

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Deise Santos Madeira

OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação Profissional em Engenharia de Produção como requisito para obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Tarcísio Gonçalves de Brito, Dr.

Coorientador: Prof. Carlos Augusto de Souza Oliveira, Dr.

Itabira

Julho de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Deise Santos Madeira

OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Banca examinadora em 17 de julho de 2023, conferindo ao autor o título de Mestre Profissional em Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Tarcísio Gonçalves de Brito – Orientador - UNIFEI

Carlos Augusto de Souza Oliveira – Coorientador - UNIFEI

Emerson José de Paiva - UNIFEI

Rogério Santana Peruchi - UFPB

Itabira

Julho de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho Àquele que, em todos os momentos, tem sido minha companhia e sustento para seguir em frente a cada novo desafio: Deus. Obrigada pelo sopro da vida, pela sabedoria concedida e pela oportunidade diária de viver cada detalhe de tudo aquilo que o Senhor sonhou para mim. Sei que os Teus olhos, sempre atentos permanecem em mim...

Aos meus pais, Moisés e Regina, alicerce e inspiração. Obrigada por ensinar à nossa família valores preciosos e por não medirem esforços para a concretização dos nossos sonhos e objetivos. Sem vocês eu não teria dado um passo sequer, e por vocês sempre irei além.

Ao meu esposo, amigo e companheiro, Renato, e ao meu irmão, Denílson, equilíbrio e porto seguro. Obrigada por me ouvirem e por acreditarem mais no meu potencial do que eu mesma sou capaz de dimensionar, me impulsionando a buscar sempre por coisas grandiosas. À minha filha, meu coração valente, que tão pequenina já demonstrou a força que tem e deu novo sentido às nossas vidas.

Aos meus fiéis amigos e colegas de trabalho, que de alguma maneira contribuíram para que esta conquista fosse possível. Obrigada pelo suporte, cuidado e por defenderem este projeto tanto quanto eu.

A todos vocês, minha gratidão.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e orientadores, Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito e Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira, pelo suporte, incentivo e pela nobre missão de compartilhar algo tão precioso: o conhecimento.

Aos meus queridos amigos, Alaíde Santos e Alexandre Couto, e afilhado Filipe Santos Couto, pelo apoio na execução dos ensaios laboratoriais e projeto.

Aos colegas do mestrado profissional, pelos momentos e conhecimento compartilhados ao longo do curso.

Ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), Geraldo Gualberto, e à colega do curso de engenharia, Viviane Reis, pela assistência em prol da execução das atividades.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Unifei *campus* Theodomiro Carneiro Santiago, pela formação e conhecimento adquirido.

EPÍGRAFE

“Tudo aquilo que o homem ignora, não existe para ele. Por isso o universo de cada um, se resume ao tamanho de seu saber.”

Albert Einstein

RESUMO

A indústria da construção civil, juntamente com o setor da mineração, em especial as áreas responsáveis pela extração de substâncias minerais da classe dos metálicos, são, atualmente, responsáveis diretos por uma parcela significativa do impacto ambiental devido ao alto consumo de matéria prima. Com a necessidade de racionalização de recursos naturais, novas propostas de uso de resíduos recicláveis vem ganhando escala com o desenvolvimento de dosagens para melhoria do processo construtivo, com especial destaque ao setor da construção civil. Milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF), subproduto do beneficiamento do minério de ferro, são descartadas anualmente. Diante deste cenário, este trabalho teve por objetivo propor uma nova utilização para o RMF em substituição parcial aos agregados naturais para argamassas de revestimento, variando de forma simultânea a relação água/cimento e teor de aditivo da composição. As devidas especificações de resistência à tração na flexão (R_t), resistência à compressão (R_c) e resistência de aderência à tração (R_a) foram avaliadas em comparação ao sistema tradicional. A estratégia deste trabalho consiste em combinar técnicas de Pesquisa Operacional para uma otimização de múltiplas respostas, avaliando a interferência de cada fator isolado e propondo a melhor configuração para dosagem de argamassas. O Planejamento Experimental, baseado no arranjo composto central (CCD) considerou 3 variáveis de controle: teor de substituição de rejeito de minério de ferro (RMF), teor de aditivo (ADT) e relação água/cimento (A/C). A Análise de Componentes Principais (ACP) e a função *Desirability* também foram métodos utilizados na busca pela resposta ideal. A otimização da dosagem da argamassa indicou que os parâmetros controláveis devem assumir a seguinte configuração: RMF = 27,63%, ADT = 1,08% e A/C = 0,80, com valores de resistência de argamassas no estado endurecido iguais a $R_t = 11,38$ MPa, $R_c = 21,67$ MPa e $R_a = 0,55$ Mpa. Os valores obtidos após a otimização estão em conformidade com as normas que definem as exigências mecânicas e reológicas para as argamassas e compatíveis com as resistências de argamassas de revestimento padrão. Experimentos de confirmação realizados validaram a modelagem aplicada, mostrando que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados otimizados.

Palavras-chave: Argamassas. Rejeito de Minério de Ferro. Otimização de Múltiplas Respostas. *Desirability*. Análise de Componentes Principais.

ABSTRACT

The construction industry together with the mining sector, especially the areas responsible for the extraction of metallic substances, are currently directly responsible for a significant portion of the environmental impact due to the high consumption of raw materials. With the need to rationalize natural resources, new proposals for the use of recyclable waste have been gaining scale with the development of dosages to improve the construction process, with special emphasis on the civil construction sector. Millions of tons of iron ore tailings (IOT), a by-product of iron ore processing, are discarded annually. Given this scenario, this work aimed to propose a new use for IOT in partial replacement of natural aggregates for coating mortars, simultaneously varying the water/cement ratio and additive content of the composition. The proper specifications of flexural tensile strength (R_t), compressive strength (R_c) and tensile bond strength (R_a) were evaluated in comparison to the traditional system. The strategy of this work is to combine Operations Research techniques for multiple response optimization, evaluating the interference of each isolated factor and proposing the best configuration for mortar dosage. The Experimental Design, based on the Central Composite Design (CCD) considered 3 control variables: replacement content of iron ore tailings (IOT), additive content (ADT) and water/cement ratio (W/C). Principal Component Analysis (PCA) and *Desirability* function were also used in the search for the ideal answer. The mortar dosage optimization indicated that the controllable parameters should assume the following configuration: IOT = 27.63%, ADT = 1.08% and W/C = 0.80, with mortar resistance values in the hardened state equal to $R_t=11.38$ MPa, $R_c = 21.67$ MPa and $R_a = 0.55$ MPa. The values obtained after the optimization are in accordance with the norms that define the mechanical and rheological requirements for mortars and compatible with the resistance of standard coating mortars. Confirmation experiments carried out validated the applied modeling, showing that the real optimal results are close to the optimized results.

Keywords: Mortars. Iron Ore Tailings. Multiple Response Optimization. *Desirability*. Principal Component Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico das principais substâncias metálicas no ano de 2021.....	21
Figura 2 - Processo característico do beneficiamento do minério de ferro.....	24
Figura 3 – Barragens Cadastradas por Categoria de Risco ao Longo do Tempo	25
Figura 4 – Distribuição espacial dos pontos experimentais.....	35
Figura 5 – CCD fatorial em um experimento com (a) 2 e (b) 3 fatores.....	39
Figura 6 – Representação da relação de importância entre o alvo e limites no <i>Desirability</i> ...	42
Figura 7 - Representação esquemática para <i>Desirability</i> dos tipos STB, NTB e LTB.....	42
Figura 8 - Superfície de resposta com ponto de máximo.....	45
Figura 9 – RMF, Areia Média e CPV-ARI para composição dos traços das argamassas	47
Figura 10 – Instrumentos de Medição EMIC DL 20000 (a) e dinamômetro hidráulico (b)....	51
Figura 11 - Ensaio de Índice de Consistência das argamassas com três traços distintos.....	53
Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos	55
Figura 13 – Processo de cura dos corpos de prova em câmara climática	56
Figura 14 - Preparo do substrato para assentamento das argamassas	57
Figura 15 – Argamassas aplicadas nos substratos	57
Figura 16 - Teste de resistência à tração na flexão	58
Figura 17 – Ruptura fora do terço médio.....	59
Figura 18 - Execução do teste de resistência de aderência à tração das argamassas	60
Figura 19 - Aspectos de ruptura para um sistema de revestimento com chapisco	61
Figura 20 - Curva granulométrica da areia média e rejeito de minério de ferro.....	62
Figura 21 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_t	69
Figura 22 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_c	70
Figura 23 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_a	70
Figura 24- Análise dos Efeitos Principais para R_t	71
Figura 25 - Análise dos Efeitos Principais para R_c	72
Figura 26 – Análise dos Efeitos Principais para R_a	72
Figura 27 - Gráfico de Contorno para R_t vs ADT e RMF.....	73
Figura 28 - Gráfico de Contorno para R_t vs A/C e RMF	73
Figura 29 - Gráfico de Contorno para R_t vs ADT e A/C	74
Figura 30- Superfície de Resposta para R_t vs RMF, ADT e A/C	74

Figura 31 - Gráfico de Contorno para R_c vs ADT e RMF	75
Figura 32 - Gráfico de Contorno para R_c vs A/C e RMF	75
Figura 33 - Gráfico de Contorno para R_c vs ADT e A/C	76
Figura 34 - Superfície de Resposta para R_c vs RMF, ADT e A/C	76
Figura 35 - Gráfico de Contorno para R_a vs ADT e RMF	77
Figura 36 - Gráfico de Contorno para R_a vs A/C e RMF.....	77
Figura 37 - Gráfico de Contorno para R_a vs ADT e A/C.....	78
Figura 38 - Superfície de Resposta para R_a vs ADT e A/C	78
Figura 39 – Gráfico de Probabilidade de Resíduos para CP_1	83
Figura 40 – Efeitos Principais para CP_1	83
Figura 41 – Gráfico de Interação entre RMF, ADT e A/C para CP_1	84
Figura 42 – Gráfico Superfície de Resposta para CP_1	85
Figura 43 – Gráfico de Contorno para CP_1	85
Figura 44 - Gráfico de Otimização para CP_1	86
Figura 45 – Gráfico de Otimização Individual	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais Minerais Portadores e Composições.....	22
Tabela 2 - Espessuras admissíveis de revestimentos internos e externos	28
Tabela 3 - Limites de resistência de aderência à tração	29
Tabela 4 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas.....	29
Tabela 5 - Interpretações possíveis para o retorno da função d_i	40
Tabela 6 – Características e propriedades do aditivo utilizado na pesquisa	47
Tabela 7 - Variáveis de Controle – Arranjo Combinado	50
Tabela 8 - Matriz Experimental para Otimização das Argamassas com RMF.....	52
Tabela 9 - Índice de Consistência das Argamassas	54
Tabela 10 - Propriedades obtidas para os agregados	63
Tabela 11 - Níveis e Variáveis de Resposta para R_t , R_c e R_a	64
Tabela 12 – Coeficientes Codificados para a Resistência à Tração (R_t)	66
Tabela 13 – Coeficientes Codificados para a Resistência à Compressão (R_c)	66
Tabela 14 – Coeficientes Codificados para a Resistência de Aderência à Tração (R_a).....	67
Tabela 15 - Análise de Variância para a Resistência à Tração (R_t).....	68
Tabela 16 - Análise de Variância para a Resistência à Compressão (R_c).....	68
Tabela 17 - Análise de Variância para a Resistência de Aderência à Tração (R_a)	68
Tabela 18 – Análise de Correlação entre R_t , R_c e R_a	79
Tabela 19 – Análise de Componentes Principais para R_t , R_c e R_a	79
Tabela 20 – Dados padronizados das variáveis R_t , R_c e R_a	80
Tabela 21 – Escores dos Componentes Principais.....	81
Tabela 22 - Análise de Variância para CP_1	82
Tabela 23 - Coeficientes codificados para CP_1	82
Tabela 24 - Parâmetros de Otimização para CP_1	86
Tabela 25 – Configuração ótima dos parâmetros de entrada.....	87
Tabela 26 – Otimização individual	88
Tabela 27 – Parâmetros ótimos para dosagem de argamassas com RMF	89
Tabela 28 – Resultados dos experimentos de confirmação	90
Tabela 29 – Comparação entre os resultados real e otimizado	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD Anderson-Darling
ANOVA Análise de Variância
CCC Arranjo Composto Circunscrito
CCD Central Composite Design ou Arranjo Composto Central ou Box-Wilson
DOE Design of Experiments ou Planejamento de Experimentos
LTB Larger The Better ou Maior é Melhor
MSR Metodologia da Superfície de Resposta
NRM Norma Regulamentadora de Mineração
NTB Nominal The Better ou Nominal é Melhor
OLS Ordinary Least Squares – Mínimos Quadrados Ordinários
PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB Política Nacional de Segurança de Barragens
 R^2 Coeficiente de determinação
 R^2 (adj) Coeficiente de determinação ajustado
RCD Resíduos da Construção e Demolição
RMF Rejeito de Minério de Ferro
RSM Response Surface Methodology
STB Smaller The Better ou Menor é Melhor
UHPC Ultra-high Performance Concrete

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do corpo de prova
α	Nível de significância
β	Regressores do modelo polinomial
$\hat{\beta}$	Vetor de regressores do modelo polinomial
d_i	Índice <i>Desirability</i> Individual
D	Índice <i>Desirability</i> Global
g_i	Graus de importância individuais dos índices <i>Desirability</i>
G	Somatório dos Graus de Importância Individuais
H_i	Limite de especificação superior da função <i>Desirability</i>
K	Número de variáveis independentes
L_i	Limite de especificação inferior da função <i>Desirability</i>
P	Carga de Ruptura
R	Peso de cada função <i>Desirability</i>
R^2	Coefficiente de determinação do modelo de regressão
R^2 (adj)	Coefficiente de determinação do modelo de regressão ajustado
R_a	Resistência de Aderência à Tração
R_c	Resistência à Compressão
R_t	Resistência à Tração
T_i	Valor alvo ou target
X_i	Variáveis de controle
X	Vetor de variáveis de controle
X^T	Vetor transposto de variáveis de controle
Y_i	Valor ajustado da variável de resposta
Y	Vetor de variáveis de resposta
e_i	Resíduo;
y_i	Resposta observada;
\hat{y}_i	Resposta estimada.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 IMPORTÂNCIA DO TEMA	18
1.5 LIMITAÇÕES:.....	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 MINÉRIO DE FERRO.....	21
2.1.1. Tipos de Minério de Ferro	22
2.1.2. Rejeito de Minério de Ferro.....	23
2.2 ARGAMASSAS	26
2.2.1. Metodologia de Dosagem de Argamassas.....	30
2.3 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM ARGAMASSAS	31
2.4 PLANEJAMENTO, PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	33
2.4.1. Metodologia da Superfície de Resposta	35
2.4.2 Arranjo Composto Central (CCD).....	38
2.4.3 Método <i>Desirability</i>	39
2.4.4 Análise dos Componentes Principais	43
2.4.5 Otimização do Desempenho e Qualidade.....	45
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Caracterização dos Agregados.....	48
3.1.2 Traço de Argamassa	49

3.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	49
3.3	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	50
3.4	MÉTODO EXPERIMENTAL	51
3.5	DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL.....	52
3.6	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	52
3.6.1	Avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco	53
3.6.2	Avaliação das propriedades das argamassas no estado endurecido	55
4	RESULTADOS	62
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS	62
4.1.1	Resultados das análises para as argamassas no estado fresco	62
4.1.2	Resultados das análises para as argamassas no estado endurecido	64
4.2	MODELAGEM DAS RESPOSTAS.....	65
4.2.1	Adequação e Ajuste dos Modelos	67
4.2.2	Análise de Correlação.....	79
4.2.3	Análise de Componentes Principais	79
4.3	OTIMIZAÇÃO.....	86
4.3.1	Otimização pelo método <i>Desirability</i>	86
4.4	VALIDAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	89
5	CONCLUSÕES	92
5.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	93
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um estudo de sustentabilidade requer atitudes pensadas de modo que os recursos naturais sejam preservados, resultando na redução de riscos ambientais e sociais. No Brasil, a descoberta de jazidas de minerais metálicos com alto interesse econômico em regiões específicas redirecionou a economia nacional, elevando significativamente o consumo de recursos não renováveis. Diante da relevância da indústria da construção civil no panorama internacional em prol do desenvolvimento socioeconômico, o setor dos agregados tornou-se um dos mais significativos em termos de consumo, visto que a produção do concreto demanda uma grande quantidade de matérias-primas.

Segundo a Agência Nacional de Mineração (2023a), as substâncias minerais da classe dos metálicos correspondem a aproximadamente 89% da produção total no ano de 2021, com ênfase para o minério de ferro, representando cerca de 80,1% deste valor dentre as principais substâncias metálicas produzidas. Neste mesmo ano, a produção de finos de minério de ferro em Minas Gerais atingiu 363 milhões de toneladas, superando as demais regiões em termos de produção bruta (ANM, 2023a).

Milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF), subproduto do beneficiamento do minério de ferro, são descartadas anualmente. Em 2020, cerca de 494,3 milhões de toneladas de resíduos minerais e metalúrgicos estéril e rejeitos foram gerados pela mineradora Vale no Brasil, o que representa um declínio em relação ao ano de 2019, em que 625,9 milhões de toneladas do material foram originadas (VALE, 2020a).

De maneira similar, os agregados para o setor da construção civil tais como a areia natural, pedregulhos, cascalho, entre outros, apresentam uma alta escala de produção anual nas usinas para posterior comercialização. A produção do concreto demanda uma grande quantidade de matérias-primas na forma de recursos naturais para sua produção, que atualmente é respaldada pelas leis e resoluções que abordam a elaboração de planos de gerenciamento de resíduos sólidos. No Brasil, o setor da construção civil produziu no ano de 2016 cerca de 294 milhões de toneladas de areia, 203 milhões de toneladas de brita e cascalho, 8,3 milhões de toneladas de cal, 53,703 milhões de toneladas de cimento e 9,24 milhões de toneladas de rochas ornamentais (DNPM, 2020).

Os fatores de produção trazem benefícios diretos a milhares de municípios brasileiros proporcionando insumos para o desenvolvimento de infraestruturas diversas. No entanto, o cenário atual reforça a necessidade de uma melhor gestão ambiental com soluções sustentáveis, sem que o nível de eficácia seja comprometido. A incorporação de resíduos é considerada uma abordagem eficaz a respeito do desenvolvimento sustentável, promovendo a redução da extração de recursos naturais e permitindo um novo destino àquele que antes era considerado apenas material para descarte, reduzindo problemas relacionados ao custo de ocupação dos solos.

A construção civil é um setor foco para pesquisas que buscam viabilizar a incorporação dos diversos resíduos na fabricação de componentes, com literatura abrangente referindo-se à viabilidade econômico-financeira, desempenho e condições de sustentabilidade (BIGOLIN e FILHO, 2013; GULARTE *et al.*, 2018). Nesse cenário, estudos buscam viabilizar o uso do RMF na formulação de produtos cimentícios, como as argamassas.

As argamassas produzidas com RMF em sua composição podem ser utilizadas não apenas como material de reboco, como também para material estrutural na construção civil (CARRASCO *et al.*, 2017). Zhao *et al.* (2021) realizaram um estudo avaliando as propriedades físicas, composições químicas e minerais, a atividade pozolânica e reatividade do RMF, seu efeito nas propriedades mecânicas e durabilidade sendo incorporado ao concreto.

Estudos similares contemplaram a incorporação do RMF como proposto por Yao *et al.* (2020) e Magalhães *et al.* (2020), por meio da adição de materiais suplementares em cimento, analisando os efeitos da ativação mecânica sobre a atividade pozolânica e propriedades de hidratação. Defáveri *et al.* (2019) verificou a aplicabilidade para a produção de geopolímeros, Protasio *et al.* (2021) para concreto sustentável, Zhang *et al.* (2020) em argamassas UHPC (*Ultra High Performance Concrete*) e Weish *et al.* (2018) com a incorporação do resíduo em tijolos ecológicos para a diminuição do consumo de energia e mitigação dos impactos ocasionados pela produção de gases de efeito estufa, direcionando para um novo destino ao rejeito de minério de ferro.

As pesquisas não se limitam apenas ao território brasileiro, com incentivo de outros países à comunidade científica para que sejam realizadas as análises, reiterando que a gestão dos resíduos é um tema debatido ostensivamente a nível global. Huang (2013) e Yellishetty (2008) confirmaram em estudos anteriores a viabilidade técnica da utilização do RMF sob o formato de aproveitamento mineral para a produção de compósitos cimentícios de alto desempenho e concreto na China e Índia, respectivamente, apontando resultados satisfatórios.

Embora os estudos apontem de maneira positiva para uma viabilidade do reaproveitamento do rejeito de minério de ferro em produtos diversos, a nova dosagem proposta a partir da substituição do agregado natural por RMF deve ser ponderada de maneira tal que o material atenda aos requisitos mínimos de resistência e desempenho. Pinheiro *et al.* (2018) ressaltam a importância da escolha adequada dos parâmetros de entrada para um bom dimensionamento, em que as variáveis de resposta estejam de acordo com os limites estabelecidos em norma.

Esta pesquisa propõe a utilização do rejeito de minério de ferro em substituição parcial aos agregados naturais para argamassas de revestimento, o que requer uma ampla avaliação dos componentes do material e seu comportamento, para alcançar um desempenho equivalente àquele apresentado por argamassas de referência.

Em relação às técnicas de análise disponíveis, Montgomery (2013) aponta o Planejamento de Experimentos (ou *Design Of Experiments*) como eficaz para identificação da magnitude da influência de parâmetros distintos em um determinado processo. A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) foi aplicada por se tratar de um método estatístico eficaz para modelagem empírica de processos, para os quais as variáveis de resposta são influenciadas por outras variáveis (ASFARAM *et al.*, 2015).

Ma *et al.* (2022) e Rahmatika *et al.* (2019) aplicaram o planejamento de experimentos e Metodologia da Superfície de Resposta para validar a aplicação de diferentes constituintes na composição de argamassas, definindo a configuração ideal.

Revathi *et al.* (2018), Debska *et al.* (2019) e Nakkeran e Krishnaraj (2023) basearam-se no método DOE e MSR para identificação dos fatores de maior influência e definição da dosagem adequada das argamassas com diferentes tipos de substituição, como resíduos de cinzas volantes, cal hidratada e modificadas com resíduos de cortiça e borracha.

A significância dos parâmetros de controle e possível interação entre as variáveis de saída da argamassa, resistência à tração na flexão (R_t), resistência à compressão (R_c) e resistência de aderência à tração (R_a) foram avaliadas. A verificação da composição ideal foi obtida a partir do método *Desirability* e Análise de Componentes Principais (ACP), utilizando-se como parâmetros de entrada o teor de substituição do agregado natural por agregado reciclável (RMF), o teor de aditivo (ADT) e a relação água/cimento (A/C), em um arranjo do tipo *Central Composite Design* (CCD) de 2^3 com 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, medindo-se três respostas de interesse: R_t , R_c e R_a .

O estudo possibilitou a construção de modelos matemáticos representativos, a análise da influência dos parâmetros de entrada, a distribuição dos resíduos e problemas de otimização do tipo quanto menor melhor (Smaller-the-better, STB).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Para a otimização da dosagem de argamassas produzidas com rejeito de minério de ferro em substituição parcial ao agregado natural, investigou-se os modelos que descrevem o comportamento das respostas, estabelecendo a combinação ótima das variáveis de entrada que viabilize a melhoria da qualidade com uma análise da eficiência do processo.

O objeto de estudo caracteriza-se como um problema complexo de otimização de múltiplas respostas, com a finalidade de melhoria dos parâmetros de resistência conforme critérios estabelecidos em normas vigentes que viabilizem sua aplicação dado as particularidades de cada material componente. De acordo com Santos (2014), as características físicas e mecânicas dos elementos podem ser aperfeiçoadas com a utilização de mecanismos adequados.

Portanto, uma análise científica é fundamental para que os fatores associados à dosagem sejam parametrizados corretamente, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos para as respostas. Dessa forma, deseja-se:

- Otimizar o processo de dosagem de argamassas;
- Maximizar a Resistência à Tração na Flexão (R_t);
- Maximizar a Resistência à Compressão (R_c); e
- Maximizar a Resistência de Aderência à Tração (R_a).

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram o teor de substituição de rejeito de minério de ferro (RMF), teor de aditivo (ADT) e relação água/cimento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo otimizar a dosagem do rejeito de minério de ferro e composição da mistura de argamassas, baseado na norma NBR 13281 (ABNT, 2023), identificando quais fatores representam maior influência nas propriedades mecânicas resistência à tração na flexão, resistência à compressão e aderência à tração do novo produto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos foram propostos para este trabalho:

1. Demonstrar a aplicação do método de otimização utilizando a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), Análise de Componentes Principais (ACP) e função *Desirability*;
2. Definir os parâmetros de influência e obter o modelo matemático equivalente;
3. Estudar a variabilidade dos fatores de entrada, teor de substituição do agregado natural por agregado reciclável, teor de aditivo e relação água/cimento, e sua significância nas interações;
4. Estudar o modelo matemático para as variáveis de saída, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e aderência à tração;
5. Propor a configuração ideal dos parâmetros controláveis para a dosagem de argamassas produzidas com RMF;
6. Analisar e discutir os resultados encontrados do ponto de vista da dosagem de argamassas.

1.4 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A incorporação de resíduos na produção de argamassas, como o rejeito de minério de ferro, suscita iniciativas para promoção da sustentabilidade, com contribuições sob a perspectiva ambiental e social. Com o desenvolvimento do novo produto, torna-se possível avançar em termos da qualidade do material composto com RMF, consolidando-se como uma alternativa de substituição para um insumo largamente utilizado no setor da construção civil.

No entanto, a utilização do resíduo está condicionada à constatação da viabilidade técnica da aplicação e definição da composição ideal, de modo a atender aos padrões normativos existentes, além dos critérios de desempenho, qualidade e demais condições de uso inerentes. A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma técnica estatística atribuída para fins de modelagem de um determinado problema dado o interesse em otimizar uma resposta influenciada por variados fatores, e que pode ser aplicada em áreas distintas das engenharias, como a dosagem de argamassas.

