

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS DE MISTURA DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COMPACTADOS
COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEAD**

KÍVIA MOTA NASCIMENTO

ITAJUBÁ, JULHO DE 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

KÍVIA MOTA NASCIMENTO

**OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS DE MISTURA DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COMPACTADOS
COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PEAD**

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

Área de Concentração: Qualidade e Produtos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva

Co orientador: Prof. Dr. Túlio Hallak Panzera

**JULHO DE 2019
ITAJUBÁ**

DEDICATÓRIA

Dedico este estudo à minha família, especialmente a meus avôs Joaquim e João

Cacheiro.

Estejam em paz, vês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me dar forças, guiar minhas escolhas, possibilitar todas as minhas conquistas e colocar pessoas incríveis no meu caminho.

Ao Vinícius, meu amor e companheiro, maior e melhor amigo, por todo apoio, dedicação e paciência nos momentos de crise e insegurança e por me colocar sempre em primeiro lugar, renunciando ao conforto e comodidade da vida para ficar ao meu lado. Obrigada por nunca duvidar de mim e me mostrar o quão forte eu posso ser, principalmente nos momentos em que eu insisto em não acreditar.

Agradeço meus pais, Neide e José Lúcio, pelo amor incondicional, por todo carinho e cuidado, por sempre me apoiarem e clarearem meus pensamentos. Mãe, obrigada por sua disponibilidade constante, pela companhia em todas as viagens ao longo do Doutorado, pelas visitas que enchem meu coração de alegria. Pai, obrigada por todo auxílio nas etapas de pesquisa, pelos dias dedicados a me ajudar com a moagem das tampinhas, mesmo quando isso prejudicava todo seu planejamento de trabalho. Sem vocês, não teria conseguido!

Às minhas irmãs e melhores amigas, Kirna e Shênia, minha gratidão a todo amor e companheirismo. Obrigada por ouvirem todos os meus lamentos, rirem comigo das coisas mais simples, por estarem sempre ao meu lado e acreditarem tanto em mim. Aos meus cunhados-irmãos, Rafael e Carlos, pela parceria e carinho. A minha sobrinha Manuela que enche meu coração de luz e de alegria. E ao meu novo sobrinho(a) que está a caminho e que, mesmo ainda não o conhecendo, já trouxe mais amor a minha vida.

À Jade pelo carinho, conversas e momentos de descontração. A minha avó Carlota, por respeitar minhas escolhas e me contagiar com toda sua força e determinação. A minha avó Aparecida por toda serenidade e amor. Ao meu amado e saudoso avô João Cacheiro por todo cuidado e interesse por meu trabalho... o senhor está fazendo muita falta. Aos meus tios, primos e primas, enfim, a toda minha família maravilhosa, pelo carinho e torcida.

Agradeço à Marli, Arlindo e Maísa, minha segunda família, pela compreensão, apoio e amor. Às famílias Castro e Segheto por toda alegria! A todos, agradeço por compreenderem os momentos de ausência e não duvidarem do meu imenso amor por vocês.

Ao meu orientador Carlos Eduardo Sanches da Silva pelo apoio incondicional, carinho, parceria e confiança. Ao meu coorientador Túlio Hallak Panzera, pela disponibilidade, paciência, amizade, por nortear meu caminho e acreditar em mim quando nada parecia dar certo. Ao professor Geraldo, meu amigo Passarinho, por sempre se importar comigo e me ajudar a encontrar uma direção.

Agradeço a parceria e confiança dos professores do curso de Engenharia de Produção da UFSJ. Ao Flávio, Guilherme, Wilson e Allexandre por acreditarem no meu trabalho. Ao

Robson por toda paciência e ajuda com a pesquisa. À Roberta, por todo apoio, amizade, conversas e descontrações durante esse processo. Ao Leandro agradeço a amizade além do convívio profissional, à sua esposa Tarcila e ao pequeno e lindo Murilo pelos momentos de alegria. Aos demais professores do DEMEP, agradeço o respeito e convívio diários. À Simone, Gabriela, Nice e Claudia por toda ajuda e pelas risadas, mesmo nos dias difíceis de trabalho.

A todos os colegas do CITEC. Aos técnicos, Alexandre e André, por todo o apoio durante as etapas da pesquisa! Vocês foram imprescindíveis! Aos professores, mestrandos, doutorandos e pós-doutorandos, principalmente Rodrigo, Livia e Julio, por toda atenção e apoio! Aos alunos Larissa, Samuel, Carlos e Paulo pelo auxílio nas atividades iniciais em laboratório. Agradeço também ao Camilo, técnico do Laboratório de Usinagem, por estar sempre disponível a ajudar. À Roseli e Luizimary do Laboratório de Microscopia pela paciência e auxílio.

Aos meus grandes amigos que torceram por mim e compreenderam os momentos de ausência. À Marcella que esteve presente mesmo de tão longe e sempre e acreditou em mim. À Lara, Diego e ao nosso bebezão Igor por todo apoio, pelas recepções em Itajubá, por todos os momentos de alegria e por entenderem as dificuldades. Às lindas do Hepteto que mesmo com toda minha indisponibilidade não desistiram de mim!

À Cooperativa de Catadores de Madre de Deus de Minas e às empresas EcoForte Tijolos e Moinhos Gerais Ltda. pelo apoio e fornecimento de material para condução dos experimentos.

Agradeço a UNIFEI, UFSJ, CAPES, CNPQ e FAPEMIG pelo apoio financeiro e estrutural, imprescindíveis à concretização desta pesquisa. Aos todos os professores que passaram pelo meu caminho, pela generosidade e por serem fonte de inspiração.

Por fim, agradeço a ajuda de todos no recolhimento das tampinhas! Mãe, vó Carlota, Marli, Tia Mônica, Tia Neide, Vó Hirla, Tio Tõe, Celinho não tenho como agradecer todo o esforço que fizeram!

*“Existem duas maneiras de ver a vida: uma é acreditar que não existem milagres e
outra é acreditar que tudo na vida é um milagre”*

Albert Einstein.

RESUMO

O elevado consumo de materiais poliméricos e o conseqüente aumento na geração de resíduos sólidos demandam à criação de rotas alternativas de reciclagem. Muitos estudos na área de materiais têm sido voltados para o reaproveitamento de resíduos como fase dispersa em materiais compósitos, principalmente os cimentícios, aliando questões ambientais, econômicas e tecnológicas. Dentre os materiais poliméricos, o polietileno de alta densidade (PEAD) é um dos mais produzidos, porém sua reciclagem não é feita de maneira expressiva e a pesquisa ainda se mostra incipiente. Sendo assim, esta tese de doutorado tem por otimizar a incorporação de resíduos poliméricos em compósitos cimentícios por meio de arranjos de misturas entre matriz cimentícia e agregados de PEAD e de quartzo, analisando sua influência na microestrutura e propriedades físico-mecânicas.. A metodologia DoE foi utilizada para planejar um experimento de misturas envolvendo partículas de PEAD, quartzo e cimento e o método *desirability* para fazer sua otimização. A relação água/cimento de 0,5 foi mantida constante, a relação agregado/cimento variou de 3,75 a 5,25 e foi definido um percentual mínimo de 30% de partículas de PEAD no experimento. Pôde-se notar que há uma baixa adesão entre as partículas de PEAD e a matriz cimentícia. Houve uma redução na resistência à compressão (até 80%), resistência à flexão (até 75%), velocidade de ultrassom (até 55%), módulo dinâmico (até 90%), densidade volumétrica e densidade aparente (até 50% para ambas) e aumento na porosidade (até 60%) e absorção de água (até 200%) à medida em que houve o aumento percentual da incorporação das partículas de PEAD. Foram otimizadas todas as variáveis respostas, sendo a proporção 0,21 de matriz cimentícia, 0,24 de PEAD e 0,55 de quartzo o ótimo individual, exceto para as variáveis densidades volumétrica e aparente em que o ótimo foi de 0,16 de matriz cimentícia e 0,84 de PEAD. Foram traçados seis diferentes cenários para otimização multiobjectivo em que se variou a importância dada as variáveis respostas, obtendo-se *desirability* individuais e compostas satisfatórias para todos os casos, o que mostra a possibilidade de incorporação de partículas de PEAD para diferentes objetivos. Os resultados revelam uma nova rota de reciclagem de PEAD em aplicações de microconcreto não estruturais.

Palavras-chave: compósitos cimentícios, resíduos de PEAD, delineamento de experimentos, arranjos de misturas, otimização, método *desirability*.

ABSTRACT

The high consumption of polymer materials and the consequent increase in solid waste generation demand alternative recycling routes. A significant amount of research in materials engineering has been directed towards the reuse of waste as dispersive phases in composites, specially cement-based materials, combining environmental, economic and technological issues. Among the polymer materials, high density polyethylene (HDPE) is one of the most produced, but its recycling is not done in an expressive way and the research is still incipient. This doctoral thesis investigates the reuse of HDPE in compacted cementitious composites and its influence on physical-mechanical properties through Design of Experiment (DoE). A desirability method was used to optimise the amount of HDPE, quartz and cement particles in the system. The water/cement ratio of 0.5 was kept constant while the aggregate/cement ratio varied from 3.75 to 5.25 and a minimum percentage of 30% of HDPE particles was defined in the experiment. A low adhesion between the HDPE particles and the cementitious matrix was verified. The increasing percentage of HDPE led to reduced compressive strength (up to 80%), flexural strength (up to 75%), ultra-pulse velocity (up to 55%), dynamic modulus (up to 90%), bulk and apparent densities (up to 50% for both) and increased porosity (up to 60%) and water absorption (up to 200%). The relationships between the response variables were modelled by means of regression analysis with satisfactory adjustments. It should be noted that the ultra-pulse velocity and dynamic modulus increase as the hydration process and the moisture rises in the sample. The combination of 0.21 of cement matrix, 0.24 of HDPE and 0.55 of quartz optimises all responses, except for bulk and apparent densities in which the optimum setup was 0.16 of cement matrix and 0.84 HDPE. Six different scenarios were considered to perform the multi-objective optimisation in which the importance given to the variable parameters was varied, obtaining individual desirability and satisfactory composites for all cases, which demonstrates the possibility of incorporating HDPE particles for different applications. The findings reveal a new recycling route for HDPE in non-structural microconcrete applications.

Key words: cementitious composites, HDPE residues, design of experiments, mixtures arrangements, optimization, desirability method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sustentabilidade e suas dimensões.....	25
Figura 2.2: Classificação de materiais compósitos quanto a fase dispersa	29
Figura 2.3: Representação esquemática de duas pastas de cimento, uma contendo uma relação água/cimento 0,65 e a outra 0,25	32
Figura 2.4: Resistência à compressão do concreto seco e plástico em função da relação água/cimento.....	33
Figura 2.5: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento.....	34
Figura 2.6: Formas características de partículas.....	35
Figura 2.7: Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas (a) partículas totalmente densas, (b) com porosidade fechada ou (c) com porosidade aberta.....	36
Figura 2.8: Etapas para o Planejamento de Experimentos	42
Figura 2.9: Exemplo de delineamento de experimentos com três componentes.....	44
Figura 2.10: Exemplos de <i>Extreme Vertices Design</i>	45
Figura 3.1: Moinho de facas (DPM-2 Nogueira®)	51
Figura 3.2: Partículas de quartzo e PEAD.....	53
Figura 3.3: Ensaio de compressão mecânica.....	54
Figura 3.4: Ensaio de flexão em três pontos.....	55
Figura 3.5: Projeto Experimental	58
Figura 3.6: Molde Cilíndrico	61
Figura 3.7: Molde Prismático	61
Figura 3.8: <i>Marshall hammer – Solotest</i>	61
Figura 4.1: Corpos de prova prismáticos.....	64
Figura 4.2: Corpos de prova cilíndricos	64
Figura 4.3: Seção transversal dos corpos de prova (a) prismático (b)cilíndrico com face retificada.....	65
Figura 4.4: Corpo de prova Cilíndrico no Ensaio de Compressão	65

Figura 4.5: Fratura dos Corpos de Prova Cilíndricos (a) R3, (b) R1.....	66
Figura 4.6: Fratura dos Corpos de Prova Cilíndricos (a) C9, (b) C5.....	66
Figura 4.7: Corpo de prova Prismático no Ensaio de Flexão	66
Figura 4.8: Fratura dos Corpos de Prova Prismáticos, R2	67
Figura 4.9: Fratura dos Corpos de Prova Prismáticos, C2	67
Figura 4.10: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=3,75 (a) R3 - Referência, (b) C2 – 24% de PEAD, (c) C8 – ~50% de PEAD, (d) C4 – ~80% de PEAD.....	68
Figura 4.11: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=4,40 (a) R1 - Referência, (b) C6 – 24% de PEAD, (c) C9 – ~50% de PEAD, (d) C7 – ~80% de PEAD.....	68
Figura 4.12: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=5,25 (a) R2 - Referência, (b) C1 – 24% de PEAD, (c) C5 – ~50% de PEAD, (d) C3 – ~80% de PEAD.....	68
Figura 4.13: Compósitos com a/c=3,75 (a) R3 - Referência, (b) C2 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C4 - Máximo de agregados de PEAD.....	70
Figura 4.14: Compósitos com a/c=4,4 (a) R1 - Referência, (b) C6 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C7 - Máximo de agregados de PEAD.....	71
Figura 4.15: Compósitos com a/c=5,2 (a) R2 - Referência, (b) C1 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C3 - Máximo de agregados de PEAD.....	72
Figura 4.16: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta resistência à compressão.....	76
Figura 4.17: Variação da resistência à compressão com a incorporação de partículas de PEAD.....	77
Figura 4.18: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta resistência à compressão.....	78
Figura 4.19: Superfície de resposta da variável resistência à compressão	79
Figura 4.20: Gráfico de contorno da variável resistência à compressão	79
Figura 4.21: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à compressão	80

Figura 4.22: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta resistência à flexão	81
Figura 4.23: Variação da resistência à flexão com a incorporação de partículas de PEAD	82
Figura 4.24: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta resistência à flexão	83
Figura 4.25: Superfície de resposta da variável resistência à flexão	83
Figura 4.26: Gráfico de contorno da variável resistência à flexão	84
Figura 4.27: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à flexão	84
Figura 4.28: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta porosidade aparente.....	85
Figura 4.29: Variação da porosidade aparente com a incorporação de partículas de PEAD	86
Figura 4.30: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta porosidade aparente.....	87
Figura 4.31: Superfície de resposta da variável porosidade aparente.....	88
Figura 4.32: Gráfico de contorno da variável porosidade aparente.....	88
Figura 4.33: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a porosidade aparente.....	89
Figura 4.34: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta absorção de água.....	90
Figura 4.35: Variação da absorção de água com a incorporação de partículas de PEAD	90
Figura 4.36: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta absorção de água.....	91
Figura 4.37: Superfície de resposta da variável absorção de água	92
Figura 4.38: Gráfico de contorno da variável absorção de água	92
Figura 4.39: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a absorção de água.....	93

Figura 4.40: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta densidade volumétrica.....	94
Figura 4.41: Variação da densidade volumétrica com a incorporação de partículas de PEAD.....	95
Figura 4.42: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta densidade volumétrica.....	96
Figura 4.43: Superfície de resposta da variável densidade volumétrica.....	96
Figura 4.44: Gráfico de contorno da variável densidade volumétrica.....	97
Figura 4.45: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a densidade volumétrica.....	97
Figura 4.46: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta densidade aparente.....	99
Figura 4.47: Variação da densidade aparente com a incorporação de partículas de PEAD	99
Figura 4.48: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta densidade aparente.....	100
Figura 4.49: Superfície de resposta da variável densidade aparente	101
Figura 4.50: Gráfico de contorno da variável densidade aparente	101
Figura 4.51: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar densidade aparente	102
Figura 4.52: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta velocidade de ultrassom.....	103
Figura 4.53: Variação da UPV com a incorporação de partículas de PEAD	104
Figura 4.54: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta velocidade de ultrassom.....	105
Figura 4.55: Superfície de resposta da variável velocidade de ultrassom.....	105
Figura 4.56: Gráfico de contorno da variável velocidade de ultrassom	106
Figura 4.57: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à compressão	106

Figura 4.58: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta módulo dinâmico	108
Figura 4.59: Variação do módulo dinâmico com a incorporação de partículas de PEAD	108
Figura 4.60: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta módulo dinâmico	109
Figura 4.61: Superfície de resposta da variável módulo dinâmico.....	110
Figura 4.62: Gráfico de contorno da variável módulo dinâmico.....	110
Figura 4.63: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar módulo dinâmico	111
Figura 4.64: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta módulo dinâmico específico	112
Figura 4.65: Variação do módulo dinâmico específico com a incorporação de partículas de PEAD	113
Figura 4.66: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta módulo dinâmico específico	114
Figura 4.67: Superfície de resposta da variável módulo dinâmico específico	115
Figura 4.68: Gráfico de contorno da variável módulo dinâmico específico	115
Figura 4.69: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar módulo dinâmico específico	116
Figura 4.70: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 1.....	119
Figura 4.71: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 2.....	121
Figura 4.72: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 3.....	122
Figura 4.73: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 4.....	124
Figura 4.74: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 5.....	126
Figura 4.75: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 6.....	128
Figura 4.76: Correlação entre as variáveis respostas.....	130
Figura 4.77: UPV e Ed ao longo do período de cura.....	134
Figura 4.78: UPV e Ed com diferentes níveis de umidade.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Distribuição granulométrica para telhas cimentícias e configuração de trabalho	52
Tabela 3.2: Componentes da Mistura	57
Tabela 3.3: Planejamento de Misturas	58
Tabela 3.4: Planejamento de Misturas – Experimento I	59
Tabela 3.5: Referências	59
Tabela 3.6: Corpos de prova fabricados	63
Tabela 4.1: Resultados do experimento (parte 1)	74
Tabela 4.2: Resultados do experimento (parte 2)	75
Tabela 4.3: ANOVA para o modelo relativo à variável resistência à compressão	77
Tabela 4.4: Ajustes do modelo polinomial aplicado à variável resistência à flexão	82
Tabela 4.5: ANOVA para o modelo relativo à variável porosidade aparente	86
Tabela 4.6: ANOVA para o modelo relativo à variável absorção de água	91
Tabela 4.7: ANOVA para o modelo relativo à variável densidade volumétrica	95
Tabela 4.8: ANOVA para o modelo relativo à variável densidade aparente	100
Tabela 4.9: ANOVA para o modelo relativo à variável velocidade de ultrassom	104
Tabela 4.10: ANOVA para o modelo relativo à variável módulo dinâmico	109
Tabela 4.11: ANOVA para o modelo relativo à variável módulo dinâmico específico	113
Tabela 4.12: Ótimos individuais	117
Tabela 4.13: Variação das importâncias nos cenários de otimização	117
Tabela 4.14: Respostas Ótimas para o Cenário 1	120
Tabela 4.15: Respostas Ótimas para o Cenário 2	121
Tabela 4.16: Respostas Ótimas para o Cenário 3	123
Tabela 4.17: Respostas Ótimas para o Cenário 4	125
Tabela 4.18: Respostas Ótimas para o Cenário 5	127
Tabela 4.19: Respostas Ótimas para o Cenário 6	129
Tabela 4.20: Análise de regressão (Parte 1)	131

Tabela 4.21: Análise de regressão (Parte 2)	132
---	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Conceitos de materiais compósitos	28
Quadro 2.2: Relações de importância entre o Alvo e os Limites do <i>Desirability</i>	47
Quadro 2.3: Objetivos de Otimização no Método de Derringer.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> – Análise de Variância
ASTM	<i>American Society For Testing And Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
BSI	<i>British Standard Institution</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB	<i>Crushed Brick</i> - Tijolo Triturado
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DMT	<i>Dimethyl terephthalate</i> - Dimetil tereftalato
DoE	<i>Design of Experiments</i> – Planejamento de Experimentos
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
ISI	<i>Institute for Scientific Information</i> - Instituto de Informação Científica
LDCAL	Polietileno de Baixa Densidade Linear Preenchido com Carbonato de Cálcio
MDE	<i>Mixture Design Experiment</i> - Projetos de experimentos de misturas
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NA	<i>Natural aggregate</i> – Agregado Natural
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PEABD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEN	<i>Polyethylene naphthalate</i> - Naftalato de polietileno
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i> - Tereftalato de polietileno
PP	Polipropileno
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> - Pavimento Asfáltico Recoberto
RPA	<i>Recycled Plastic Aggregates</i> – Agregados Poliméricos Reciclados
TPE	<i>Thermoplastic polyester elastomers</i> - Elastômeros de poliéster termoplásticos
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UPV	<i>Ultra Pulse Velocity</i> – Velocidade de Ultrassom
WWF	<i>World Wildlife Fund</i> - Fundo Mundial para a Natureza
ZTI	Zona de Transição de Interface

