; MATTONE, M.; FRATINI, F.; LUVIDI, L. Earthen Plasters Stabilized through Sustainable Additives: An Experimental Campaign. Sustainability 2021, 13, 1090. <https://doi.org/10.3390/su13031090>

ROCHA, C. A. L. (2007) O gesso na indústria da construção civil: Considerações econômicas sobre utilização de blocos de gesso. UFPE.

ROCHA, S.O.; CABRAL, S.A.; SÁ, G. (2021) Aplicação sustentável da fibra do babaçu como isolamento acústico em painéis de gesso. CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES - CINPAR, Fortaleza – CE, 2021.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de Experimentos e Otimização de

Processos. 1ª Ed. Campinas, SP: Casa do Pão Editora, 2005. 325p

SALEH, H. M. ; SALMAN, A. A. ; FAHEIM, A. A. ; EL-SAYED, A. M. (2021). Influence of aggressive environmental impacts on clean, lightweight bricks made from cement kiln dust and grated polystyrene. *Case Stud. Constr. Mater.* 15, e00759. doi:10.1016/j.cscm.2021.e00759

SALEH, H. M. ; SALMAN, A. A. ; FAHEIM, A. A.; EL-SAYED, A. M. (2020). Sustainable composite of improved lightweight concrete from cement kiln dust with grated poly(styrene). *J. Clean. Prod.* 277, 123491. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123491

SALIH, M. ; HUSSEIN, A. Enhancing the Compressive Strength Property of Gypsum used in Walls Plastering by Adding Lime, *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences.*26 (2018) 58-66.

SANTOS, G. S. S.; NASCIMENTO, J. G. M.; MARQUES, C. S. A; ALMEIDA, M. J. M. 2018. Pavimento de Baixo Custo com o Uso do Montículo de Cupim. In: IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP – 26 a 29/11/2018

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN Jr., V.; SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. de F. P.. Planejamento de Experimentos e Otimização de Sistemas Mistos. *FAMAT em Revista – número 11, outubro de 2008.*

SILVA, V. V. L. (2019) Análise da viabilidade técnica da reutilização de resíduos de pedras ornamentais na fabricação de blocos de gesso sustentáveis. IFPB. Cajazeiras – PB.

SIQUEIRA, J. S., SOUZA, C. A., & SOUZA, J. A. (2012). Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formação de argamassas.

SOPHIA, M.; SAKTHIESWARAN, N.; GANESH, B.O. Gypsum as a Construction Material- A Review of Recent Developments. *IJRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology* Volume 2, Issue 12, May 2016 ISSN (online): 2349-6010.

SOVACOOOL, B. K. ; GRIFFITHS, S. ; KIM, J. ; BAZILIAN, M. (2021). Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141, 110759. doi:10.1016/j.rser.2021.110759

TROSSEILLE, J. ; PANCZER, G. ; MARTINET, C. ; LE MERRER, M. Monitoring Gypsum Plaster Setting in a Foam through Raman Spectroscopy *Phys. Rev. Applied* 18, 034078 – Published 28 September 2022. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.034078>

VIEIRA, S. R. ; PETRACONI FILHO, G. Estudo da reatividade de plasmas no processo de ativação de materiais carbonosos: com parâção com o processo termo-químico, 2008.

WU, C. F.; HAMADA, M. Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization. New York: Wiley – Interscience, 2000.

ZOU, C.; HUA, Z.; MO, L.; QI, C.; LIU, Z.; XIE, Y.; YU, H.; KE, J. Evaluation on the Performance of Hydraulic Bitumen Binders under High and Low Temperatures for Pumped Storage Power Station Projects. *Materials* 2022, 15, 1890. <https://doi.org/10.3390/ma15051890>