Na maioria dos problemas analisados a forma da relação da resposta com os fatores é desconhecida. Deste modo, o primeiro estágio da MSR consiste em estabelecer uma aproximação adequada para essa relação até então desconhecida, geralmente através de

polinômios de baixo ordem (Paiva, 2006; Box e Draper, 1987). Para casos em que se identifique uma curvatura no modelo de primeira ordem apresentado, uma aproximação polinomial de segunda ordem é requerida.

Esta pesquisa busca aplicar esta metodologia no processo de dosagem de argamassas produzidas com rejeito de minério de ferro sob diversos fatores, analisando as variáveis controláveis que provocam forte influência sobre as resistências R_t , R_c e R_a com dispersão aleatória. A MSR permite encontrar parâmetros adequados em que esta dispersão das respostas esteja de acordo com parâmetros estabelecidos em norma, propiciando a melhoria de condições ambientais e riscos associados à disposição dos materiais de descarte em barragens.

1.5 LIMITAÇÕES:

Este trabalho limita-se ao desenvolvimento de um método de otimização para dosagem de argamassas produzidas com rejeito de minério de ferro. Variando-se o teor de substituição do rejeito (RMF), teor de aditivo (ADT) e relação água cimento (A/C) com influência na resistência à tração na flexão (R_t), resistência à compressão (R_c) e resistência de aderência à tração (R_a). Portanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos de dosagem com materiais diferentes.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Além deste primeiro capítulo que apresenta os pressupostos iniciais, os capítulos seguintes tratam dos assuntos, a saber:

- Capítulo 2: Apresenta a revisão bibliográfica, onde são apontados os principais conceitos relacionados ao reaproveitamento do rejeito de minério de ferro na área da construção civil e pesquisas anteriores desenvolvidas a respeito do tema. Quanto às técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfícies de Resposta (MSR) e os aspectos teóricos para a estratégia de ponderação para otimização.
- Capítulo 3: Descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.

- Capítulo 4: Apresenta a modelagem das respostas, ajustes dos modelos, superfícies de respostas e otimização, possibilitando encontrar o melhor parâmetro de substituição do rejeito de minério de ferro e validação dos resultados.
- Capítulo 5: Apresenta as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

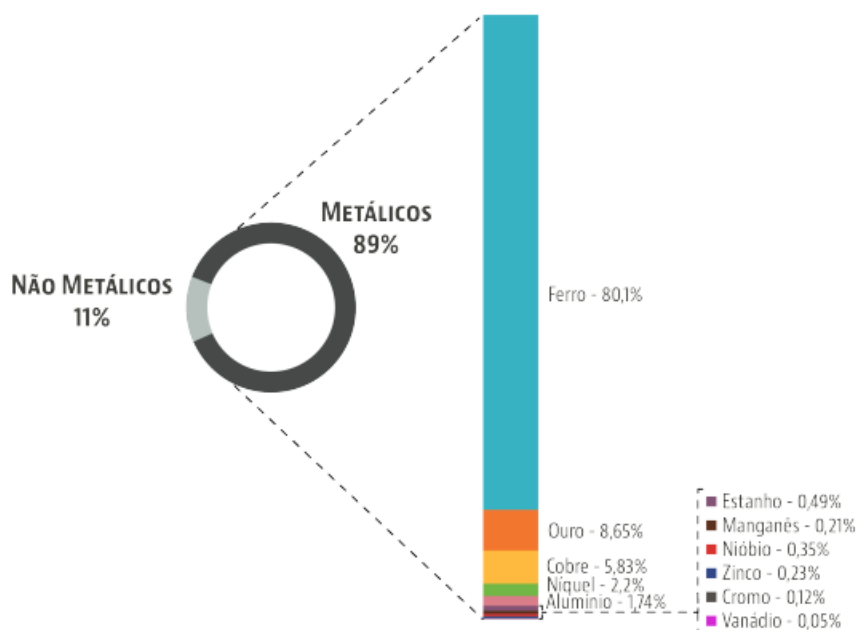
2.1 MINÉRIO DE FERRO

O ferro está entre os elementos mais abundantes encontrados na crosta terrestre, correspondente a cerca de 5,6% em peso da constituição de sua superfície (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). Essencial para a fabricação do aço em usinas siderúrgicas, o minério de ferro é obtido após o beneficiamento de rochas que o possuem em sua estrutura, misturado a outros elementos.

Brasil, Austrália e China estão classificados entre os maiores produtores de minério de ferro na economia mundial (CARVALHO *et al.*, 2014). Em termos de parceria comercial a China representa um importante papel, tendo importado, somente no ano de 2021, cerca de 71% do total de minério de ferro exportado mundialmente (TRADE MAP, 2021).

Informações divulgadas pela Agência Nacional de Mineração (2023a) apontaram que as principais substâncias metálicas que constituíram 89% da produção mineral brasileira em 2021 foram o ferro, em posição de destaque, correspondente a cerca de 80,1% da produção total, seguido do ouro, cobre, níquel, alumínio, estanho, manganês, nióbio, zinco, cromo e vanádio, conforme Figura 1.

Figura 1 - Gráfico das principais substâncias metálicas no ano de 2021



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023a)

O beneficiamento do minério de ferro compreende, segundo a Norma Regulamentadora de Mineração (NRM - 18 - Beneficiamento), as operações realizadas com a finalidade de modificar a granulometria, concentrar ou promover alterações de ordem química ou física para purificar minérios, ainda que mantendo a constituição química dos minerais.

2.1.1. Tipos de Minério de Ferro

O elemento ferro (Fe) está presente em diferentes minerais portadores, sendo classificados de acordo com sua composição mineral em óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos (CARVALHO *et al.*, 2014). Os principais minerais passíveis de exploração econômica e suas respectivas composições estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Principais Minerais Portadores e Composições

Mineral	Fórmula Química	Teor de Ferro
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	62,9
Limonita	$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	59,8
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	61,0
Siderita	$FeCO_3$	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Ilmenita	$FeTiO_3$	36,8

Fonte: Adaptado de <www.rc.unesp.br/mmuseudpm/banco/grm.html>. Acesso em: nov. 2021

Segundo Carvalho *et al.* (2014), magnetita e hematita são atualmente consideradas as substâncias minerais mais importantes para extração do ferro em termos de viabilidade econômica e conteúdo de ferro, levando-se em consideração o fato de que nem todo mineral portador pode ser explorado. Em território brasileiro, o minério de ferro representa um ponto estratégico para a economia não só devido ao seu alto valor agregado, como também pela abundância de depósitos do mineral com teor elevado de ferro (MELFI *et al.*, 2016).

Uma parcela significativa do minério de ferro extraído no Brasil é proveniente do Quadrilátero Ferrífero, correspondente à Província Mineral de Carajás e região de Corumbá, em que o material é retirado de rochas constituídas, principalmente, de minerais de sílica e ferro como hematita, magnetita e algumas variedades de carbonatos e silicatos (CARVALHO

et al., 2014). No ano de 2021, o Brasil se consolidou como o segundo maior exportador do produto, responsável por cerca de 53% do valor total, ficando a Austrália em primeiro lugar (TRADE MAP, 2021). Estes indicadores reafirmam a importância fundamental do setor da mineração em território brasileiro, que há anos vem apresentando números representativos em termos de extração e exportação.

2.1.2. Rejeito de Minério de Ferro

O rejeito de minério de ferro é o subproduto ou resíduo gerado após o processo de beneficiamento como parte não aproveitada da lavra. Rejeitos podem ser definidos como resíduos sólidos que não mais apresentam potencial de utilização de modo economicamente viável, seja pelo tratamento ou recuperação com aporte tecnológico, restando apenas a alternativa de disposição final adequada no que diz respeito às condições ambientais (PNRS, 2010).

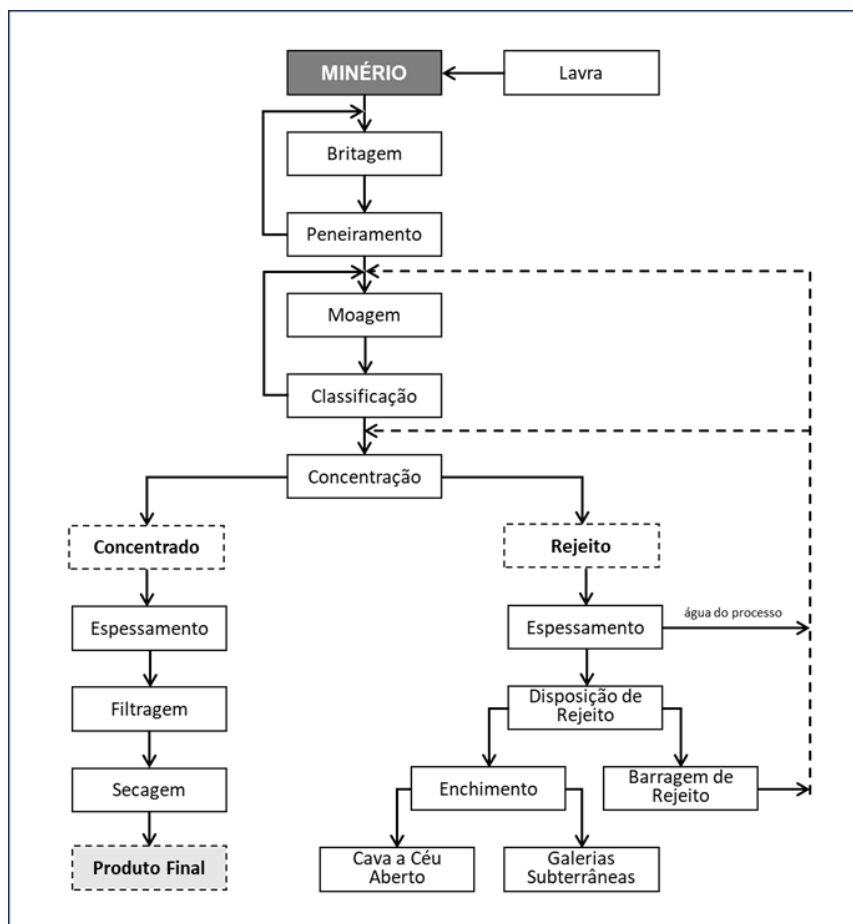
Entre os anos de 2015 e 2019, o Brasil vivenciava alguns dos desastres ambientais mais graves de sua história. No município de Mariana (MG), em novembro de 2015, as barragens de Fundão e Santarém se romperam, atingindo áreas distantes até 100 km do local do evento e liberando 62 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro (G1, 2015). Alguns anos depois, em 2019, o rompimento de outra barragem situada em Brumadinho (MG), tornou-se o maior e mais grave acidente de trabalho do país, deixando centenas de mortos e desaparecidos no mar de lama que se espalhou por toda a região (G1, 2019).

Os eventos deixaram o setor da mineração em estado de alerta quanto à disposição do rejeito proveniente das atividades exercidas, ficando os órgãos públicos responsáveis por reavaliar os critérios para controle e gestão dos resíduos a fim de garantir a segurança das barragens através da Lei. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei (Lei nº 12.305/10) que estabelece que a disposição final de resíduos no meio ambiente, indica que estes devem ocorrer somente como último recurso, enfatizando a necessidade de rever a utilização de barragens como uma prática comum.

O reaproveitamento do rejeito de minério de ferro como uma parcela dos agregados de composição das argamassas e outros materiais da construção civil mostra-se uma alternativa válida, não só em termos de minimização dos desperdícios, como também uma melhoria de condições ambientais e riscos associados à disposição dos materiais de descarte em barragens, uma vez que um volume considerável de rejeito é produzido diariamente, a partir do processo de beneficiamento do minério de ferro.

Um processo característico do beneficiamento do minério de ferro e as saídas do material lavrado, enquanto substância concentrada ou sob a forma de rejeito, quando da impossibilidade de aproveitamento em termos econômicos, é representado na Figura 2.

Figura 2 - Processo característico do beneficiamento do minério de ferro



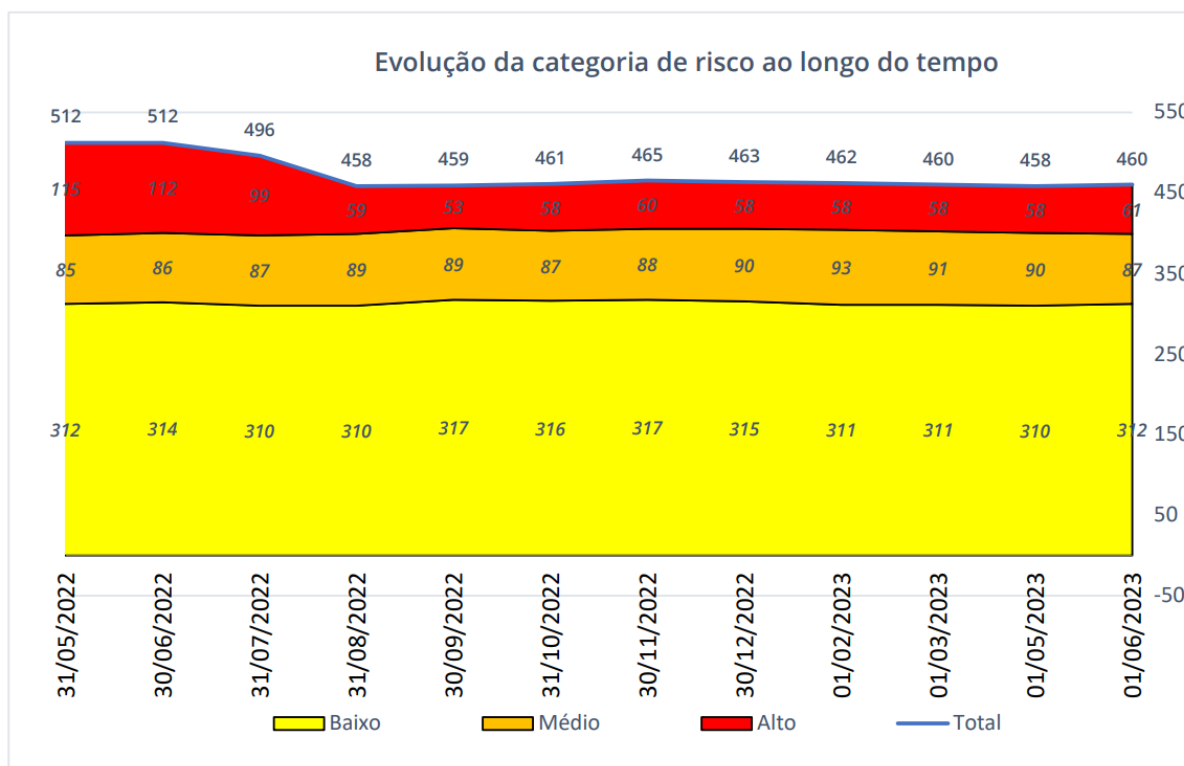
Fonte: Adaptado de Luz *et al.* (2004)

O beneficiamento de minérios deve propor a otimização do processo para obtenção do máximo aproveitamento e desenvolvimento das atividades em cumprimento às regras estabelecidas pelos órgãos competentes, a fim de garantir a segurança, saúde ocupacional e conservação do meio ambiente (NRM, 2002). Como resultado do processo de beneficiamento, o tratamento do rejeito de minério de ferro deve ter ênfase em uma gestão ambiental sob maior controle, propondo soluções como a filtragem a seco e obras de alteamento, proporcionando melhores condições de segurança.

Dados divulgados pela Agência Nacional de Mineração (2023b) por meio do Report Mensal Barragens de Mineração apontam que, em junho de 2023, 919 barragens de mineração estavam cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens

de Mineração (SIGBM) no Brasil, sendo que 460 destas inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelecida pela Lei nº 12.334/2010 (DNPM, 2020). A Figura 3 representa a evolução do número de barragens em cada categoria de risco de maio de 2022 a junho de 2023.

Figura 3 – Barragens Cadastradas por Categoria de Risco ao Longo do Tempo



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023b)

De acordo com Vale (2020a), os rejeitos de minério de ferro classificados na condição de reuso inviável são predispostos em barragens constituídas para tal fim, em conformidade com as diretrizes de governança e segurança estabelecidas na Política de Segurança de Barragens e Estruturas Geotécnicas de Mineração.

O processo de classificação dos resíduos sólidos abrange desde a identificação do processo de origem do produto, até as etapas de análise dos constituintes e características destes, definindo-os quanto a materiais perigosos e não-perigosos, inertes e não-inertes, avaliando condições como sua biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água conforme determinações da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Conhecer o material empregado é parte imprescindível no processo de dosagem de argamassas, especialmente levando em consideração que para cada tipo de aplicação, existe uma recomendação. Uma dosagem inadequada poderá resultar em uma trabalhabilidade ruim,

tornando a argamassa suscetível a segregação, exsudação e falta de fluidez durante o processo de assentamento por projeção (MA *et al.*, 2022).

Almada *et al.* (2023) identificaram após estudos que os RMF de diferentes minas exibiram diferentes propriedades físicas e composições químicas/mineralógicas, além de associarem o maior grau de processamento do minério a uma menor heterogeneidade, teor de ferro e gravidade específica. O aumento no teor empregado deste material no processo de dosagem leva à redução da fluidez e aumento da densidade aparente, além de contar com a interferência da temperatura de cura, que pode fomentar a reação de hidratação e melhorar as propriedades apresentadas pelo material (HUANG *et al.*, 2023).

Os trabalhos apontam para uma tendência de melhora das propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas, no entanto, em atenção ao fato de que as principais fontes de manifestações patológicas estão associadas a dosagens inadequadas, ocasionando em prejuízos não só de ordem estética, como também perda de função, estudos de otimização devem ser estimulados.

2.2 ARGAMASSAS

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2023), a argamassa consiste em uma “mistura homogênea de agregados(s) miúdo(s), aglomerantes(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. As argamassas são classificadas de acordo com cada tipo de aplicação, podendo ser nomeadas para assentamento, para revestimento de paredes e tetos, de uso geral, para reboco, decorativa em camada fina ou decorativa em monocamada (ABNT, 2023).

Cincotto *et al.* (1995) classificam as argamassas quanto à consistência da mistura, podendo ser definidas como:

- **Argamassas secas:** necessária uma maior aplicação de energia para moldagem no formato final;
- **Argamassas plásticas:** menor esforço necessário para conformação do produto em seu estado final;
- **Argamassas fluidas:** autonivelamento da mistura, sem a necessidade de emprego de esforço para conformá-la, sendo a própria gravidade suficiente para tanto.

As argamassas para utilização em revestimentos podem ser à base de cal, cimento ou mistas, associando a cal e cimento em sua composição. Em relação ao produto, os

componentes comumente utilizados são: Cimento Portland, cal hidratada, água, areia e aditivos (ABCP, 2002).

O cimento Portland, composto de clínquer e adições, é denominado aglomerante hidráulico devido à reação ocasionada em seus constituintes ao entrar em contato com a água de amassamento. A resistência mecânica de um material pode ser incrementada a partir da contribuição do cimento nas propriedades da argamassa (ABCP, 2002).

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), define-se cal hidratada como: “pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio”. Argamassas produzidas somente com cal tem suas propriedades de resistência mecânica e aderência reduzidas, destacando-se as propriedades de trabalhabilidade e absorção de deformações (ABCP, 2002).

De acordo com a ABCP (2002), a água possui importante papel ao favorecer as reações entre os componentes distintos do produto, sobretudo as reações do cimento, devendo ter seu teor pré-estabelecido para melhores resultados. A areia de origem mineral (ou agregado miúdo) como constituinte das argamassas tem influência nas proporções de aglomerantes e água da mistura, conforme indicado pela ABCP (2002). No Quadro 1 são apresentadas as interferências da granulometria do agregado miúdo nas propriedades da argamassa.

Quadro 1 - Interferência da granulometria da areia nas propriedades da argamassa

Propriedade	Quanto mais fino	Granulometria mais descontínua	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	-	Melhor
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	-
Porosidade	-	Aumenta	-
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência Mecânica	-	Pior	-
Impermeabilidade	Pior	Pior	-

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005), entende-se por agregado miúdo aqueles em que os grãos passam pela peneira ABNT de 4,75 mm, ficando retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. De maneira similar, os agregados graúdos são aqueles compostos por grãos passantes pela peneira ABNT de 75 mm, ficando retidos na peneira ABNT de 4,75 mm.

Conforme estabelecido pela norma NBR 13529 (ABNT, 1995), os aditivos, na forma de materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, possuem a função de modificar e conferir melhorias relacionadas às propriedades da argamassa de acordo com características de interesse.

O fator aderência pode ser definido como sendo a capacidade de adesão da interface argamassa-substrato, sendo de fundamental importância o material utilizado na base e os procedimentos para preparação e limpeza desta, assim como a forma como será realizado o revestimento propriamente dito.

A NBR 13749 (ABNT, 2013) estabelece os limites mínimos relacionados aos parâmetros de espessura e resistência de aderência à tração para o revestimento de argamassa de acordo com sua aplicação, que poderá ser para revestimento de parede interna/externa ou teto interno/externo. O parâmetro de resistência é auferido do ensaio de arrancamento à tração conforme norma (NBR 13749 ABNT, 2013), que adequa os níveis ideais para cada tipo de exposição. A Tabela 2 apresenta as espessuras admissíveis para argamassas utilizadas em revestimentos internos e externos:

Tabela 2 - Espessuras admissíveis de revestimentos internos e externos

Revestimento	Espessura (cm)
Parede interna	$0,5 \leq e \leq 2,0$
Parede externa	$2,0 \leq e \leq 3,0$
Teto interno e externo	$e \leq 2,0$

Fonte: NBR 13749 (2013)

Quanto aos limites de resistência de aderência à tração, a norma NBR 13749 (ABNT, 2013) estabelece valores mínimos considerando o local de aplicação da argamassa e o tipo de acabamento adotado, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de resistência de aderência à tração

Local		Acabamento	Ra (MPa)
Parede	Interno	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto			$\geq 0,20$

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013)

Além das especificações anteriormente mencionadas, a NBR 13281 (ABNT, 2023) estabelece que os requisitos mecânicos e reológicos das propriedades das argamassas devem estar em concordância com as condições especificadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	
Capacidade de retenção de água (%)	Normal	≥ 80 e ≤ 90	NBR 13277
	Alta	> 90	
Teor de ar incorporado (%)	a	< 8	NBR 13278
	b	≥ 8 e ≤ 18	
	c	> 18	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2023)

Avaliar a aderência e resistência em um sistema de revestimento é fundamental, pois a argamassa possui a função de resistir aos esforços normais e tangenciais, sem que suas propriedades sejam alteradas a ponto de comprometer o desempenho do material.

2.2.1. Metodologia de Dosagem de Argamassas

Metodologias de dosagem de argamassas vem sendo desenvolvidas como uma proposta para melhoria de desempenho do material e análise de novas composições possíveis.

Estudos de dosagem desenvolvidos por Selmo (1989), Lara *et al.* (1995) e Carneiro e Cincotto (1999) já exemplificavam, há alguns anos, abordagens distintas com o propósito de adequação dos traços para um alto desempenho, maior durabilidade e outros avanços e seguem sendo atualizados. Mecanismos eficientes podem melhorar, de maneira considerável, as características físicas e mecânicas dos elementos associados, ampliando sua utilização e possibilitando o uso em obras de maior complexidade (SANTOS, 2014).

O método de dosagem proposto por Selmo (1989) utiliza como critério a dosagem do teor ótimo do material plastificante. Os níveis de areia + plastificantes *versus* cimento são variados até que se obtenha níveis de trabalhabilidade adequados. Curvas de correlação são definidas estabelecendo a relação entre agregados/cimento e água/cimento, permitindo identificar os teores mínimos de plastificante e água para compor o material.

Selmo e Helene (1991) recomendaram a melhoria do método citado anteriormente a partir da adição de cal, no entanto, com uso específico para revestimento externo de fachada de edifícios. Para este método, são estabelecidas as relações agregado + cal/cimento e areia/finos, em que são avaliadas as propriedades da argamassa no estado fresco e/ou no estado endurecido, para tomada de decisão baseada no traço que mais se adequa às necessidades levantadas.

A metodologia de dosagem de Lara *et al.* (1995) estipula um teor de finos limite, em função da aderência requerida e consumo de água, para atingimento de uma consistência pré-estabelecida.

Carneiro e Cincotto (1999) constataram que a variação da granulometria do agregado possibilitava o aumento no teor de finos inertes, em substituição ao cimento, sem que fosse necessário o aumento no teor de água. Deste modo, propuseram uma evolução no método de dosagem a partir da adequação da curva granulométrica do agregado miúdo.

Pesquisas recentes conduzidas por Ma *et al.* (2022), Rahmatika *et al.* (2019), Revathi *et al.* (2018), Debska *et al.* (2019) e Nakkeran e Krishnaraj (2023) sugerem o uso de softwares estatísticos e modelagem matemática como Planejamento de Experimentos e Metodologia de Superfície de Resposta para definição da proporção de cada um dos materiais da composição.

Santos (2014) constatou que as publicações nacionais acerca das metodologias de dosagem apresentavam divergências significativas, reforçando a importância dos estudos em prol do desenvolvimento tecnológico e de inovação nesta área. Além disso, as metodologias de dosagem disponíveis para argamassas de revestimento e assentamento demonstram abordagens limitadas, além de uma aplicabilidade restrita na maioria dos casos (SANTOS *et al.*, 2018).

2.3 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM ARGAMASSAS

Em substituição parcial ao agregado natural, assim como a areia, o rejeito de minério de ferro possui função aglomerante na mistura. O material viabiliza o preenchimento dos vazios existentes e possíveis reações pozolânicas entre os hidróxidos de cálcio do cimento e a sílica (SiO_2) do agregado miúdo (CARRASCO *et al.*, 2017). A matriz se torna mais contínua e fornece um meio melhor para a formação de produtos de hidratação, apresentando um aumento da densidade aparente e redução dos teores de ar incorporado no material (FONTES *et al.*, 2016).

Huang *et al.* (2023) estudaram a influência da substituição dos agregados por RMF, com teor variando de 0% ~ 50% e temperatura de cura oscilando entre 20 °C, 40 °C e 60 °C, tendo acrescentado aditivo superplastificante na mistura. O estudo indicou bons resultados na taxa de substituição entre 30% e 50%, sendo observada uma tendência de melhoria na resistência quando a idade de cura aumenta de 7 dias para 28 dias. Li *et al.* (2023) também ressaltaram a melhoria potencial da resistência, dado o aumento do tempo de cura, especialmente para idades de cura de 28 dias e 120 dias, tendo avaliado as condições para misturas com traço 1:3 (ligante:agregado), relação a/c de 0,45 e teores de substituição de 0%, 25% e 50%.