SUMÁRIO

1. Introdução.....	19
1.1. Contexto da Pesquisa.....	19
1.2. Justificativa.....	21
1.3. Objetivos.....	23
1.4. Estrutura do Trabalho.....	24
2. Revisão de Literatura.....	25
2.1. Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis.....	25
2.2. Materiais Compósitos.....	27
2.2.1. Compósitos particulados de matriz cerâmica.....	30
2.2.2. Matriz Cimentícia.....	30
2.2.3. Fase Dispersa.....	36
2.3. Compósitos cimentícios com compactação uniaxial.....	37
2.3. Resíduos plásticos como agregados em compósitos cimentícios.....	37
2.4. Projeto de Experimentos.....	41
2.4.1. Projeto de Experimentos de Misturas.....	42
2.5. Otimização pelo MDE.....	45
2.5.1.1. Método <i>Desirability</i>	46
3. Metodologia Experimental.....	50
3.1. Reconhecimento e apresentação do Problema.....	50
3.1.1. Materiais.....	50
3.1.2. Distribuição granulométrica.....	52
3.2. Seleção das variáveis-respostas.....	53
3.2.1. Resistência à compressão.....	53
3.2.2. Resistência à flexão.....	54

3.2.3.	Porosidade Aparente, Absorção de água, Densidade Volumétrica e aparente	55
3.2.4.	Velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade Dinâmico	56
3.3.	Planejamento Experimental	57
3.4.	Fabricação dos corpos de prova.....	60
4.	Resultados e Análise.....	64
4.1.	Análise estrutural	65
4.2.	Microestrutura.....	69
4.3.	Variáveis respostas	73
4.3.1.	Resistência à compressão	76
4.3.2.	Resistência à flexão	81
4.3.3.	Porosidade aparente	85
4.3.4.	Absorção de água.....	89
4.3.5.	Densidade Volumétrica	94
4.3.6.	Densidade Aparente.....	98
4.3.7.	Velocidade de ultrassom.....	103
4.3.8.	Módulo de Elasticidade (Dinâmico).....	107
4.4.	Otimização	116
4.5.	Relação entre as variáveis respostas	129
4.6.	Velocidade de ultrassom e módulo dinâmico ao longo do tempo	133
4.7.	Umidade influenciando velocidade de ultrassom e módulo dinâmico	134
5.	Considerações Finais	136
	APÊNDICE A	139
	Referências	141

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto da Pesquisa

O reaproveitamento ou reciclagem de resíduos sólidos poliméricos tem sido uma preocupação crescente. Seu descarte no meio ambiente ainda ocorre, em muitos casos, sem o devido controle ou tratamento adequado, aumentando as emissões de carbono e os níveis de poluição. Muitos estudos na área de materiais têm sido desenvolvidos para encontrar possibilidades de reaproveitamento, aliando questões ambientais, econômicas e tecnológicas (FERREIRA, DE BRITO e SAIKIA, 2012; YANG *et al.*, 2015; ALFAHDAWI *et al.*, 2016; ARULRAJAH *et al.*, 2017; JASSIM, 2017; OZBAKKALOGLU, GU e GHOLAMPOUR, 2017; BADACHE *et al.*, 2018; TAFHEEM *et al.*, 2018).

Há o constante crescimento das aplicações de materiais poliméricos devido ao seu baixo custo e facilidade de fabricação (ARULRAJAH *et al.*, 2017; JASSIM, 2017). Esse alto nível de produção leva a um grande acúmulo de resíduos poliméricos, sendo seu descarte um grande desafio para as empresas (JASSIM, 2017). Um levantamento feito por Geyer, Jambeck e Law (2017) relativo à produção, uso e destinação de todo o polímero já produzido indica que a produção mundial, de 1950 a 2015, foi de 8,3 bilhões de toneladas de polímero, sendo que 2,5 bilhões de toneladas, aproximadamente 30% do total produzido, permanecem em uso. Considerando resíduos primários e secundários (reciclados), há um total cumulativo de 6,3 bilhões de toneladas de resíduos poliméricos gerados. Deste total, somente 9% foi reciclado, 12% foi incinerado e 79% acumula-se em aterros ou está poluindo o ambiente natural. O estudo ainda indica que metade da produção de polímeros ocorreu entre os anos de 2002 a 2015, havendo a previsão de disposição de 13 bilhões de toneladas de polímeros em aterros ou meio ambiente até 2050 (GEYER, JAMBECK e LAW, 2017).

Segundo ABIPLAST (2016), a produção mundial de resíduos poliméricos em 2015 foi de 269 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por 6,2 milhões de toneladas (2,3%). Aliado a isto, tem-se que 42% da composição gravimétrica da fração seca reciclável dos resíduos sólidos coletados no Brasil corresponde a materiais poliméricos,

contando com reciclagem de 615 mil toneladas, sendo quase 2 milhões de toneladas destinada a incineração ou disposta em aterros ou na natureza.

Os resíduos poliméricos possuem em sua composição elementos tóxicos, como cádmio e chumbo (FERREIRA, DE BRITO e SAIKIA, 2012; TAFHEEM *et al.*, 2018) e sua biodegradabilidade é extremamente lenta, podendo levar mais de 600 anos para ocorrer (BADACHE *et al.*, 2018; JASSIM, 2017). Sua disposição no ambiente ou em aterros polui a água e o solo, podendo bloquear o sistema de drenagem do solo, deteriorando sua fertilidade e reduzindo a taxa de percolação da água. Dessa forma, podem proporcionar ambientes favoráveis à reprodução de mosquitos e outras doenças transmitidas pela água (SIDDIQUE, KHATIB e KAUR, 2008; TAFHEEM *et al.*, 2018). Além disso, a vida marinha é contaminada ao se dispor resíduos poliméricos em corpos d'água como rios, córregos, mares e outros. A saúde de animais aquáticos é prejudicada ao consumirem estes resíduos, visto sua grande toxicidade (TAFHEEM *et al.*, 2018).

Assim, reafirma-se a necessidade de desenvolvimento de pesquisas que resultem em alternativas eficientes para o reaproveitamento desses materiais, evitando que poluam e prejudiquem a natureza. Badache *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Ferreira, De Brito e Saikia, 2012; Gavela *et al.*, 2004; Jassim, 2017; Ozbakkaloglu, Gu e Gholampour, 2017; Tafheem *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2015 avaliam que dentre as possíveis alternativas para reuso dos materiais poliméricos, uma forma barata e ecológica é a sua utilização na produção de produtos cimentícios, visto que o fluxo de resíduos é removido por um longo período devido à sua longa vida útil.

A substituição de agregados naturais por agregados poliméricos afeta diretamente as propriedades físicas e mecânicas compósitos cimentícios (GAVELA *et al.*, 2004; GU e OZBAKKALOGLU, 2016; SHARMA e BANSAL (2016); JAIN e KANSAL, 2016). A redução na densidade e melhoria da ductilidade são obtidas pelas inclusões de agregados plásticos, mas a resistência à compressão, à flexão e a porosidade são prejudicadas. Dessa forma, é necessário desenvolver estudos experimentais relacionados com a incorporação de materiais poliméricos em compósitos cimentícios para a sua caracterização físico-mecânica (GAVELA *et al.*, 2004; OZBAKKALOGLU, GU e GHOLAMPOUR, 2017).

A velocidade de ultrassom é um teste não destrutivo simples, rápido e barato para a caracterização de produtos cimentícios (PANZERA, CHRISTOFORO e COTA, 2011; KURTULUS e BOZKURT, 2011; SADRMOHTAZI e ZANOOSH, 2012; PANZERA

et al., 2012; BOGAS, GOMES e GOMES, 2013; PUCINOTTI, 2015; GEHLOT *et al.*, 2016; RAO, SRAVANA e RAO, 2016; WANG e WANG, 2017; RASHID e WAQAS, 2017; ALI-BENYAHIA *et al.*, 2017). O teste de velocidade de ultrassom tem muitas vantagens em comparação com os métodos convencionais de ensaios não destrutivos, porque está ligado às propriedades mecânicas elásticas do material de teste (POPOVICS e SUBRAMANIAM, 2015). Além disso, alterações nos parâmetros de pulso ultrassônico podem ser usadas para determinar os danos e defeitos em materiais à base de cimento (BUI *et al.*, 2013). A literatura aberta apresentou modelos teóricos para a predição de propriedades físico-mecânicas de compósitos cimentícios baseados em medidas de UPV (PANZERA, CHRISTOFORO e COTA, 2011; KURTULUS e BOZKURT, 2011; SADRMOHTAZI e ZANOOSH, 2012; PANZERA *et al.*, 2012; BOGAS, GOMES e GOMES, 2013; PUCINOTTI, 2015; POPOVICS e SUBRAMANIAM, 2015; GEHLOT *et al.*, 2016; RAO, SRAVANA e RAO, 2016; WANG e WANG, 2017; RASHID e WAQAS, 2017; ALI-BENYAHIA *et al.*, 2017).

1.2. Justificativa

A utilização de fibras poliméricas para reforço de concreto foi estudada pela primeira vez durante a década de 90. Posteriormente novos estudos abordaram a produção de concreto com resinas poliméricas e, mais recentemente, com agregados poliméricos e agregados poliméricos reciclados (*recycled plastic aggregates* – RPA) (FERREIRA, BRITO e SAIKA, 2012). Ainda assim Gavela *et al.* (2004) e Ozbakkaloglu, Gu e Gholampour (2017) afirmam que é necessário o desenvolvimento de estudos experimentais relativos à incorporação de agregados poliméricos reciclados, em produtos cimentícios para sua caracterização físico-mecânica.

A utilização de resíduos poliméricos em substituição a agregados naturais pode não só ser uma forma de reduzir o impacto da poluição ambiental e os custos de fabricação, como também uma forma de melhorar a ductibilidade de compósitos cimentícios, devido ao seu caráter dúctil (CHEN *et al.*, 2019).

De todos os tipos de polímeros, o polietileno (PE) é o mais produzido no mundo, correspondendo a 36% da produção mundial (GEYER, JAMBECK e LAW, 2017), o segundo mais reciclado com um percentual de aproximadamente 15% (GU e OZBAKKALOGLU, 2016). O Brasil é o quarto país no mundo que mais gera resíduo

plástico (WIT *et al.*, 2019), sendo o polietileno de alta densidade (PEAD) o segundo mais consumido no país (17,4%) (ABIPLAST, 2016). O PEAD é um polímero atóxico, impermeável, flexível, com alta resistência química, ao impacto e à abrasão, baixo custo e baixa densidade. É amplamente utilizado na produção de utensílios domésticos, brinquedos, tubos, sacolas plásticas, embalagens e recipientes. O PEAD pode ser considerado um material adequadamente reciclável, visto que não emite gases prejudiciais à atmosfera no processo de reciclagem (ALI *et al.*, 2017).

Gu e Ozbakkaloglu (2016) realizaram uma revisão tomando como base 84 trabalhos publicados entre os anos de 1994 e 2015 que tratavam da utilização de agregados poliméricos em cimento. Destes, cinco estudaram da utilização de PEAD, sendo um como fibra, quatro como partícula, sendo dois deles juntamente com outros tipos de plásticos. No trabalho de Sharma e Bansal (2016) analisaram 18 artigos publicados entre os anos de 2007 e 2015, sendo que somente um deles utilizou PEAD como fibra.

Em 20 de junho de 2019 realizou-se um exame nas principais bases de dados de artigos científicos – *ISI Web of Science e Engineering Village* – para verificar as pesquisas relativas à utilização de partículas de PEAD como agregados para compósitos cimentícios. A pesquisa foi realizada com os termos “(concrete OR mortar OR cement) AND (“recycled plastic” OR “plastic waste” OR “recycled polymer” OR “polymeric waste”) AND (HDPE OR “high density polyethylene”)” e foram encontrados 23 trabalhos no *Web of Science* e 19 no *Engineering Village*. Analisando os trabalhos, somente 8 tratam da incorporação de resíduos de PEAD em compósitos cimentícios, que são apresentados detalhadamente no tópico 2.3.

Ali *et al.* (2017), Arulrajah *et al.* (2017), Badache *et al.* (2018), Chen *et al.* (2019), Jassim (2017), Rahim *et al.* (2013), Şimşek e Uygunoğlu (2017) e Tafheem *et al.* (2018) estudaram o efeito da incorporação de partículas de resíduos poliméricos, dentre elas PEAD, em compósitos cimentícios avaliando diversas propriedades: acústicas, físico-mecânicas e térmicas. Dentre estes, Ali *et al.* (2017), Badache *et al.* (2018), Chen *et al.* (2019), Jassim (2017), Rahim *et al.* (2013) utilizaram somente resíduos de PEAD. Chen *et al.* (2019) desenvolveram uma análise de regressão para modelar a relação entre o percentual de partículas de PEAD e as propriedades mecânicas analisadas, obtendo bons resultados. Şimşek e Uygunoğlu (2017) realizaram uma regressão multivariada e otimizaram as proporções de partículas de sete diferentes polímeros, cimento, cinza

volante, água, superplastificantes, agregados fino e graúdo, utilizando métodos de programação linear.

Apesar da pesquisa ainda incipiente, a incorporação de partículas de PEAD como agregados em compósitos cimentícios pode ser benéfica para a aplicação em produtos da construção civil. De forma geral, os resultados encontrados mostram-se promissores, apontando para a redução da densidade, aumento da ductilidade e do isolamento acústico e térmico. Por outro lado, há a redução das resistências à compressão e flexão, aumento da absorção de água, principalmente pela menor adesão da partícula polimérica à matriz cimentícia.

Neste contexto esta tese de doutorado visa: Otimizar a incorporação de resíduos poliméricos em compósitos cimentícios por meio de arranjos de misturas entre matriz cimentícia e agregados de PEAD e de quartzo, analisando sua influência na microestrutura e propriedades físico-mecânicas.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste projeto é otimizar arranjos de misturas de compósitos cimentícios compactados uniaxialmente com incorporação de resíduos de PEAD analisando sua influência nas propriedades físico-mecânicas e microestrutura.

Para isso, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar uma alternativa para a reutilização de resíduos de PEAD.
- Investigar o efeito da adição de partículas de PEAD nas propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, resistência à flexão, porosidade aparente, absorção de água, densidade aparente, densidade volumétrica, velocidade de ultrassom, módulo dinâmico, módulo dinâmico específico) e microestruturais de compósitos cimentícios compactados uniaxialmente.
- Modelar as variáveis respostas em função das proporções de matriz cimentícia, agregados de PEAD e quartzo, utilizando a metodologia Projeto de Experimentos de Misturas;
- Otimizar a mistura de matriz cimentícia, agregados de PEAD e quartzo para cada uma das variáveis individualmente, utilizando o método *Desirability*.

- Definir cenários para otimização multiobjectivo por meio do método *Desirability*, da mistura de matriz cimentícia, agregados de PEAD e quartzo levando em conta as principais variáveis-respostas.
- Estudar a variação na velocidade de ultrassom ao longo do período de cura e em diferentes níveis de umidade.
- Modelar a relação entre as variáveis- respostas relativas às propriedades físico-mecânicas estudadas.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 contextualiza o tema da pesquisa, apresenta a justificativa para a realização do trabalho, bem como os objetivos da tese. O Capítulo 2 constitui a fundamentação teórica do trabalho, abordando os temas: Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis, Materiais Compósitos, Resíduos de PEAD em compósitos cimentícios, Planejamento e Otimização de Experimentos. No Capítulo 3 é apresentada a Metodologia Experimental adotada. No Capítulo 4 são apresentados os Resultados e no Capítulo 5 as Considerações finais. Por fim, os Apêndices e Referências utilizadas no trabalho são apresentados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu em 1987 por meio do documento “Nosso Futuro Comum” do inglês “*Our Common Future*”, da Comissão Mundial sobre o Meio-Ambiente e Desenvolvimento criada pelas Nações Unidas (ONU). No documento define-se que o desenvolvimento sustentável deve “garantir (...) as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991, p. 9). O desenvolvimento sustentável se baseia em três principais dimensões: sustentabilidade ambiental, econômica e social, como ilustrado na Figura 2.1.

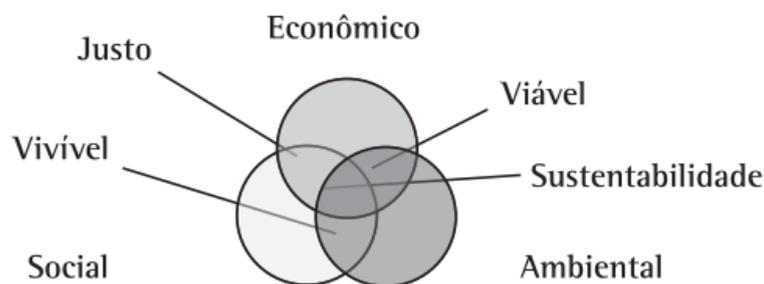


Figura 2.1: Sustentabilidade e suas dimensões.

Fonte: Oliveira *et al.* (2012)

Segundo Manzini e Vezzoli (2002) deve-se considerar a sustentabilidade como um objetivo a ser alcançado e, não somente, uma direção a ser seguida. Isso implica na alteração dos padrões de consumo da sociedade e dos sistemas de produção atuais. Para isso, é necessário propor novas soluções de consumo, ou seja, fornecer opções de produtos e/ou serviços que colaborem para um processo de desmaterialização da demanda social. Segundo Lockrey e Johnson (2013) a sustentabilidade é uma questão global e será um dos principais direcionadores na formação de *designers* e engenheiros que precisarão se tornar praticantes da sustentabilidade em um futuro bem próximo.

Nesse sentido, as práticas adotadas no desenvolvimento de produtos também devem ser adequadas, possibilitando o alcance da sustentabilidade. Luttropp e Largerstedt (2006)

destacam que o desenvolvimento de produtos ambientalmente conscientes é uma tarefa complexa, visto que, por questões culturais, poucos são os consumidores dispostos a pagar por produtos de perfil sustentável, ainda que o valor seja equivalente aos demais. Dessa forma, é um desafio desenvolver produtos sustentáveis, pois é necessário que atendam às necessidades ou forneçam algum tipo de benefício ao consumidor, contando com um custo econômico e ambiental mais baixo. Sendo assim, a proposta de novas soluções deve aliar a dimensão técnica à sociocultural da inovação para garantir que o desenvolvimento dos produtos alcance de fato a sustentabilidade (LJUNGBERG, 2007; LUTTROPP e LAGERSTEDT, 2006).

Durante as fases iniciais do desenvolvimento de um produto, tradicionalmente levam-se em conta diversos fatores como custos, assistência, legislação, aspectos culturais e estéticos. Além desses fatores, já devem ser considerados os requisitos ambientais agindo preventivamente. Essa postura se mostra mais eficaz do que buscar medidas de recuperação ou paliativas para os danos já causados (LJUNGBERG, 2007; MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Essa nova abordagem utiliza o conceito de ciclo de vida dos produtos, enfatizando a preocupação em considerar as atividades de produção, distribuição, utilização e eliminação/descarte durante o processo de desenvolvimento do produto. Levando em conta o conceito de ciclo de vida do produto, objetiva-se reduzir a carga ambiental associada a ele (LJUNGBERG, 2007; MANZINI e VEZZOLI, 2002; SAPUAN, 2017).

Existem algumas estratégias para integrar os requisitos ambientais no desenvolvimento de produtos e serviços, sendo: a minimização de recursos, escolha de recursos e processo de baixo impacto ambiental, otimização da vida dos produtos, facilidade de desmontagem e extensão da vida dos materiais (LJUNGBERG, 2007; MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Considerando a alta geração de resíduos no contexto mundial, a estratégia de extensão da vida dos materiais pode ser uma opção para evitar o descarte de materiais, além de auxiliar na redução da utilização de recursos virgens para a produção de novos materiais correspondentes, que também seriam descartados. A extensão da vida dos materiais pode ocorrer de duas formas: pelo reprocessamento ou reciclagem para sua transformação em matéria-prima secundária ou pela incineração, recuperando seu conteúdo energético (MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Não é simples afirmar qual das duas opções causa maior ou menor impacto ambiental. Porém, para materiais poliméricos é verdade que a incineração leva a produção de gases e resultam em resíduos prejudiciais. A reciclagem tem um relativo impacto ambiental devido a poluição associada a seu transporte, porém estudos mostram que é possível um real ganho ambiental com esta prática (LJUNGBERG, 2007; MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Segundo Manzini e Vezzoli (2002) para reciclagem de materiais de pós-consumo, pode-se considerar as seguintes fases:

- Recolher e transportar;
- Identificar e separar;
- Desmontar e/ou desmembrar;
- Limpar e/ou lavar;
- Pré-produzir matérias primas secundárias.