Almada *et al.* (2022) moldaram argamassas estruturais com traço de 1:0,40:3 (cimento:RMF:areia) e adição de 40% do teor de rejeito de minério de ferro, mantendo a relação água/cimento em 0,50, sem o uso de aditivos plastificantes, para evitar influências externas e permitir a análise da trabalhabilidade. A partir das análises concluíram que a adição de RMF aumentou a resistência à compressão do material.

Júnior e Oliveira (2022) realizaram um estudo exploratório utilizando o cimento Portland CPIII 32 RS, teor de substituição do agregado miúdo convencional variando entre 0%, 25%, 50% e 100%, e traço 1:3 (ligante:agregado), indicando uma maior densidade no estado fresco e melhores parâmetros quanto à durabilidade, porosidade e absorção de água

para o material com 25% de substituição. Este mesmo traço apresentou bons resultados relativos à resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial, sem diminuição significativa, se comparados com a argamassa de referência com 0% de teor de RMF.

Silva e Mazzinghy (2021) propuseram a utilização do RMF em argamassas geopoliméricas, sendo a maior resistência à compressão observada considerando 50% de RMF, 25% de metacaulim comercial e 25% de uma solução alcalina em uma proporção de 1:3 de solução comercial de hidróxido de sódio (NaOH) e solução comercial de silicato de sódio (Na₂SiO₃). Os resultados referentes à resistência à compressão foram considerados satisfatórios, indicando a possibilidade de utilização do RMF como uma alternativa sustentável no estado de Minas Gerais, no Brasil, dadas as características favoráveis da região.

Carrasco *et al.* (2017) analisaram a viabilidade da utilização do RMF em substituição parcial ao agregado miúdo, utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), variando a relação a/c de 1,062 a 1,522, constatando uma resistência e módulo de elasticidade (dinâmico e estático) compatíveis com os encontrados para concreto e argamassas dosados de maneira convencional.

Fontes *et al.* (2016) realizaram um estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas da composição moldadas com substituição parcial e total de cal por rejeito de minério de ferro e cimento Portland tipo CP-III 40 RS, com um traço 1:3 (ligante:agregado), indicando que a substituição da cal por até 20% de RMF garantiu propriedades satisfatórias para utilização do material alternativo.

De maneira geral, os estudos indicaram que há uma tendência de melhora nas propriedades mecânicas com a incorporação do rejeito em misturas de argamassa em uma faixa recomendada, em comparação com às convencionais. Além disso, é válido ressaltar que as propriedades físico-mecânicas de amostras de 28 dias são melhores do que as de amostras de 7 dias porque os produtos de hidratação crescentes são produzidos com o aumento da idade de cura (HUANG *et al.*, 2023). A adição de material fino aumenta significativamente a coesão da mistura e contribui significativamente para o nível de resistência do material (CARRASCO *et al.*, 2017). Em outros termos, os resíduos do RMF preencheram os vazios com a superfície de suas partículas e sua influência na resistência estaria relacionada a condições físicas, como o efeito *filler* (ALMADA *et al.*, 2022). Além disso, o RMF melhora o empacotamento das partículas e tende a reduzir a Zona de Transição Interfacial (ZIT) entre a pasta de cimento e os agregados, considerada a região mais fraca dos componentes. (ALMADA *et al.*, 2023).

É possível obter argamassas de alto desempenho para serem utilizadas não apenas como material de revestimento, mas também, como material estrutural na construção civil (CARRASCO *et al.*, 2017). As pesquisas reforçam a importância dos estudos relacionados a este tipo de dosagem a fim de se definirem combinações adequadas que levem a um desempenho mecânico superior.

2.4 PLANEJAMENTO, PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

O Planejamento, Projeto e Análise de Experimentos ou *Design of Experiments* (DOE), consiste em técnicas para planejamento de experimentos visando a coleta de dados válidos e objetivos para uma análise estatística que indique os efeitos de fatores isolados em um mesmo processo. De acordo com Montgomery (2013): “um experimento é um teste ou uma série de testes nos quais são feitas alterações propositalmente às variáveis de entrada de um processo ou sistema para que possamos observar e identificar os motivos para mudanças que podem ser observadas nas respostas de saída”.

Box, Hunter e Hunter (1978) destacam três fontes de discrepâncias que podem ser minimizadas a partir de métodos estatísticos, com o adequado emprego dos projetos e análises de experimentos, sendo estes: (a) erro aleatório ou ruído; (b) confundimento entre correlação e causalidade e (c) complexidade dos efeitos.

De acordo com Montgomery (2013), o método DOE tem aplicação multidisciplinar, com uma abordagem científica que possibilita compreender como os sistemas funcionam para fins de melhoria dos processos. Alguns dos benefícios resultantes da aplicação das técnicas do Projeto e Análise de Experimentos podem ser resumidos em:

1. Aprimoramento do rendimento dos processos;
2. Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
3. Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
4. Redução de custos.

Segundo Nilo (2003), as técnicas mais utilizadas nos projetos experimentais são o Planejamento Fatorial Completo, Planejamento Fatorial Fracionário, os arranjos de Taguchi e a Metodologia da Superfície de Resposta. O Quadro 2 apresenta um descritivo com as características de cada uma das técnicas apontadas e suas principais aplicações:

Quadro 2 - Principais técnicas do Planejamento de experimentos e aplicações

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tenha um prévio domínio e nos quais as realizações das corridas não demandem maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionário 2^{k-p}	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos em que se deseje um pré-conhecimento e nos quais a literatura seja limitada. Corridas que demandem maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos em que haja pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou em que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2012)

A possibilidade de analisar a interação entre um número considerável de variáveis e a significância do efeito isolado de cada uma delas no sistema representa um grande benefício da aplicação de experimentos fatoriais (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

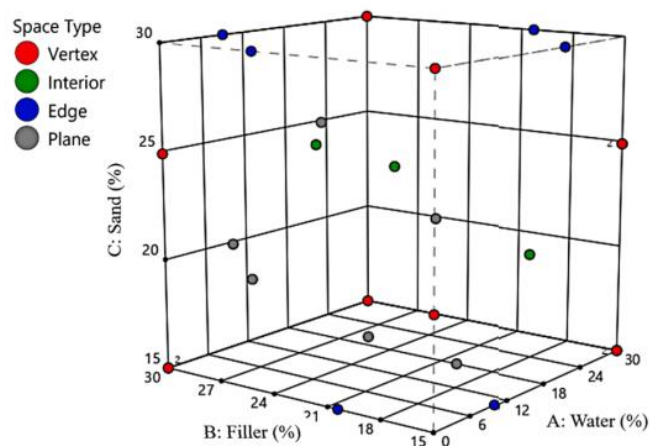
Em um conceito voltado para a área da Engenharia mais especificamente, Montgomery (2013) destaca a importância fundamental do método DOE e aponta algumas de suas aplicações que incluem:

- Avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;
- Avaliação de materiais alternativos;
- Seleção de parâmetros de projeto para um produto robusto;
- Determinação dos principais parâmetros que afetam o desempenho do produto;
- Concepção de novos produtos.

A aplicação do método DOE no estudo de materiais de concreto possibilita prever a resistência do concreto e o desenvolvimento do projeto de mistura para obtenção de melhores resultados, mostrando-se uma abordagem favorável (CHONG *et al.*, 2021). O método também foi aplicado por Rahmatika *et al.* (2019) em seu estudo.

Ma *et al.* (2022) utilizaram o software *Design-Expert* para definição do projeto experimental para proceder à análise dos componentes da argamassa tipo SFS, um material popular de manutenção preventiva, preencher as microfissuras e melhorar a resistência à derrapagem e resistência ao desgaste da superfície de pavimentos, totalizando 26 combinações. O modelo permitiu a caracterização das interações e obtenção das configurações ideais de produtos a partir da modelagem de respostas. A distribuição espacial dos pontos experimentais é mostrada na Figura 4:

Figura 4 – Distribuição espacial dos pontos experimentais



Fonte: Ma *et al.* (2023)

2.4.1. Metodologia da Superfície de Resposta

A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) reúne um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas relacionando variáveis de saída de um processo com as variáveis de entrada (MYERS *et al.*, 2009).

A metodologia objetiva a definição de uma aproximação que estabeleça a relação entre a resposta de interesse e as variáveis envolvidas no processo. A manipulação de variáveis distintas em um mesmo procedimento experimental permite avaliar interações importantes, as quais poderiam ser negligenciadas em caso de análise dos fatores isolados. O modelo de primeira ordem, indicado para processos em que a resposta é descrita de maneira

apropriada por uma função linear das variáveis independentes é definido conforme Equação 1 (Paiva, 2006; Box e Draper, 1987):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Em que as variáveis correspondem a:

y: resposta de interesse;

x_k : variáveis independentes;

β_k : coeficientes a serem estimados;

k: número de variáveis independentes; e

ε : erro experimental.

Em alguns casos a curvatura da superfície de resposta pode ser significativa ao ponto do modelo de primeira ordem se tornar inadequado para explicar a variabilidade do processo. Diante desta situação, os dados devem ser tratados a partir da aproximação polinomial de segunda ordem, como um modelo quadrático, conforme Equação 2:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Onde:

y: resposta de interesse;

x: variáveis independentes;

β_i , β_{ii} e β_{ij} : parâmetros de regressão;

k: número de variáveis independentes; e

ε : erro experimental.

O modelo será fundamentado na condição de que a soma dos quadrados dos resíduos é mínima, razão pela qual o método é definido como ajuste por mínimos quadrados.

Segundo Cornell (2002), a escolha do modelo adequado que se aproxima da superfície de interesse e o teste de adequação do mesmo são fundamentais durante esta etapa. Box e Draper (1987) estimaram que a maioria dos problemas envolvendo MSR podem ser

resolvidos a partir de modelos lineares (sem curvatura) e de segunda ordem (com curvatura), determinando o comportamento do sistema.

O ajuste dos modelos de superfície de resposta pode ser validado a partir da Análise de Variância (ANOVA), identificando a significância destes em termos estatísticos. Os coeficientes β representados conforme Equação 3, em forma matricial, podem ser definidos a partir do modelo dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares - OLS*):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

Sendo X a Matriz de fatores codificados e Y a resposta.

O coeficiente de determinação (R^2) indica o ajuste do modelo e a fração da variação na resposta explicada. Partindo do ponto zero, quanto mais próximo de 1 for o valor de referência, maior será a concordância da resposta com os valores experimentais. O coeficiente de determinação ajustado (R^2 (adj)) é utilizado para regressões lineares múltiplas, ponderando o efeito do tamanho da amostra no ajuste do modelo, dada a tendência de R^2 superestimar o resultado por não considerar o número de variáveis inseridas

De acordo com Montgomery (2013) é fundamental a verificação dos resíduos da observação como parte do processo para validação das suposições. A definição de resíduos é representada conforme Equação 4:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4)$$

Onde:

e_i : Resíduo;

y_i : Resposta observada;

\hat{y}_i : Resposta estimada.

A modelagem e otimização de problemas envolvendo múltiplas respostas é comumente realizada utilizando-se o método de pesquisa DOE, amplamente difundido no meio acadêmico e industrial. Uma série de estudos foram conduzidos a fim de proceder à otimização de misturas de concreto utilizando Metodologia da Superfície de Resposta (MONTGOMERY, 2013).

Galan *et al.* (2019) utilizaram Metodologia da Superfície de Resposta para conduzir um estudo a respeito da durabilidade do asfalto misturado a quente produzido com agregados de concreto reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), variando o teor de substituição de 0 a 60%, inferindo que cerca de 17% é o teor máximo para misturas feitas com xisto como agregado natural e aproximadamente 11% para calcite dolomite.

Rahmatika *et al.* (2019) realizaram o teste de Análise de Variância de Modelo de Segunda Ordem da resistência à compressão e avaliação por meio da MSR para avaliar o alcance da resposta produzida pelo uso da sílica como substituição parcial na argamassa.

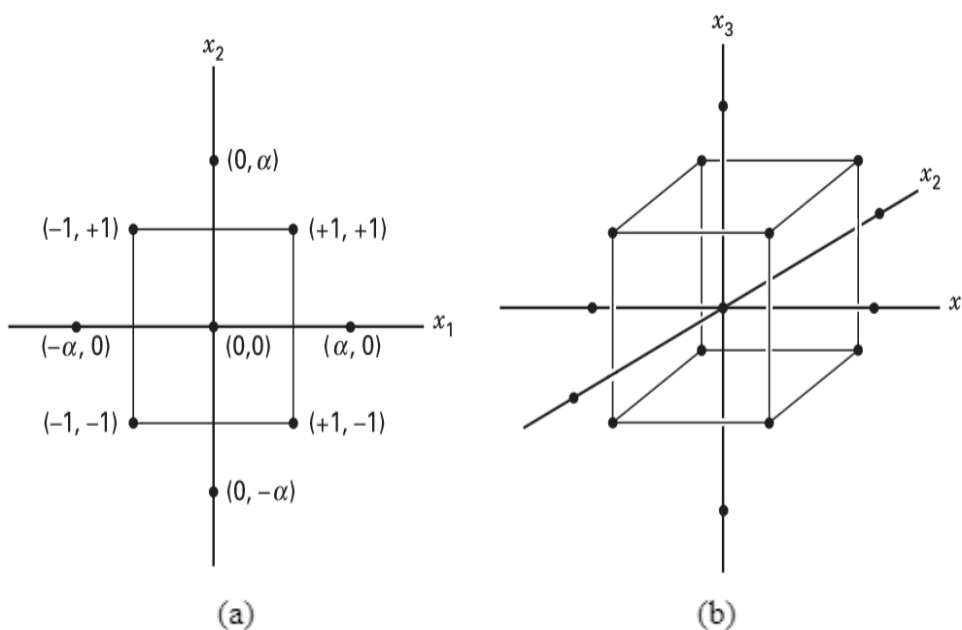
Ma *et al.* (2022) utilizaram a MSR com o objetivo de identificar a influência dos componentes no desempenho da argamassa SFS, apontando o teor de água e filler como significativos na trabalhabilidade e a adição de areia com uma influência negativa na fluidez.

Al-alaily e Hassan (2016) realizaram a otimização de misturas de concretos à base de metacaulim para melhoria da resistência à compressão e permeabilidade ao cloreto utilizando o DOE e MSR. O método representou uma aplicação precisa para determinação das proporções ideais para a mistura. Rezaifar *et al.* (2016) analisaram misturas híbridas com substituição de um determinado volume de areia por uma dada quantidade de resíduos de borracha e metacaulim incorporadas ao concreto em substituição ao cimento, maximizando a resistência e minimizando as taxas de absorção de água, indicando a correlação entre as variáveis por ANOVA.

2.4.2 Arranjo Composto Central (CCD)

O Arranjo Composto Central ou *Central Composite Design* (CCD) é o delineamento experimental mais utilizado para ajustes de modelos polinomiais de segunda ordem (MONTGOMERY, 2013). Para os experimentos do tipo CCD, a apresentação pode se dar de três formas distintas: pontos centrais, pontos fatoriais (ou cúbicos) e os pontos axiais (ou estrela). A Figura 5 representa pontos centrais cubo-estrela para um experimento com 2 e 3 fatores:

Figura 5 – CCD fatorial em um experimento com (a) 2 e (b) 3 fatores



Fonte: Montgomery (2013)

Mohammed *et al.* (2018) executaram 45 experimentos com variação do fator água/cimento e teor de substituição do agregado natural miúdo, no concreto convencional, por resíduo de borracha em uma faixa pré-determinada encontrando a correlação entre os fatores e a resposta e demonstrando que o modelo é satisfatório para análises similares.

2.4.3 Método *Desirability*

Os dados obtidos a partir do projeto de experimentos são tratados obtendo-se os parâmetros ótimos para confecção do produto. A função *Desirability*, elaborada por Harrington (1965) e aprimorada por Derringer e Suich (1980), permite que uma solução ótima para um determinado problema seja apresentada convertendo múltiplas variáveis de resposta em uma única, em conformidade com os critérios estabelecidos.

Pinheiro *et al.* (2018) utilizaram o Projeto de Experimentos e Função *Desirability* para dosagem de argamassa mista, definindo como variáveis de entrada, cimento, cal e areia. O método, considerado satisfatório, possibilitou avaliar a significância de seus parâmetros, otimizando propriedades relacionadas à resistência à tração, resistência à compressão e resistência de aderência à tração.

A proposta desenvolvida por Derringer e Suich (1980) estabeleceu a conversão, com o auxílio de um algoritmo, de cada uma das respostas em uma única função d_i pertencente ao

intervalo $0 \leq d_i \leq 1$, em que $d_i = 0$ representa uma resposta fora da região exequível, enquanto $d_i = 1$ é definido como o objetivo (*target*) para as variáveis de resposta (MYERS *et al.*, 2009).

De acordo com Derringer e Suich (1980), as observações apresentadas são válidas, levando-se em consideração o valor obtido para a função d_i conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Interpretações possíveis para o retorno da função d_i

Função	Interpretação
$d_i = 1$	Valor desejável
$0,80 \leq d_i \leq 1$	Valor excelente
$0,63 \leq d_i \leq 0,80$	Valor adequado
$0,40 \leq d_i \leq 0,63$	Valor aceitável, porém pobre
$d_i = 0,30 \leq d_i \leq 0,40$	Valor no limite de aceitação
$d_i = 0 \leq d_i \leq 0,30$	Valor fora da faixa adequada

Fonte: Autoria Própria

O conjunto de variáveis ótimas pode ser então representado pelo *Desirability* Global (D), conforme Equação 5, em que o valor da maximização corresponde à média aritmética de cada uma das funções individuais (d) as quais serão submetidas à otimização com o mesmo grau de importância. O emprego da média geométrica viabiliza o atingimento de uma solução global balanceada, em que o algoritmo se aproxima das restrições estabelecidas (PAIVA, 2006).

$$D = (d_1(Y_1).d_2(Y_2)... d_m(Y_m))^{1/m} \quad (5)$$

Em casos particulares para os quais deve-se atribuir um grau de importância individual (g_i) para cada propriedade em relação às demais envolvidas, a Equação 6 pode ser utilizada:

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{g_i}(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{G}} \quad (6)$$

Em que: g_i representa os graus de importância individuais e G, ao somatório de g_i

Derringer e Suich (1980) apresentam funções relacionadas ao tipo de resposta desejada, que podem ser do tipo:

- Nominal é Melhor (NTB – *Nominal The Better*);
- Maior é Melhor (LTB – *Larger The Better*); e
- Menor é Melhor (STB – *Smaller The Better*).

Wu (2005) e Murphy *et al.* (2005) estabelecem a relação para funções com o objetivo de normalização, ou seja, em que se deseja atingir um valor alvo, conforme Equação 7. Assumindo que a resposta é do tipo NTB, observa-se um aumento no valor da função *Desirability* na medida em que a variável de resposta se aproxima do valor desejado. Mantidas as restrições de valores inferior e superior, temos que acima ou abaixo dos limites pré-estabelecidos, a função “d” equivale a zero.

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 0 & \hat{Y}_i < L_i \text{ ou } \hat{Y}_i > H_i \end{cases} \quad (7)$$

Em que: L_i e H_i representam o limite inferior e superior de especificação, respectivamente, T_i o valor alvo (*target*) e \hat{Y}_i o valor ajustado da resposta.

Se uma resposta deve ser minimizada, a função *Desirability* aumenta conforme o valor ajustado se aproxima do valor mínimo especificado e tende a zero quando está acima do limite superior. A solução do problema do tipo STB pode ser estabelecida conforme Equação 8, em que T_i indica um valor suficientemente pequeno para a variável de resposta.

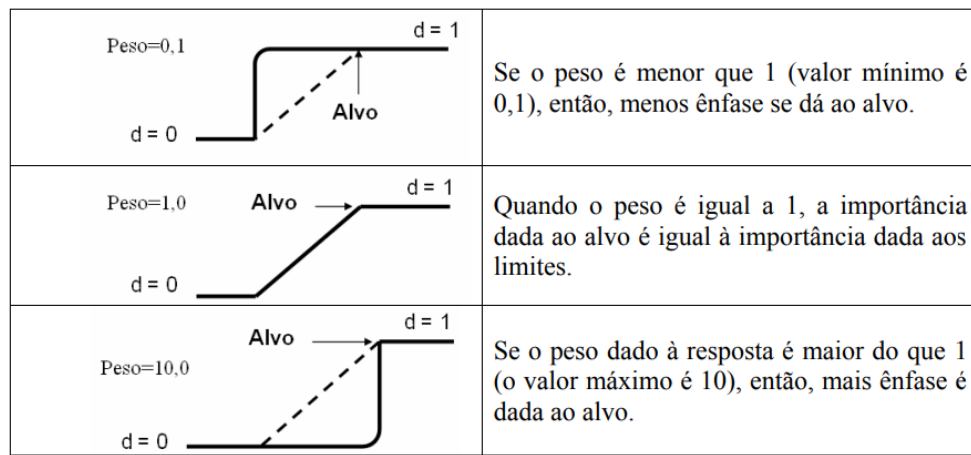
$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i > H_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 1 & \hat{Y}_i < T_i \end{cases} \quad (8)$$

Para respostas com o objetivo de maximização, o valor da função aumenta, com o também aumento do valor da variável de resposta. Tem-se uma resposta do tipo LTB em que, para valores abaixo do limite inferior, $d=0$ e, acima do alvo, $d=1$, conforme Equação 9:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < L_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{Y}_i > T_i \end{cases} \quad (9)$$

Em que R representa o peso atribuído, ou seja, a preponderância dos limites, dadas as relações de importância conforme Figura 6:

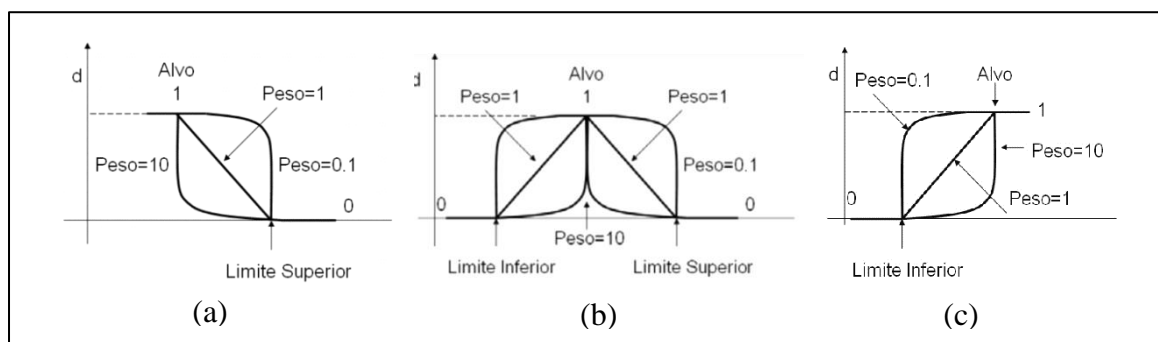
Figura 6 – Representação da relação de importância entre o alvo e limites no *Desirability*



Fonte: Paiva (2006)

A Figura 7 apresenta uma representação esquemática para a função *Desirability* com o objetivo de (a) minimização, (b) normalização e (c) maximização.

Figura 7 - Representação esquemática para *Desirability* dos tipos STB, NTB e LTB



Fonte: Adaptado de Paiva (2006)

O índice global D será maximizado conforme as variáveis de resposta se aproximarem o máximo possível de suas especificações, em intervalo [0 ; 1] pré-determinado (PAIVA, 2006). O método dependerá dos limites de especificação para os

valores desejados, do grau de importância de cada resposta (g_i), peso (R) dado a cada resposta e o tipo de otimização pretendida, seja com o objetivo de maximização, normalização ou minimização.

Ma *et al.* (2022), Rahmatika *et al.* (2019) e Pinheiro *et al.* (2018) confirmaram a aplicabilidade do método matemático *Desirability* com o objetivo de otimização da dosagem da argamassa, definindo as proporções adequadas de material que atendessem a trabalhabilidade desejada.

2.4.4 Análise dos Componentes Principais

Análise de Componentes Principais é um método estatístico de análise multivariada. Descrita inicialmente por Pearson (1901) e aprimorada por Hotelling (1933), a técnica transforma linearmente um conjunto original de variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, retendo o máximo de informações, em termos de variação total, do conjunto original (HONGYU, 2015). O método ACP viabiliza a representação de dados multivariados em um subespaço de dimensão reduzida, admitindo-se que, na maioria dos casos, a maior parte desta variabilidade pode ser representada por um pequeno número x de componentes principais. A distância entre os pontos que representam as amostras corresponde às desigualdades entre os pontos na dimensão original (BERNARDI *et al.*, 2001; SILVA, 2001).

Para análises envolvendo apenas duas variáveis, é suficiente que se verifique apenas a correlação entre elas. Conjuntos com maior número de variáveis requerem uma análise individualizada para uma transformação linear ótima. A ACP reduz múltiplas variáveis a eixos perpendiculares (ortogonais) que representam algumas variáveis, demonstrando a variação dos dados de forma decrescente e independente (HONGYU, 2015).

Seja $Y^T = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ um vetor aleatório cuja matriz Σ possua autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$. Considerando as combinações lineares, baseada nos autovalores que deram origem aos autovetores (ℓ) conforme Equações (10 a 12), os CPs serão as combinações lineares não correlacionadas de Y_1, Y_2, \dots, Y_p , com máxima variância possível.

$$Y_1 = \ell'_1 X = \ell_{11}X_1 + \ell_{21}X_2 + \dots + \ell_{p1}X_p \quad (10)$$

$$Y_2 = \ell'_2 X = \ell_{12}X_1 + \ell_{22}X_2 + \dots + \ell_{p2}X_p \quad (11)$$

$$\vdots$$

$$Y_p = \ell'_p X = \ell_{1p}X_1 + \ell_{2p}X_2 + \dots + \ell_{pp}X_p \quad (12)$$

Deste modo, o primeiro componente principal (CP_1) pode ser definido como a combinação linear que maximiza a variância (JOHNSON e WICHERN, 2007). De forma genérica, o i -ésimo componente principal será a combinação linear $\ell'_i X$, conforme Equações (13 a 15):

$$\text{Maximizar Var}(\ell'_i X) \quad (13)$$

$$\text{Sujeito a: } \ell'_i X \ell_i = 1 \quad (14)$$

$$\text{Cov}(\ell'_i X, \ell'_k X) = 0 \text{ para } k < i \quad (15)$$

Em que $i, k = 1, 2, \dots, p$.