Conforme destacado por Badache *et al.*, (2018), Chen *et al.* (2019), Ferreira, De Brito e Saikia (2012), Gavela *et al.* (2004), Jassim (2017), Ozbakkaloglu, Gu e Gholampour (2017), Tafheem *et al.* (2018) e Yang *et al.* (2015) uma forma eficiente de reaproveitamento de resíduos plásticos é sua utilização em materiais compósitos, principalmente em compósitos cimentícios. Apesar da grande quantidade de resíduo plástico gerado, cerca de 6,3 milhões de toneladas, os custos das operações de recolhimento, transporte e armazenagem são um empecilho à concretização da reciclagem dos materiais.

2.2. Materiais Compósitos

A definição de materiais compósitos não é um consenso entre os autores da área, sendo apresentadas várias delas no Quadro 2.1. A denominação veio da palavra ‘composto’ o que pode significar materiais formados por partes (ou constituintes) diferentes.

Segundo Daniel e Ishai (1994) para que seja possível a classificação de um material como compósito é necessário o atendimento a três critérios:

- Presença dos constituintes em proporções maiores que 5%;
- Constituintes com propriedades diferentes;
- Compósito com propriedades notoriamente diferentes dos materiais constituintes.

Uma questão importante é o fato de os materiais compósitos serem materiais multifásicos obtidos artificialmente. Sendo assim, materiais que se formam a partir de fenômenos naturais, como grande parte das ligas metálicas e materiais cerâmicos, não se enquadram nessa definição, não podendo, portanto, ser considerados materiais compósitos (CALLISTER, 2007).

Quadro 2.1: Conceitos de materiais compósitos

Autor	Definição
Daniel e Ishai (1994)	Sistema de materiais consistindo de duas ou mais fases numa escala macroscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são projetados para serem superiores àqueles dos constituintes atuando independentemente.
Gibson (1994)	Combinação de dois ou mais materiais (metais, polímeros e/ou cerâmicos) em uma unidade estrutural macroscópica.
Askeland (1998)	União de materiais.
Jones (1999)	Combinação de dois ou mais materiais em uma escala macroscópica para formar um terceiro material útil.
Padilha (2007)	Materiais conjugados.
(Mendonça (2005) e Newell (2010)	Conjunto de dois ou mais materiais diferentes.
Shackelford (2006)	Combinações de materiais individuais.
Kaw (2006)	Material estrutural composto por dois ou mais constituintes não solúveis entre si combinados a um nível macroscópico, composto por uma fase matriz (materiais contínuos) e outra de reforço (partículas, fibras ou flocos).
ASTM D3878 (2007)	Substância constituída de dois ou mais materiais, selecionados para formar um material exibindo características desejáveis, apresentando propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.
Callister (2007)	Material multifásico feito artificialmente.
Panzer (2012)	Mistura de duas ou mais fases imiscíveis, sendo uma denominada “matriz” (responsável pela adesão) e as demais “dispersa”, a fim de otimizar um desempenho específico.

Segundo Daniel e Ishai (1994) utilizando como base o tipo de matriz, fase dispersa, ou mesmo o processo de fabricação dos compósitos, é possível classificá-los de diferentes formas. Um compósito pode ser cerâmico, metálico ou polimérico quando classificado em relação ao tipo de matriz utilizada. Levando em conta o tipo de fase dispersa, os compósitos são classificados em três categorias gerais (Figura 2.2). Particulados possuem partículas, de várias formas e tamanhos, dispersas aleatoriamente em uma matriz; fibras descontínuas são aqueles que possuem pequenas fibras (*whiskers*) como reforço, podendo estar dispostas de maneira unidirecional ou aleatória; fibras contínuas são aqueles reforçados com fibras longas, direcionadas paralelamente (unidirecional), formando

ângulos entre si (*crossply*) ou em várias direções (multidirecional). Além disso, os compósitos podem ser classificados como híbridos quando combinam diferentes fibras e/ou partículas (PANZERA *et al.*, 2011). Neste trabalho, utilizam-se os compósitos particulados híbridos de matriz cerâmica.

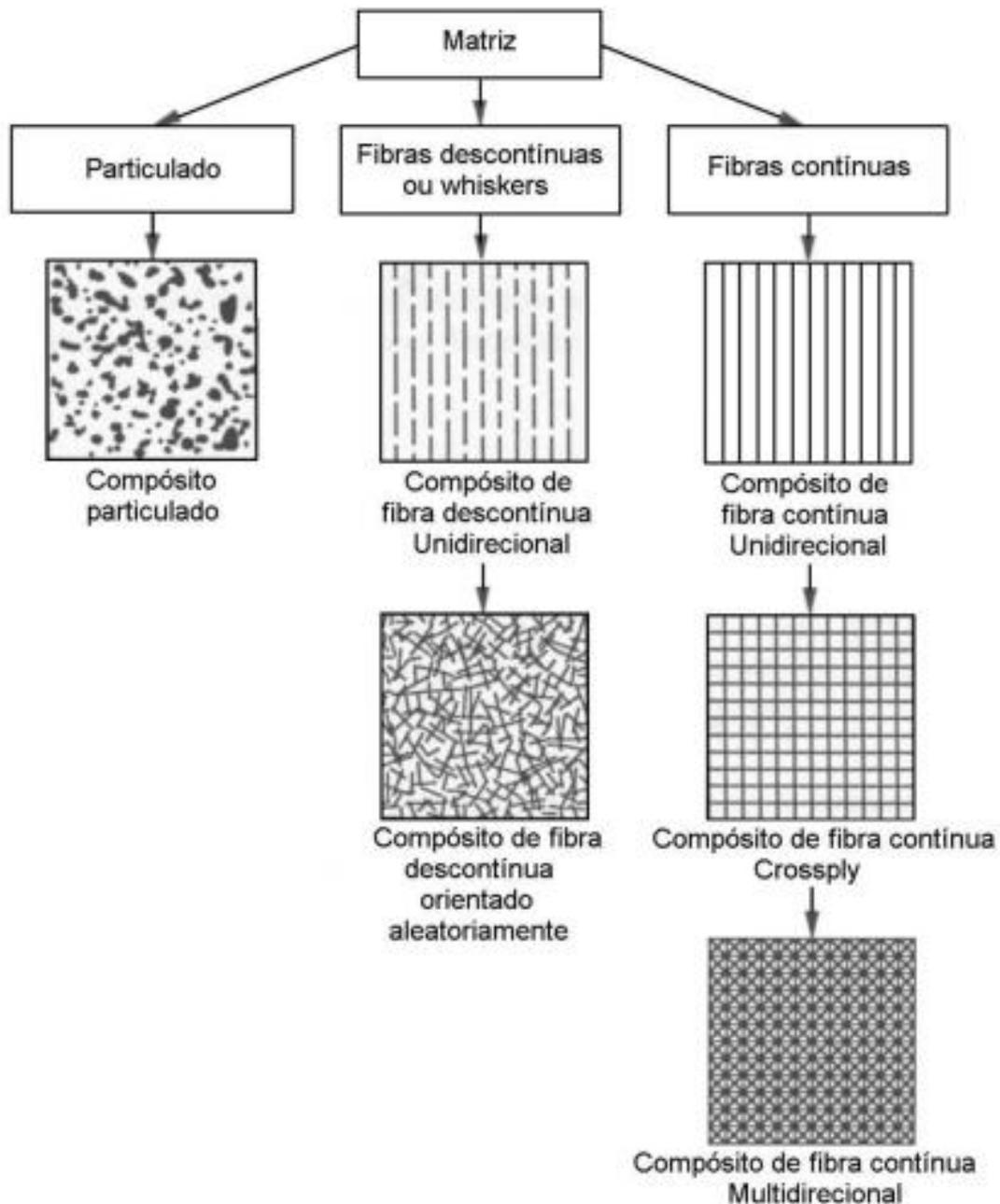


Figura 2.2: Classificação de materiais compósitos quanto a fase dispersa
Fonte: Daniel e Ishai (1994)

2.2.1. Compósitos particulados de matriz cerâmica

Os compósitos particulados possuem partículas de vários tamanhos e formas dispersas aleatoriamente pela da matriz, podendo ser materiais sintéticos ou naturais, metálicos, poliméricos ou cerâmicos. A existência de partículas em um compósito auxilia no aumento da rigidez, que está associada ao aumento do módulo de elasticidade, porém pouco impacta no aumento da resistência. Quando comparados aos compósitos reforçados por fibras possuem menor resistência à tração, porém exibem alto desempenho em carregamentos compressivos (CASARIL, 2009).

Materiais cerâmicos são formados tipicamente por elementos metálicos combinados com oxigênio ou carbono, nitrogênio ou enxofre, caracterizados por serem materiais duros, frágeis e resistentes ao calor e à corrosão (NEWELL, 2010).

2.2.2. Matriz Cimentícia

Dentre os materiais compósitos particulados com matriz cerâmica, podem-se destacar os materiais utilizados na construção civil como concreto, argamassas e outros produtos cimentícios, que serão tratados pelo termo ‘compósito cimentício’.

Sua estrutura interna é bastante complexa sendo que cada uma de suas fases constituintes é de natureza multifásica. É composta por pasta de cimento como matriz, agregados minerais e a interface entre a pasta e os agregados, além de fissuras e vazios. A pasta de cimento apresenta uma distribuição multifásica e heterogênea, com diferentes fases sólidas, microfissuras e poros. Com o decorrer do tempo, ocorrem mudanças microestruturais nos compostos formados na hidratação do cimento. Todas essas características permitem a classificação de produtos cimentícios como materiais compósitos tanto em escala macro quanto microscópica (MEHTA e MONTEIRO, 1994; PANZERA, *et al.*, 2008).

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) determina as especificações e classificação dos agregados. Partículas que passam pela peneira de 75 mm e ficam retidas na peneira de 4,75 mm são classificadas como agregados graúdos. As partículas que passam para peneira de 4,75 mm e ficam retidas na peneira de 150 µm são classificadas como agregados miúdos.

2.2.2.1. Cimento Portland

O cimento Portland é produzido pela moagem e mistura íntima de argila e minerais que contêm cal em proporções adequadas. Suas matérias-primas são constituídas principalmente de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), magnésia (MgO) e anidrido sulfúrico (SO₃). A mistura resultante destes materiais é aquecida a uma temperatura de aproximadamente 1400°C em forno rotativo e então é resfriado. O material resultante é denominado clínquer, que é moído e misturado a uma pequena quantidade de gipsita (gesso), para retardar a pega do cimento, resultando no cimento Portland (CALLISTER, 2007; HUNTZINGER e EATMON, 2009; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo a norma NBR 5732, pode-se definir cimento Portland como um “aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio” (ABNT, 1991). Pode ser classificado como um cimento hidráulico por sua natureza se desenvolver por reações químicas com a água (CALLISTER, 2007).

O endurecimento e a cura do cimento Portland ocorrem por meio de reações químicas simultâneas entre os constituintes e a água. Sua composição heterogênea faz com que as reações de hidratação sejam complexas, pois estas ocorrem em diferentes velocidades dependendo do composto. Os aluminatos se hidratam mais rapidamente, auxiliando no enrijecimento e pega. Os silicatos necessitam de um período maior para a hidratação, correspondem a 75% da composição do cimento Portland e desempenham um papel importante no endurecimento e desenvolvimento da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No Brasil são comercializados diversos tipos de cimento Portland, que se diferenciam pela proporção de clínquer, sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições e por suas propriedades intrínsecas. Para produtos pré-moldados é utilizado o cimento Portland CPV-ARI, pois este tem como especificidade atingir elevada resistência já nos primeiros dias hidratação. Além do tipo de cimento utilizado, há outros fatores envolvidos na fabricação de compósitos cimentícios que influenciam diretamente suas propriedades, o quais serão descritos no tópico a seguir.

2.2.2.2. Fatores que influenciam no desempenho de compósitos cimentícios

Compósitos desenvolvidos à base de cimento podem possuir estruturas e composições específicas, dependendo da especificidade de sua aplicação, havendo assim variação em suas propriedades mecânicas. A obtenção de compósitos cimentícios de alto desempenho mecânico incluem a otimização da geometria e tamanho das partículas, uso de partículas ultrafinas, baixa relação água/cimento, aditivos químicos, adição pozolânica, fabricação por prensagem, cura em alta temperatura ou em autoclave (PANZERA *et al.*, 2008).

2.2.2.2.1. Relação água e cimento

Em compósitos cimentícios de alto desempenho, a relação água/cimento é considerada um dos fatores com maior influência na resistência mecânica e em outras propriedades (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Quanto menor esta relação maior será a resistência do concreto, desde que haja uma quantidade mínima necessária à sua hidratação. Quando há uma redução na relação água/cimento, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras (Figura 2.3).

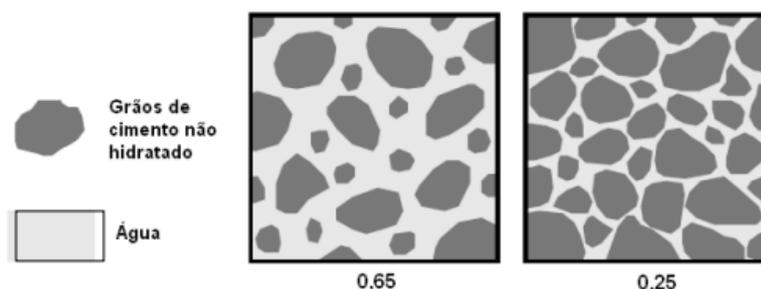


Figura 2.3: Representação esquemática de duas pastas de cimento, uma contendo uma relação água/cimento 0,65 e a outra 0,25

Fonte: Aitcin (2000)

Reduzir a relação água/cimento implica no aumento da densidade aparente e resistência à compressão e na redução da porosidade e do tamanho médio dos poros, além de acelerar a hidratação inicial do cimento (AITCIN, 2000; JAMBOR, 1976).

Quando é utilizada uma quantidade mínima de água em sua composição, cuja função prioritária é a hidratação do cimento, o concreto é denominado seco, possuindo um teor de umidade da mistura variando de 5% a 9% (FERNANDES, 2008). De uma maneira geral, para melhoria da trabalhabilidade, são adicionados superplastificantes em sua composição. Dependendo da aplicação, haverá a variação da dosagem do compósito,

sendo diretamente relacionada às propriedades físico-mecânicas desejadas (SCHUMACHER, 2007).

Para manuseio adequado deste tipo de material são utilizados equipamento que conciliam efeitos simultâneos de vibração e compressão, como extrusoras produtoras de blocos e telhas (JUVAS, 1993). Neste caso, o material pode ser desmoldado imediatamente à sua fabricação e possui uma resistência superior se comparado aos concretos plásticos, devido à menor quantidade de água utilizada (JUVAS, 1993). Ao contrário do previsto pela “Lei de Abram” que rege o comportamento de concretos plásticos, para concretos secos não há a melhora da resistência à compressão com a redução da relação água/cimento. A Figura 2.4 mostra o comportamento da resistência à compressão em função da relação água cimento, considerando uma mesma proporção de agregados/cimento, para concretos secos e plásticos (OLIVEIRA, 2004).

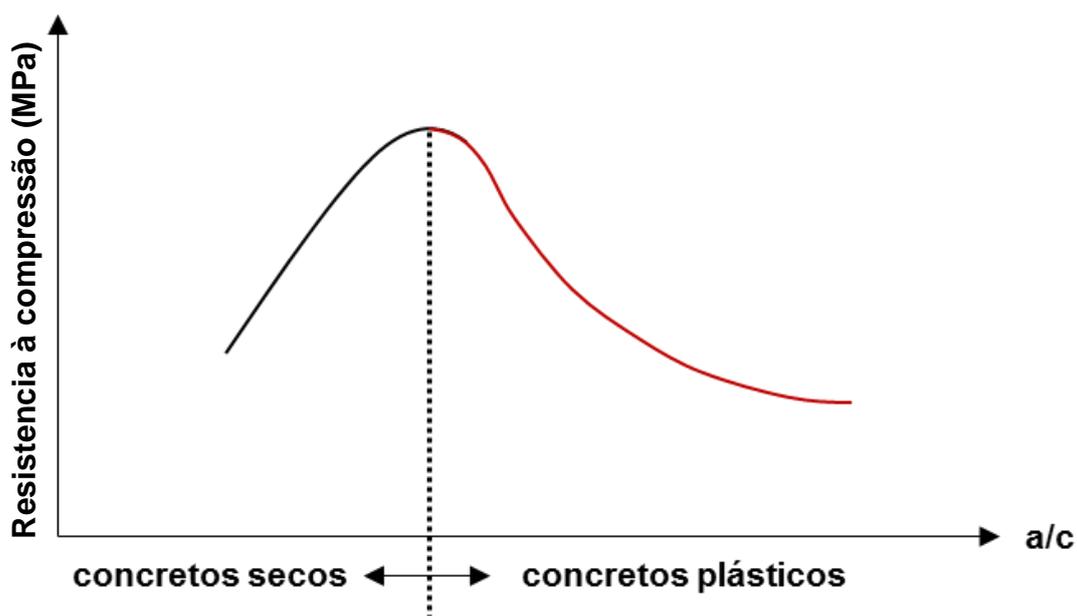


Figura 2.4: Resistência à compressão do concreto seco e plástico em função da relação água/cimento

Fonte: Oliveira (2004)

Considerando que a umidade da mistura é baixa, o aumento da relação água/cimento melhora sua trabalhabilidade e capacidade de compactação por reduzir o atrito interno entre os grãos. Com o aumento da água, consegue-se uma redução na porosidade total e aumento da resistência à compressão, fixados o traço e a energia de compactação (OLIVEIRA, 2004).

2.2.2.2.2. Tamanho de partícula e Partículas ultrafinas

Partículas podem possuir uma infinidade de formatos e tamanhos, tendo efeito direto sobre o empacotamento das partículas. Segundo McGeary (1961) o empacotamento de partículas está ligado à correta seleção de proporção e tamanho do material particulado, possibilitando que partículas menores ocupem os vazios deixados por partículas maiores de maneira sucessiva. A Figura 2.5 mostra esquematicamente o efeito da quantidade e tamanho de partículas na eficiência de empacotamento. Em (a) tem-se um sistema monodisperso, em (b) um sistema com deficiência de partículas grandes, em (c) a máxima densidade de empacotamento teórica, em (d) uma distribuição inadequada de tamanhos de partículas e em (e) deficiência de partículas pequenas.

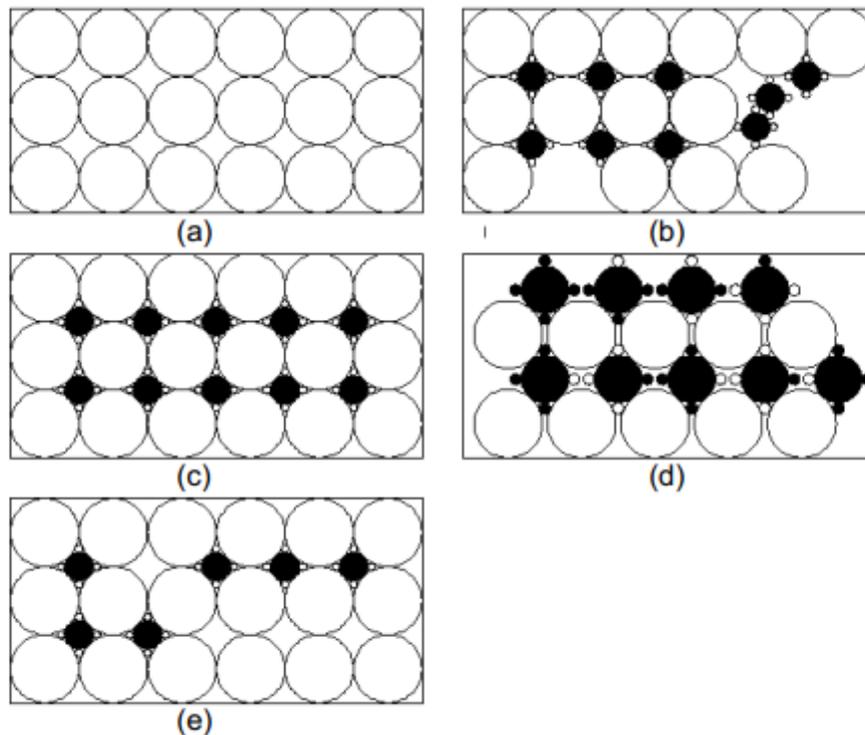


Figura 2.5: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento

Fonte: Pandolfelli *et al.* (2000)

A determinação da distribuição granulométrica irá impactar diretamente no empacotamento. Quando os vazios entre partículas de uma granulometria são preenchidos por partículas menores, possivelmente haverá empacotamento com menor porosidade. Por outro lado, caso sejam adicionadas partículas maiores que os vazios, haverá o deslocamento das partículas de sua posição original e surgimento de novos vazios,

piorando o empacotamento e aumentando a porosidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000, PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

2.2.2.2.3. Microestrutura da Partícula

O empacotamento também pode ser afetado pela morfologia e geometria das partículas. As partículas podem ser classificadas como arredondadas, subangulares ou angulares (Figura 2.6). As partículas arredondadas possuem o formato semelhante ao esférico, com arestas e faces bastante desgastadas. As angulares são aquelas pouco desgastadas, com arestas vivas. As subangulares possuem características intermediárias entre as arredondas e angulares.

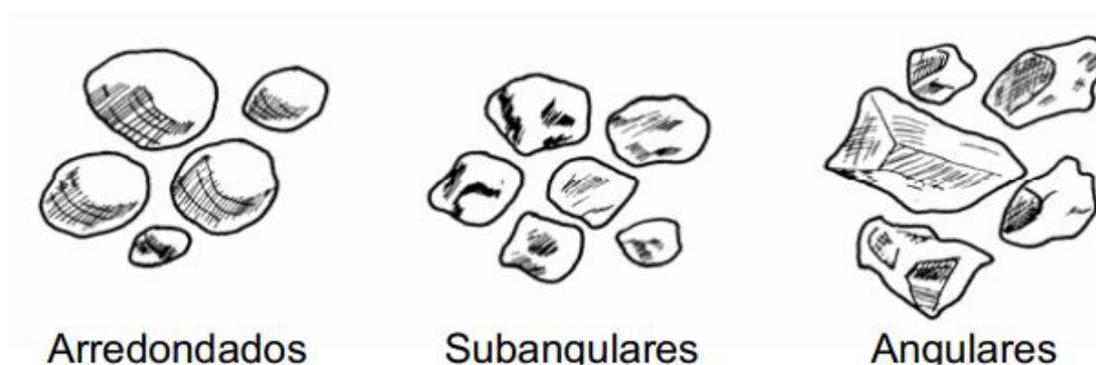


Figura 2.6: Formas características de partículas
Fonte: Muchon (1986)

Quanto mais esférica for a partícula, maior a densidade de empacotamento, visto que o atrito entre elas será reduzido devido ao seu formato regular. Quando as partículas são irregulares, ou seja, não esféricas, sua área superficial específica é maior, o que leva a um aumento no atrito a partir do contato de suas superfícies irregulares, levando à menor densidade de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000, PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

Segundo Neville (2011) há a influência da rugosidade superficial da partícula na adesão à matriz de cimento, bem como na demanda de água da mistura, especialmente no caso de partículas finas. O processo de obtenção do agregado (natural ou moído) e suas características – como dureza, tamanho, porosidade aparente – afetam diretamente a rugosidade superficial das partículas.

A porosidade interna das partículas permite a divisão das partículas em três tipos: (a) totalmente densas, (b) com porosidade fechada ou (c) com porosidade aberta, como representado na Figura 2.7.

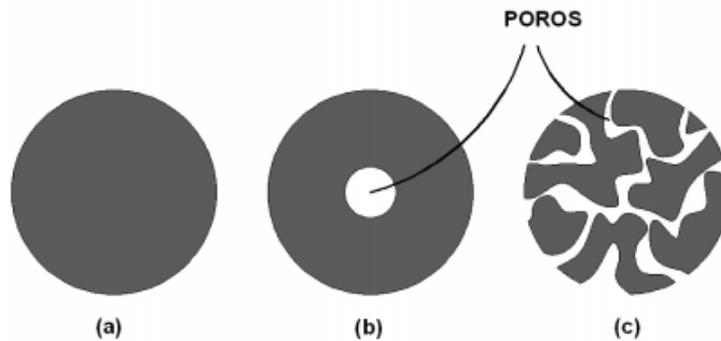


Figura 2.7: Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas (a) partículas totalmente densas, (b) com porosidade fechada ou (c) com porosidade aberta

Fonte: Pandolfelli *et al.* (2000)

As partículas totalmente densas se assemelham às de porosidade fechada em relação à distribuição granulométrica, mas resultam em misturas com densidade maior. O formato irregular das partículas com porosidade fechada prejudica o empacotamento das partículas e resultam em misturas com menor densidade (OLIVEIRA *et al.*, 2000; PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

2.2.3. Fase Dispersa

A função da fase dispersa está ligada ao reforço, enchimento ou carga do compósito, de acordo com a finalidade do material. Ao atuar como reforço, a fase dispersa melhora o desempenho mecânico da matriz e, ao atuar como enchimento ou carga, modifica as propriedades da matriz (DANIEL e ISHAI, 1994).

Apesar de não apresentarem a mesma resistência que os outros compósitos, os compósitos particulados são mais baratos e mais fáceis de fabricar. As partículas, que são orientadas aleatoriamente, também são denominadas agregados principalmente em compósitos cimentícios que tendem a ser isotrópicos (SANTOS, 2012).

Newel (2010) destaca que, em concretos e argamassas, os agregados possuem quatro funções básicas:

- Reduzir custos, por serem mais baratos que o cimento e aumentarem o volume da massa, sem perda de resistência;
- Aumentar a resistência da superfície a desgastes e intempéries;
- Reduzir a variação do volume do concreto e argamassa durante o processo de cura;

- Auxiliar na redução ou aumento da densidade do concreto ou argamassa, de acordo com a necessidade.

Em contraste, o uso de agregados reciclados poliméricos confere ao compósito a redução de sua densidade e aumento de ductilidade, além de ser uma opção sustentável de reaproveitamento de resíduos (BADACHE *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2019; FERREIRA, DE BRITO e SAIKIA, 2012; GAVELA *et al.*, 2004; JASSIM, 2017; OZBAKKALOGLU, GU e GHOLAMPOUR, 2017; TAFHEEM *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2015).

2.3. Compósitos cimentícios com compactação uniaxial

Um método de fabricação adequado aos materiais de baixa umidade é a prensagem de pós. Segundo Callister (2007) a prensagem de pós é utilizada para fabricação de composições argilosas e não-argilosas, correspondendo ao processo de metalurgia do pó para cerâmicos. Consiste na aplicação de pressão para compactação de uma massa pulverizada na forma desejada. Com o uso de proporções apropriadas de partículas de diferentes granulometrias, há a minimização da fração de vazios e maximização da compactação, não havendo deformação plástica das partículas durante o processo.

O procedimento de prensagem de pós pode ser uniaxial ou isostático (ou hidrostático), à frio ou à quente. Na prensagem uniaxial há a aplicação da pressão ao longo de uma única direção para compactação do pó em um molde metálico, sendo esta a configuração assumida pela peça conformada. Esse processo possui altas taxas de produção e baixo custo, mas restringe-se a fabricação de formas relativamente simples (REED, 1994).

Como há o aumento da compactação, é possível se trabalhar com baixas taxas de umidade ou relações água cimento, como é o caso do concreto seco. Consequentemente, tem-se uma redução da porosidade, que ocasiona o aumento da resistência do material (BAZJA, 1983, REGOURD, 1985; PANZERA, BOWEN e WALKER, 2007).

2.3. Resíduos plásticos como agregados em compósitos cimentícios

Como mencionado anteriormente, diversos estudos têm sido desenvolvidos para avaliar a incorporação de resíduos poliméricos como agregados em compósitos cimentícios como forma de encontrar opções de reutilização.

Rahim *et al.* (2013) utilizaram partículas de PEAD como substitutos de agregados graúdos em concreto e avaliaram a influência sobre a resistência à compressão. Três condições experimentais foram definidas com 10%, 20% e 30% de substituição. Apesar da redução na resistência à compressão à medida em que as partículas de PEAD foram incorporadas, os autores julgaram que 20% do agregado de PEAD pode ser incorporado como substituição de agregados graúdos em concreto sem efeitos prejudiciais a longo prazo e com propriedades estruturais aceitáveis.

Jassim (2017) estudou a utilização de partículas de PEAD em substituição ao agregado miúdo em compósitos cimentícios. Nas condições definidas, não foram utilizados outros agregados além do resíduo polimérico. Os componentes do compósito foram cimento, agregados poliméricos, que variaram de acordo com as condições experimentais e água, que foi mantida constante. Nove condições experimentais foram definidas com o percentual de PEAD variando de 15% a 80%. Os resultados mostraram que existe a possibilidade de produzir argamassa utilizando resíduos de PEAD e cimento Portland nos percentuais 60% e 40%, respectivamente. Constatou-se a redução da densidade e aumento da ductilidade e trabalhabilidade obtendo materiais leves.

Ali *et al.* (2017) estudaram a incorporação de PEAD como material substituto na fabricação de blocos de concreto. Quatro diferentes percentuais de substituição de areia por PEAD foram estudados: 0%, 2,5%, 3,0% e 3,5%. As variáveis respostas, resistência à compressão e absorção de água foram avaliadas no 7º e 28º dias. Aos 7 dias, a condição com 3,5% de substituição obteve a maior resistência à compressão e a absorção de água foi semelhante à referência. Aos 28 dias, os resultados obtidos pela condição com 3% de substituição tiveram um desempenho melhor que a referência em termos de resistência à compressão, porém a absorção de água foi maior dentre todas as condições estudadas. Nos dois casos, tem-se uma tendência de crescimento da absorção de água até 3,0% de substituição e em seguida uma queda.

Arulrajah *et al.* (2017) estudaram a utilização de grânulos de resíduos poliméricos e resíduos de construção civil como agregados no concreto. Três tipos de polímeros: polietileno de baixa densidade linear preenchido com carbonato de cálcio (LDCAL), polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de baixa densidade (PEBD) foram avaliados em misturas com tijolo triturado (CB) e pavimento asfáltico recoberto (RAP). Doze condições experimentais foram definidas, combinando os fatores estudados cada

um com dois diferentes níveis: 3% e 5% para os resíduos poliméricos e 97% e 95% para os resíduos de construção civil, além de condições de controle CB e RAP. As condições com maior percentual de plástico apresentaram desempenho inferior que as condições de controle para resistência à compressão e módulo, sendo que o PEAD teve um comportamento intermediário entre LDCAL e PEBD.

Şimşek e Uygunoğlu (2017) estudaram a incorporação de sete diferentes tipos de resíduos poliméricos (PEAD, PEBD, PP, TPE, PEN, PET E DMT) nas propriedades velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade utilizando análise de regressão multivariada para otimização das proporções. Foi utilizado um arranjo ortogonal para planejar o experimento, resultando em 27 condições experimentais. Todos os tipos de polímeros tiveram influência significativa sobre a velocidade de ultrassom, mas sobre o módulo somente o PEAD, PP, TPE e PEN mostraram-se significativos. De forma geral, houve a redução de ambas respostas à medida em que maiores proporções de polímeros eram utilizadas. Foi realizada uma regressão multivariada para otimizar as proporções de partículas dos sete diferentes polímeros, cimento, cinza volante, água, superplastificantes, agregados fino e graúdo, utilizando métodos de programação linear.

Badache *et al.* (2018) estudaram as propriedades térmicas, físicas e mecânicas de argamassa leve com resíduos de PEAD e areia. Os agregados de PEAD foram utilizados como substitutos parciais por volume da areia natural a 0, 15, 30, 45 e 60%. Cimento, areia natural, partículas de PEAD e superplastificantes foram utilizados no compósito. Para a obtenção das partículas de PEAD, tubos foram moídos utilizando um moinho de facas, obtendo partículas irregulares menores que 3,15 mm. Corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm³ foram fabricadas com uma relação água/cimento de 0,5. A incorporação de 60% de partículas de PEAD aumentou a ductilidade do compósito, reduziu o módulo de elasticidade em 73%, a densidade em 25%, a condutividade térmica em 41%, a resistência à compressão em 38%. Além disso, houve o aumento da velocidade de ultrassom com a incorporação das partículas de PEAD, o que indica uma melhoria na impedância acústica do material. Por meio de uma análise em microscópio eletrônico de varredura, pôde-se notar que há baixa adesão do polímero à matriz.

Tafheem *et al.* (2018) investigaram a influência da substituição de agregados graúdos por partículas de PEAD e PET sobre as propriedades do concreto. A substituição foi feita por volume, sendo definidas quatro condições experimentais: 0% Plástico e 100% de

agregados naturais (AN) (concreto controle), 10% PET e 90% de AN; 10% PEAD e 90% de AN e 5% PET + 5% PEAD e 90% de ANNA. Corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm foram fabricados, após um dia foram desmoldados e foram então mantidos sob água de cal para cura até 28 dias. O estudo concluiu que, para os percentuais de substituição estudados, há uma redução de até 4% na densidade. Em relação à resistência à compressão para 10% de PET, 10% de PEAD e 5% de PET + 5% PEAD, foram reduzidas em 35%, 48% e 40%, respectivamente, em comparação com o concreto de controle. Isso mostra que o PET tem um desempenho melhor que o PEAD na substituição. Os autores propõem a utilização de agregados provenientes de resíduos poliméricos na fabricação de concreto não-estrutural.

Chen *et al.* (2019) estudaram o efeito da incorporação de grânulos de PEAD em concreto sobre a resistência à flexão cíclica e monotônica de quatro pontos e sobre o módulo de elasticidade. Foram utilizados cimento Portland, areia, agregados graúdos com tamanho máximo de 20mm, os grânulos de PEAD e água potável. Os pesquisadores fundiram, moldaram e cortaram os resíduos de PEAD a fim de obter grânulos regulares com tamanho entre 3 e 4 mm. Seis diferentes níveis de incorporação dos grânulos de PEAD (0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%) em substituição da areia e dos agregados graúdos foram definidos, sendo mantidas constantes as quantidades de cimento e água. Corpos de prova prismáticos de 100 x 100 x 400 mm³ foram fabricados e desmoldados depois de 3 dias, colocados em água por 7 dias, sendo retirados e curados por 28 dias até que o aumento de força pudesse ser desprezado. Os autores concluíram que com o aumento do percentual de grânulos há a redução gradual da resistência e do módulo de elasticidade e o aumento do pico de deformação. Além disso, foi realizada uma análise de regressão para modelar a relação entre o percentual de grânulos de PEAD incorporados e as propriedades estudadas, obtendo ajustes satisfatórios.

Com base na análise do contexto de pesquisa, nota-se que, em grande parte das vezes, os estudos não seguem um planejamento estatístico claramente definido, o que leva a um processo de tentativa e erro. A utilização de uma metodologia estatística, especialmente para experimentos de misturas, pode guiar o processo de pesquisa e garantir melhores resultados práticos (SILVEIRA e LEITE, 2010).

2.4. Projeto de Experimentos

A metodologia de Projeto de experimentos – DoE, do inglês *Design of Experiments* – foi desenvolvida por Fisher entre 1920 e 1930 e aprimorada por pesquisadores como Box, Hunter e Taguchi, dentre outros (PAIVA, 2006). Pode ser definido como uma metodologia baseada em métodos estatísticos, cujo objetivo é a otimização do planejamento e execução de experimentos e análise de seus resultados, por meio da minimização e controle do erro experimental, ou seja, dos efeitos gerados por fatores não controláveis (RIBEIRO, 1999).

O DoE possibilita a análise de dados por métodos estatísticos de maneira sistematizada, levando a conclusões válidas e objetivas. Por se tratar de um processo de planejamento de experimentos, o DoE faz com que seja possível estimar como os resultados ou respostas dos experimentos são afetados por mudanças pré-determinadas nos fatores de interesse (MONTGOMERY, 2001).

Ao guiar o planejamento e execução de experimentos de forma sistemática, o DoE possibilita a obtenção de resultados com maior nível de confiabilidade, reduzindo a variabilidade dos resultados e permitindo a melhoria de processos. O DoE permite avaliar os efeitos de múltiplos fatores em respostas de interesse, por meio de um estudo simultâneo desses fatores em diferentes níveis experimentais. Como consequência direta, tem-se a redução do tempo de análise dos resultados obtidos e dos custos envolvidos em todo o processo experimental (MONTGOMERY, 2001).

A realização de réplicas e a aleatorização dos experimentos são dois princípios básicos necessários para a definição de um projeto experimental. Réplicas podem ser definidas como a repetição do experimento sob condições semelhantes, permitindo estimar e minimizar o erro experimental oriundo de variáveis externas que podem afetar os resultados. É importante destacar, porém, que há o aumento do custo à medida em que um número maior de réplicas é utilizado. A aleatorização consiste em selecionar materiais e realizar experimentos em uma sequência aleatória, garantindo que as variáveis estudadas e os erros experimentais tenham um caráter aleatório (BUTTON, 2005; MONTGOMERY, 2001).

Segundo Montgomery (2001) para que seja possível o uso da abordagem estatística no planejamento e análise de experimentos é necessário seguir as etapas mostradas na Figura 2.8.

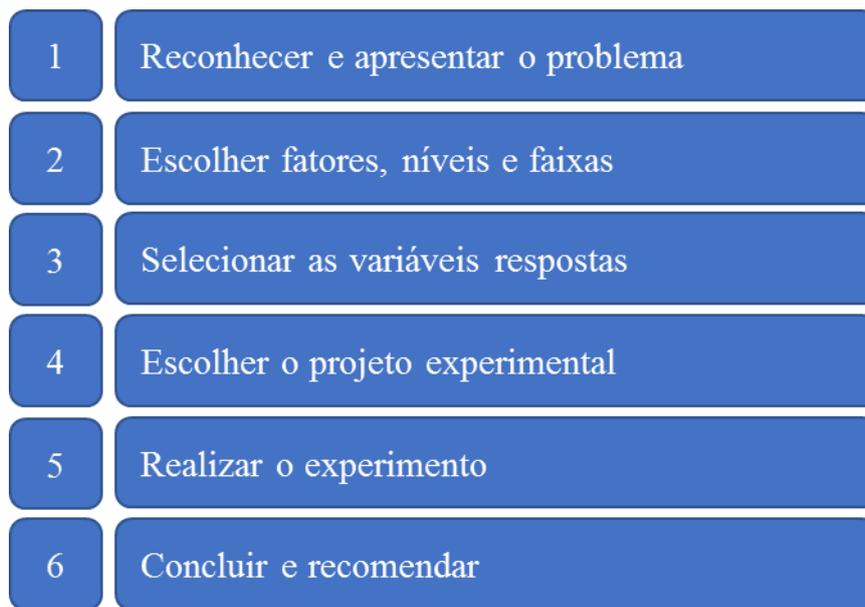


Figura 2.8: Etapas para o Planejamento de Experimentos
Fonte: Baseado em Montgomery (2001)

Após o reconhecimento do problema, definição dos fatores e seus respectivos níveis e seleção das variáveis resposta, passa-se à fase de escolha do arranjo experimental. Os arranjos mais comumente utilizados são o fatorial completo, fatorial fracionado, superfície de resposta e planejamento de misturas (MONTGOMERY, 2001). Neste trabalho, foi utilizado o arranjo de misturas o qual será detalhadamente explorado no tópico seguinte.

Depois de realizados os experimentos, são utilizados métodos estatísticos para estimação dos efeitos dos fatores estudados, como por exemplo, a análise de variância (ANOVA) e análise de regressão e, em seguida, são interpretados e analisados os resultados e propostas melhorias.

2.4.1. Projeto de Experimentos de Misturas

Projetos de experimentos de misturas (MDE - *Mixture Design Experiment*) são aqueles em que há a mistura de dois ou mais componentes para formação de um produto final. Neste tipo de experimento tem-se como objetivo a determinação da proporção ideal de cada componente para obtenção de um resultado desejado, representado pelas variáveis resposta que caracterizam a qualidade do produto (AKALIN *et al.*, 2010; NUNES, 1998; SOLVASON *et al.*, 2009).

Segundo Scheffé (1958), no MDE as variáveis de interesse são função da proporção desses componentes, ou seja, depende das X_i proporções dos q componentes presentes, sujeitas às restrições:

$$0 \leq X_i \leq 1 \text{ onde } i = 1, 2, 3, \dots, q \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^q X_i = 1 \quad (2.2)$$

As proporções dos componentes são dependentes, uma vez que, de acordo com as restrições (2.1) e (2.2), elas se distribuem na mistura de modo que sua soma seja igual a 1. Pode-se afirmar, portanto, que as variáveis X_i são linearmente dependentes, sendo que uma alteração na proporção de algum componente na mistura causa uma modificação na proporção de pelo menos um dos outros componentes (AKALIN *et al.*, 2010; ALVES, 2017; ERIKSSON, JOHANSSON e WIKSTROM, 1998; SCHEFFÉ, 1958).

O espaço determinado pelos experimentos de mistura é definido como um sistema *simplex* de coordenadas. Dependendo do número de componentes da mistura, o formato do espaço experimental irá variar. Para dois componentes, o *simplex* é representado por uma linha. Para três componentes tem-se o *simplex* representado por uma região bidimensional com um domínio triangular (Figura 2.9), sendo que os experimentos podem ser realizados nos vértices (misturas puras), nos pontos médio dos vértices (em que um dos componentes está ausente e os outros dois estão presentes em proporções iguais), na parte interior (onde os três componentes estão presentes) e no ponto de centro ou centroide (onde há iguais proporções de cada componente) (AKALIN *et al.*, 2010; ERIKSSON, JOHANSSON e WIKSTROM, 1998; MONTGOMERY, 2002; MONTICELI, 2016; NUNES, 1998).