De acordo com Johnson e Wichern (2007), a matriz de variância-covariância amostral S_{ij} e a matriz de correlação R_{ij} podem ser aplicadas em análises cujos parâmetros populacionais de variância-covariância e correlação são desconhecidos. A matriz S_{ij} , em que os elementos diagonais da matriz representam os desvios das variáveis e os demais indicam as covariâncias associadas aos pares de variáveis possíveis, é expressa conforme Equação 16:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)^2 & \dots & \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{pj} - \bar{x}_p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{pj} - \bar{x}_p) & \dots & \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{pj} - \bar{x}_p)^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

A matriz de correlação R_{ij} pode ser calculada conforme Equação 17:

$$r_{(\hat{y}_i, x_k)} = \frac{\text{Cov}(x_k, \hat{y}_i)}{\sqrt{\text{Var}(\hat{y}_i) \cdot \text{Var}(x_k)}} = \frac{\hat{e}_{ki} \sqrt{\hat{\lambda}_i}}{\sqrt{S_{kk}}} \quad (17)$$

Em que $i, k = 1, 2, \dots, p$.

A correlação entre as variáveis pode ser interpretada de forma análoga ao coeficiente de Pearson (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). O coeficiente de correlação situa-se no intervalo $[-1; 1]$, sendo que valores próximos de 1 indicam correlações positivas, enquanto valores próximos de -1 representam uma correlação negativa.

A matriz de escore de componentes principais (CP_k) pode ser representada conforme Equação 18 (JOHNSON e WICHERN, 2007).

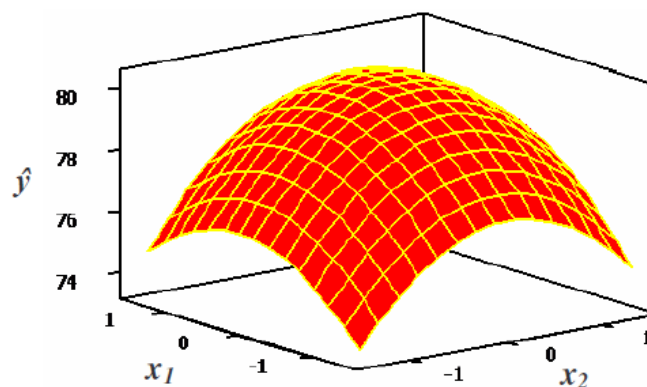
$$CP_k = Z^T e = \begin{bmatrix} \left(\frac{x_{11} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}}\right) & \left(\frac{x_{21} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}}\right) & \dots & \left(\frac{x_{p1} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}}\right) \\ \left(\frac{x_{12} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}}\right) & \left(\frac{x_{22} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}}\right) & \dots & \left(\frac{x_{p2} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{x_{1n} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}}\right) & \left(\frac{x_{2n} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}}\right) & \dots & \left(\frac{x_{pn} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1p} & e_{2p} & \dots & e_{pp} \end{bmatrix} \quad (18)$$

O critério de Kaiser (1958) é um método frequente utilizado para definir o número de Componentes Principais (CPs), que deve ser igual ao número de autovalores maiores ou iguais à média das variâncias das variáveis em estudo que explicam a maior parte da variação dos dados. Para este critério, o autovalor dos CPs deverá ser maior do que 1 ($\lambda_i > 1$) para representar a variação no conjunto de dados (JOHNSON e WICHERN, 2007; SAVEGNAGO *et al.*, 2011). Em muitos casos, modelos que expliquem pelo menos 80% da variância total são adotados (JOHNSON e WICHERN, 2007).

2.4.5 Otimização do Desempenho e Qualidade

A otimização de uma resposta reúne o conjunto de soluções mais apropriado para as variáveis independentes envolvidas no processo que resultaram no melhor valor para a variável dependente do sistema. A representação gráfica de uma superfície de resposta mediante a um sistema de coordenadas, em que o ponto ótimo pode ser entendido como o conjunto de valores da coordenada x para os quais a derivada parcial equivale a zero é demonstrada na Figura 8:

Figura 8 - Superfície de resposta com ponto de máximo



Fonte: Montgomery (2001)

Rahmatika *et al.* (2019) utilizaram o projeto de experimentos CCD, totalizando 20 experimentos, para definir o valor ótimo de substituição considerando a influência do efeito da adição de sílica ativa em substituição parcial do Cimento Portland, aplicando o método de superfície de resposta. A análise indicou que a composição ótima é obtida pela adição de 23,6% de sílica ativa do cimento, com ensaios de confirmação registrando uma resistência à compressão de 55,8 MPa, índice superior a esta mesma resistência medida para a argamassa sem sílica, de 25,6 MPa.

Ma *et al.* (2022) avaliaram a influência de cada um dos constituintes da argamassa SFS estabelecendo uma matriz com 26 experimentos, para os quais procedeu-se à análise por meio da MSR e otimização com o auxílio do método *Desirability*. O comportamento das argamassas foi examinado, correlacionando-se os parâmetros reológicos com a trabalhabilidade, estabelecendo-se, portanto, a formulação ideal.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

Para cumprir com os objetivos deste trabalho foi utilizado o cimento Portland CP V-ARI, classificado segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) como cimento de alta resistência inicial, que apresenta acelerada reação de hidratação e ganho de resistência, o que favorece propriedades mecânicas com elevada resistência ainda nos primeiros dias de aplicação. O uso deste tipo de aglomerante é altamente indicado para situações em que se faz necessária uma rápida desforma, além de proporcionar uma maior proteção ao ataque de agentes abrasivos externos do meio ambiente.

Em relação aos agregados da mistura, utilizou-se uma areia de origem natural, denominada comercialmente como “areia média”, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de abertura 0,075 mm. As amostras de rejeito de minério de ferro arenoso do tipo AM-2 (2018. SC 078) foram doadas pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas da empresa Vale S.A. Todos os agregados foram coletados em loja de materiais de construção e barragem de rejeitos localizados no município de Itabira (MG).

Amostras de rejeito de minério de ferro, areia média e cimento Portland CPV-ARI utilizados nessa pesquisa encontram-se na Figura 9 ilustrados da esquerda para a direita.

Figura 9 – RMF, Areia Média e CPV-ARI para composição dos traços das argamassas



Fonte: Autorial Própria

Outro material utilizado na formulação das argamassas foi o aditivo químico. Para isso, empregou-se nas misturas de argamassa o aditivo Muraplast FK 845, do fabricante MC-Bauchemie, encontrado no estado líquido e classificado como um plastificante multifuncional.

Trata-se de um produto compatível com o cimento Portland utilizado, aplicado na produção das argamassas visando combater o efeito da alta taxa de absorção de água, proporcionando concomitantemente uma melhoria na coesão e trabalhabilidade do material. As características do produto fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características e propriedades do aditivo utilizado na pesquisa

Descrição	Resultado
Cor	Marrom escuro
Densidade (kg/L)	1,08
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 1,0\%$

Fonte: Autorial Própria

Ressalta-se que a trabalhabilidade está entre as propriedades mais importantes da argamassa, que deverá apresentar boas condições de consistência, plasticidade e retenção de água adequadas ao processo de execução. Para uma mesma trabalhabilidade das argamassas

convencionais, aquelas produzidas com agregado reciclado tendem a consumir maiores teores de água (FONTES *et al.*, 2016).

O emprego desse aditivo se deu em virtude das características do RMF. Sua elevada finura sinalizava possíveis alterações na consistência das argamassas. A consistência tende a diminuir nas amostras, quanto mais fino e poroso for o rejeito, devido à maior necessidade de água de amassamento (ALMADA *et al.*, 2022; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016). Em outras palavras, o tamanho da partícula do RMF, menor que a areia média, tem influência negativa na trabalhabilidade (ZHAO *et al.*, 2021). Ocorre, portanto, o aumento da densidade aparente e redução da fluidez das amostras frescas (HUANG *et al.*, 2023).

Considerando a maior porosidade dos materiais reciclados finos, como observado pelos autores citados acima e, conseqüentemente, a maior taxa de absorção de água do agregado reciclado, os pesquisadores fizeram uma correção da relação água/cimento das misturas recicladas para produzir a nova argamassa. Portanto, houve um aumento na relação água/cimento como método de controle para evitar a influência negativa dessa característica do agregado no desempenho das argamassas dosadas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

3.1.1 Caracterização dos Agregados

A caracterização dos agregados areia média e do rejeito de minério de ferro utilizados na preparação das argamassas foi realizada conforme metodologias listadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Normas para definição das características físicas dos agregados

Método	Descrição
ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica
ABNT NBR 16972:2021	Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios
ABNT NBR NM 52:2009	Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente

Fonte: Autoria Própria

A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada através do Método do Peneiramento do material granular, a partir do qual foi possível verificar a

distribuição das partículas que compõem esses insumos e a percentagem em peso que cada faixa específica do tamanho dos grãos representa em relação à massa total. Em conformidade com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), o material foi coletado, umedecido para evitar a segregação das partículas e, posteriormente, seco em estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de (105 ± 5) °C. Foram preparadas duas amostras, com 0,3 kg do material para cada uma delas. As amostras foram peneiradas em um conjunto com agitação mecânica durante cerca de 5 minutos. Ao fim do processo, as proporções retidas em cada uma das peneiras foram pesadas.

A massa unitária dos agregados foi determinada com referência na norma NBR 16972 (ABNT, 2021), estabelecendo a relação entre a massa do agregado analisado e o volume ocupado no recipiente de medição, sendo o resultado definido como a média dos resultados individuais de três amostras de cada um dos materiais.

Conforme estabelecido pela norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) a massa específica dos agregados foi estabelecida a partir da relação entre a massa do agregado seco e o volume dos grãos, desprezando os poros permeáveis.

As análises propostas fornecem informações significativas acerca das propriedades físicas dos agregados que poderão influenciar na formulação das argamassas e nas propriedades destas nos estados fresco e endurecido. Sua aplicação é importante, pois permite antecipar o comportamento do material em uma dada composição e especificar o potencial de utilização da matéria-prima em um determinado produto.

3.1.2 Traço de Argamassa

A fim de se obter argamassas com aplicações em assentamentos de alvenaria e revestimento de paredes e tetos, efetuou-se um proporcionamento de materiais baseado em uma faixa de consistência (255 ± 10) mm, avaliada através da mesa de espalhamento (*flow table*), adotadas em função da trabalhabilidade desejada no canteiro de obras e conservando-se a mistura coesa e sem segregação. Como resultado, o traço referência para o estudo foi moldado na proporção 1:5 com substituição de areia e RMF realizada em massa.

3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Os parâmetros foram fixados baseando-se nas condições dos dados apresentados conforme Tabela 7. Em seguida, testes foram realizados para verificar se o processo ocorria nas condições extremas de cada variável de controle, em que os pontos fatoriais (-1; +1)

representaram valores obtidos a partir da revisão bibliográfica com α igual a 1,68, indicando uma extrapolação dos dados definidos inicialmente.

Tabela 7 - Variáveis de Controle – Arranjo Combinado

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis Experimentais				
		-1,68	-1,0	0,0	1,0	1,68
Teor de substituição	RMF (%)	13,18	20,00	30,00	40,00	46,82
Teor de aditivo	ADT (%)	0,33	0,50	0,75	1,00	1,17
Relação água/cimento	A/C	0,73	0,80	0,90	1,00	1,07

Fonte: Autoria Própria

Primeiramente, foram definidos quais parâmetros seriam adotados para cada nível das variáveis de controle. Essa definição foi importante para que não fossem adotados valores que inviabilizassem a execução dos experimentos ou que resultassem em condições inseguras para execução dos ensaios.

Para tanto, foram considerados os resultados obtidos em experimentos anteriores identificados por meio da revisão bibliográfica e informações do fabricante dos materiais utilizados, com matriz experimental construída no software estatístico MINITAB®, contendo as três variáveis de entrada adotadas para esse procedimento, teor de substituição de agregado miúdo natural por rejeito de minério de ferro (RMF), teor de aditivo (ADT) e relação água-cimento (A/C).

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições das resistências à tração na flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c) foram obtidas utilizando a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos EMIC DL 20000 para aplicação da carga de (500 ± 50) N/s, com resolução de leitura de 10N (1kgf), conforme Figura 10-a.

Para coleta das informações relativas à resistência de aderência à tração na flexão (R_a) foi utilizado um dinamômetro para arrancamento hidráulico manual (Figura 10-b) com indicação digital e capacidade 1500 kgf, resolução de 1kgf.

Figura 10 – Instrumentos de Medição EMIC DL 20000 (a) e dinamômetro hidráulico (b)



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria

3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL

O processo de otimização das argamassas baseou-se na experimentação. A definição dos parâmetros para preparação do material e coleta de dados foi estabelecida tomando como referência a técnica proposta por Projeto e Análise de Experimentos (DOE) com o Arranjo Composto Central (CCD) e avaliação por métodos estatísticos.

O desenvolvimento foi dividido por fases macro, conforme descrito a seguir:

1. Análise do material experimental: por meio da Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), procedeu-se à definição dos critérios para experimentação, conforme indicado pelo planejamento de experimentos, seguido da coleta de informações relevantes para composição dos resultados. Os resultados experimentais fomentaram o desenvolvimento do modelo de estimação das respostas para análise do efeito de cada um dos fatores individualmente e suas possíveis interações nas propriedades mecânicas avaliadas RMF, ADT e A/C, a um nível de confiança de 95%.
2. Otimização: a função *Desirability* foi aplicada para as respostas coletadas a fim de se obter a configuração ótima dos parâmetros de entrada, para maximização dos resultados com a melhoria da qualidade do material moldado.

3.5 DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL

A matriz experimental foi definida utilizando-se o delineamento CCD, com arranjo fatorial de 2^3 com 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, totalizando 18 experimentos para as variáveis de controle com α igual a 1,68. O sequenciamento experimental é apresentado conforme Tabela 8:

Tabela 8 - Matriz Experimental para Otimização das Argamassas com RMF

Número de experimentos	Variáveis de controle codificadas			Variáveis de controle decodificadas		
	<i>RMF</i>	<i>ADT</i>	<i>A/C</i>	<i>RMF</i> [%]	<i>ADT</i> [%]	<i>A/C</i>
1	-1	-1	-1	20,00	0,50	0,80
2	1	-1	-1	40,00	0,50	0,80
3	-1	1	-1	20,00	1,00	0,80
4	1	1	-1	40,00	1,00	0,80
5	-1	-1	1	20,00	0,50	1,00
6	1	-1	1	40,00	0,50	1,00
7	-1	1	1	20,00	1,00	1,00
8	1	1	1	40,00	1,00	1,00
9	-1,68	0	0	13,18	0,75	0,90
10	1,68	0	0	46,82	0,75	0,90
11	0	-1,68	0	30,00	0,33	0,90
12	0	1,68	0	30,00	1,17	0,90
13	0	0	-1,68	30,00	0,75	0,73
14	0	0	1,68	30,00	0,75	1,07
15	0	0	0	30,00	0,75	0,90
16	0	0	0	30,00	0,75	0,90
17	0	0	0	30,00	0,75	0,90
18	0	0	0	30,00	0,75	0,90

Fonte: Autoria Própria

3.6 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Procedeu-se ao ensaio de consistência para controle da qualidade da argamassa no estado fresco e, em seguida, a moldagem dos corpos de prova prismáticos e preparo do revestimento de blocos de concreto para realização dos ensaios no estado endurecido, compreendendo a medição da

resistência à compressão e tração na flexão e resistência de aderência à tração. As resistências foram medidas a partir do rompimento dos corpos de prova em equipamentos apropriados aos 14 dias de idade das argamassas, tendo em vista a especificidade do material, que desenvolve altas resistências nos primeiros dias após aplicação, favorecendo a análise.

3.6.1 Avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco

A caracterização da argamassa no estado fresco para observação da condição de trabalhabilidade foi realizada a partir do Índice de Consistência (*flow table*), em que o espalhamento do material sobre mesa cadente padronizada é medido, em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016). O ensaio foi realizado de acordo com as etapas descritas a seguir, e a Figura 11 ilustra a consistência das argamassas obtida para três traços distintos:

1. Com o molde cônico e tampo da mesa úmidos, o cone foi preenchido com a argamassa referente a cada um dos traços ensaiados;
2. O preenchimento total do cone se deu em três camadas objetivando o adensamento uniforme do material, primeiro aplicando 15 golpes com soquete metálico, seguido pela segunda e terceira camadas aplicando-se 10 e 5 golpes em cada uma delas, respectivamente.
3. A superfície do molde cônico foi rasada para a simetria do material.
4. O molde cônico pode então ser removido para o posterior acionamento do sistema da mesa, proporcionando 30 golpes em um intervalo aproximado de 30 segundos de maneira uniforme.
5. O espalhamento do material foi calculado através da média de três aferições do diâmetro realizadas com o auxílio de um paquímetro.

Figura 11 - Ensaio de Índice de Consistência das argamassas com três traços distintos



Fonte: Autoria Própria

O Índice de Consistência ideal dependerá do tipo de aplicação do material e deverá favorecer a trabalhabilidade no momento de execução do serviço, mantendo-se plástica até o fim da execução após as etapas de mistura e transporte do material. A argamassa produzida poderá ser caracterizada como seca, plástica ou fluida, o que dependerá diretamente das proporções e do material empregado em cada composição. A NBR 13276 (ABNT, 2016) indica um índice de consistência padrão de 255 ± 10 mm como requisito para uma boa trabalhabilidade. Os resultados obtidos para cada traço, seguindo as variações do CCD, são apresentados conforme Tabela 9:

Tabela 9 - Índice de Consistência das Argamassas

Traço	Fator A/C	Índice de Consistência (mm)
T1	0,80	143,3
T2	0,80	144,0
T3	0,80	146,7
T4	0,80	149,3
T5	1,00	294,0
T6	1,00	284,0
T7	1,00	262,3
T8	1,00	285,7
T9	0,90	192,0
T10	0,90	239,3
T11	0,90	230,3
T12	0,90	278,3
T13	0,73	135,3
T14	1,07	335,3
T15	0,90	255,3
T16	0,90	255,0
T17	0,90	255,8
T18	0,90	256,0

Fonte: Autoria Própria

Conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016) as argamassas correspondentes aos traços T7, T15, T16, T17 e T18 apresentaram um indicativo de resultados satisfatórios em termos de trabalhabilidade, contribuindo para um adequado espalhamento do material no substrato.

3.6.2 Avaliação das propriedades das argamassas no estado endurecido

O preparo da mistura das amostras foi realizado de maneira mecânica conforme preconiza a norma NBR 16541 (ABNT, 2016), utilizando uma argamassadeira planetária da marca Solocap. O traço utilizado como referência para o estudo foi confeccionado na proporção 1:5 (cimento:agregado miúdo) com a utilização do cimento CPV-ARI.

Para determinação das resistências à compressão axial e tração na flexão, as argamassas foram moldadas em formas prismáticas triplas com as dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 12), que permaneceram por 48 horas em câmara com umidade relativa mínima do ar de 95%, conforme estabelecido pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos



Fonte: Autoria Própria

Os corpos de prova foram submetidos a 14 dias de cura, em que permaneceram na câmara climática em condições laboratoriais (Figura 13) até chegada a data planejada para rompimento e finalização dos testes de resistência.

Figura 13 – Processo de cura dos corpos de prova em câmara climática



Fonte: Autoria Própria

A NBR 13528 (ABNT, 2019) prevê a realização dos ensaios de determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa sobre substratos inorgânicos não metálicos, aplicados em obra ou laboratório. Para obtenção dos parâmetros referentes à esta resistência, foram utilizados como substrato blocos de concreto estrutural para alvenaria vazados, com 19 cm de altura, 14 cm de largura e 39 cm de comprimento, devido à disponibilidade do material em laboratório, que atende aos requisitos do ensaio.

Na execução, para preparação da base (Figura 14), os blocos de concreto foram chapiscados com argamassa tradicional composta por cimento e areia média considerando um traço de 1:3 (cimento Portland:agregado miúdo), com aplicação da argamassa em espessura de $20 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ sobre a face, conforme previsto na norma NBR 13528 (ABNT, 2019). O uso do chapisco como uma forma de pré-tratamento da base do substrato para aplicação da argamassa promove uma melhoria nos resultados de aderência do revestimento aplicado (SCARTEZINI e CARASEK, 2003).

Figura 14 - Preparo do substrato para assentamento das argamassas



Fonte: Autoria Própria

Gabaritos metálicos foram utilizados para aplicação, garantindo assim a espessura adequada, com adensamento do substrato realizado por projeção manual, pelo mesmo operador. As amostras foram sarrafeadas e desempenadas com o uso de régua e desempenadeira, visando um acabamento uniforme. A cura das argamassas foi realizada em ambiente laboratorial até atingir o tempo necessário para execução dos ensaios de arrancamento (Figura 15).

Figura 15 – Argamassas aplicadas nos substratos



Fonte: Autoria Própria

As argamassas de revestimento foram caracterizadas no estado endurecido seguindo as diretrizes contidas na norma NBR 13279 (ABNT, 2005) para verificação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial, em que os valores foram medidos individualmente.

Os corpos de prova foram posicionados na Máquina EMIC DL 20000 (Figura 16) conduzida continuamente, e monitorada até a ruptura dos corpos de prova para execução do ensaio mecânico.

Figura 16 - Teste de resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria Própria

O cálculo da resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos foi obtida em conformidade com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010), que define dois métodos de cálculo com aplicações específicas, conforme Equações 19 e 20:

$$R_t = \frac{F \cdot \ell}{b \cdot d^2} \quad (19)$$

Em que:

R_t : resistência à tração na flexão (MPa);

F: força máxima aplicada no ensaio (N);

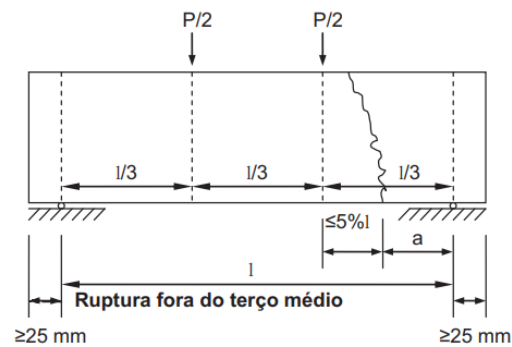
ℓ : dimensão do vão entre apoios (mm);

b: largura média do corpo de prova (mm);

d: altura média do corpo de prova (mm);

Para as situações em que a linha de ruptura se deu fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% de ℓ conforme indicado na Figura 17, a resistência à tração na flexão pode ser calculada utilizando a Equação 20:

Figura 17 – Ruptura fora do terço médio



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010)

$$R_t = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (20)$$

Em que:

R_t : resistência à tração na flexão (MPa);

F: força máxima aplicada no ensaio (N);

b: largura média do corpo de prova (mm);

d: altura média do corpo de prova (mm);

a: distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

Os corpos de prova rompidos após o ensaio de tração na flexão foram destinados à realização do ensaio de resistência à compressão axial. Deste modo, os resultados compreenderam um total de 03 medidas de resistência à tração e 06 medidas de resistência à compressão axial para cada traço de argamassa moldado e a resistência final expressa pela média de suas repetições.

A resistência à compressão axial dos corpos de prova ensaiados foi obtida a partir da Equação 21:

$$R_c = F/A \quad (21)$$

Em que:

R_c : resistência à compressão axial (MPa);

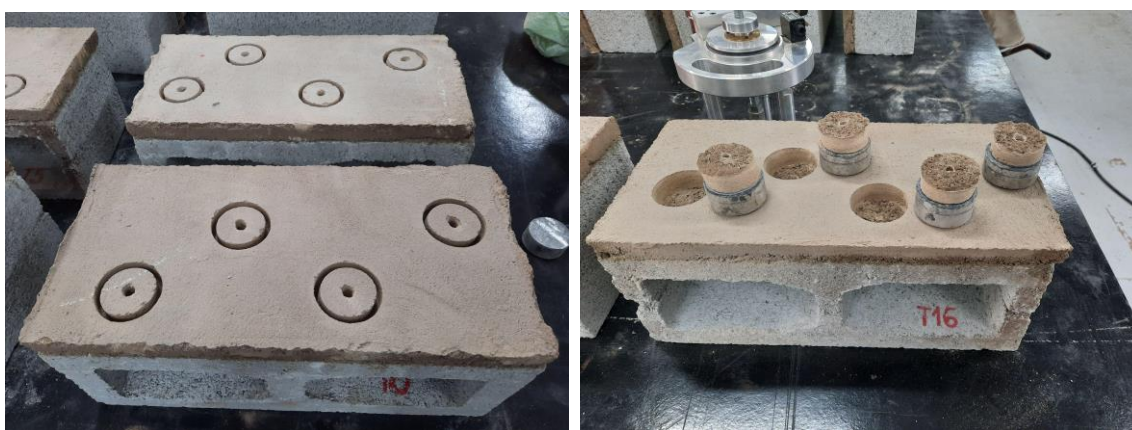
F: força máxima aplicada no ensaio; e

A: área do corpo de prova (mm^2).

A análise da resistência de aderência à tração, ou seja, da capacidade da argamassa manter-se aderida ao substrato após o período de cura, foi medida tomando como referência a norma NBR 13528 (ABNT, 2019). Ainda com os substratos na posição horizontal, 04 furos foram executados no corpo de prova com o auxílio de uma furadeira acoplada a uma broca do tipo serra-copo de 50mm de diâmetro um dia antes do ensaio. Procedeu-se à limpeza da superfície, colando com resina epóxi uma pastilha de aço circular com 5 cm na região de corte.