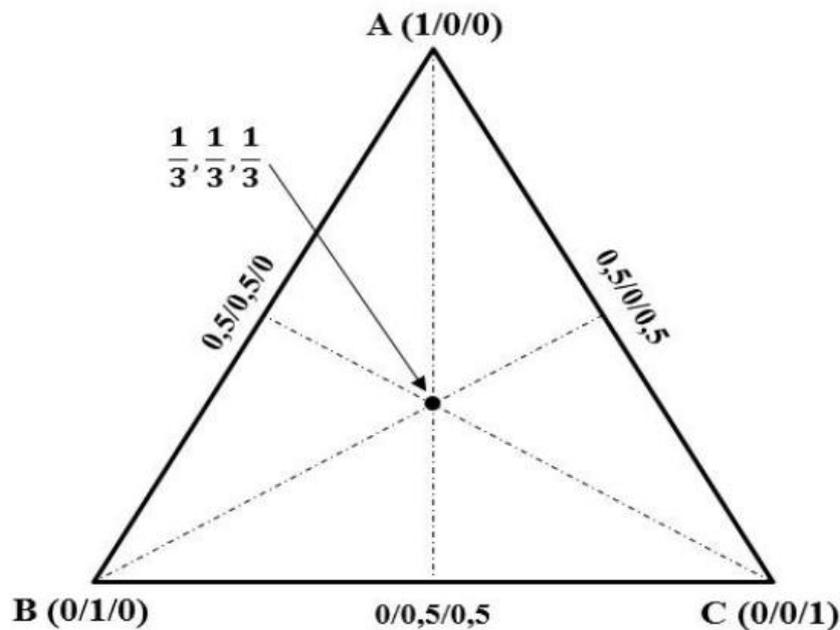


Figura 2.9: Exemplo de delineamento de experimentos com três componentes
 Fonte: Junior, 2013

Pode-se dizer que um experimento de misturas procura modelar a relação entre as proporções dos componentes e as variáveis de resposta por meio de uma equação matemática que permita obter:

- A influência da combinação das proporções e de cada proporção individual dos componentes sobre a variável resposta;
- A previsão da variável resposta para todas as combinações das proporções
- As proporções dos componentes que geram os valores desejáveis da variável resposta. (ALVES, 2017; CORNELL, 2002; MONTICELI, 2016)

Segundo Montgomery (2001) existem diversos tipos de arranjos para misturas, dentre eles: o *simplex lattice design*, o *simplex centroid design* e o *extreme vertice design*. O *simplex lattice design* busca definir um modelo que represente a região *simplex* por meio de pontos distribuídos de maneira uniforme dentro da região, sendo este arranjo de pontos denominado *lattice*. No *simplex centroid design* o projeto é composto por todos os subconjuntos dos componentes, envolvendo apenas proporções iguais nas misturas.

O *extreme vertice design* é utilizado em casos em que é necessário considerar não só a proporção dos componentes, mas também restrições para as proporções (MONTGOMERY, 2001), como acontece no caso deste trabalho em que deseja-se

estudar a incorporação de partículas poliméricas em substituição de agregados de quartzo, variando-se também o percentual de cimento utilizado.

No arranjo *extreme vertice design* é utilizada apenas uma pequena porção do *simplex* para a realização do experimento, devido às restrições relativas às proporções. Neste tipo de arranjo, definem-se limites inferiores e/ou superiores para as proporções dos q componentes do tipo $0 \leq L_i \leq w_i \leq U_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, q$, sendo L_i e U_i os limites inferior e superior e w_i o componente (ADEYEYE e OYAWALE, 2008; DING *et al.*, 1999).

Os limites inferiores são definidos quando se deseja que o componente esteja obrigatoriamente na mistura e os limites superiores quando a mistura não pode conter mais que uma proporção limite de cada componente. A Figura 2.10 apresenta exemplos de espaços experimentais definidos com base no arranjo *extreme vertices design*. A região sombreada representa o espaço experimental, as linhas em cinza são as restrições dos componentes da mistura, ou seja, os limites inferior e superior. Os pontos são definidos nos vértices extremos do espaço do arranjo experimental (MYERS e MONTGMOMERY, 2002).

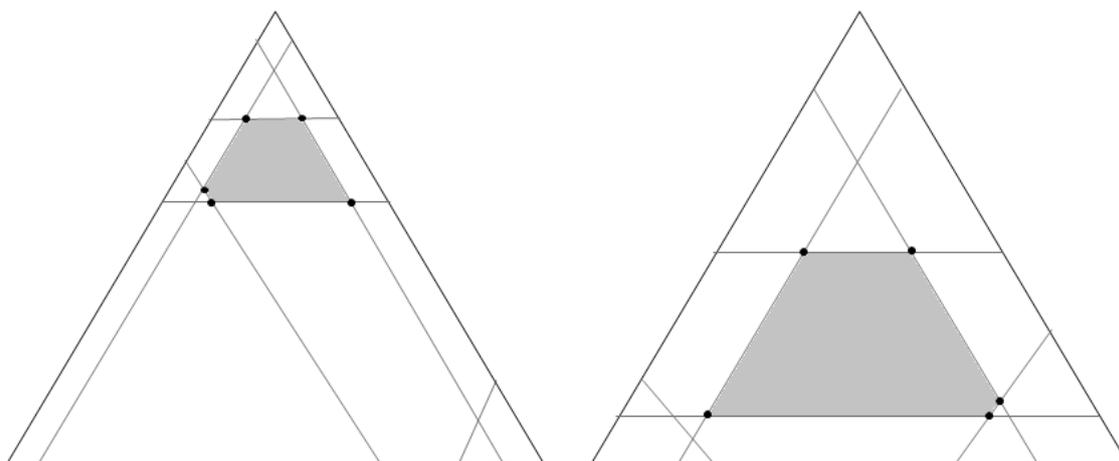


Figura 2.10: Exemplos de *Extreme Vertices Design*
Fonte: Adaptado de Myers e Montgomery (2002)

2.5. Otimização pelo MDE

O problema mais comum na otimização pelo MDE refere-se a otimizar as variáveis resposta (y_i) de um experimento tomando como base as proporções de cada componente

da mistura, ou seja, as variáveis de entrada (w_i). O objetivo da otimização consiste em maximizar e/ou minimizar as variáveis respostas y_i , e os modelos que relacionam y_i e w_i são obtidos por meio da análise do experimento de misturas.

Porém, a solução para o problema não é trivial e uma estratégia eficiente para solucioná-lo é o *desirability*, criado originalmente por Harrington (1965) e aprimorado por Derringer e Suich (1980).

2.5.1.1. Método *Desirability*

Desirability é um método de otimização simultânea que trata problemas com múltiplas respostas. Foi criado originalmente por Harrington (1965) e aprimorado por Derringer e Suich (1980) (MONTICELI, 2016; PAIVA, 2006). Este método possibilita determinar um conjunto de condições mais adequadas para propriedades de interesse por meio da avaliação de um conjunto de respostas simultaneamente (VAN GYSEGHEM *et al.*, 2004).

A operacionalização do método consiste inicialmente em relacionar entre as respostas e as variáveis dependentes, utilizando, por exemplo, a metodologia de superfície de resposta. Considerando a existência de uma relação entre cada variável resposta (k) e variáveis independentes (p) e considerando o valor esperado (y_i), pode-se representar a relação entre as variáveis pela equação (2.3) (MONTICELI, 2016).

$$\hat{y}_i = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2.3)$$

Utilizando a formulação de Harrington (unilateral ou bilateral), transformam-se cada uma das respostas, tal que d_i que pertença ao intervalo $0 \leq d \leq 1$. O valor da variável d_i , chamada *desirability* individual, aumenta à medida em que a i -ésima resposta se aproxima dos limites desejados (PAIVA, 2006).

O algoritmo proposto por Derringer e Suich (1980) determina o estabelecimento de pesos para as variáveis estudadas, sendo estes relacionados às importâncias dadas aos alvos e limites definidos para cada uma delas, de acordo com o apresentado no Quadro 2.2. Além disso, o algoritmo depende do objetivo de otimização necessária à resposta, de acordo com o Quadro 2.3.

Quadro 2.2: Relações de importância entre o Alvo e os Limites do *Desirability*

<p>Peso=0,1 d = 0 Alvo d = 1</p>	<p>Se o peso é menor que 1 (valor mínimo é 0,1), então, menos ênfase se dá ao alvo.</p>
<p>Peso=1,0 Alvo d = 0 d = 1</p>	<p>Quando o peso é igual a 1, a importância dada ao alvo é igual à importância dada aos limites.</p>
<p>Peso=10,0 Alvo d = 0 d = 1</p>	<p>Se o peso dado à resposta é maior do que 1 (o valor máximo é 10), então, mais ênfase é dada ao alvo.</p>

Fonte: Paiva (2006)

Quadro 2.3: Objetivos de Otimização no Método de Derringer

Objetivo	Características	Representação esquemática
Minimizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta enquanto o valor da resposta original se aproxima de um valor alvo mínimo. Abaixo do alvo, $d = 1$; acima do limite superior, $d = 0$.	<p>Alvo 1 Peso=10 Peso=1 Peso=0,1 0 Limite Superior</p>
Normalizar	Quando a resposta se move em direção alvo, o valor da função <i>desirability</i> aumenta. Acima ou abaixo dos limites, $d = 0$; no alvo $d = 1$.	<p>Alvo 1 Peso=1 Peso=1 Peso=0,1 0 Limite Inferior Limite Superior</p>
Maximizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior, $d = 0$; acima do alvo, $d = 1$.	<p>Peso=0,1 Alvo 1 Peso=10 Peso=1 0 Limite Inferior</p>

Fonte: Paiva (2006)

De acordo com o objetivo da otimização de uma resposta, diferentes transformações são empregadas. As equações (2.4) e (2.5) representam as transformações unilaterais para os

casos em que deseja, respectivamente, maximizar ou minimizar uma resposta. A equação (2.6) é uma transformação bilateral, para quando existem restrições de máximo e mínimo para uma mesma resposta, ou seja, quando se deseja atingir um valor alvo (DERRINGER E SUICH, 1980; MONTICELI, 2016, PAIVA, 2006).

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < LSL \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{Y}_i > T_i \end{cases} \quad (2.4)$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i > LSL \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{Y}_i < T_i \end{cases} \quad (2.5)$$

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 0 & \hat{Y}_i < L_i \text{ ou } \hat{Y}_i > H_i \end{cases} \quad (2.6)$$

As *desirability* individuais são combinadas por meio de uma média geométrica para obtenção da *desirability* total (D). Quando as importâncias e pesos definidos são os mesmos para todas as variáveis envolvidas na otimização, utiliza-se uma média geométrica simples (2.7), caso contrário é feita uma média geométrica ponderada (2.8), em que w_i são os graus de importância e W a sua soma (DERRINGER E SUICH, 1980; MONTICELI, 2016, PAIVA, 2006).

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (2.7)$$

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{w_i}(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (2.8)$$

O valor de D pertence ao intervalo $[0, 1]$ e se aproxima do valor máximo à medida em que as respostas se aproximam de suas especificações. O ótimo geral do sistema é obtido por meio da maximização de D que é calculada tomando como base as funções *desirability* individuais (OSBORNE *et al.*, 1997; PAIVA, 2006; ROSSI, 2001).

Pode-se dizer que o método *desirability* reduz um problema multivariado em um problema de otimização univariada. A vantagem de se utilizar a média geométrica é balancear a obtenção da solução global, atingindo os valores esperados de todas as respostas e aproximando-se das especificações impostas. Como desvantagem, o método não considera a estrutura de variância-covariância das respostas para a otimização, havendo o aumento da não linearidade de D à medida em que um número maior de variáveis é considerado, o que pode conduzir somente à obtenção de ótimos locais (KHURI e CONLON, 1981; ORTIZ *et al.*, 2004; PAIVA, 2006).

No contexto desta pesquisa, há o interesse de estudo de diversas propriedades físico-mecânicas simultaneamente. Utilizar o MDE para guiar o planejamento da pesquisa e o método *desirability* para otimizar as respostas, evita o processo de tentativa e erro e garante a obtenção de respostas ótimas.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental foi realizada por meio do controle de variáveis por parte do pesquisador e a demonstração de relações causais entre os fatores analisados e as variáveis respostas utilizando ferramentas estatísticas (Mello *et al.* 2012). O planejamento experimental está baseado na metodologia DoE. O DoE possibilita a análise de dados por métodos estatísticos de maneira sistematizada levando a conclusões válidas e objetivas. Por se tratar de um processo de planejamento de experimentos, o DoE faz com que seja possível estimar como as variáveis respostas dos experimentos são afetadas por mudanças pré-determinadas nos fatores de interesse (MONTGOMERY, 2001).

A seguir, estão apresentadas cada uma das etapas de planejamento e as definições adotadas para essa pesquisa.

3.1. Reconhecimento e apresentação do Problema

A partir do levantamento das informações apresentadas anteriormente, foi possível definir o problema de pesquisa: Otimizar a incorporação de resíduos poliméricos em compósitos cimentícios por meio de arranjos de misturas entre matriz cimentícia e agregados de PEAD e de quartzo, analisando sua influência na microestrutura e propriedades físico-mecânicas. A seguir estão descritos os materiais e a distribuição granulométrica envolvidos na realização dos experimentos desta pesquisa.

3.1.1. Materiais

O compósito cimentício a ser estudado é formado pela fase: (i) matriz, constituída de cimento Portland; e (ii) dispersa, composta de partículas de quartzo e/ou partículas de resíduos de polipropileno (PEAD). Nos próximos itens serão descritos o processo de obtenção e classificação de cada fase do compósito cimentício.

3.1.1.1. Fase matriz - Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CPV-ARI Maxi fabricado pela empresa Nacional (Brasil). Esse tipo de cimento foi selecionado por sua elevada resistência inicial, baixo teor de adição e por ser recomendado para utilização com agregados não-reativos (ABNT, 1991). Todos corpos de prova foram fabricados com cimento do mesmo lote, a fim de

evitar variações físico-químicas que poderiam afetar a homogeneidade dos compósitos.

3.1.1.2. Fase dispersa - Partículas de Quartzo

O fornecimento dos agregados de quartzo foi realizado pela empresa Moinhos Gerais Ltda, localizada em Ribeirão Vermelho (MG). O material bruto foi fornecido em faixas granulométricas utilizadas comumente na indústria. Foi necessária uma etapa de reclassificação por peneiramento para obtenção das faixas granulométricas de interesse nesta pesquisa, de acordo com o item 3.1.2.

3.1.1.3. Fase Dispersa - Partículas de resíduos de PEAD

As partículas de resíduo PEAD utilizadas são provenientes de tampas de garrafas PET de refrigerantes da marca Coca-Cola®, coletadas em associações de catadores de lixo. A limitação da marca se deu em função de minimizar a fonte de variabilidade relativa ao material utilizado, visto que variando-se o fabricante há também a variação de suas propriedades. As tampas de PEAD foram lavadas, secas e moídas utilizando um moinho de facas, modelo DPM-2 do fabricante Nogueira® (Figura 3.1). Após a moagem, as partículas de PEAD e quartzo foram classificadas por peneiramento a seco, de acordo com as faixas granulométricas descritas no item 3.1.2.



Figura 3.1: Moinho de facas (DPM-2 Nogueira®)

3.1.2. Distribuição granulométrica

Esta pesquisa utiliza uma distribuição granulométrica adequada para a fabricação de telhas cimentícias fabricadas por compactação uniaxial (COTA, 2013).

A fim de identificar o efeito da substituição de quartzo por partículas de PEAD em diversos tamanhos, a distribuição granulométrica foi estratificada em quatro faixas granulométricas, [4 – 10 US-Tyler], [10 – 20 US-Tyler], [20 – 50 US-Tyler] e [50 – 100 US-Tyler], constituídas de percentuais equivalentes em massa. A Tabela 3.1 apresenta a distribuição granulométrica de agregados utilizada na fabricação de telhas cimentícias, bem como a estratificação utilizada nesta pesquisa.

Tabela 3.1: Distribuição granulométrica para telhas cimentícias e configuração de trabalho

Distribuição granulométrica para telhas de concreto		Estratificação granulométrica utilizada (% em massa)
Peneiras US-Tyler – (mm)	Retido (%)	
4 US-Tyler – (5mm)	0	
5 US- Tyler – (4 mm)	5	4-10 US-Tyler (15%)
7 US- Tyler – (2,8 mm)	11,4	
9 US- Tyler – (2 mm)	15,89	
16 US- Tyler – (1 mm)	27,08	10-20 US-Tyler (40%)
32 US- Tyler – (0,500 mm)	28,44	20-50 US-Tyler (30%)
60 US- Tyler – (0,250 mm)	10,91	
115 US- Tyler – (0,125 mm)	1,28	50-100 US-Tyler (15%)

A classificação das partículas foi realizada utilizando-se um agitador eletromagnético e a sequência de peneiras 4, 10, 20, 50 e 100 US-Tyler. O material retido na peneira de malha 4 e aquele depositado no fundo não foram utilizados. Devido à dificuldade de obtenção das partículas de PEAD na faixa [50-100 US-Tyler], a mesma foi constituída apenas por agregados de quartzo, ou seja, não houve substituição da faixa [50-100 US-Tyler].

A Figura 3.2 mostra as imagens dos agregados de quartzo (a-c) e PEAD (d-f) obtidas em microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 30×. As partículas de quartzo exibem uma geometria angular (Figura 3.2a-c), enquanto as partículas de PEAD revelam uma forma mais esférica (Figura 3.2d-f).

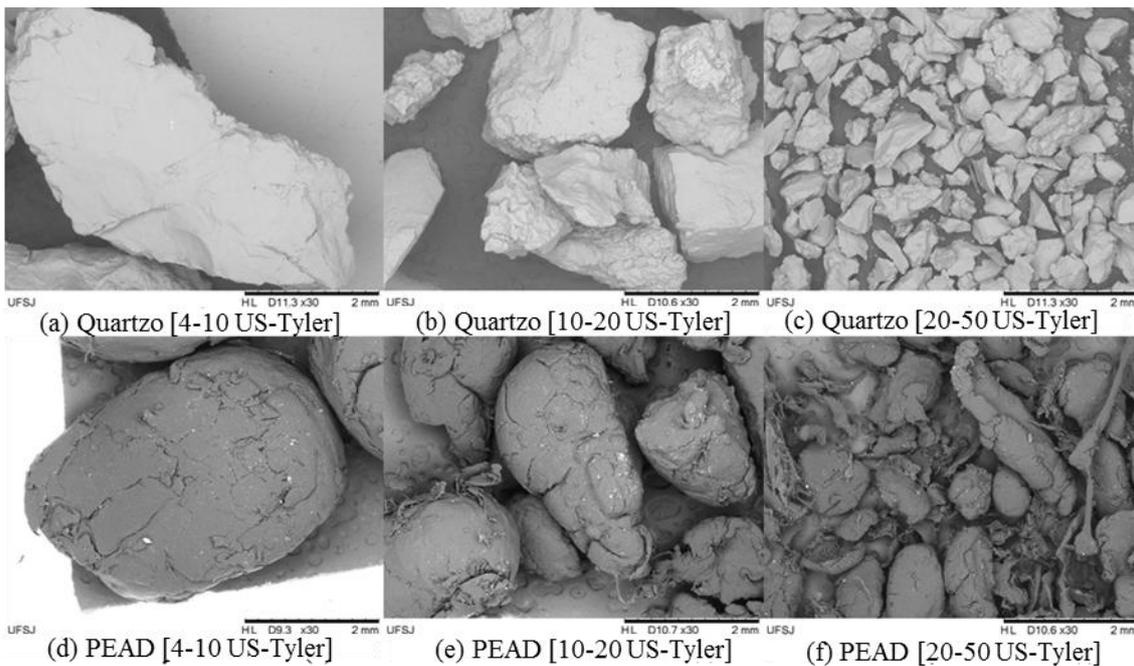


Figura 3.2: Partículas de quartzo e PEAD

3.2. Seleção das variáveis-respostas

As variáveis-resposta foram selecionadas com base nas exigências de normas nacionais e internacionais relativas à caracterização de concreto e argamassa. Nos próximos tópicos estão descritas cada uma das variáveis apresentadas, bem como seu procedimento de medição.

3.2.1. Resistência à compressão

A norma britânica BS12390-3 (BSI, 2009) foi utilizada embasar realização dos ensaios de resistência à compressão. A resistência à compressão é determinada pela divisão da força máxima aplicada na amostra (F_{max}) pela área inicial da seção transversal (A_0), de acordo com a equação (3.1):

$$f_c = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.1)$$

Os testes de compressão foram realizados em uma máquina de teste SHIMADZU AG-X Plus (Figura 3.3) equipada com célula de carga de 100 kN, considerando uma velocidade de 1 mm/min.

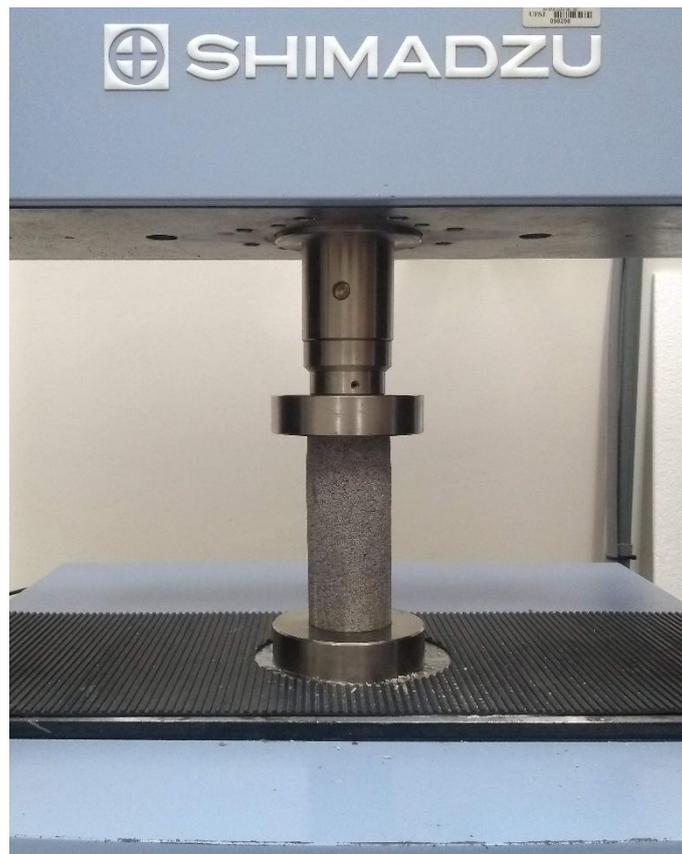


Figura 3.3: Ensaio de compressão mecânica.

3.2.2. Resistência à flexão

A resistência à flexão em três pontos foi obtida seguindo as recomendações das normas NBR 13858-3 (ABNT, 1997) e ASTM C 348-02 (ASTM, 2002). Os corpos de prova prismáticos de dimensões $40 \times 40 \times 160$ mm foram ensaiados com uma velocidade de 1 mm/min utilizando-se a máquina universal SHIMADZU de 100 kN (Figura 3.4). A resistência à flexão foi calculada considerando a equação (3.2):

$$S_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

Sendo,

- S_f = resistência à flexão, (MPa)
- F = força máxima, (N)
- L = distância entre apoios, (mm)
- b = largura da seção transversal, (mm)
- d = altura da seção transversal, (mm)



Figura 3.4: Ensaio de flexão em três pontos

3.2.3. Porosidade Aparente, Absorção de água, Densidade Volumétrica e aparente

De acordo com as orientações da norma britânica BS 10545-3 (BSI, 1997), calculou-se a porosidade aparente, absorção de água, densidade volumétrica e aparente dos corpos de prova. As amostras foram pesadas após 28 dias de cura e a massa seca (m_1) foi registrada após permanecerem em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24h. Posteriormente, as amostras foram saturadas com água utilizando vácuo por um período de 24h e medidas a massa saturada (m_2) e a massa saturada submersa (m_3).

A densidade volumétrica (B) dos compósitos é calculada pela divisão da massa seca das amostras após 28 dias de cura (m_1) pela diferença entre as massas saturada e submersa. A densidade aparente, pode ser calculada pela relação entre a massa seca e a diferença entre massa seca e massa suspensa. A densidade volumétrica e a densidade aparente são calculadas usando as equações (3.3) e (3.4), respectivamente:

$$B = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_3} \quad (3.4)$$

A porosidade aparente (p) representa uma porcentagem ou fração dos espaços vazios em um material, estando entre 0 e 100% ou 0 e 1. A porosidade aparente é calculada utilizando a equação (3.5):

$$p = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \quad (3.5)$$

A absorção de água (W_a) é a porcentagem de água absorvida pela amostra após ser imersa em água sob vácuo, conforme descrito na BS 10545-3 (BSI, 1997). A determinação da absorção de água é obtida pela equação (3,6):

$$W_a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.6)$$

3.2.4. Velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade Dinâmico

Um pulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor eletroacústico que é mantido em contato com uma superfície da amostra de concreto sob teste. Depois de percorrer um comprimento L do material, o pulso de vibrações é convertido em um sinal elétrico por um segundo transdutor. Circuitos de temporização eletrônica permitem a medição do tempo de trânsito T do pulso a ser medido. A medição do ultrassom é realizada por um equipamento de teste digital portátil não destrutivo (Pundit Plus) com um transdutor de 150 kHz. A velocidade pulsada (em m / s) é dada pela equação (3.7):

$$v = \frac{L}{T} \quad (3.7)$$

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é uma medida que expressa a relação entre a velocidade do pulso e as constantes elásticas (BSI, 1986). O módulo dinâmico de elasticidade é dado pela equação (3.8):

$$E_d = Bv^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3.8)$$

em que μ é o coeficiente de Poisson, cujo valor para o concreto varia entre 0,15 a 0,22 (NEVILLE, 2011). Nesta pesquisa foi usado $\mu = 0,15$ que de acordo com Neville (2011) é geralmente o valor para o concreto de alta resistência.

3.3. Planejamento Experimental

Conforme descrito anteriormente, este tópico corresponde às etapas “Escolha do Projeto Experimental” e “Seleção das Variáveis Resposta” propostas no modelo de Montgomery (2001). De forma geral, a pesquisa tem como objetivo otimizar a incorporação de agregados poliméricos em compósitos cimentícios compactados analisando a estrutura e propriedades físico-mecânicas.

Para isso, foi utilizada a metodologia de Projeto de Experimentos de Misturas. A relação água/cimento foi mantida constante a fim de garantir o mesmo nível de hidratação do cimento em todos os tratamentos experimentais. Com base em resultados de estudos preliminares, foi definida uma relação água/cimento de 0,5, garantindo bom acabamento e trabalhabilidade da mistura, além de propriedades físico-mecânicas adequadas.

A mistura a ser otimizada consiste em cimento, partículas de PEAD e de quartzo, com as frações mínimas e máximas apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Componentes da Mistura

Componente da mistura	Fração Mínima	Fração máxima
Cimento	0,16	0,21
PEAD	0,24	0,84
Quartzo	0	0,60

O cálculo das proporções baseou-se:

- na definição de incorporação de pelo menos 30% de partículas de PEAD na nova mistura; e
- na variação da relação agregado/cimento de 3,75 a 5,25.

Utilizando um arranjo experimental de misturas *extreme vertices* com grau 3, tem-se as 9 composições mostradas na Tabela 3.3 e representadas na Figura 3.5. O arranjo utilizado para o planejamento de misturas foi o de *extreme vertices*, pois este envolve não só a proporção dos componentes, mas também restrições para as proporções que devem ser

consideradas nos experimentos. Isso significa que serão respeitados os limites inferiores e superiores de cada um dos componentes da mistura na realização da otimização.

Tabela 3.3: Planejamento de Misturas

Composições	Cimento	PEAD	Quartzo
C1	0,160	0,2400	0,6000
C2	0,210	0,2400	0,5500
C3	0,160	0,8400	0,0000
C4	0,210	0,7900	0,0000
C5	0,160	0,5400	0,3000
C6	0,185	0,2400	0,5750
C7	0,185	0,8150	0,0000
C8	0,210	0,5150	0,2750
C9	0,185	0,5275	0,2875

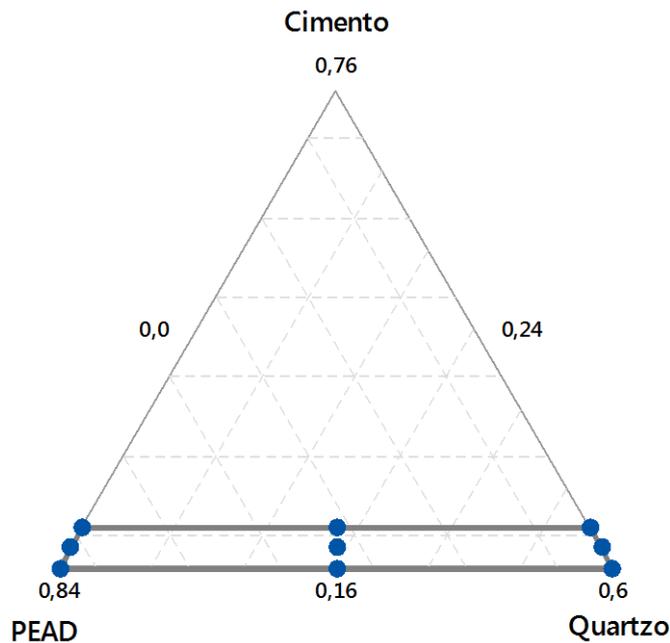


Figura 3.5: Projeto Experimental

O planejamento com réplica foi realizado para garantir confiabilidade ao experimento, resultando em 18 condições experimentais. A

Tabela 3.4 mostra as composições contendo a ordem de fabricação e a proporção de água em cada tratamento a fim de manter constante a relação água/cimento em 0,5 e o mesmo nível de hidratação do cimento. Para a análise do experimento, será considerada a influência da proporção de matriz cimentícia e não simplesmente do cimento, pois suas propriedades devem ser consideradas de acordo com a hidratação.

Tabela 3.4: Planejamento de Misturas – Experimento I

Composições	Réplica	Ordem de Fabricação	Matriz cimentícia		Agregados	
			Cimento	Água	PEAD	Quartzo
C1	1	F5	0,160	0,0800	0,2400	0,6000
C2	1	F6	0,210	0,1100	0,2400	0,5500
C3	1	F8	0,160	0,0800	0,8400	0,0000
C4	1	F14	0,210	0,1100	0,7900	0,0000
C5	1	F9	0,160	0,0800	0,5400	0,3000
C6	1	F18	0,185	0,0925	0,2400	0,5750
C7	1	F7	0,185	0,0925	0,8150	0,0000
C8	1	F12	0,210	0,1100	0,5150	0,2750
C9	1	F3	0,185	0,0925	0,5275	0,2875
C1	2	F13	0,160	0,0800	0,2400	0,6000
C2	2	F15	0,210	0,1100	0,2400	0,5500
C3	2	F11	0,160	0,0800	0,8400	0,0000
C4	2	F2	0,210	0,1100	0,7900	0,0000
C5	2	F17	0,160	0,0800	0,5400	0,3000
C6	2	F16	0,185	0,0925	0,2400	0,5750
C7	2	F4	0,185	0,0925	0,8150	0,0000
C8	2	F10	0,210	0,1100	0,5150	0,2750
C9	2	F1	0,185	0,0925	0,5275	0,2875

Amostras de referência contendo somente agregados de quartzo foram produzidas para avaliar o impacto da incorporação das partículas de PEAD na estrutura e propriedades do material. Assim como no planejamento de misturas, foi adotado um planejamento com réplica para garantia da confiabilidade do experimento. A Tabela 3.5 mostra as composições contendo a ordem de fabricação e a proporção de água em cada referência.

Tabela 3.5: Referências

Composições	Réplica	Ordem de Fabricação	Matriz cimentícia		Agregados	
			Cimento	Água	PEAD	Quartzo
R1	1	F21	0,185	0,0925	0,0000	0,8150
R2	1	F20	0,160	0,0800	0,0000	0,8400
R3	1	F19	0,210	0,1100	0,0000	0,7900
R1	2	F22	0,185	0,0925	0,0000	0,8150
R2	2	F24	0,160	0,0800	0,0000	0,8400
R3	2	F23	0,210	0,1100	0,0000	0,7900

As variáveis-respostas investigadas foram: densidade volumétrica, porosidade aparente, absorção de água, resistência à compressão, resistência à flexão, velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico. Os dados obtidos na caracterização físico-mecânica

dos compósitos foram manipulados por meio de um *software* estatístico Minitab17® adotando-se um planejamento de experimentos de misturas com nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$). Foi utilizado o método *stepwise* cuja operacionalização consiste em adicionar ou remover termos do modelo de regressão, utilizando como base testes estatísticos de significância de cada termo. Este método de seleção retorna somente os termos significativos do modelo. Para otimizar o arranjo de misturas foi utilizado o método *desirability*. Para tanto, foram definidos pesos constantes para as variáveis e definidos seis diferentes cenários variando-se as importâncias delas.

3.4. Fabricação dos corpos de prova

As condições de fabricação foram constantes. O cimento Portland CPV-ARI Maxi foi utilizado como fase matriz e a temperatura ambiente durante o processo de fabricação foi de aproximadamente 25°C. A preparação da mistura foi feita de acordo com o procedimento a seguir:

- Medir utilizando uma balança de precisão as massas dos componentes da mistura – cimento, água, PEAD e quartzo – colocando cada um deles em um recipiente;
- Colocar no misturador somente os elementos secos – cimento, PEAD e quartzo;
- Misturar por 1 minuto;
- Colocar a massa de água no misturador dividindo-a em aproximadamente 5 porções iguais com intervalos de 30 segundos de uma para outra;
- Após colocar a última porção de água, deixar o misturador ligado por mais 30 segundos;
- Desligar o misturador e utilizar uma colher para mexer a massa por aproximadamente 30 segundos, evitando o acúmulo de material na pá ou na cuba do misturador;
- Misturar por mais 1 minuto.

Um molde metálico cilíndrico (Figura 3.6) e um prismático (Figura 3.7) foram fabricados para obtenção dos corpos de prova compactadas no martelete *marshal hammer* da marca *Solotest* (Figura 3.8). Fabricações preliminares foram realizadas para definir os níveis de compactação dos corpos de prova. Foram definidos para os corpos de prova prismáticos e cilíndricos 7 e 10 golpes, respectivamente, a fim de obterem propriedades físicas equivalentes, ou seja, porosidades, densidades e velocidade de ultrassom semelhantes.



Figura 3.6: Molde Cilíndrico

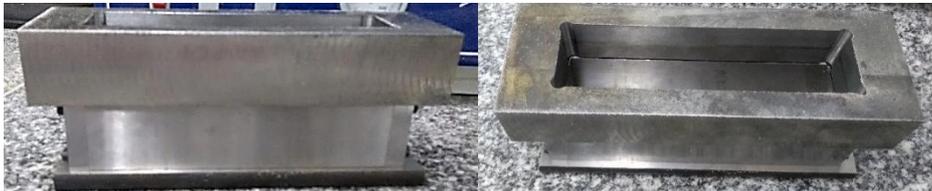


Figura 3.7: Molde Prismático



Figura 3.8: *Marshall hammer – Solotest*

Todas as amostras foram desmoldadas imediatamente após a compactação. Em seguida foram envolvidas em plástico filme e deixadas em recipiente fechado, em temperatura ambiente até completar 28 dias de cura.

Quatorze corpos de prova foram produzidos para cada condição experimental, sendo sete prismáticos e sete cilíndricos. Destes, quatro corpos de prova – dois prismáticos e dois cilíndricos – foram utilizados para medir as variáveis velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico durante o período de cura, ou seja, a 1, 7, 14, 21 e 28 dias após a fabricação. As medições de massa e o ensaio de velocidade de ultrassom eram realizados em cada dia e, em seguida, os corpos de prova eram envoltos novamente por plástico filme e colocados de volta em recipiente fechado até a próxima medição.

No 28º dia, esses corpos de prova foram utilizados para realizar o ensaio de porosidade aparente, absorção de água, densidade aparente e densidade volumétrica. Para isso, eles foram imersos em água no 28º dia e após 24 horas, ou seja, no 29º dia, foram aferidas as massas saturadas e submersas. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. Então, no 30º dia, foram aferidas as massas secas. Para avaliar o efeito da umidade na velocidade de ultrassom e no módulo de elasticidade dinâmico, o ensaio de velocidade de ultrassom foi realizado também nos corpos de prova saturados (29º dia) e secos (30º dia). Também aos 28 dias de cura, os cinco corpos de prova cilíndricos restantes foram utilizados no ensaio de resistência à compressão e os cinco prismáticos, no de resistência flexão.

Devido à restrição de capacidade do misturador, a fabricação de cada condição experimental, ou seja, dos quatorze corpos de prova, foi dividida em três lotes: em dois foram produzidos cinco corpos de prova e no terceiro, quatro. A fabricação de cada condição demorou em média 150 minutos. Para medir a massa dos componentes e preparar a mistura para fabricação de cada lote, gastou-se em média 10 minutos e para fabricar cada corpo de prova, em média 8,5 minutos. Então, os lotes de 5 corpos de prova foram fabricados em aproximadamente 53 minutos e os de 4 corpos de prova, 44 minutos. Durante a fabricação, a mistura foi mantida em recipiente fechado para evitar a perda de umidade.

No arranjo de misturas foram definidas 9 composições com 2 réplicas, totalizando 18, sendo que em cada uma delas foram fabricados 14 corpos de prova, o que resulta em 252. Além disso, foram fabricadas 3 referências com 2 réplicas, com um total de 6 condições.

Assim como para o arranjo de misturas, foram fabricados 14 corpos de prova, totalizando 84. Dessa forma, foram fabricados 336 corpos de prova, de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Corpos de prova fabricados

	Arranjo de Misturas	Referências
Nº de condições	9	3
Réplicas	2	2
Nº de corpos de prova prismáticos/ condição	7	7
Nº de corpos de prova cilíndricos/ condição	7	7
	$(9 \times 2 \times (7+7)) =$	$(3 \times 2 \times (7 + 7)) =$
Total de corpos de prova fabricados	252	84
	336	

4. RESULTADOS E ANÁLISE

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 apresentam um exemplar de corpo de prova de cada uma das condições estudadas, sem considerar as réplicas.



Figura 4.1: Corpos de prova prismáticos



Figura 4.2: Corpos de prova cilíndricos

Embora a quantidade de massa tenha sido calculada em função do volume desejado, pôde-se notar uma diferença de altura nos corpos de prova cilíndricos atribuída a variação de compactação dos agregados; notou-se que as partículas poliméricas compactam menos que as de quartzo. As medidas estão apresentadas no APÊNDICE A.

A Figura 4.3a é uma fotografia da seção transversal de um corpo de prova prismático após a fratura. A Figura 4.3b mostra a seção transversal de um corpo de prova cilíndrico após faceamento por meio de uma retificadora. Pode-se notar que as partículas de plástico estão bem distribuídas no corpo de prova.

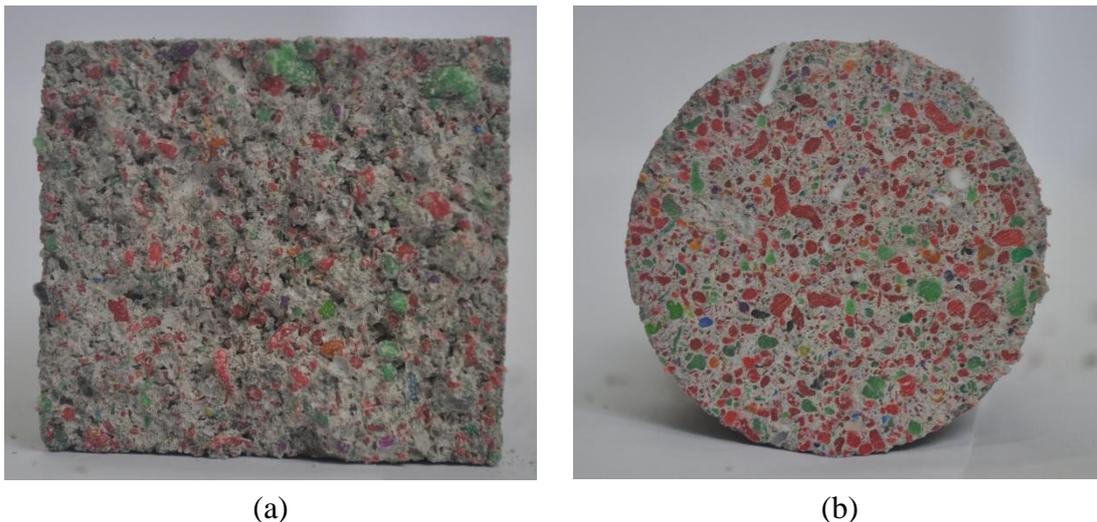


Figura 4.3: Seção transversal dos corpos de prova (a) prismático (b) cilíndrico com face retificada

4.1. Análise estrutural

A Figura 4.4 mostra um corpo de prova cilíndrico em ensaio de compressão mecânica. Nota-se que o início da ruptura ocorre na parte inferior do corpo de prova, sendo isto atribuído à menor compactação uniaxial nesta região durante a prensagem uniaxial. A Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram o padrão de fratura dos corpos de prova cilíndricos, sendo que não houve diferenças significativas entre as referências e as composições definidas no experimento de misturas.