O dinamômetro de tração foi utilizado para leitura da carga necessária para efetivar o arrancamento aos 14 dias de idade da argamassa. As características do substrato possuem influência direta na resistência, com melhor aderência à tração de argamassas para blocos de concreto em comparação com blocos cerâmicos (SCARTEZINI e CARASEK, 2003). Cada uma das amostras foi analisada quanto à sua forma de ruptura e resistência de aderência à tração. Através deste ensaio, torna-se possível identificar o modo de interação entre as diferentes camadas constituintes do revestimento. A Figura 18 ilustra o procedimento realizado:

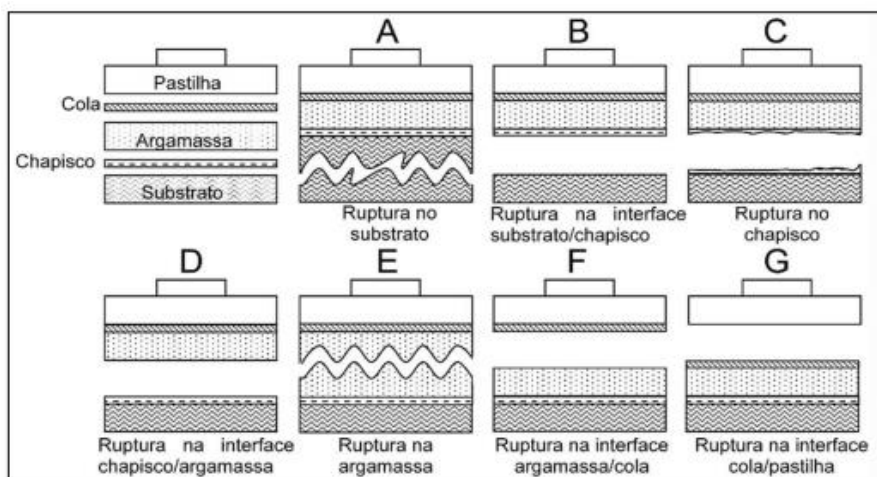
Figura 18 - Execução do teste de resistência de aderência à tração das argamassas



Fonte: Autoria Própria

De maneira complementar, procedeu-se a análise do tipo de ruptura da amostra para argamassas com sistema de revestimento com chapisco, bem como sua espessura, conforme estabelecido pela norma NBR 13528 (ABNT, 2019) ilustrado na Figura 19:

Figura 19 - Aspectos de ruptura para um sistema de revestimento com chapisco



Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2019)

A resistência de aderência à tração (R_a) para avaliação dos resultados pode ser obtida de maneira similar à resistência à compressão, conforme Equação 21, como a razão entre a carga de ruptura e a área do corpo de prova.

Cabe ressaltar que os resultados podem variar em outras pesquisas devido à diferença regional apresentada na composição do RMF, e que estes são reflexo da combinação de diversos fatores que também podem ser influenciados pela alteração de um índice, ainda que isolado.

O arranjo experimental foi conduzido para os 18 experimentos com o objetivo de coletar as informações referentes ao modelo. A partir destas respostas, buscou-se a definição da configuração ideal dos parâmetros de entrada que resultariam em melhores resistências à compressão, tração na flexão e aderência à tração.

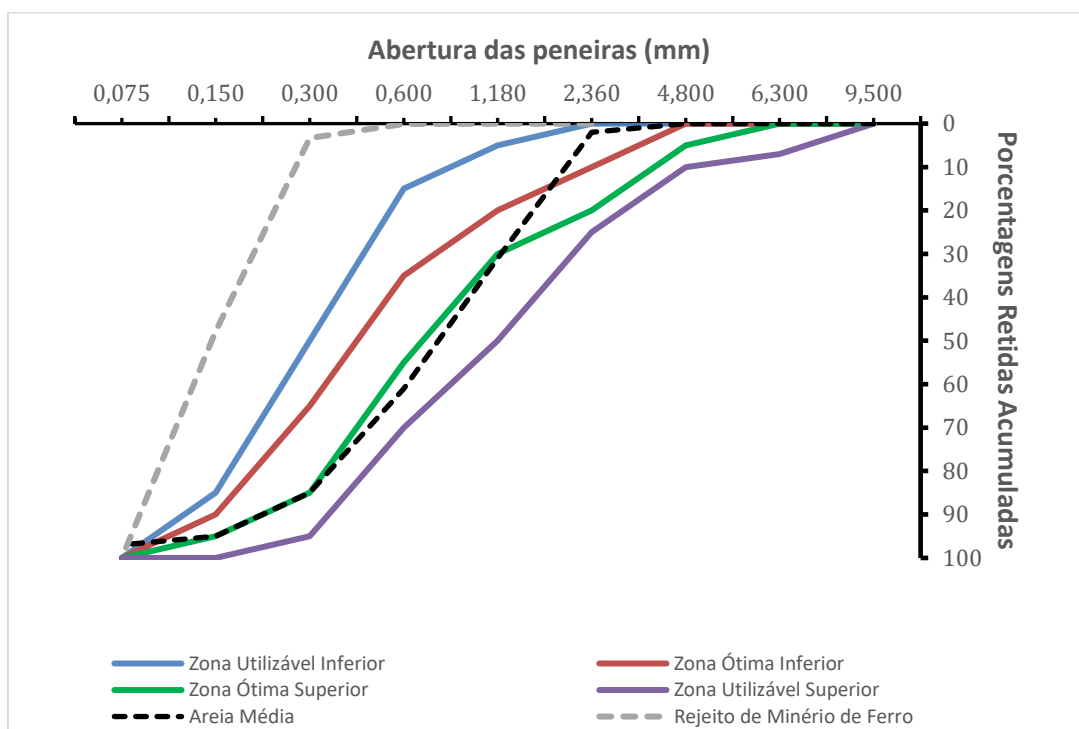
4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1.1 Resultados das análises para as argamassas no estado fresco

Com referência na NBR NM 248 (ABNT, 2003), a representação da curva granulométrica identificando a composição dos agregados areia média e rejeito de minério de ferro com a distribuição das porcentagens retidas em cada uma das peneiras é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Curva granulométrica da areia média e rejeito de minério de ferro



Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar que a distribuição granulométrica da areia média é contínua, mantendo-se dentro da zona ótima, conforme a distribuição granulométrica determinada segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022). A massa unitária e específica dos materiais, bem como o módulo de finura e dimensão máxima são apresentados conforme Tabela 10:

Tabela 10 - Propriedades obtidas para os agregados

Parâmetro	Areia Média	RMF
Módulo de Finura	2,74	0,51
Dimensão Máxima (mm)	2,36	0,60
Massa Unitária (g/cm ³)	1,26	1,48
Massa Específica (g/cm ³)	2,58	2,67

Fonte: Autoria Própria

Após o preparo dos agregados com peneiramento e retirada de impurezas e secagem em estufa por 48 horas, a areia selecionada para composição das argamassas apresentou módulo de finura de 2,74 e dimensão máxima dos grãos de 2,36 mm, classificado como média de acordo com as especificações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica das partículas é de 2,58 g/cm³, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), e a massa unitária aparente de 1,26 g/cm³, NBR 16972 (ABNT, 2021).

O resíduo de minério de ferro apresentou módulo de finura de 0,51 e dimensão máxima dos grãos de 0,60 mm, sendo classificado como um material fino considerando as determinações contidas na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Em termos práticos, para o mesmo traço e quantidade de aglomerante (cimento Portland), o maior módulo de finura do agregado influenciará no teor final de cimento do traço durante o processo de substituição e, assim, na resistência mecânica.

A caracterização do material adotado faz-se necessária tendo em vista a possível influência dos fatores analisados na qualidade do produto. O formato anguloso e teor de finos dos grãos associado a uma maior massa específica real interfere positivamente na resistência de aderência, devido à melhor ancoragem dos grãos à pasta (SANTOS *et al.*, 2019). De modo geral, a distribuição granulométrica pode alterar as propriedades no estado fresco (SANTOS, 2014).

No estado endurecido, traços com incorporação de resíduos de menor granulometria possivelmente apresentaram um melhor empacotamento das partículas, justificando a influência positiva nos resultados de resistência à compressão (FARIA, 2021). Graduações uniformes com o uso de faixas granulométricas únicas ocasionam em efeitos negativos na resistência à compressão de argamassas (RIBEIRO e SOUZA, 2019).

4.1.2 Resultados das análises para as argamassas no estado endurecido

A execução dos experimentos gerou um conjunto de dados como parte da obtenção da modelagem matemática conforme Tabela 11, em que os valores referentes à R_t , R_c e R_a representam as médias dos resultados coletados:

Tabela 11 - Níveis e Variáveis de Resposta para R_t , R_c e R_a

Ordem de experimentação	Variáveis codificadas			Respostas		
	RMF [%]	ADT [%]	A/C -	R_t [MPa]	R_c [MPa]	R_a [MPa]
1	20,00	0,50	0,80	9,32	24,85	0,40
2	40,00	0,50	0,80	6,90	16,85	0,60
3	20,00	1,00	0,80	11,50	22,34	0,51
4	40,00	1,00	0,80	9,18	19,76	0,60
5	20,00	0,50	1,00	6,40	13,14	0,73
6	40,00	0,50	1,00	7,30	14,65	0,74
7	20,00	1,00	1,00	7,15	16,15	0,59
8	40,00	1,00	1,00	7,99	21,79	0,48
9	13,18	0,75	0,90	8,85	20,63	0,54
10	46,82	0,75	0,90	7,36	19,68	0,58
11	30,00	0,33	0,90	8,30	20,28	0,57
12	30,00	1,17	0,90	10,87	24,20	0,45
13	30,00	0,75	0,73	8,40	17,49	0,58
14	30,00	0,75	1,07	5,20	9,57	0,68
15	30,00	0,75	0,90	8,47	17,38	0,64
16	30,00	0,75	0,90	8,57	16,80	0,65
17	30,00	0,75	0,90	8,65	16,80	0,65
18	30,00	0,75	0,90	8,98	17,70	0,69

Fonte: Autoria Própria

A análise de resultados foi realizada por etapas, iniciando pelo processo de modelagem das variáveis de resposta coletadas, com representação matemática. Em seguida, procedeu-se a otimização das variáveis de entrada visando à melhor combinação que

resultasse na maximização das variáveis de resposta R_t , R_c e R_a . Por fim, a última etapa da análise consistiu na realização de experimentos de confirmação, a fim de validar a proposta, comparando com os resultados reais obtidos.

4.2 MODELAGEM DAS RESPOSTAS

A partir dos resultados experimentais apresentados na Tabela 14 é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas de interesse e os parâmetros do processo. Considerando o processo abordado pelo presente trabalho, em que são estudados os efeitos de três parâmetros de entrada e três parâmetros de saída, pode-se escrever as Equações 22 a 24 em unidades não codificadas para as resistências à tração na flexão, compressão e aderência à tração as resistências à tração na flexão, compressão e aderência à tração:

$$R_t = -22,33 - 0,6625 RMF + 8,30 ADT + 92,73 A/C - 0,001805 RMF^2 + 5,484 ADT^2 - 64,19 (A/C)^2 + 0,0020 RMF * ADT + 0,8100 RMF * A/C - 15,10 ADT * A/C \quad (22)$$

$$R_c = 45,4 - 2,931RMF - 92,54ADT + 133,0A/C + 0,00903RMF^2 + 26,24ADT^2 - 143,9A/C^2 + 0,4775 RMF * ADT + 2,216RMF * A/C + 4,75ADT * A/C \quad (23)$$

$$R_a = -4,364 + 0,07399 RMF + 3,704 ADT + 5,24 \frac{A}{C} - 0,000327 RMF^2 - 0,806 ADT^2 - 0,793 A/C^2 - 0,01150 RMF * ADT - 0,04875 RMF * A/C - 2,550 ADT * A/C \quad (24)$$

Em que:

R_t, R_c e R_a : respostas de interesse;

RMF: teor de rejeito de minério de ferro;

ADT: teor de aditivo; e

A/C: relação água/cimento.

Os coeficientes do modelo foram estimados conforme Equações 22, 23 e 24 utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). As Tabelas 12 a 14 apresentam os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas analisadas:

Tabela 12 – Coeficientes Codificados para a Resistência à Tração (R_t)

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		8,6634	0,0791	109,56	0,000
RMF	-0,8063	-0,4032	0,0429	-9,41	0,000
ADT	1,4970	0,7485	0,0429	17,46	0,000
A/C	-1,9685	-0,9842	0,0429	-22,97	0,000
RMF ²	-0,3610	-0,1805	0,0445	-4,05	0,004
ADT ²	0,6855	0,3427	0,0445	7,70	0,000
A/C ²	-1,2838	-0,6419	0,0445	-14,41	0,000
RMF*ADT	0,0100	0,0050	0,0560	14,46	0,000
RMF*A/C	1,6200	0,8100	0,0560	14,46	0,000
ADT*A/C	-0,7550	-0,3775	0,0560	-6,74	0,000
S = 0,158384 R ² = 99,47% R ² adj = 98,88% R ² (pre) = 98,23%					

Fonte: Autoria Própria

O modelo apresentado indicou um ajuste R² (*adj*) de 98,88% e mostra-se válido, uma vez que o valor é superior ao índice de 80%. Além disso, para um nível de significância de $\alpha = 0,05$ conclui-se que há uma associação estatisticamente significativa, visto que o modelo apontou um valor-P inferior a 5%.

Tabela 13 – Coeficientes Codificados para a Resistência à Compressão (R_c)

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		17,593	0,242	72,73	0,000
RMF	-0,736	-0,368	0,131	-2,81	0,023
ADT	2,510	1,255	0,131	9,57	0,000
A/C	-4,597	-2,298	0,131	-17,53	0,000
RMF ²	1,806	0,903	0,136	6,63	0,000
ADT ²	3,280	1,640	0,136	12,04	0,000
A/C ²	-2,879	-1,439	0,136	-10,57	0,000
RMF*ADT	2,388	1,194	0,171	6,97	0,000
RMF*A/C	4,433	2,216	0,171	12,94	0,000
ADT*A/C	2,437	1,219	0,171	7,11	0,000
S = 0,484539 R ² = 99,24% R ² adj = 98,38% R ² (pre) = 97,60%					

Fonte: Autoria Própria

Para o modelo apresentado, temos um ajuste R^2 (adj) de 98,38% que valida a modelagem uma vez que o índice é superior a 80%. A um nível de significância de $\alpha = 0,05$ conclui-se que há uma associação estatisticamente significativa para o modelo, que possui um valor-P inferior ao critério estabelecido.

Tabela 14 – Coeficientes Codificados para a Resistência de Aderência à Tração (Ra)

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		0,6640	0,0130	51,01	0,000
RMF	0,03768	0,01884	0,00706	2,67	0,028
ADT	-0,07202	-0,03601	0,00706	-5,10	0,001
A/C	0,08760	0,04380	0,00706	6,21	0,000
RMF ²	-0,06535	-0,03267	0,00733	-4,46	0,002
ADT ²	-0,10070	-0,05035	0,00733	-6,87	0,000
A/C ²	-0,01585	-0,00793	0,00733	-1,08	0,311
RMF*ADT	-0,05750	-0,02875	0,00922	-3,12	0,014
RMF*A/C	-0,09750	-0,04875	0,00922	-5,29	0,001
ADT*A/C	-0,12750	-0,06375	0,00922	-6,92	0,000
S = 0,0260733 $R^2 = 96,41\%$ $R^2_{adj} = 92,37\%$ $R^2_{(pre)} = 79,28\%$					

Fonte: Autoria Própria

A análise apontou um ajuste R^2 (adj) de 92,37%, um indicativo de modelo bem ajustado. A constante A/C² foi a única não significativa a um nível de $\alpha = 0,05$, com valor-P superior ao critério estabelecido. O valor-P inferior a 5% para os demais termos estabelece que o modelo é estatisticamente significativo.

4.2.1 Adequação e Ajuste dos Modelos

Os dados experimentais foram utilizados para desenvolver modelos de análise de variância (ANOVA) e verificação da adequação dos modelos, referenciado pela Metodologia da Superfície de Resposta. A análise de variância para as resistências à tração, compressão e aderência à tração, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis, são apresentados nas Tabelas 15 a 17, seguindo em conformidade com a modelagem das respostas proposta:

Tabela 15 - Análise de Variância para a Resistência à Tração (R_t)

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regressão	9	37,9404	37,9404	4,2156	168,05	0,000
Linear	3	23,1011	23,1011	7,7004	306,96	0,000
Quadrático	3	8,4503	8,4503	2,8168	112,29	0,000
Interação	3	6,3891	6,3891	2,1297	84,90	0,000
Erro Residual	8	0,2007	0,2007	0,0251		
Falta de ajuste	5	0,0542	0,0542	0,0108	0,22	0,931
Erro Puro	3	0,1465	0,1465	0,0488		
Total	17	38,1411				

Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 - Análise de Variância para a Resistência à Compressão (R_c)

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regressão	9	244,449	244,449	27,1610	115,69	0,000
Linear	3	95,517	95,517	31,8391	135,61	0,000
Quadrático	3	86,354	86,354	28,7848	122,60	0,000
Interação	3	62,577	62,577	20,8591	88,85	0,000
Erro Residual	8	1,878	1,878	0,2348		
Falta de ajuste	5	0,388	0,388	0,0776	0,16	0,964
Erro Puro	3	1,490	1,490	0,4968		
Total	17	246,327				

Fonte: Autoria Própria

Tabela 17 - Análise de Variância para a Resistência de Aderência à Tração (R_a)

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regressão	9	0,146011	0,146011	0,016223	23,86	0,000
Linear	3	0,048759	0,048759	0,016253	23,91	0,000
Quadrático	3	0,039115	0,039115	0,013038	19,18	0,001
Interação	3	0,058137	0,058137	0,019379	28,51	0,000
Erro Residual	8	0,005439	0,005439	0,000680		
Falta de ajuste	5	0,003739	0,003739	0,000748	1,32	0,436
Erro Puro	3	0,001700	0,001700	0,000567		
Total	17	0,151450				

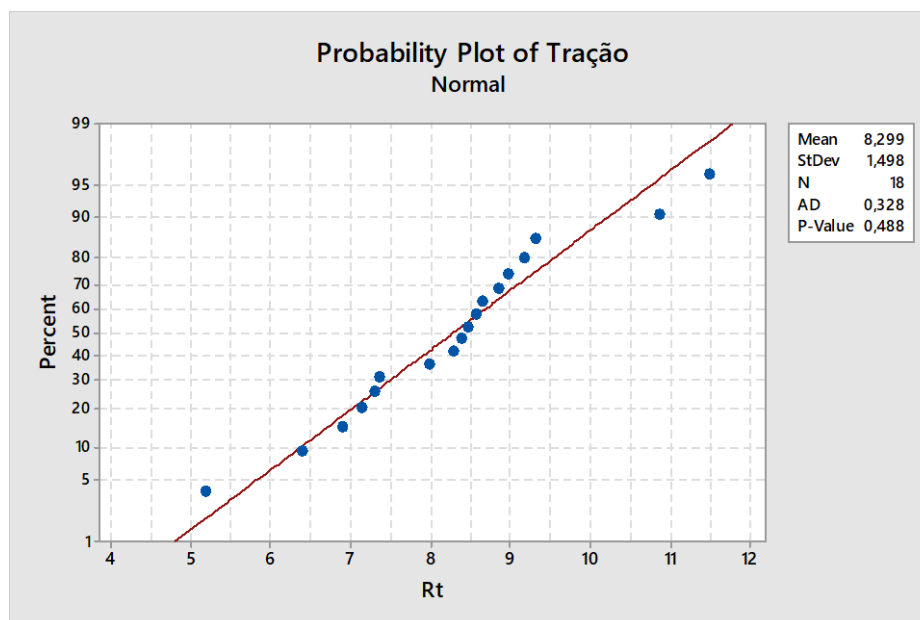
Fonte: Autoria Própria

Os resultados da ANOVA indicaram, para a fonte “interação” dos modelos desenvolvidos, o valor-P inferior a 5% de significância para R_t , R_c e R_a . Os ajustes R^2 (adj) validam a modelagem.

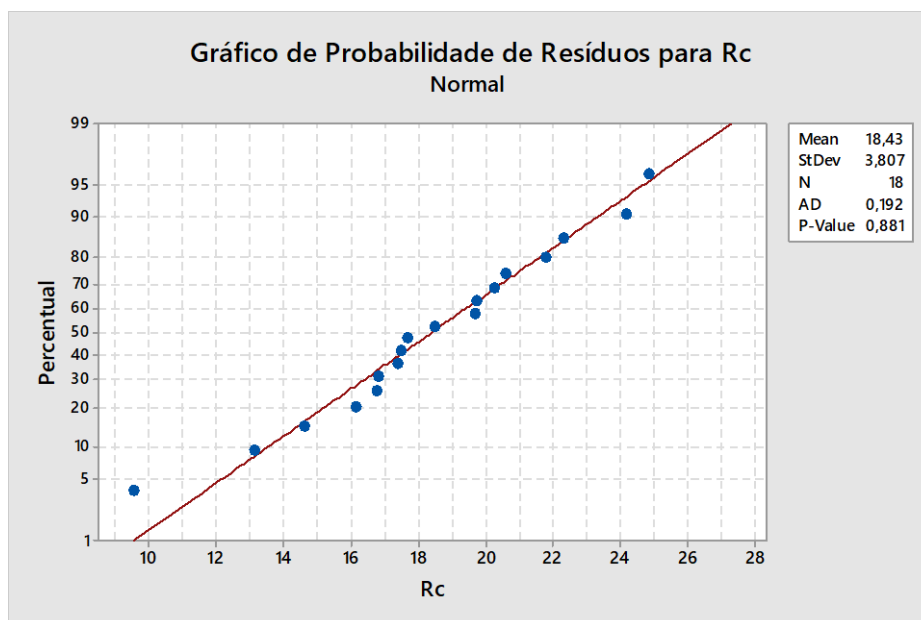
A análise da probabilidade normal através de gráficos visa confirmar o pressuposto de que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante. A verificação da normalidade dos resíduos foi realizada pelo teste de Anderson Darling.

O gráfico de probabilidade normal de resíduos é representado pelas Figuras 21 a 23. Para a resistência à tração na flexão, indica que os resíduos são normalmente distribuídos e o modelo bem ajustado, com valor-P igual a 48,8%, maior que o nível de significância de 5%. A análise para a resistência à compressão indica uma boa qualidade de ajuste do modelo, em que os resíduos são normalmente distribuídos. O valor-P é igual a 88,1%, maior que o nível de significância de 5%, valida a análise. Para a resistência a aderência à tração, constata-se que os resultados são normalmente distribuídos com valor-P de 82,0%, com adequado ajuste do modelo representando a variabilidade dos parâmetros.

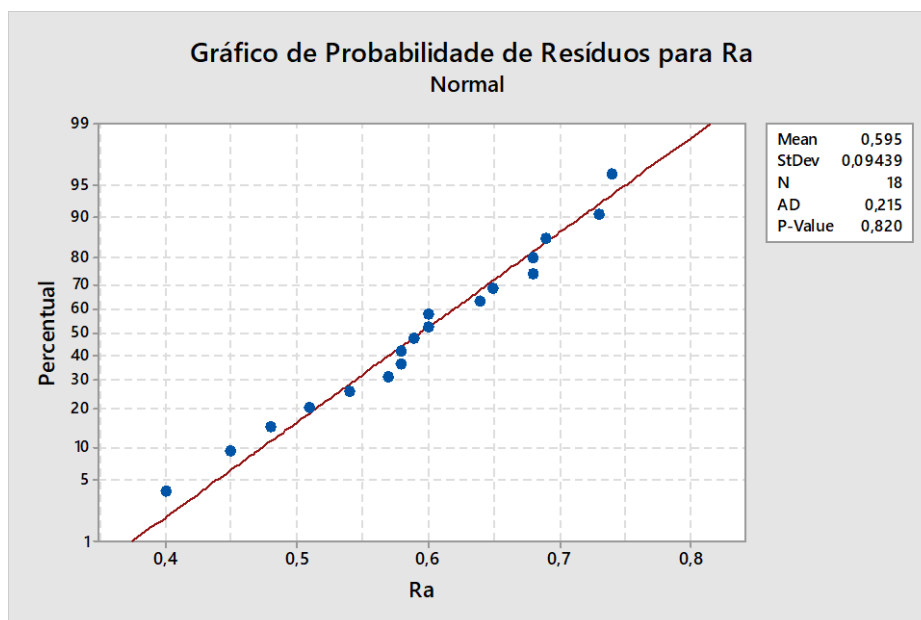
Figura 21 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_t



Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_c 

Fonte: Autoria Própria

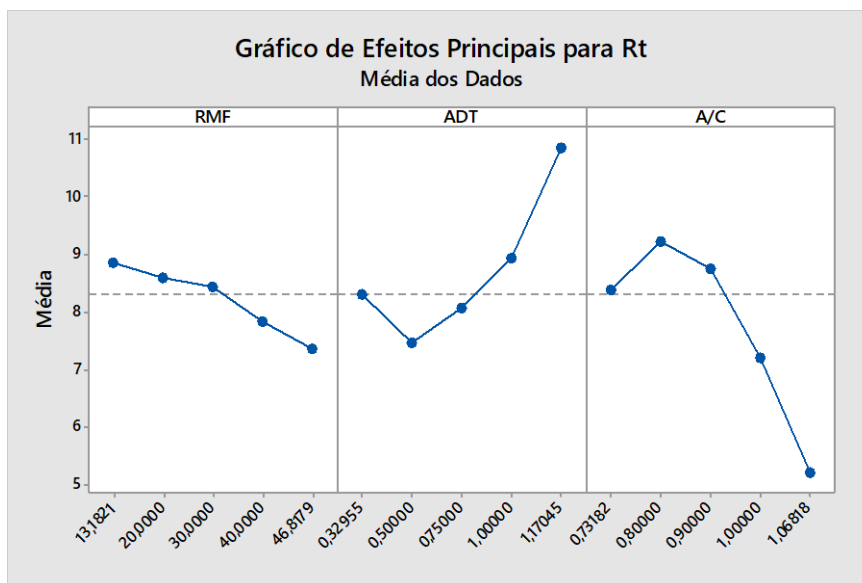
Figura 23 - Gráfico de Probabilidade Normal de Resíduos para R_a 

Fonte: Autoria Própria

A análise dos efeitos principais para investigação das diferenças entre as médias de nível para os três fatores de entrada. As Figuras 24 a 26 apresentam as análises obtidas a partir dos modelos para R_t , R_c e R_a . A verificação para a resistência à tração indica que o teor de aditivo foi a variável de maior influência, associada à maior média de resistência observada. A partir de um teor de substituição de 0,50% de ADT a resistência tende a

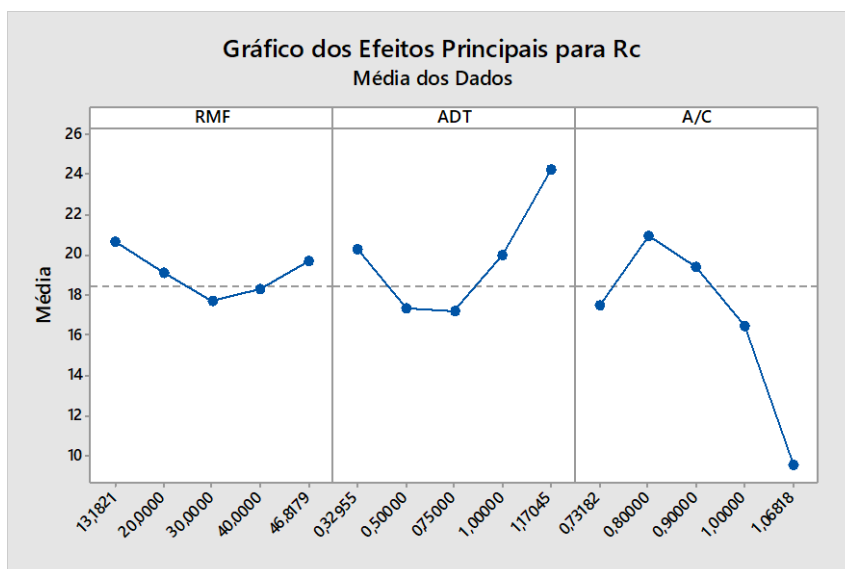
aumentar, enquanto para o aumento da relação A/C a partir de 0,80, a resistência tende a cair para o produto modelado. O teor de substituição do rejeito de minério de ferro (RMF) demonstrou menor influência nos resultados obtidos, no entanto, observa-se que o maior nível de resistência está associado a um teor de aproximadamente 13%, tendendo a cair com substituições acima deste valor.