Figura 4.4: Corpo de prova Cilíndrico no Ensaio de Compressão

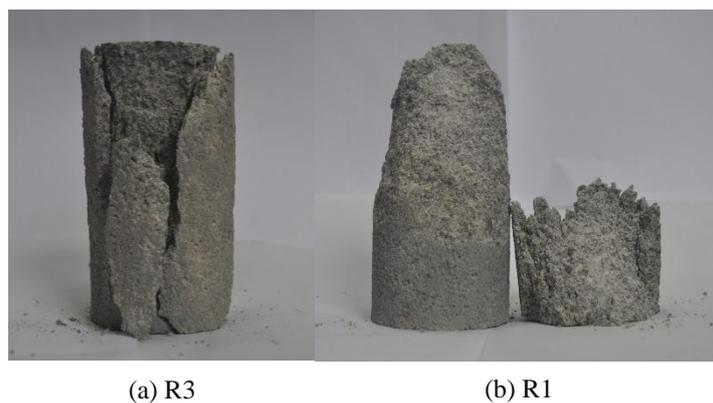


Figura 4.5: Fratura dos Corpos de Prova Cilíndricos (a) R3, (b) R1



Figura 4.6: Fratura dos Corpos de Prova Cilíndricos (a) C9, (b) C5

A Figura 4.7 apresenta um corpo de prova prismático durante o ensaio de flexão. A fratura ocorreu aproximadamente no meio do vão livre como pode ser visto na Figura 4.8 e Figura 4.9.

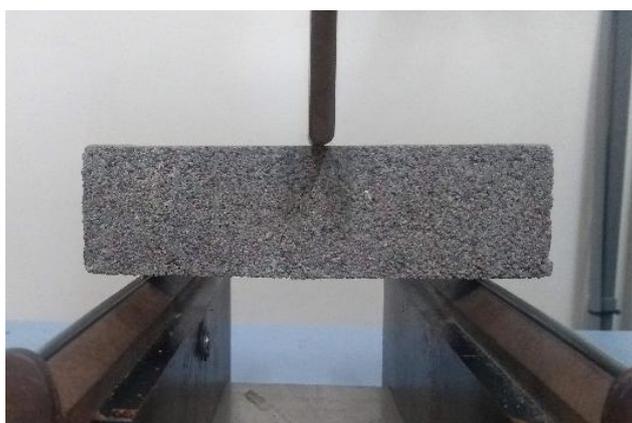


Figura 4.7: Corpo de prova Prismático no Ensaio de Flexão

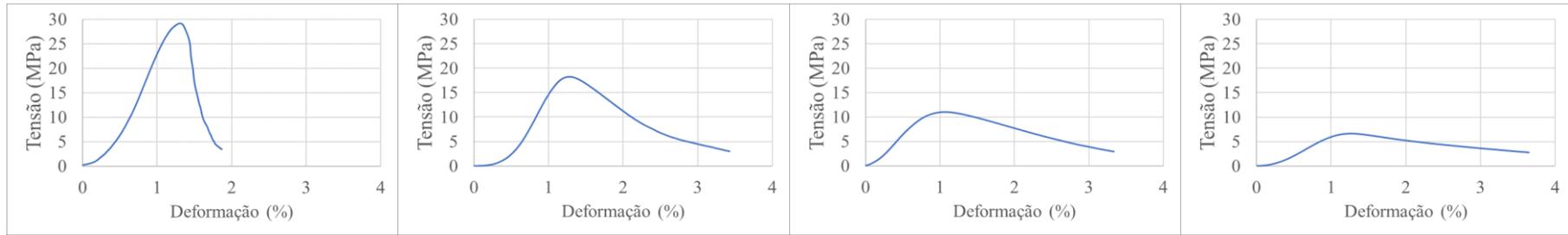


Figura 4.8: Fratura dos Corpos de Prova Prismáticos, R2



Figura 4.9: Fratura dos Corpos de Prova Prismáticos, C2

A curvas tensão-deformação na compressão mostradas na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 revelam os comportamentos mecânicos obtidos para cada condição experimental. As partículas de PEAD promovem uma maior deformação dos corpos de prova do que o quartzo. Assim como destacado nos trabalhos de Jassim (2016) e Badache *et al.* (2018) a incorporação de partículas poliméricas aumenta a flexibilidade dos compósitos, ou seja, melhora sua ductilidade, o que pode ser visto por meio das curvas apresentadas.



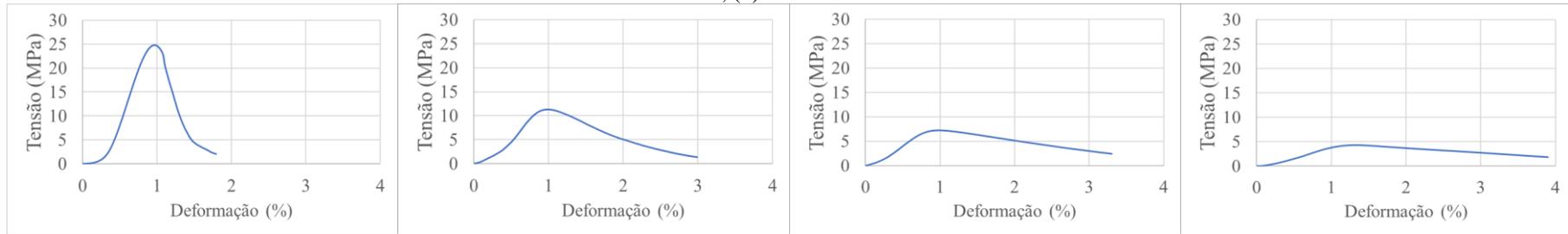
(a) R3

(b) C2

(c) C8

(d) C4

Figura 4.10: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=3,75 (a) R3 - Referência, (b) C2 – 24% de PEAD, (c) C8 – ~50% de PEAD, (d) C4 – ~80% de PEAD



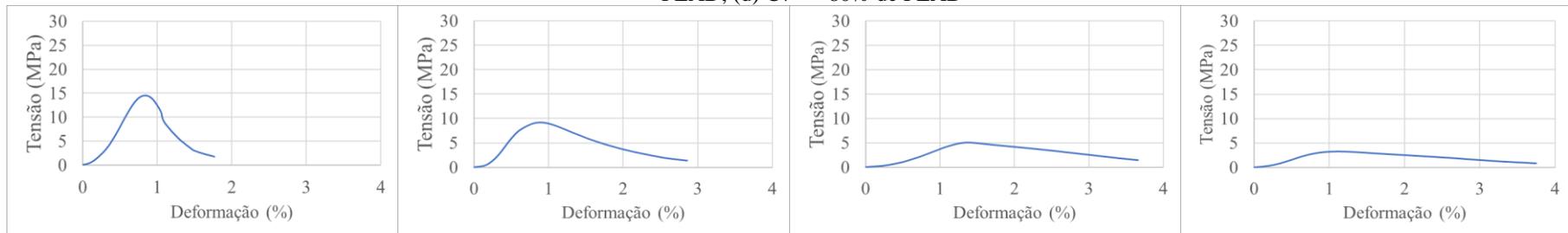
(a) R1

(b) C6

(c) C9

(d) C7

Figura 4.11: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=4,40 (a) R1 - Referência, (b) C6 – 24% de PEAD, (c) C9 – ~50% de PEAD, (d) C7 – ~80% de PEAD



(a) R2

(b) C1

(c) C5

(d) C3

Figura 4.12: Curvas tensão (MPa) versus deformação (%) na compressão: relação agregado/cimento=5,25 (a) R2 - Referência, (b) C1 – 24% de PEAD, (c) C5 – ~50% de PEAD, (d) C3 – ~80% de PEAD

4.2. Microestrutura

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um microscópio da marca Hitachi modelo TM-3000. As amostras avaliadas foram retiradas dos corpos de prova após a fratura sob esforços de compressão e flexão. As partículas de polímero aparecem em cor preta, as partículas de quartzo em coloração acinzentada e o cimento em tons de cinza mais claro.

As Figuras 4.11-13 mostram os compósitos com relação agregado/cimento (a/c) de 3,75, 4,40 e 5,25, respectivamente, além das referências e as composições com o mínimo e máximo de polímero. Por meio da análise das imagens, pode-se notar que o material se torna mais poroso com o aumento da a/c. Além disso, à medida em que mais partículas de polímero são adicionadas, dentro da mesma a/c, há o aumento do número e tamanhos dos poros, ampliando o surgimento de trincas durante o ensaio mecânico. A zona de transição de interface (ZTI) é mais porosa em partículas de polímero que de quartzo, tornando-se mais porosa à medida em que é aumentado o percentual de polímero na composição, comportamento semelhante ao relatado por Rahim *et al.* (2013) e Badache *et al.* (2018). É importante destacar também que a trinca ocorre e propaga ao longo da matriz, não atingindo as partículas utilizadas.

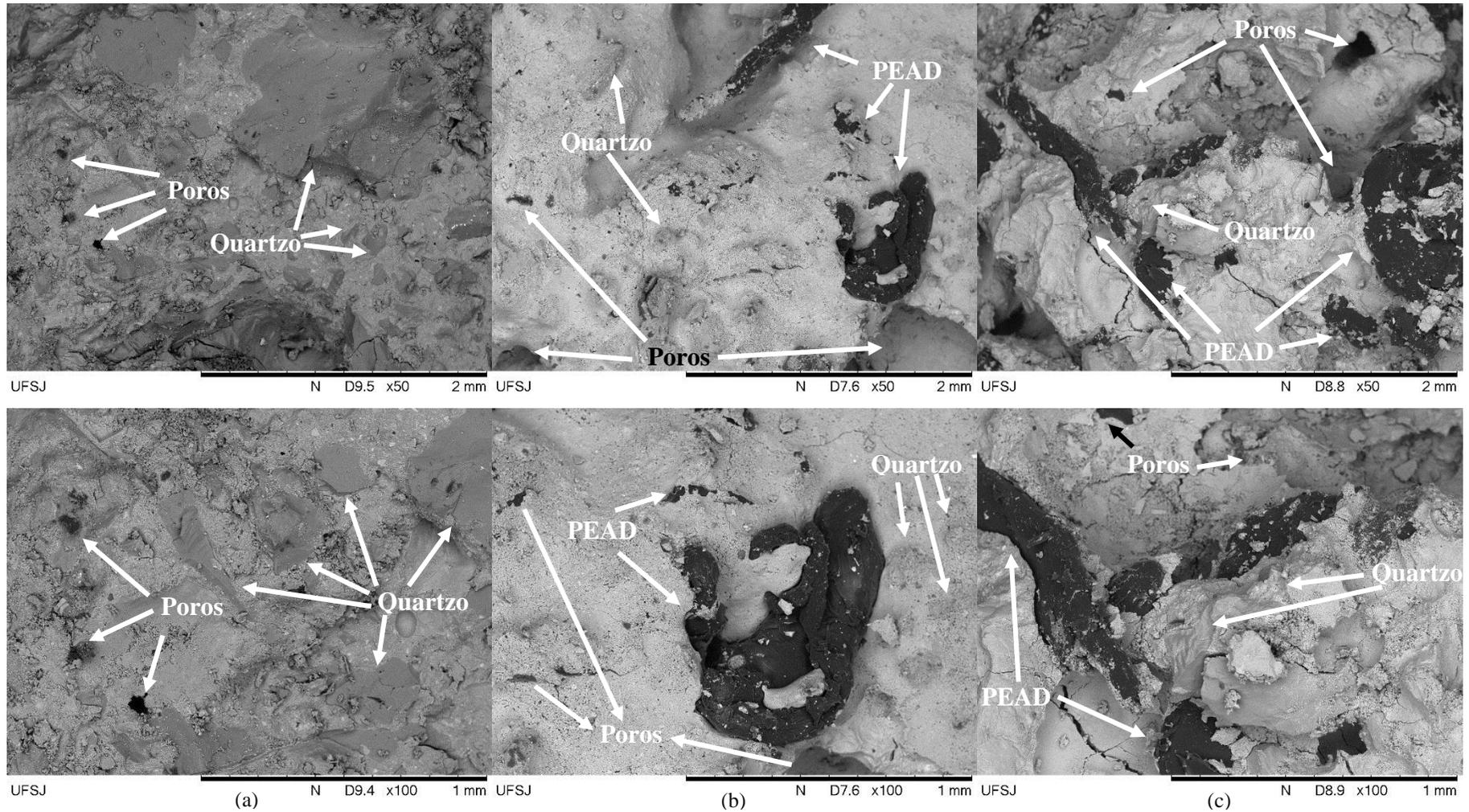


Figura 4.13: Compósitos com $a/c=3,75$ (a) R3 - Referência, (b) C2 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C4 - Máximo de agregados de PEAD

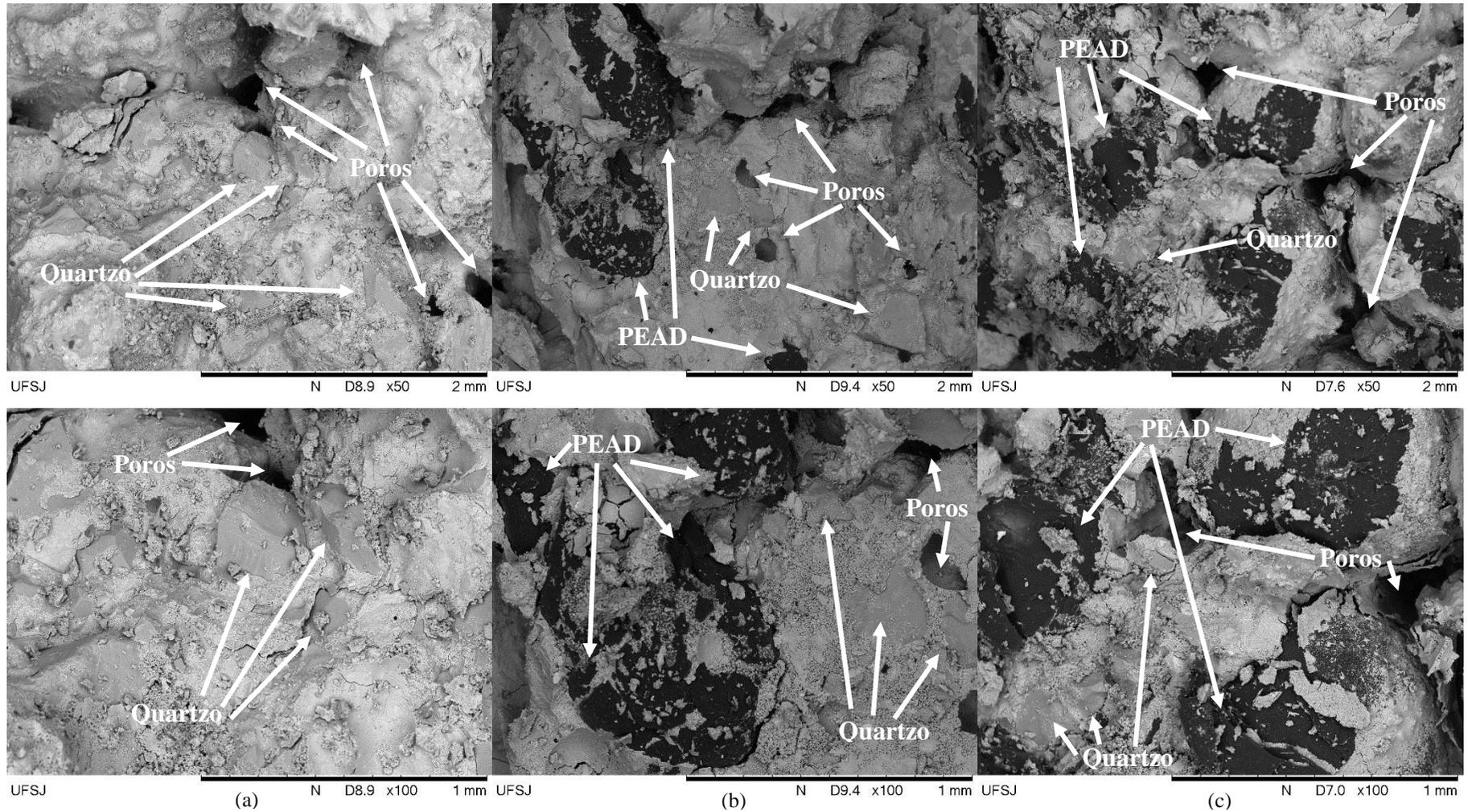


Figura 4.14: Compósitos com $a/c=4,4$ (a) R1 - Referência, (b) C6 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C7 - Máximo de agregados de PEAD

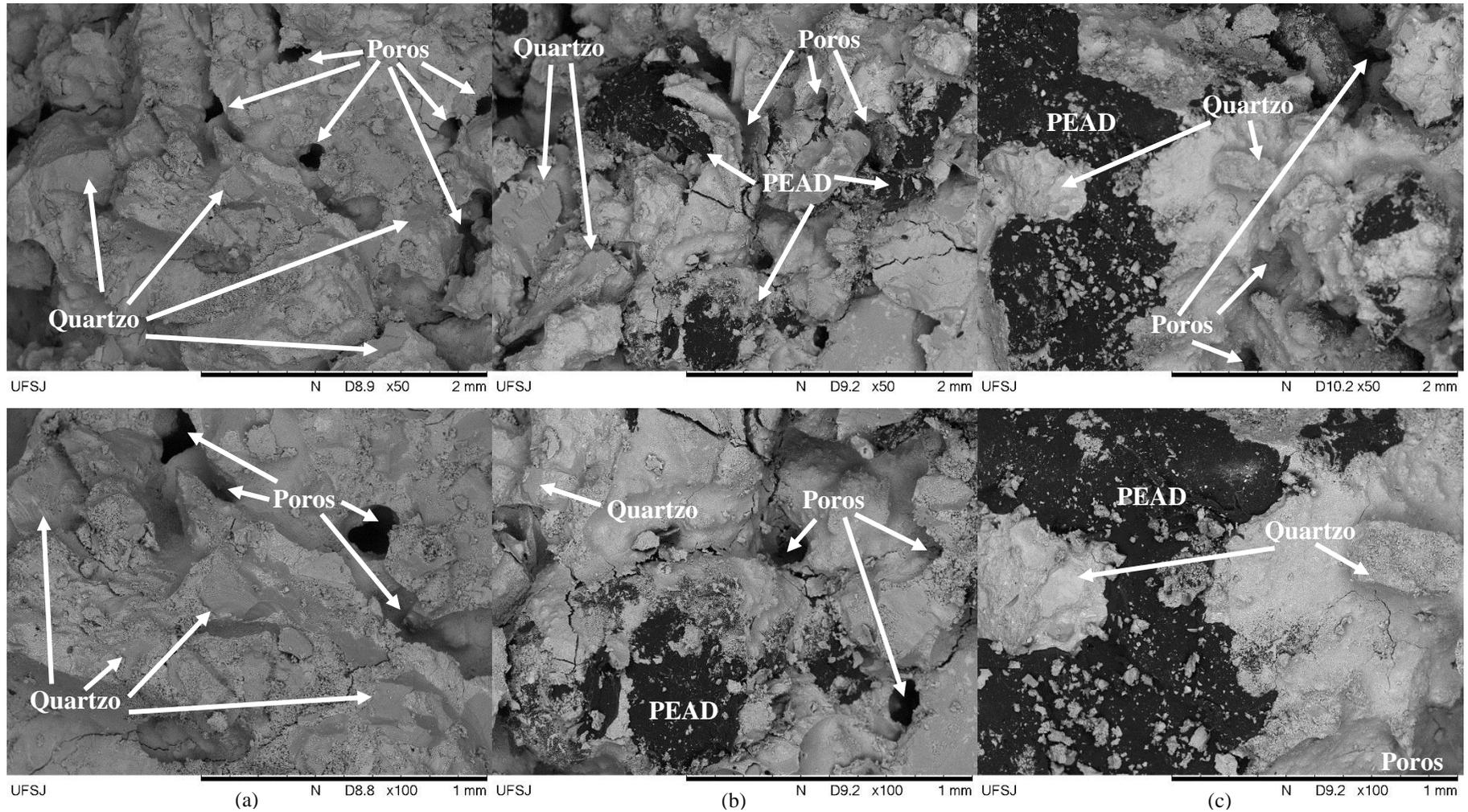


Figura 4.15: Compósitos com $a/c=5,2$ (a) R2 - Referência, (b) C1 - Mínimo de agregados de PEAD, (c) C3 - Máximo de agregados de PEAD

4.3. Variáveis respostas

As variáveis respostas estudadas foram: resistência à compressão, resistência à flexão, porosidade aparente, absorção de água, densidade volumétrica, densidade aparente, velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade. A Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam a média e desvio padrão das propriedades avaliadas. Apesar dos parâmetros do experimento serem variáveis contínuas, pode-se analisar o comportamento das variáveis-resposta com sua variação.