Figura 24- Análise dos Efeitos Principais para R_t



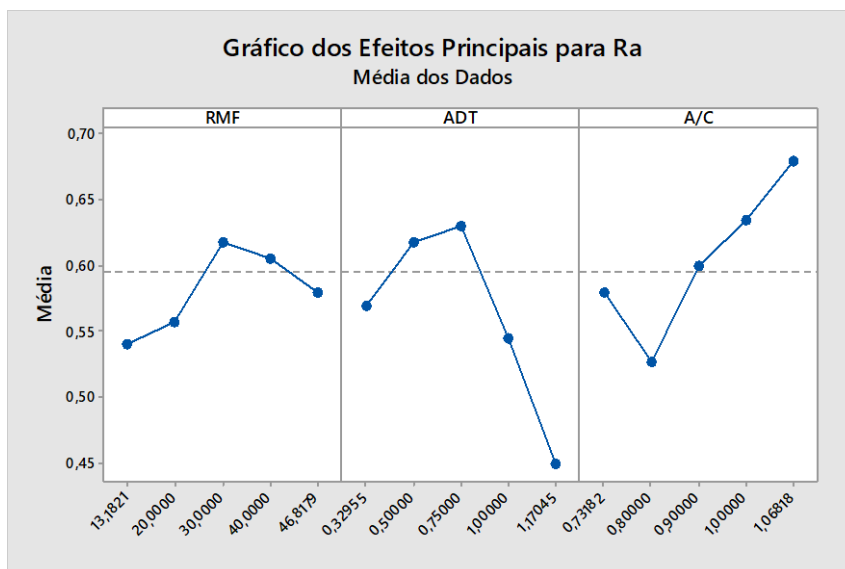
Fonte: Autoria Própria

Considerando a resistência à compressão, a verificação permite observar que o teor de aditivo influencia significativamente no resultado, de modo que, a partir de um nível de adição de 0,75% da massa cimentícia das argamassas, o aumento em ADT tende a aumentar a resistência à compressão do produto. Os níveis de resistência à compressão indicam ainda uma influência significativa dos efeitos de A/C no desempenho das argamassas, uma vez que este decai a partir de um nível superior a 0,80. O teor de substituição do rejeito de minério de ferro mostrou-se pouco influente nos resultados, mas, assim como para a resistência à tração na flexão, a maior resistência está associada a um teor de aproximadamente 13%.

Figura 25 - Análise dos Efeitos Principais para R_c 

Fonte: Autoria Própria

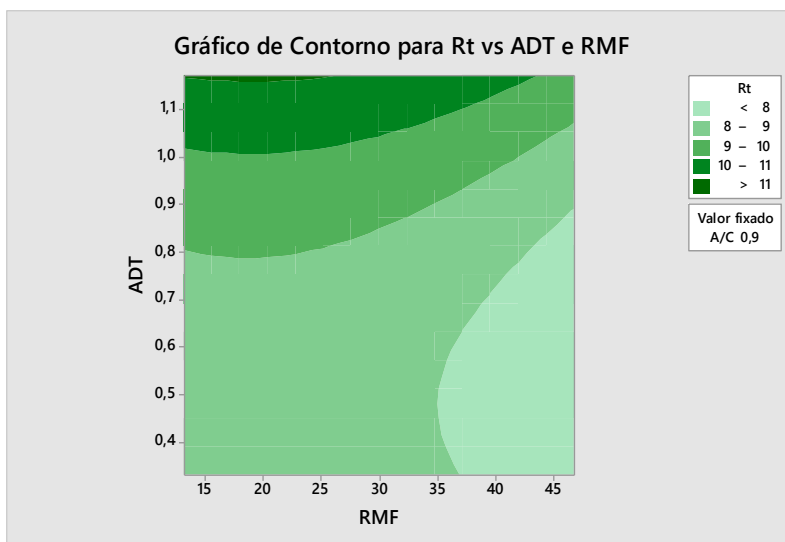
O gráfico para análise dos efeitos principais das variáveis de entrada em R_a é representado pela Figura 26, em que se nota uma maior influência dos níveis de ADT e A/C nas respostas. A análise indica uma redução na resistência de aderência à tração das argamassas com o aumento no teor de ADT a partir de 0,75%, enquanto esta mesma resistência tende a aumentar com o também aumento da relação A/C a partir de 0,80. O teor de substituição de RMF representa uma tênue influência nos resultados, sendo que a maior resistência observada foi obtida com um nível de substituição de 30%.

Figura 26 – Análise dos Efeitos Principais para R_a 

Fonte: Autoria Própria

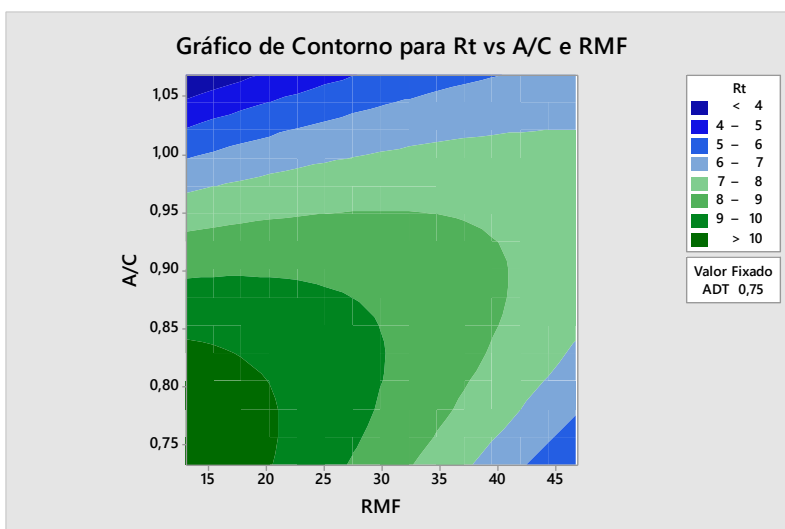
O gráfico de contorno que estabelece a relação entre R_t e as variáveis de entrada RMF, ADT e A/C é representado através das Figura 27 a 29, bem como a superfície de resposta para as médias desta combinação de variáveis é representada na Figura 30. O gráfico de contorno de RMF vs ADT e A/C fornece uma visão bidimensional dos fatores ADT e A/C, enquanto o fator RMF foi mantido em seu nível ótimo. Pode-se notar que até um limite para relação A/C de 0,90, o aumento no teor de ADT tende a aumentar o valor de R_t . Após essa faixa, a resistência das argamassas tende a cair gradativamente, conforme indicado na análise.

Figura 27 - Gráfico de Contorno para R_t vs ADT e RMF

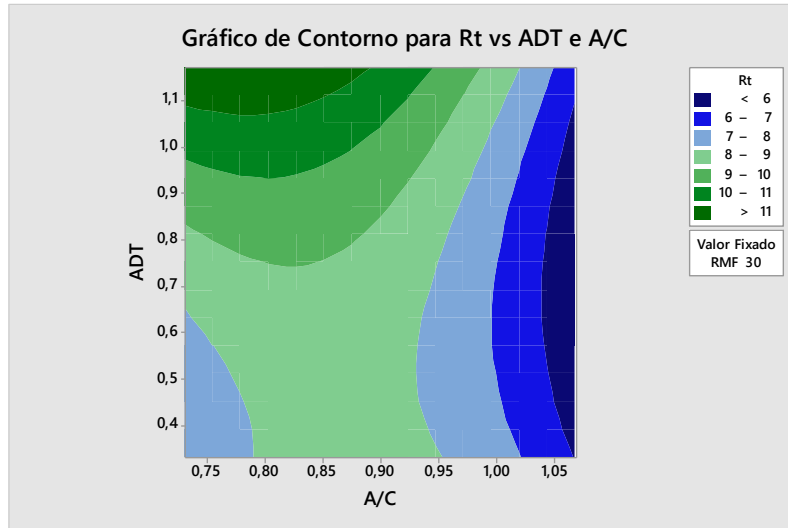


Fonte: Autoria Própria

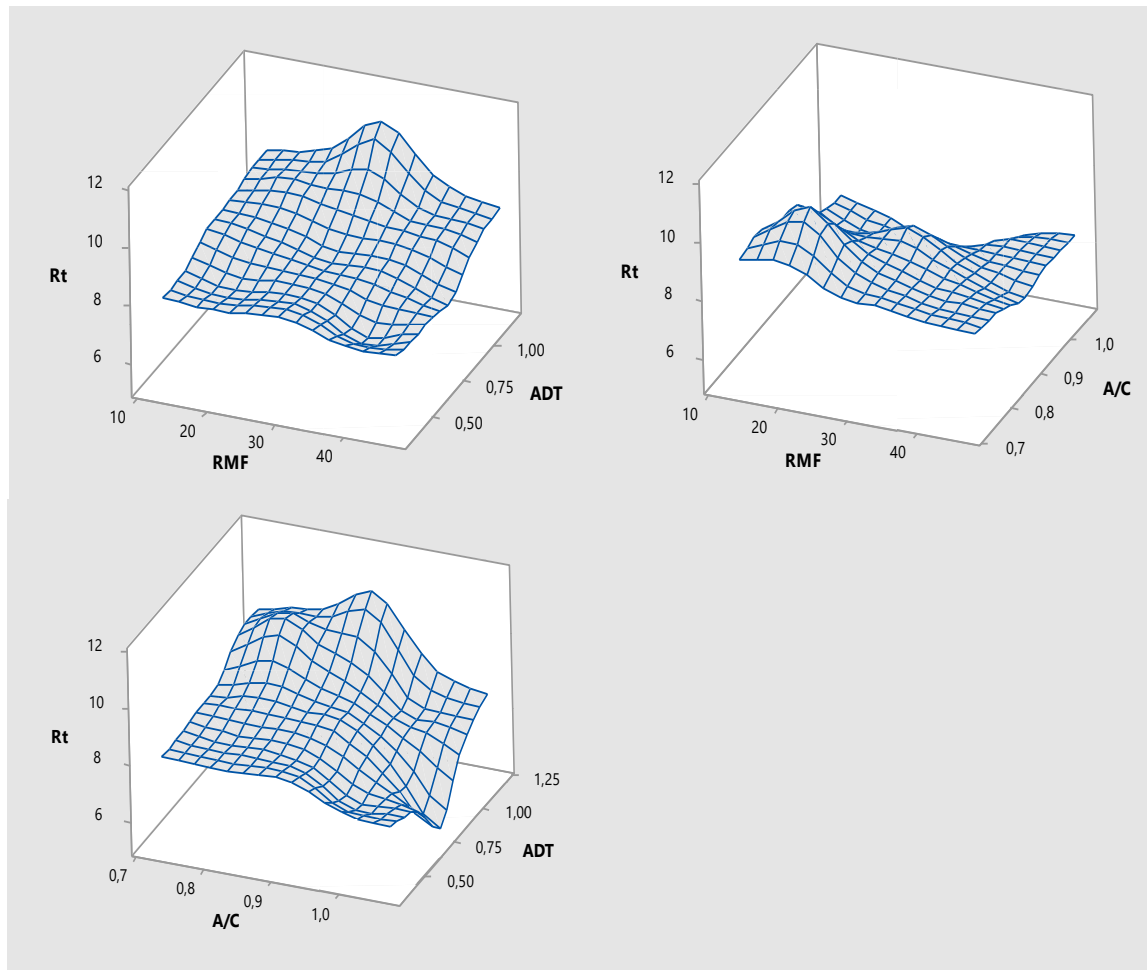
Figura 28 - Gráfico de Contorno para R_t vs A/C e RMF



Fonte: Autoria Própria

Figura 29 - Gráfico de Contorno para R_t vs ADT e A/C

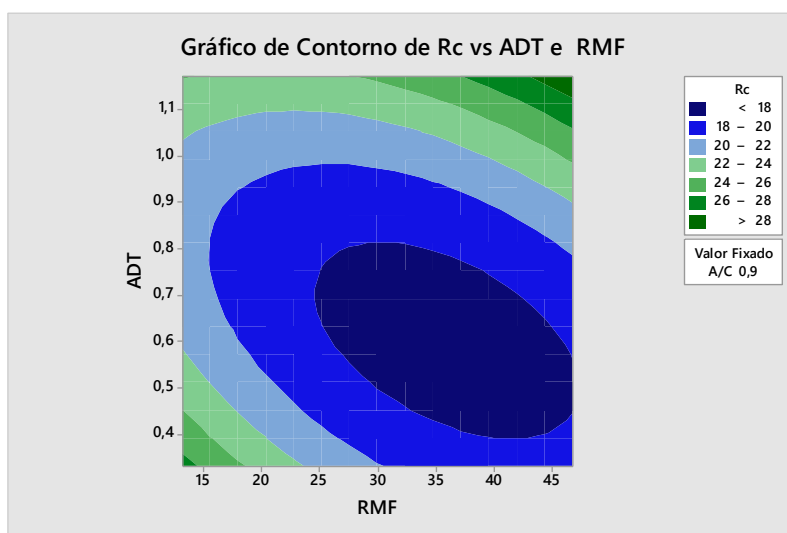
Fonte: Autoria Própria

Figura 30- Superfície de Resposta para R_t vs RMF, ADT e A/C

Fonte: Autoria Própria

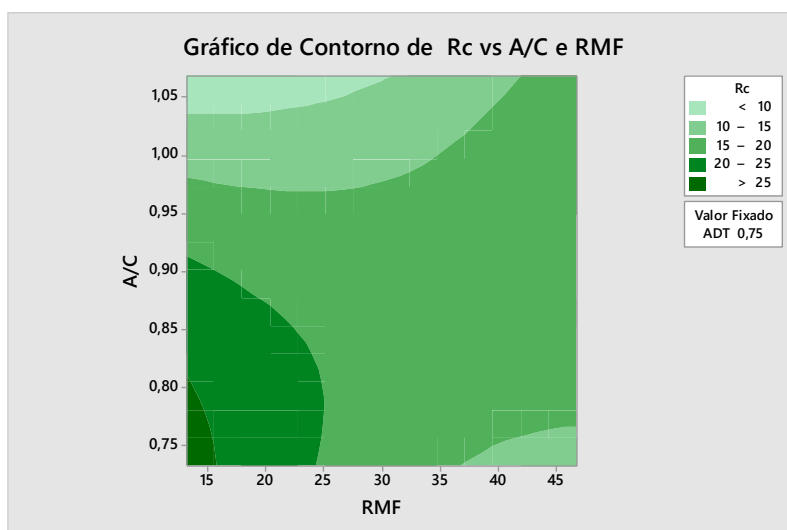
A relação entre R_c e as variáveis de entrada RMF, ADT e A/C é demonstrada pelos gráficos de contorno e superfície de resposta representados pelas Figura 31 a 33 e Figura 34, respectivamente. De maneira geral, a análise permite observar que as maiores médias de resistência à compressão estão associadas a uma relação a/c inferior a 1.

Figura 31 - Gráfico de Contorno para R_c vs ADT e RMF

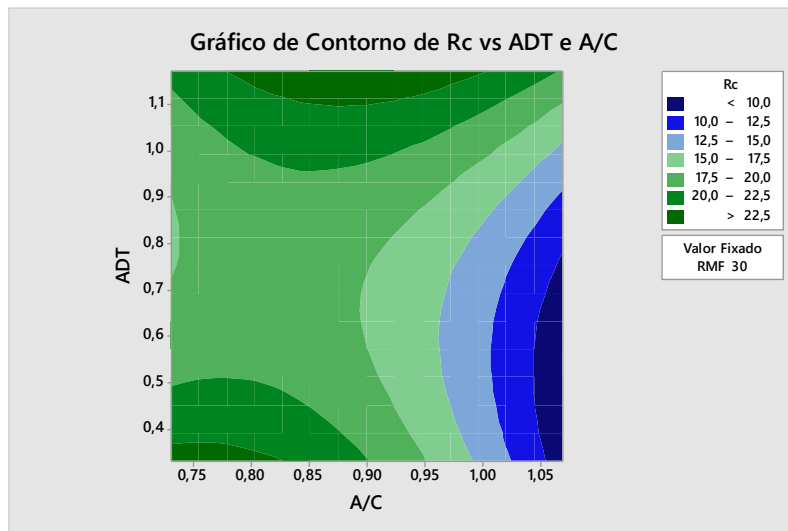


Fonte: Autoria Própria

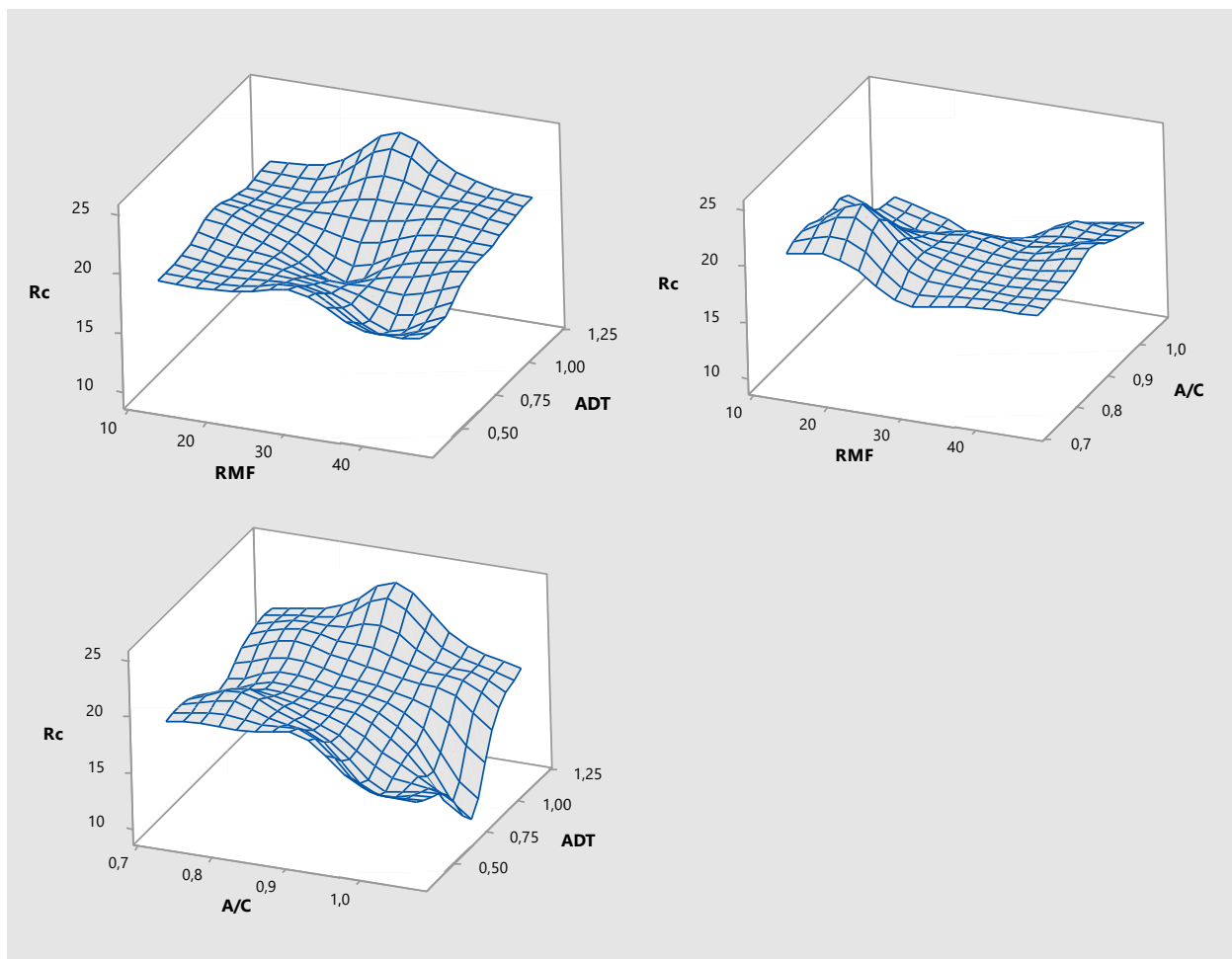
Figura 32 - Gráfico de Contorno para R_c vs A/C e RMF



Fonte: Autoria Própria

Figura 33 - Gráfico de Contorno para R_c vs ADT e A/C

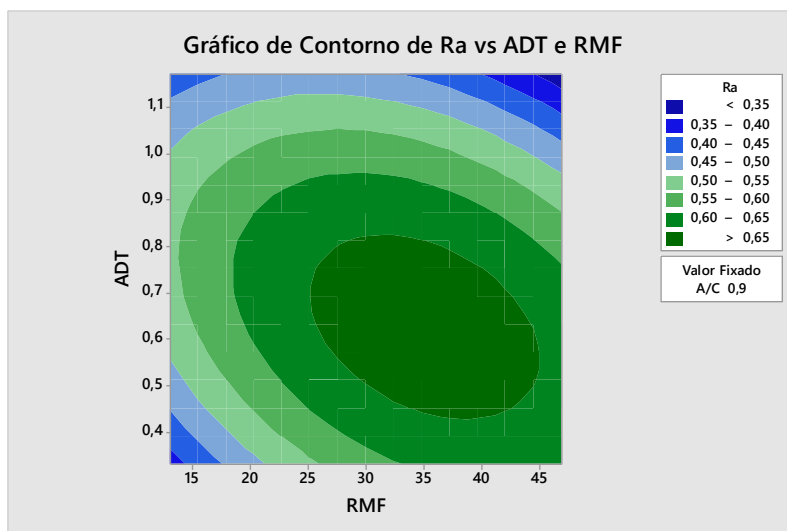
Fonte: Autoria Própria

Figura 34 - Superfície de Resposta para R_c vs RMF, ADT e A/C

Fonte: Autoria Própria

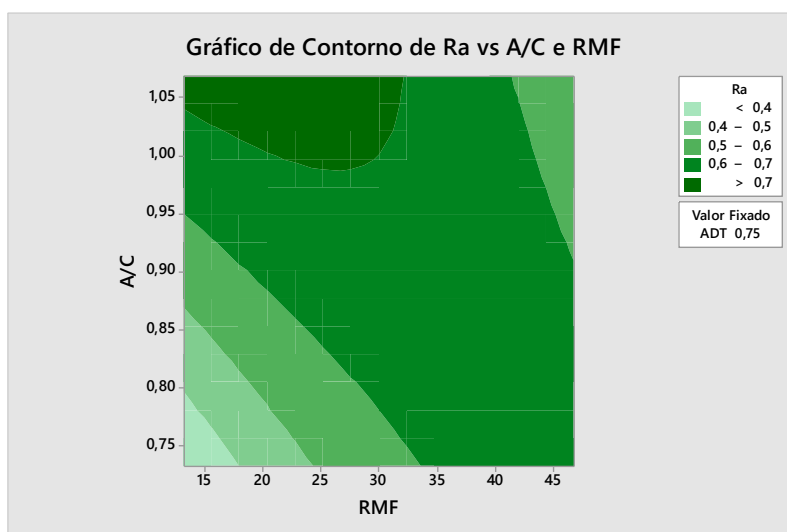
A variação dos níveis de resistência da aderência à tração das argamassas é representada através dos gráficos de contorno na Figura 35 a 37. A análise complementar indica que os valores de Ra aumentam na medida em que a relação A/C também aumenta e a adição de ADT diminui. A Figura 38 demonstra a superfície de resposta da modelagem.

Figura 35 - Gráfico de Contorno para Ra vs ADT e RMF

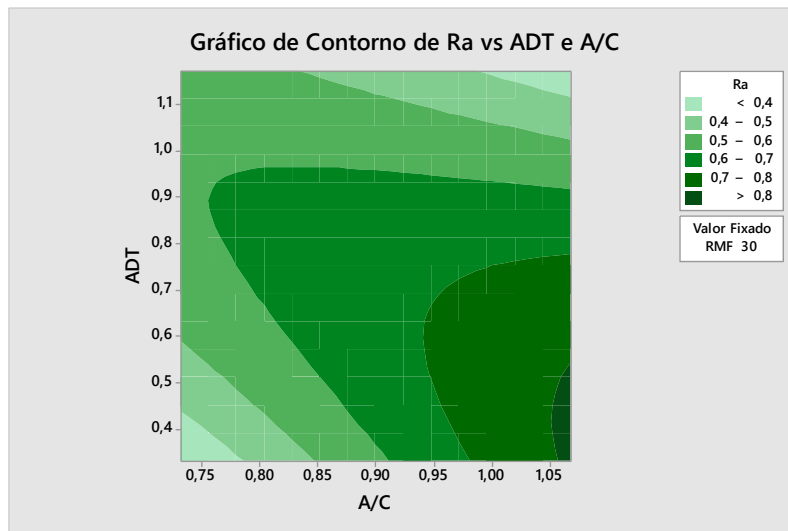


Fonte: Autoria Própria

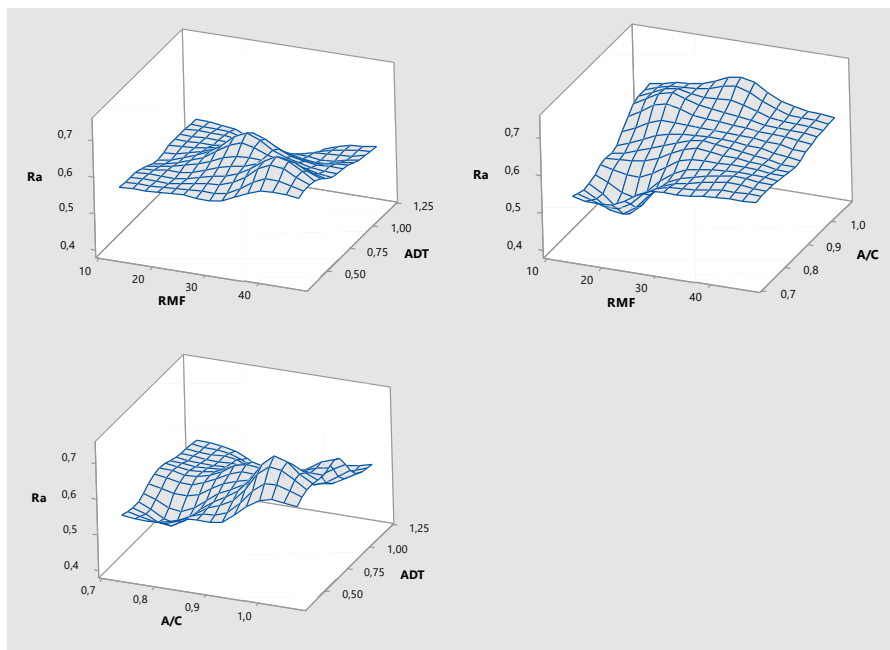
Figura 36 - Gráfico de Contorno para Ra vs A/C e RMF



Fonte: Autoria Própria

Figura 37 - Gráfico de Contorno para Ra vs ADT e A/C

Fonte: Autoria Própria

Figura 38 - Superfície de Resposta para Ra vs ADT e A/C

Fonte: Autoria Própria

Com a verificação do ajuste adequado para os modelos apresentados, o processo de otimização das argamassas produzidas com rejeito de minério de ferro pode ser executado, conforme demonstrado na seção a seguir.

4.2.2 Análise de Correlação

A análise de correlação entre as variáveis de resposta é apresentada conforme Tabela 18, em que os dados superiores (a) indicam o coeficiente de *Pearson* e os inferiores (b), o valor-P. Nota-se uma forte correlação positiva entre a resistência à tração e a resistência à compressão, uma vez que valores próximos de 1 apontam para uma correlação positiva e, de maneira inversa, valores próximos de -1, a correlação negativa. As demais associações representam uma correlação negativa. De maneira complementar à análise, todos os resultados (b) apresentaram valor-P $\leq 0,05$, indicando a significância do teste.

Tabela 18 – Análise de Correlação entre *Rt*, *Rc* e *Ra*

	<i>Rt</i>	<i>Rc</i>
<i>Rc</i>	0,815 (a) 0,000 (b)	
<i>Ra</i>	-0,570 (a) 0,013 (b)	-0,849 (a) 0,000 (b)

Fonte: Autoria Própria

Dado que o objetivo de otimização para as respostas é maximizar, e a correlação negativa de *Ra* com as demais respostas, conclui-se que a solução que maximiza *Ra* acaba minimizando *Rt* e *Rc*.

4.2.3 Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais foi obtida a partir das três variáveis de interesse conforme Tabela 19:

Tabela 19 – Análise de Componentes Principais para *Rt*, *Rc* e *Ra*

Variáveis	CP ₁	CP ₂	CP ₃
Autovalores	2,4959	0,4306	0,0735
Proporção	0,832	0,144	0,024
Acumulado	0,832	0,976	1,000
Autovetores			
<i>Rt</i>	0,551	-0,733	0,399
<i>Rc</i>	0,618	0,037	-0,785
<i>Ra</i>	-0,561	-0,679	-0,474

Fonte: Autoria Própria

O primeiro componente principal (CP_1) representa isoladamente 83,2% da variabilidade acumulada, podendo, portanto, representar a função multiobjetivo. Os autovetores indicam uma correlação positiva entre CP_1 , Rt e Rc , e correlação inversa com Ra . Em outras palavras, maximizar CP_1 implica em minimizar Ra . Os dados padronizados foram definidos para cada resposta de interesse, conforme Tabela 20:

Tabela 20 – Dados padronizados das variáveis Rt , Rc e Ra

$Z(Rt)$	$Z(Rc)$	$Z(Ra)$
0,68134102	1,686419584	-2,065972009
-0,934293974	-0,415219707	0,052973641
2,13674775	1,027030257	-0,900551902
0,587874533	0,349251585	0,052973641
-1,268102857	-1,389854929	1,430288314
-0,667246867	-0,993170512	1,536235597
-0,767389532	-0,599113145	-0,052973641
-0,206590609	0,882542555	-1,218393749
0,36756067	0,577804858	-0,582710054
-0,627189801	0,328235192	-0,158920924
0,000370899	0,485858139	-0,264868206
1,716148558	1,515661392	-1,536235597
0,067132675	-0,247088564	-0,158920924
-2,069244176	-2,327711463	0,900551902
0,113865919	-0,275986104	0,476762771
0,180627696	-0,428354953	0,582710054
0,234037117	0,015616348	0,900551902
0,45435098	-0,191920533	1,006499184

Fonte: Autoria Própria

O produto entre os autovetores e dados padronizados resultou nos escores dos componentes principais CP₁, CP₂ e CP₃, conforme Tabela 21:

Tabela 21 – Escores dos Componentes Principais

Variáveis de controle codificadas			Escores dos componentes principais		
<i>RMF</i>	<i>ADT</i>	<i>A/C</i>	CP ₁	CP ₂	CP ₃
-1	-1	-1	2,5766365	0,965769551	-0,072713574
1	-1	-1	-0,80111997	0,633505251	-0,071945331
-1	1	-1	2,31726233	-0,91676124	0,473205202
1	1	-1	0,51003813	-0,45395883	-0,064710062
-1	-1	1	-2,36004676	-0,093071	-0,092893582
1	-1	1	-1,84326057	-0,59075933	-0,214768321
-1	1	1	-0,76336534	0,576298443	0,189224902
1	1	1	1,11509877	1,011374346	-0,197706922
-1,68	0	0	0,88650967	0,147616935	-0,030715541
1,68	0	0	-0,05357759	0,579782134	-0,432584839
0	-1,68	0	0,44905576	0,197550394	-0,255703121
0	1,68	0	2,74410477	-0,15875345	0,223124755
0	0	-1,68	-0,02655599	0,049556779	0,296078978
0	0	1,68	-3,08388884	0,819155916	0,574763471
0	0	0	-0,37528321	-0,41739713	0,03609604
0	0	0	-0,49209784	-0,54390936	0,132124523
0	0	0	-0,36660426	-0,78244614	-0,345739624
0	0	0	-0,43290554	-1,02355327	-0,145136954

Fonte: Autoria Própria

A modelagem obtida para CP₁ indica um ajuste de 99,33%, indicando que a proporção da variabilidade do componente é coerente e bem explicada pelas variáveis de

controle definidas no processo de otimização de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de minério de ferro. A análise de variância demonstra a significância do modelo, com falta de ajuste de 6,7%, conforme Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Análise de Variância para CP₁

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Regressão	9	42,3079	42,3079	4,7009	283,15	0,000
Linear	3	21,4967	21,4967	7,1656	431,61	0,000
Quadrático	3	11,0199	11,0199	3,6733	221,26	0,000
Interação	3	9,7913	9,7913	3,2638	196,59	0,000
Erro Residual	8	0,1328	0,1328	0,0166		
Falta de ajuste	5	0,1226	0,1226	0,0245	7,23	0,067
Erro Puro	3	0,0102	0,0102	0,0034		
Total	17	42,4407				

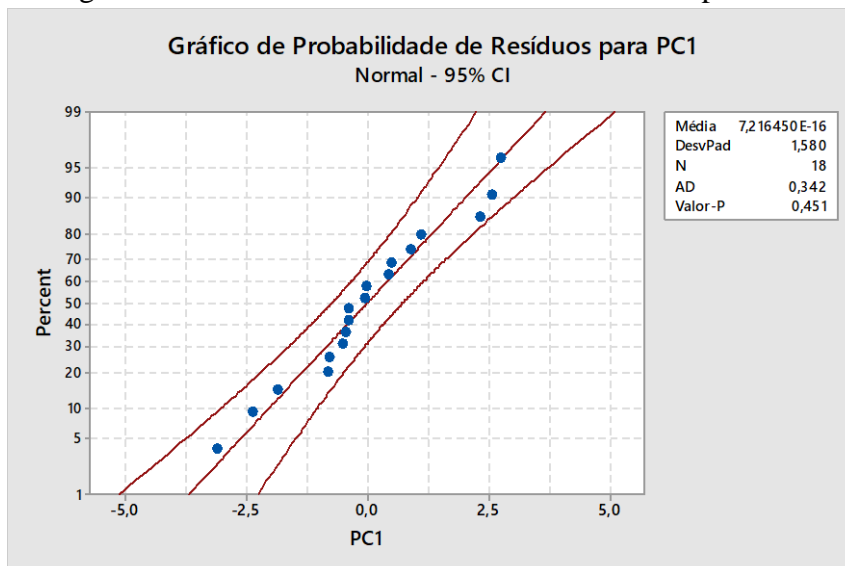
Fonte: Autoria Própria

Tabela 23 - Coeficientes codificados para CP₁

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		-0,4122	0,0643	-6,41	0,000
RMF	-0,6401	-0,3200	0,0349	-9,18	0,000
ADT	1,3864	0,6932	0,0349	19,88	0,000
A/C	-1,9911	-0,9956	0,0349	-28,55	0,000
RMF ²	0,5488	0,2744	0,0362	7,57	0,000
ADT ²	1,3832	0,6916	0,0362	19,09	0,000
A/C ²	-0,8454	-0,4227	0,0362	-11,67	0,000
RMF*ADT	0,7331	0,3665	0,0456	8,05	0,000
RMF*A/C	1,8951	0,9475	0,0456	20,80	0,000
ADT*A/C	0,8758	0,4379	0,0456	9,61	0,000
S = 0,128848 R ² = 99,69% R ² adj = 99,33% R ² (pre) = 97,74%					

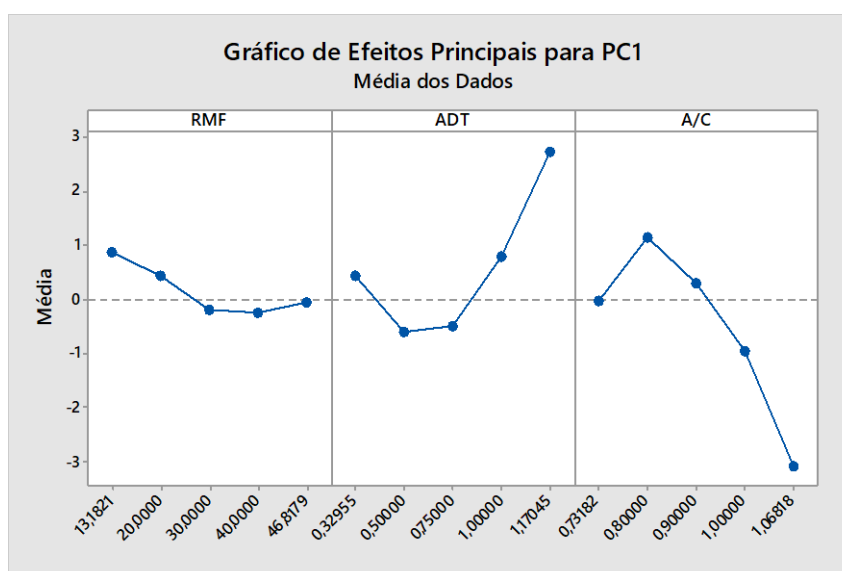
Fonte: Autoria Própria

O teste de probabilidade normal foi realizado a fim de verificar a distribuição de resíduos para CP₁, conforme Figura 39, em que o valor-P resultou em 45,1%. Com o índice maior que o nível de significância de 5%, podemos afirmar que os resíduos estão normalmente distribuídos e que o modelo é ajustado, explicando a variabilidade dos parâmetros.

Figura 39 – Gráfico de Probabilidade de Resíduos para CP₁

Fonte: Autoria Própria

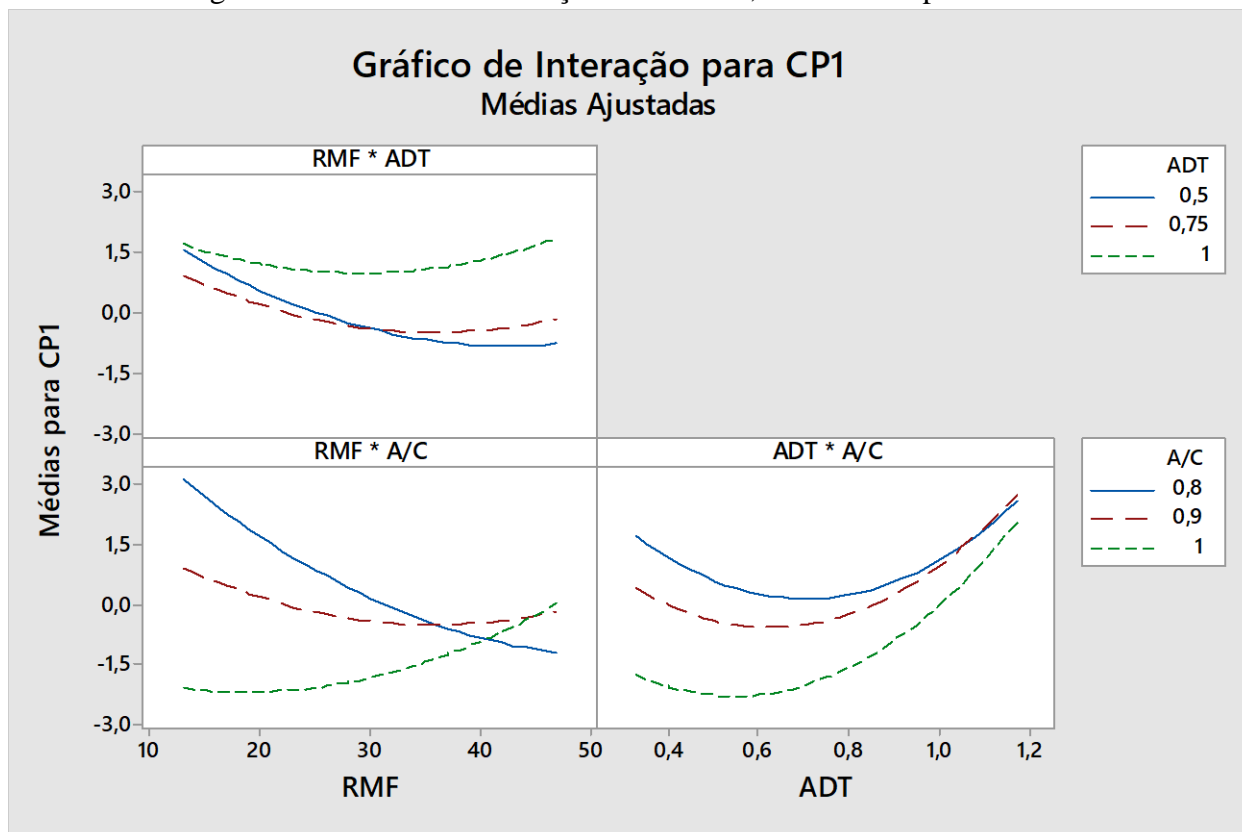
A análise aponta para a maior influência do teor de aditivo e relação água/cimento nos resultados. A maximização da variável de resposta mostra-se efetiva com o aumento no teor ADT a partir de 0,75%. De maneira similar, o aumento da média de resistência é possível até uma relação A/C aproximada de 0,80, sendo que a partir deste nível as médias tendem a cair, conforme Figura 40. As médias obtidas para a análise da influência do teor de RMF demonstraram menor relevância nos resultados. A média mais elevada está associada a um teor de aproximadamente 13%.

Figura 40 – Efeitos Principais para CP₁

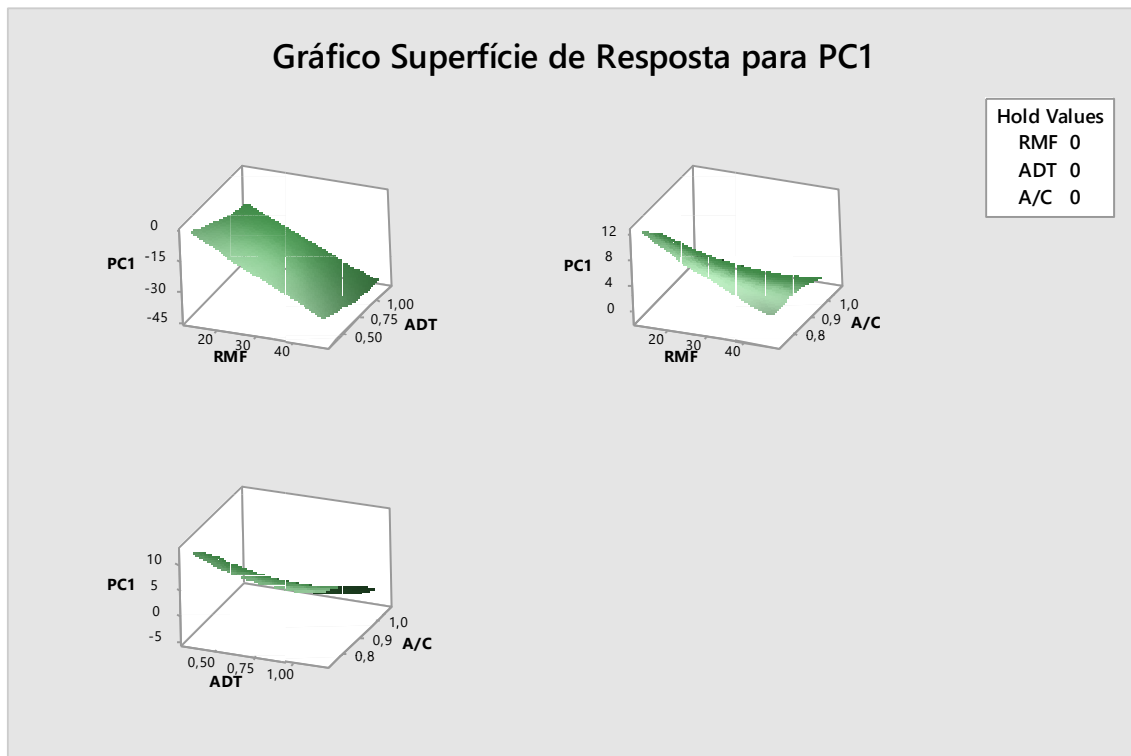
Fonte: Autoria Própria

O gráfico de interação demonstra que as variáveis de controle teor de substituição de rejeito de minério de ferro, teor de aditivo e relação água cimento interagem entre si, o que significa que a alteração mútua dos índices relacionados às variáveis ocasiona variações nas médias do componente principal validado, conforme Figura 41. A análise reforça que as variáveis que possuem maior força de interação são ADT e A/C.

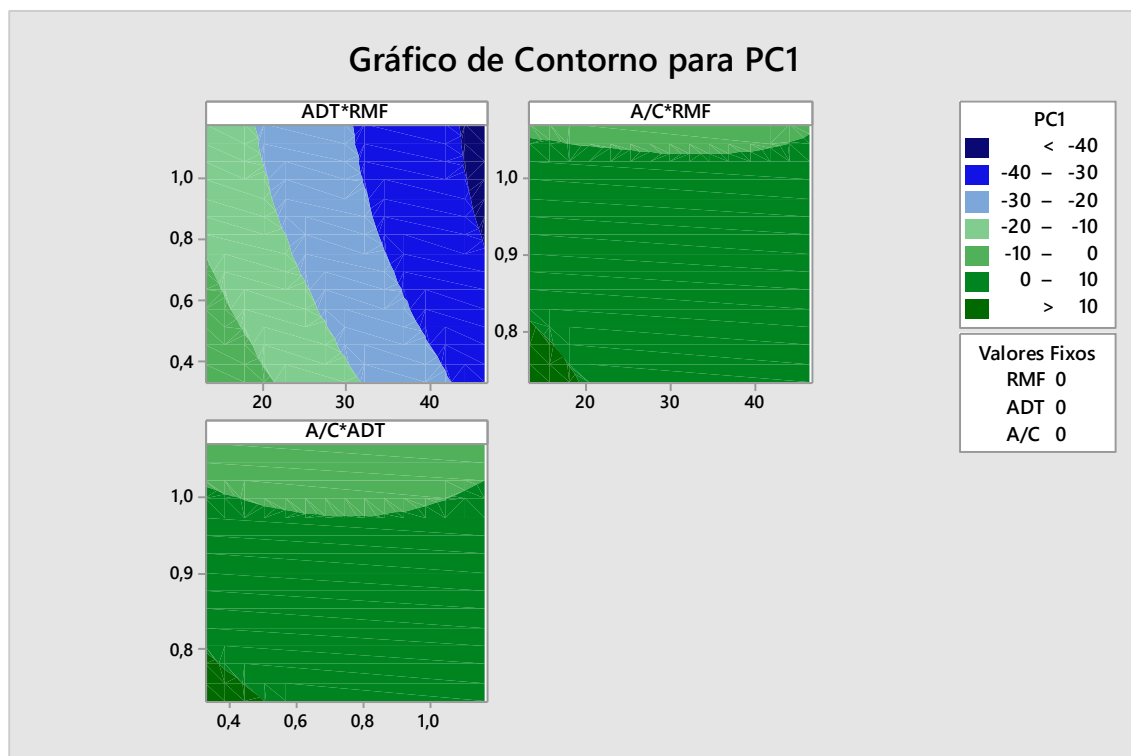
Figura 41 – Gráfico de Interação entre RMF, ADT e A/C para CP₁



A análise do gráfico de superfície de resposta e gráfico de contorno, conforme Figuras 42 e 43, indica que a minimização dos teores de substituição de rejeito de minério de ferro em paralelo com a redução do teor de aditivo, tendem a propiciar um aumento no valor médio de CP₁. De maneira similar, nota-se que a diminuição tanto na relação A/C, quanto no teor de RMF, resultam em maiores médias para CP₁. Considerando a interação entre as variáveis ADT e A/C, a minimização dos teores relacionados também resultam em um aumento das médias para CP₁.

Figura 42 – Gráfico Superfície de Resposta para CP₁

Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Gráfico de Contorno para CP₁

Fonte: Autoria Própria

4.3 OTIMIZAÇÃO

Definidos os modelos matemáticos representativos para as variáveis de resposta relativas à dosagem das argamassas, iniciou-se o processo de otimização. O objetivo desta otimização foi definir a melhor combinação de valores para as variáveis de entrada que correspondesse à maximização das variáveis de resposta Rt , Rc e Ra . O método *Desirability* foi aplicado com o objetivo de determinar as melhores condições de ajuste do processo de acordo com as especificidades de cada uma das variáveis de entrada.

4.3.1 Otimização pelo método *Desirability*

O método *Desirability* foi utilizado com o propósito de maximizar a variável de resposta. Os parâmetros são apresentados na Tabela 24, em que é possível observar que foram adotados o mesmo peso e grau de importância para todas as variáveis e o valor alvo correspondente ao limite superior identificado:

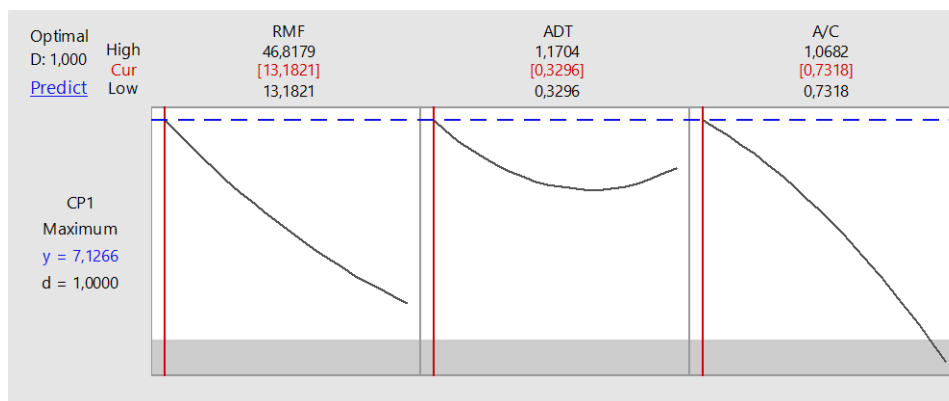
Tabela 24 - Parâmetros de Otimização para CP_1

Resposta	Meta	Limite Inferior	Limite Superior	Alvo	Peso	Importância
CP_1	Máximo	-3,08389	-	2,74410	1	1

Fonte: Autoria Própria

A aplicação do Método *Desirability* como uma ferramenta de potencialização dos resultados indicou um valor de conveniência $D = 1,00$, que de acordo com a classificação proposta por Derringer e Suich (1980) é um valor desejável. A Figura 44 apresenta o gráfico de otimização para as respostas:

Figura 44 - Gráfico de Otimização para CP_1



Fonte: Autoria Própria

Para a solução apresentada com $CP_1 = 7,1266$, que representa o conjunto de variáveis de resposta, temos a configuração ótima dos parâmetros de entrada conforme Tabela 25:

Tabela 25 – Configuração ótima dos parâmetros de entrada

Variáveis de controle codificadas			Variáveis de controle decodificadas		
RMF	ADT	A/C	RMF [%]	ADT [%]	A/C
-1,68	-1,68	-1,68	13,18	0,33	0,73

Fonte: Autoria Própria

As variáveis de saída foram calculadas a partir da substituição dos valores ótimos identificados nas equações modeladas para as resistências à tração na flexão, compressão e aderência à tração: $(R_t) = 9,62$ MPa, $(R_c) = 25,55$ MPa e $(R_a) = -0,04$ MPa.

A otimização de um arranjo CCD rotativo pelo Minitab® frequentemente resulta em solução inviável, pois não é possível adicionar ao software a restrição esférica do espaço experimental de busca de soluções viáveis.

Tendo em vista que o valor negativo encontrado para R_a representa uma solução não ótima, procedeu-se à otimização individual sobre as variáveis originais, a partir da aplicação do algoritmo GRG (Gradiente Reduzido Generalizado), disponível no Solver® do Microsoft Office Excel®, com a programação do sistema lógico de otimização na planilha do software.

As variáveis de entrada teor de substituição de rejeito de minério de ferro (RMF), teor de aditivo (ADT) e relação água/cimento (A/C) foram definidas como elementos decisores da configuração ótima por meio da função objetivo, em que foi atribuído o mesmo grau de importância (R) para todas as resistências R_t , R_c e R_a .

O *target* foi definido como sendo o valor referente às maiores resistências observadas durante a experimentação. A Tabela 26 apresenta os resultados ótimos individuais para os valores codificados com restrição esférica $\rho^2 = 2,8284$.

Tabela 26 – Otimização individual

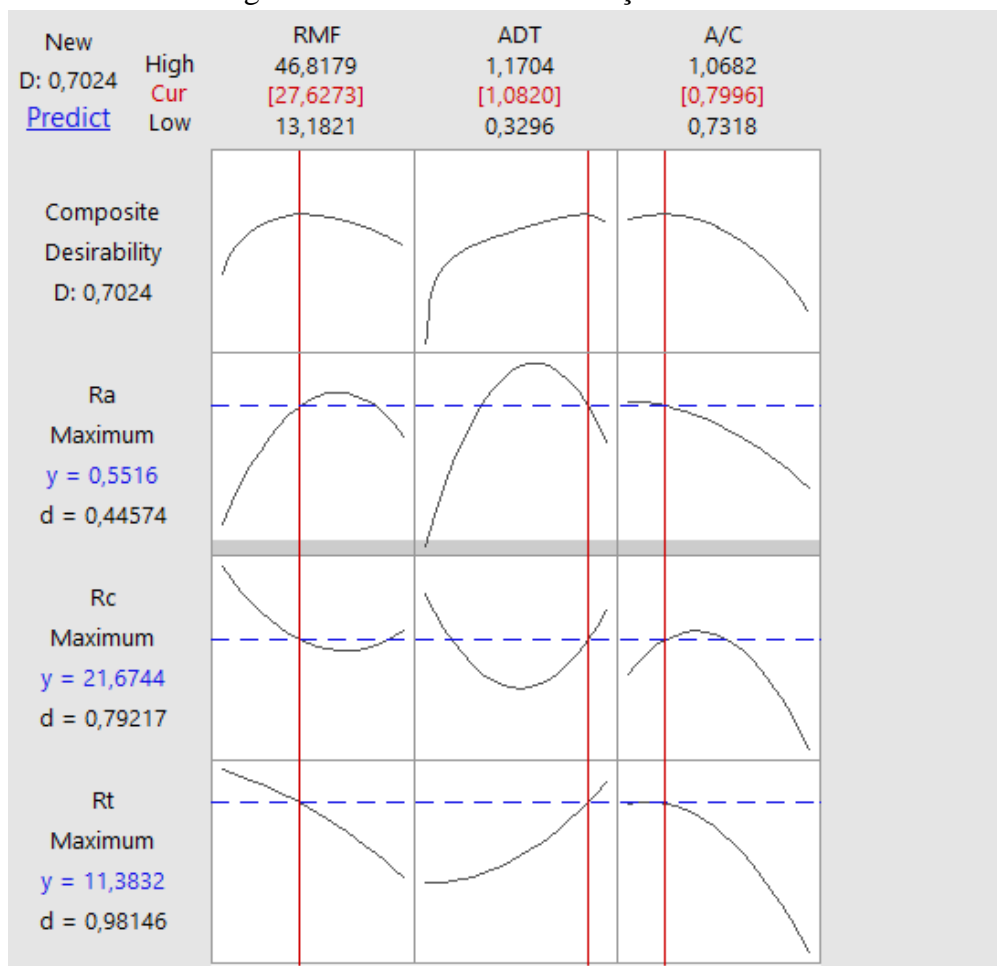
	<i>Rt</i>	<i>Rc</i>	<i>Ra</i>	Codificada	Decodificada		
				Z(x)	Ótimo	X-	X+
Const	8,6634	17,5932	0,6640	1,0000			
RMF	-0,4032	-0,3681	0,0188	-0,2373	27,6273	20,0000	40,0000
ADT	0,7485	1,2552	-0,0360	1,3281	1,0820	0,5000	1,0000
A/C	-0,9842	-2,2985	0,0438	-1,0042	0,7996	0,8000	1,0000
RMF ²	-0,1805	0,9029	-0,0327	0,0563			
ADT ²	0,3427	1,6401	-0,0504	1,7638			
A/C ²	-0,6419	-1,4394	-0,0079	1,0084			
RMFxADT	0,0050	1,1938	-0,0288	-0,3151			
RMFxA/C	0,8100	2,2163	-0,0488	0,2383			
ADTxA/C	-0,3775	1,2188	-0,0638	-1,3336			
Y^x	11,3834	21,6744	0,5515				
<i>L_i</i>	5,2000	9,5700	0,4000				
T	11,5000	24,8500	0,74000				
d(Y _i)	0,9815	0,7922	0,4457				
Importância (R)	0,3333	0,3333	0,3333				
Maximizar D	0,7024						
Restrição	2,8284	≤	2,8284				

Fonte: Autoria Própria

O *Desirability* Global (D) = 0,70 mostra-se em conformidade com os parâmetros ótimos para as resistências mecânicas medidas na dosagem das argamassas, classificado por Derringer e Suich (1980) como um valor adequado.

A partir da aplicação do algoritmo GRG conclui-se que teores ótimos com RMF = 27,6273%, ADT = 1,0820% e A/C = 0,7996 alcançaram valores iguais a *Rt* = 11,38 MPa, *Rc* = 21,67 MPa e *Ra* = 0,55 MPa, conforme Figura 45.

Figura 45 – Gráfico de Otimização Individual



Fonte: Autoria Própria

4.4 VALIDAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Novos experimentos foram realizados a fim de validar a proposta em uma comparação dos resultados reais obtidos inicialmente com os resultados da condição otimizada. A Tabela 27 apresenta os parâmetros ótimos de entrada para dosagem das argamassas.

Tabela 27 – Parâmetros ótimos para dosagem de argamassas com RMF

	Variáveis de controle decodificadas		
	RMF [%]	ADT [%]	A/C
Resultado Ótimo	27,63	1,08	0,80

Fonte: Autoria Própria

Para esta condição de validação dos resultados, procedeu-se à moldagem das argamassas em formas prismáticas, obtendo após os 14 dias de cura as medidas de resistência à compressão e resistência de tração na flexão para cada traço estabelecido. De maneira complementar, a aplicação da argamassa em blocos de concreto estrutural foi realizada, resultando nas medidas de resistência de aderência à tração. O conjunto de dados obtidos é apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados dos experimentos de confirmação

Medições	<i>Rt</i> [MPa]	<i>Rc</i> [MPa]	<i>Ra</i> [MPa]
1	11,43	21,52	0,49
2	11,85	22,33	0,53
3	12,21	22,64	0,58
4	11,64	21,75	0,51
5	11,16	21,32	0,46

Fonte: Autoria Própria

A validação dos resultados indicou que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados teóricos, sendo a maior divergência observada de aproximadamente 0,14 MPa para *Rt*, 0,12 Mpa para *Rc* e 0,02 MPa para *Ra* com a confirmação dos experimentos, conforme Tabela 29.

Tabela 29 – Comparação entre os resultados real e otimizado

	Real	Otimizado	Desvio Padrão
<i>Rt</i> (MPa)	11,38	11,66	0,14
<i>Rc</i> (MPa)	21,67	21,91	0,12
<i>Ra</i> (MPa)	0,55	0,51	0,02

Fonte: Autoria Própria

As condições ótimas apresentadas validam o método utilizado para otimização da dosagem de argamassas com substituição parcial do agregado natural por resíduo de minério de ferro, uma vez que os valores reais medidos convergem para os valores ótimos calculados.

Os resultados obtidos por meio da metodologia de dosagem proposta tendem aos encontrados por outros pesquisadores como Fontes *et al.* (2016), Júnior e Oliveira (2022) e Huang *et al.* (2023), os quais apontaram que níveis de substituição variando em uma taxa de substituição de 20%, 25% e 30%, respectivamente, apresentaram propriedades satisfatórias, embora tenham sido utilizadas metodologias de dosagem distintas.

O emprego do rejeito de minério de ferro em misturas de argamassas tende a refletir na melhoria potencial das propriedades do resíduo dadas as características do resíduo, aumentando a resistência à compressão axial do material (HUANG *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2023; ALMADA *et al.*, 2022; JÚNIOR e OLIVEIRA, 2022).

Considerando os parâmetros ótimos para dosagem definidos a argamassa se classificaria, mecanicamente, segundo a norma NBR 13281 (ABNT, 2023) como tipo III. O produto otimizado poderia ser utilizado tanto no ambiente interno como no externo, conforme especificações contidas na norma NBR 13749 (ABNT, 2013).

No que se refere à influência significativa dos níveis de ADT e A/C na mistura, isso pode ser justificado pela associação dos materiais com o RMF na argamassa. A consistência tende a diminuir diante da necessidade de adição de uma maior quantidade de água devido ao tamanho das partículas e porosidade do agregado mais fino (ALMADA *et al.*, 2022; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016). No entanto, o uso do aditivo na faixa recomendada e limitação do consumo de água permitem controlar os efeitos negativos na trabalhabilidade e consistência, favorecendo o aumento nos níveis de resistência conforme observado.

5. CONCLUSÕES

A análise comparativa entre os traços de argamassas com substituição parcial do agregado natural por rejeito de minério de ferro em sua composição utilizando o Projeto de Experimentos e Metodologia da Superfície de Resposta permitiu a identificação de aspectos importantes para a dosagem do material.

Para todas as variáveis de resposta consideradas na estruturação, a modelagem de respostas mostrou-se confiável e válida, com ajustes superiores a 80% para R_t , R_c e R_a . Em síntese, a proporção da variabilidade das respostas pode ser explicada pelas variáveis de controle utilizadas neste processo.

A probabilidade normal de resíduos para R_t , R_c e R_a apresentou distribuição normal, um indicativo de que os modelos propostos são adequados.

Os modelos matemáticos e análise dos efeitos principais apontaram para uma maior influência das variáveis de entrada ADT e A/C nos resultados. A substituição parcial do agregado natural por RMF indicou que melhores índices de resistência estão associados a limites inferiores de substituição de RMF, ou seja, teores mais conservadores. As análises corroboram os resultados obtidos por outros autores no estudo da viabilidade da aplicação do agregado RMF.

De maneira geral, analisando os valores de resistência obtidos para R_t e R_c em consonância com os efeitos das variáveis de entrada, pode-se observar que os maiores índices estão associados a um maior valor de teor de aditivo plastificante e menor relação água/cimento nas argamassas. Para a resistência R_a temos um cenário distinto: a média das resistências tende a elevar com o aumento na relação água/cimento e diminuição do teor de aditivo plastificante na dosagem do produto.

A otimização da argamassa alcançou resultados adequados, com os parâmetros controláveis assumindo a seguinte configuração: teor de substituição de rejeito de minério de ferro (RMF) = 27,63%, teor de aditivo plastificante (ADT) = 1,08% e relação água/cimento (A/C) = 0,80, com valores de resistência iguais a $R_t = 11,38$ MPa, $R_c = 21,67$ MPa e $R_a = 0,55$ Mpa. A confirmação dos experimentos validou a modelagem aplicada, com os valores reais medidos coerentes com os valores ótimos calculados e desvio padrão dentro dos limites aceitáveis.

Os valores de resistência obtidos para R_t , R_c e R_a após a otimização estão em conformidade com a norma NBR 13281 (ABNT, 2023) que define as exigências mecânicas e reológicas para as argamassas, além de estar dentro dos limites de resistência de aderência à

tração aceitos segundo a norma NBR 13749 (ABNT, 2013), sugerindo que a argamassa dosada poderia ser utilizada tanto para revestimento interno quanto externo. Deste modo, a modelagem apresentou resultados compatíveis às argamassas de revestimento padrão e em condições adequadas que atestam seu uso na construção civil.

O estudo demonstra que é possível aplicar o método de Planejamento de Experimentos e Metodologia da Superfície de Resposta para modelar o comportamento das propriedades das argamassas, obtendo uma dosagem ótima com os alvos ajustados conforme necessidade do dosador com o auxílio da função *Desirability*, amplamente difundida como uma ferramenta de melhoria contínua.

A combinação de diferentes propriedades, a fim de avaliar a interferência isolada de cada um dos pontos, mostrou-se válida, em que os resultados obtidos por meio da otimização poderão ser utilizados para replicação da nova dosagem das argamassas visando aspectos como a melhoria do desempenho, qualidade e confiabilidade do material. De maneira complementar, os valores alvos poderão ser alterados conforme a necessidade de cada projeto e especificações.

Sob uma visão dos impactos ambientais causados pela disposição do rejeito de minério de ferro em barragens, a proposta de reuso do resíduo com uma nova destinação ao que antes era considerado um mero material para descarte mostra-se uma alternativa viável em termos de tecnologia sustentável.

Por fim, conclui-se que para ações visando a otimização da performance de um determinado produto é fundamental conhecer todo o processo e suas variáveis para modelagem do problema e solução de problemas complexos. O embasamento teórico e prático auxiliará na tomada de decisões a partir do uso de modelos matemáticos, estatística e algoritmos.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a replicação do estudo utilizando outro tipo de material aglomerante que não o CPV-ARI dadas as suas limitações, além de reservar um período de cura maior para ganho de resistência, completando todo o processo.

Análises posteriores podem averiguar também as possíveis influências do uso de aditivo incorporador associado ou em substituição ao aditivo utilizado nessa pesquisa.

Por fim, sugere-se avaliar a interferência das variáveis de controle em outras propriedades de argamassas possíveis como índice de consistência das argamassas, teor de ar aprisionado, retenção de água, densidade de massa no estado endurecido, absorção de água e índice de vazios. Além disso, análises incluindo variáveis de custo e variáveis ambientais, como por exemplo emissão de gases de efeito estufa, tem potencial para enriquecer o estudo avaliando o possível impacto socioambiental e econômico da incorporação de RMF.

REFERÊNCIAS

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **Manual de revestimentos de argamassa**, 2002. Disponível em: <<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>>.

Acesso em: 12 de novembro de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas**. Coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. 23p. Brasília: ANM, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>.

_____. **Report Mensal Barragens de Mineração – Maio 2023**. 13p. Brasília: ANM, 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/boletim-mensal-maio-2023.pdf>.

AL-ALAILY, H. S.; HASSAN, A. AA. **Refined statistical modeling for chloride permeability and strength of concrete containing metakaolin**. Construction and Building Materials, v. 114, p. 564-579, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.187>.

ALMADA, B. *et al.* **Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil**. Journal of Materials Research and Technology, v. 18, p. 1947-1962, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.070>.

ALMADA, B. *et al.* **Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings**. Journal of Building Engineering, v.63, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105405>.

ASFARAM, *et al.* **Rapid removal of Auramine-O and Methylene blue by ZnS : Cu nanoparticles loaded on activated carbon: A response surface methodology approach**.

Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v. 53, p. 80–91. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.026>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos - Determinação do Índice de Consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

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

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

BERNARDI, J. V. E. *et al.* **Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada**. *Holos Environment*, v.1, p.162-172, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v1i2.1625>

BIGOLIN, M.; FILHO, L. C. P. S. **Desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis, foco em matrizes cimentícias: uma revisão sistemática**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, 2013, Gramado, RS. Anais. São Paulo: Ibracon, 2013.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical Model-Building and Response Surfaces**. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1987. 650p.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Response surfaces, mixtures, and ridge analyses**. New York, John Wiley & Sons. Inc., 2007. 880 p.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G., MacGREGOR, J. F., ERJAVEC, J. Some Problems Associated with the Analysis of Multiresponse Data. *Technometrics*, v 15, n 1, pp.33-51, 1973.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for Experimenters**. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1978. 653 p.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos**.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassa através de curvas granulométricas**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil, BT/PCC/237. São Paulo. 1999.

CARRASCO, E. V. M. *et al.* **Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests**. Construction and Building Materials, v. 131, p. 31-38, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.065>.

CARVALHO, P. S. L. de, *et al.* **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-234, 2014.

CHONG, B.W. *et al.* **Design of Experiment on Concrete Mechanical Properties Prediction: A Critical Review**. Materials, v. 14, p. 1866, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081866>.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim Técnico n. 68. 1995.

CORNELL, J. **Experiments with Mixtures: Designs, Models and the Analysis of Mixture Data**. New York, John Wiley & Sons. Inc., 2002. 649 p.

DEBSKA, B; KRASON, J.; LICHOLAI, L. **Designing Cement Mortars Modified with Cork and Rubber Waste Using Theory of the Experiment**. Journal of Ecological Engineering, v. 20, ed. 9, p. 121-130, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/112499>.

DEFÁVERI, K. C. S. *et al.* **Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties**. Construction and

Building Materials, v. 220, p. 375-385, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (Brasil). **Boletim do Setor Mineral 2020** Brasília, DF: DNPM, 2020. 36 p. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/1006289/Boletim+do+Setor+Mineral+-+julho+2020/abcd81f-e8e6-dd16-243f-87e97f23f418?version=1.1>>. Acesso em 04 jan. 2022.

DERRINGER G.; SUICH, R. **Simultaneous optimization of several response variables**. Journal of Quality Technology, v. 12, p. 214-219, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.

FARIA, F. S. **Influência do Teor e da Granulometria de Resíduo de Poliuretano na Produção de Argamassa**. 2021. 95 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2021.

FONTES, W. C. *et al.* **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams**. Construction and Building Materials, v. 112, p. 988-995, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027>.

GALAN, J. J. *et al.* **Mechanical Behavior of Hot-Mix Asphalt Made with Recycled Concrete Aggregates from Construction and Demolition Waste: A Design of Experiments Approach**. Sustainability, v. 11, p. 3730, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11133730>.

GOMES, J. H. F. *et al.* **Otimização Robusta da Diluição e da Largura do Cordão na Soldagem com Arame Tubular para Aplicações de Revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L**. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil, 2012.

GULARTE, L. C. P. *et al.* **Análise bibliométrica e sistêmica da literatura sobre viabilidade econômica-financeira, gestão e sustentabilidade da reciclagem de resíduos**

da construção civil. Exacta Engenharia de Produção, v. 16, n. 4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5585/exactaep.v16n4.7436>.

G1. **Lama de barragens atinge áreas a até 100 km de distância em MG**. 06 nov. 2015. Disponível em: <<https://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/hidreletrica-100-km-e-afetada-por-lama-do-rompimento-de-barragens.html>>. Acesso em 04. jan. 2022.

G1. **Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, MG**. 25 jan. 2019. Disponível em:<<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml>>. Acesso em 04. jan. 2022.

HUANG, X. *et al.* **Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates**. Construction and Building Materials, v. 44, p. 757-764, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.088>.

HUANG, S. *et al.* **Utilization of high-sulfur iron ore tailings in cement mortar by considering the influence of curing temperature and tailing content**. Journal of Building Engineering, v. 74, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106826>.

HONGYU, K. **Comparação do GGEbiplot ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo × ambiente**. 2015. 155p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

HOTELLING, H. **Analysis of a complex of statistical variables into principal components**. The Journal of Educational Psychology, v. 24, p. 417-441, 1933. DOI: <https://doi.org/10.1037/h0071325>.

JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**, New Jersey: Prentice Hall Inc., 6 ed., p. 767, 2007.

JÚNIOR, W. R. P.; OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação da utilização do rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas.** Research, Society and Development, v. 11, n. 4, e0211425954, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i4.25954>.

LARA, D. *et al.* **Dosagem das argamassas.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I, Goiânia, Anais... Goiânia: ANTAC, p. 63-72. 1995.

LI, J. *et al.* **Mechanical Properties and Microstructure Analysis of Cement Mortar Mixed with Iron Ore Tailings.** Buildings, 13, 149, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13010149>.

LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de Minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 867 p., 2004.

MA, Z. *et al.* **Optimal design of fresh sand fog seal mortar using response surface methodology (RSM): Towards to its workability and rheological properties.** Construction and Building Materials, v. 340, 127638, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127638>.

MAGALHÃES, L. F. *et al.* **Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements.** Journal of Cleaner Production, v. 274, p. 123260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123260>.

MELFI, A. J. (ORG.) *et al.* **Recursos Minerais do Brasil: Problemas e Desafios.** Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. v. 1.

MOHAMMED, B. S. *et al.* **Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology.** Construction and Building Materials, v. 171, p. 1605-1621, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** New York, John Wiley & Sons. Inc., 757 p, 2013.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para**

engenheiros. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., 570 p, 2003.

MORRISSON, D. **Multivariate Statistical Methods**. New York, McGraw-Hill Inc, 415 p, 1976.

MURPHY, T. E.; TSUI, K. L., ALLEN, J. K. **A Review of Robust Design Methods for Multiple Responses**. Research in Engineering Design, v 15, pp. 201-215, 2005.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology**. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2009. 680 p.

NAKKERAN, G; KRISHNARAJ, L. **Prediction of cement mortar strength by replacement of hydrated lime using RSM and ANN**. Asian Journal of Civil Engineering, v. 24, p. 1401-1410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00577-6>.

Norma Regulamentadora de Mineração. **NRM-18 (Beneficiamento)**. Ministério de Minas e Energia, 2002. Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_18.htm>. Acesso em: 13. jan. 2022.

PAIVA, A. P. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unifei, Itajubá, 2006.

PINHEIRO, E. R. *et al.* **Uma Técnica, Baseada em Projeto de Experimentos, para Otimização da Dosagem de Argamassa Mista de Cimento, Cal e Areia**. In: XIII Simpósio de Mecânica Computacional, Vitória, Espírito Santo, 2018.

Portal **UNESP**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>. Acesso em: 22. nov. 2021.

PROTASIO, F. N. M. *et al.* **The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete**. Journal of Cleaner Production, v. 278, p. 123929, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123929>.

RAHMATIKA, A. *et al.* **The Application of Response Surface Methods (RSM) to Study the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using Silica Fume on the Properties of Mortar.** International Journal of Civil Engineering and Technology, v.10, ed. 4, p. 2356–2364, 2019. Disponível em: <<http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=4>>.

REVATHI, T. *et al.* **Application of Response Surface Methodology: Optimum Mix Design of Fly ash geopolymer mortar, a Portland cement free binder for sustainable construction.** International Journal of ChemTech Research, v. 11, p. 13-22, 2018. Disponível em: <[https://www.sphinxesai.com/2018/ch_vol11_no1/abstracts/A\(13-22\)V11N01CT.pdf](https://www.sphinxesai.com/2018/ch_vol11_no1/abstracts/A(13-22)V11N01CT.pdf)>.

REZAI FAR, O. *et al.* **Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method.** Construction and Building Materials, v. 123, p. 59-68, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.047>.

RIBEIRO, C. C. B.; SOUZA, J. G. G. **Influência Granulométrica na Resistência à Compressão de Argamassas e Concretos de Cimento Portland.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, Fortaleza, CE. Anais. São Paulo: Ibracon, 2019.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento.** 2014. 179p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SANTOS, W. J. *et al.* **Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 225-243, 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-8621201800010021>.

SANTOS, W. J. *et al.* **Análise da influência do tipo de agregado miúdo nas características e dosagem de argamassas mistas.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 271-288, 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000400355>.

SAVEGNAGO, R. P. *et al.* **Estimates of genetic parameters, and cluster and principal components analyses of breeding values related to egg production traits in a White Leghorn population**, Poultry Science, 90, p.2174-2188, 2011.

SCARTEZINI, L. M.; CARASEK, H. **Fatores que exercem influência na resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassas**. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 5, 2003, São Paulo. Anais [...] São Paulo: ANTAC/EPUSP, 2003. p. 251-264.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento Externo de fachadas dos edifícios**. 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

SELMO, S. M. S.; HELENE, P. R. L. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento Externo de fachadas dos edifícios**. 10 p. Boletim Técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

SILVA, A. P. D. **Efficient Variable Screening for Multivariate Analysis**. Journal of Multivariate Analysis, v. 76, p. 35-62, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1006/jmva.2000.1920>

SILVA, E. J. D. A.; MAZZINGHY, D. B. **Evaluation of compressive strength in geopolymer mortars produced using iron ore tailings ground by tumbling ball mills**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 18, e2480, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212480>.

TRADE MAP. **Product: 2601 Iron ores and concentrates, incl. roasted iron pyrites**. Disponível em: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx?nvpm=1%7c076%7c%7c%7c%7c2601%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1<. Acesso em: 10. dez. 2021.

VALE, SA, 2020a. Management and environmental technology. **Vale**, 2020. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/en/Pages/Waste.aspx>. Acesso em: 08 de fev. de 2022.

WEISHI, L. *et al.* **The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings.** *Journal of Cleaner Production*, v. 274, p. 123260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.309>.

WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. J. (2006). **Mineral Processing Technology. An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** Elsevier, 7^a edição.

WU, F. C. **Optimization of Correlated Multiple Quality Characteristics Using Desirability Function.** *Quality Engineering*, v 17, n.1 pp. 119-126, 2005.

YAO, G. *et al.* **Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement.** *Powder Technology*, v. 360, p. 863-871, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.002>.

YELLISHETTY, M. *et al.* **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 1283-1289, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.007>.

ZHANG, W. *et al.* **Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 119917, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119917>.

ZHAO, J. *et al.* **An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties.** *Construction and Building Materials*, v. 286, 12298, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122968>.