Conforme esperado por meio da análise estrutural, de uma maneira geral, pode-se afirmar que à medida em que são incorporadas as partículas de PEAD há a redução da resistência à compressão, resistência à flexão, densidades e UPV e o aumento da porosidade e absorção de água. Estes comportamentos são atribuídos à baixa densidade e resistência mecânica do agregado polimérico em comparação ao agregado de quartzo, e menor adesão com a pasta cimentícia. Os tópicos a seguir apresentam os resultados obtidos de cada variável resposta ao analisar o experimento.

Tabela 4.1: Resultados do experimento (parte 1)

%	Variáveis Resposta	Relação agregado/cimento							
		3,75		4,4		5,25			
		R3		R1		R2			
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2		
0%	Resistência à compressão (MPa)	28,65 ± 5,81	28,60 ± 4,54	23,48 ± 2,45	23,52 ± 3,29	14,92 ± 0,89	14,31	±	0,88
	Resistência à flexão (MPa)	7,38 ± 0,58	7,43 ± 0,49	6,34 ± 0,26	6,55 ± 0,47	5,65 ± 0,58	5,04	±	0,22
	Porosidade (%)	16,06 ± 2,67	12,96 ± 1,45	19,47 ± 0,51	15,69 ± 2,41	22,60 ± 0,50	22,39	±	2,01
	Absorção de água (%)	7,68 ± 1,40	6,00 ± 0,70	9,47 ± 0,32	7,49 ± 1,30	11,45 ± 0,31	11,45	±	1,11
	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	2,10 ± 0,04	2,16 ± 0,01	2,06 ± 0,02	2,10 ± 0,02	1,97 ± 0,01	1,96	±	0,02
	Densidade Aparente (g/cm ³)	2,50 ± 0,04	2,48 ± 0,03	2,55 ± 0,01	2,49 ± 0,05	2,55 ± 0,01	2,52	±	0,05
	UPV (km/s)	4,06 ± 0,13	4,18 ± 0,08	3,95 ± 0,05	4,02 ± 0,03	3,73 ± 0,03	3,60	±	0,04
	Módulo de Elasticidade (GPa)	32,77 ± 2,77	35,75 ± 1,39	30,36 ± 0,82	32,09 ± 0,72	26,07 ± 0,55	24,03	±	0,48
		C2		C6		C1			
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2		
24%	Resistência à compressão (MPa)	18,25 ± 0,69	18,55 ± 1,75	12,62 ± 1,28	11,93 ± 1,00	8,15 ± 0,51	8,92	±	1,46
	Resistência à flexão (MPa)	5,05 ± 0,44	5,25 ± 0,22	4,34 ± 0,43	4,50 ± 0,28	3,39 ± 0,33	3,70	±	0,31
	Porosidade (%)	18,81 ± 0,20	17,48 ± 1,05	21,42 ± 0,86	21,31 ± 0,42	24,67 ± 0,61	24,67	±	0,53
	Absorção de água (%)	10,41 ± 0,11	9,58 ± 0,60	12,31 ± 0,67	12,21 ± 0,45	14,87 ± 0,40	14,76	±	0,29
	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	1,81 ± 0,01	1,83 ± 0,01	1,74 ± 0,03	1,75 ± 0,03	1,66 ± 0,01	1,67	±	0,01
	Densidade Aparente (g/cm ³)	2,23 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,22 ± 0,03	2,20 ± 0,01	2,22	±	0,02
	UPV (km/s)	3,41 ± 0,05	3,44 ± 0,11	3,24 ± 0,09	3,23 ± 0,03	2,90 ± 0,03	2,94	±	0,05
	Módulo de Elasticidade (GPa)	19,89 ± 0,46	20,53 ± 1,38	17,29 ± 1,16	17,27 ± 0,58	13,24 ± 0,32	13,68	±	0,49

Tabela 4.2: Resultados do experimento (parte 2)

% PEAD	Variáveis Resposta	Relação agregado/cimento					
		3,75		4,4		5,25	
		C8		C9		C5	
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
~50%	Resistência à compressão (MPa)	10,90 ± 1,12	10,54 ± 0,72	7,04 ± 0,77	6,17 ± 0,85	4,89 ± 0,52	4,59 ± 0,42
	Resistência à flexão (MPa)	3,79 ± 0,51	3,42 ± 0,60	2,70 ± 0,30	2,46 ± 0,21	2,24 ± 0,22	2,32 ± 0,29
	Porosidade (%)	21,21 ± 0,91	21,64 ± 0,67	24,64 ± 0,38	25,62 ± 1,03	27,50 ± 0,14	27,35 ± 0,16
	Absorção de água (%)	14,46 ± 0,66	14,79 ± 0,76	17,93 ± 0,47	18,65 ± 1,01	20,86 ± 0,23	20,76 ± 0,19
	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	1,47 ± 0,01	1,46 ± 0,03	1,37 ± 0,02	1,37 ± 0,02	1,32 ± 0,01	1,32 ± 0,01
	Densidade Aparente (g/cm ³)	1,86 ± 0,02	1,87 ± 0,02	1,82 ± 0,01	1,85 ± 0,02	1,82 ± 0,02	1,81 ± 0,01
	UPV (km/s)	2,70 ± 0,04	2,68 ± 0,04	2,38 ± 0,03	2,35 ± 0,14	2,11 ± 0,09	2,11 ± 0,04
	Módulo Dinâmico (GPa)	10,16 ± 0,29	9,98 ± 0,50	7,34 ± 0,21	7,22 ± 0,92	5,57 ± 0,53	5,56 ± 0,24
		C4		C7		C3	
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
~80%	Resistência à compressão (MPa)	6,89 ± 1,05	7,57 ± 0,66	4,11 ± 0,16	4,27 ± 0,31	2,98 ± 0,67	3,13 ± 0,34
	Resistência à flexão (MPa)	2,88 ± 0,14	2,27 ± 0,26	1,62 ± 0,18	1,83 ± 0,22	1,47 ± 0,18	1,57 ± 0,15
	Porosidade (%)	23,90 ± 0,59	23,03 ± 0,21	27,17 ± 1,50	26,02 ± 0,59	28,44 ± 0,60	29,52 ± 0,82
	Absorção de água (%)	20,97 ± 0,82	19,98 ± 0,35	25,71 ± 1,82	24,33 ± 0,56	28,08 ± 0,86	29,46 ± 1,17
	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	1,14 ± 0,02	1,15 ± 0,01	1,06 ± 0,02	1,07 ± 0,00	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01
	Densidade Aparente (g/cm ³)	1,50 ± 0,02	1,50 ± 0,01	1,45 ± 0,01	1,45 ± 0,01	1,42 ± 0,00	1,42 ± 0,00
	UPV (km/s)	2,19 ± 0,11	2,20 ± 0,02	1,84 ± 0,02	1,87 ± 0,04	1,67 ± 0,07	1,66 ± 0,08
	Módulo Dinâmico (GPa)	5,19 ± 0,61	5,27 ± 0,14	3,39 ± 0,06	3,56 ± 0,16	2,67 ± 0,24	2,61 ± 0,29

4.3.1. Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão dos compósitos variaram de 2,98 MPa a 18,55 MPa e das referências de 14,31 MPa a 28,65 MPa. A Figura 4.16 mostra os resultados de resistência à compressão exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Pode-se notar que as composições com maior relação agregado/cimento e menor percentual de PEAD possuem maior resistência à compressão.

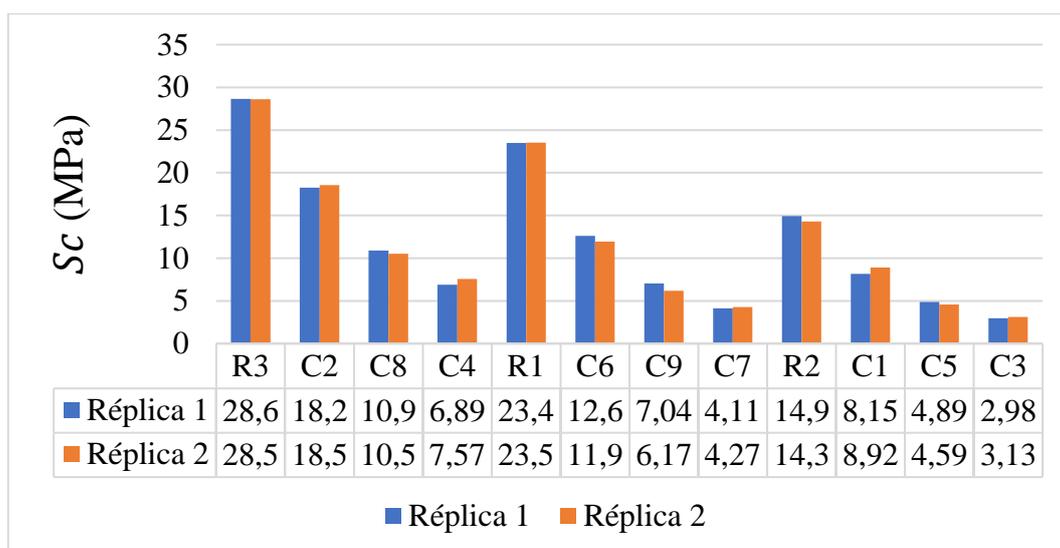


Figura 4.16: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta resistência à compressão

Pode-se notar que a resistência à compressão reduz em até aproximadamente 80% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.17 mostra a variação percentual da resistência à compressão à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.



Figura 4.17: Variação da resistência à compressão com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável resistência à compressão (S_c) relacionando as proporções matriz cimentícia (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.3. Utilizando o método *stepwise*, todos os termos foram significativos, sendo o modelo para a resistência à compressão formado pelos termos lineares e todas as interações.

Tabela 4.3: ANOVA para o modelo relativo à variável resistência à compressão

ANOVA para S_c (MPa)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,000
Cimento*PEAD		0,000
Cimento*Quartzo		0,001
PEAD*Quartzo		0,000
$R^2=99,31\%$	$R^2(\text{pred})= 98,43\%$	$R^2(\text{adj})= 99,02\%$

Com base na análise estatística, pode-se dizer que o modelo de regressão é significativo e, neste caso, todos os termos de interação quadráticos também, visto que os p-valores são menores que o nível de significância adotado neste experimento ($p - \text{valor} < \alpha$ e $\alpha = 0,05$). Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório.

A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.18.

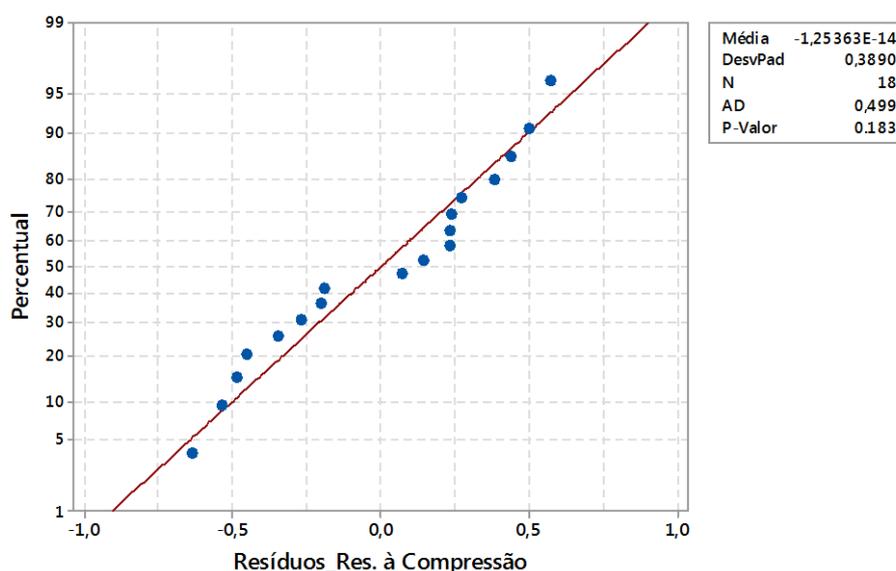


Figura 4.18: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta resistência à compressão

Os resíduos da variável resposta resistência à compressão apresentaram comportamento adequado às condições de normalidade do experimento. Os pontos no gráfico estão localizados, aproximadamente, ao longo de uma linha reta e não existem “outliers”, que poderiam representar uma fonte de erro na coleta dos dados. Pelo teste de Anderson Darling não se pode rejeitar a hipótese de que os resíduos seguem uma distribuição normal, uma vez que o p-valor encontrado foi de 0,183, que é maior que o nível de significância adotado para a análise dos dados neste experimento ($\alpha=0,05$). Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido. O polinômio ajustado aos dados experimentais da resistência à compressão é apresentado na Equação (4.1).

$$S_c = 1298,91x_1 + 57,76x_2 + 31,573x_3 - 1857,5x_1x_2 - 1634,87x_1x_3 - 18,799x_2x_3 \quad (4.1)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável resistência à compressão em relação às proporções de matriz cimentícia, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.19.

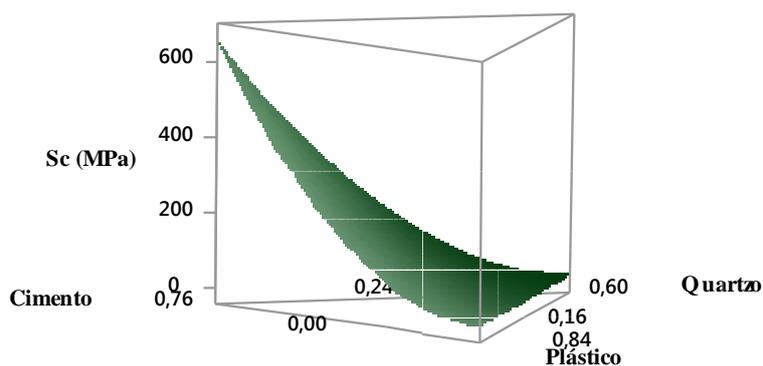


Figura 4.19: Superfície de resposta da variável resistência à compressão

A equação ajustada aos dados experimentais possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.20.

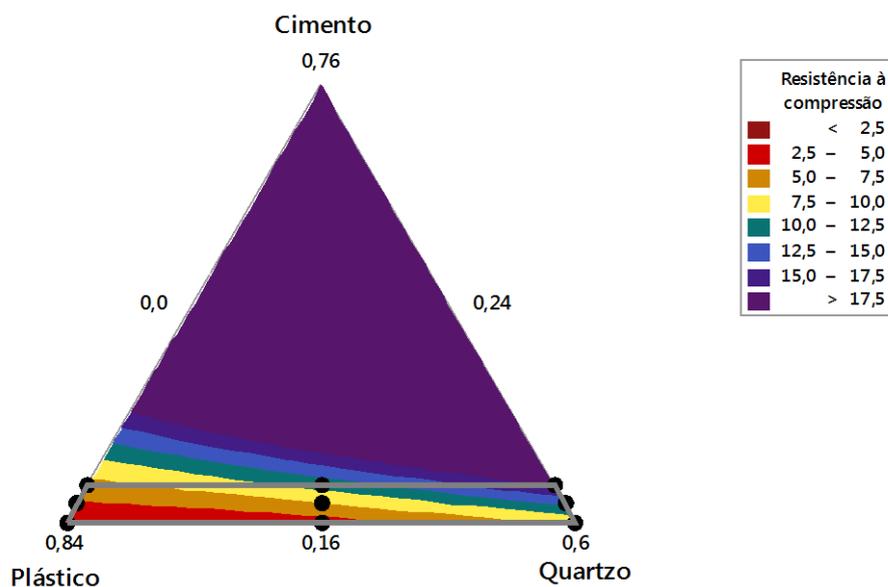


Figura 4.20: Gráfico de contorno da variável resistência à compressão

O gráfico apresenta as faixas de resistência à compressão dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que à medida em que se reduz o percentual de cimento e/ou aumenta-se o de PEAD há a redução da resistência à compressão. Por meio do modelo estatístico, é possível

encontrar a resposta ótima para maximizar a variável resistência à compressão (Figura 4.21).

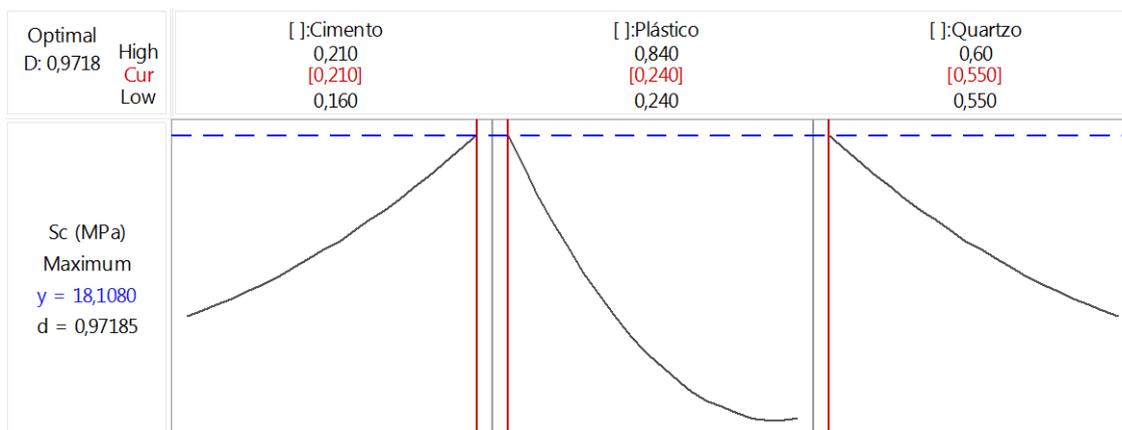


Figura 4.21: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à compressão

A Figura 4.21 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Nota-se que a matriz cimentícia influencia positivamente na resistência à compressão, enquanto os agregados, negativamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso significa que uma maior relação agregado/cimento implica em uma menor resistência à compressão, visto que há a redução do percentual de matriz cimentícia e consequente aumento do percentual de agregados. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica na redução da resistência à compressão, uma vez que há uma baixa adesão das partículas de PEAD à matriz cimentícia, resultando em uma zona de interface de transição mais porosa.

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que, nesse caso são o máximo de matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), que representa uma relação agregado/cimento de 3,75. Essa condição resulta em uma resistência à compressão de $S_c = 18,11$ MPa, representada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,97185$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.2. Resistência à flexão

Os valores de resistência à flexão dos compósitos variaram de 1,47 MPa a 5,24 MPa e das referências de 5,04 MPa a 7,43 MPa. A Figura 4.22 mostra os resultados de resistência à flexão exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Assim como ocorre com a variável resistência à compressão, pode-se notar que a resistência à flexão aumenta com a redução da relação agregado/cimento e com a redução do percentual de PEAD incorporado.

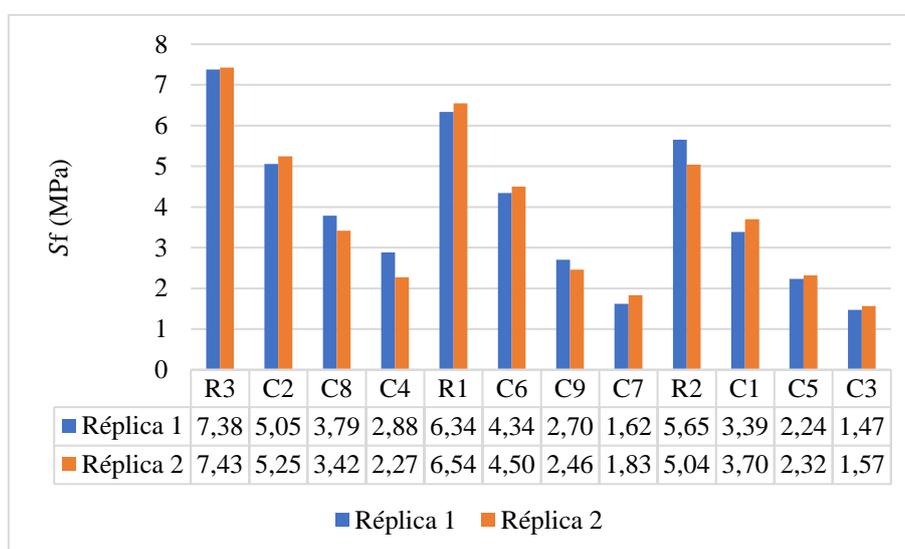


Figura 4.22: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta resistência à flexão

Pode-se notar que a resistência à flexão reduz em até aproximadamente 75% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.23 mostra a variação percentual na resistência à flexão à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

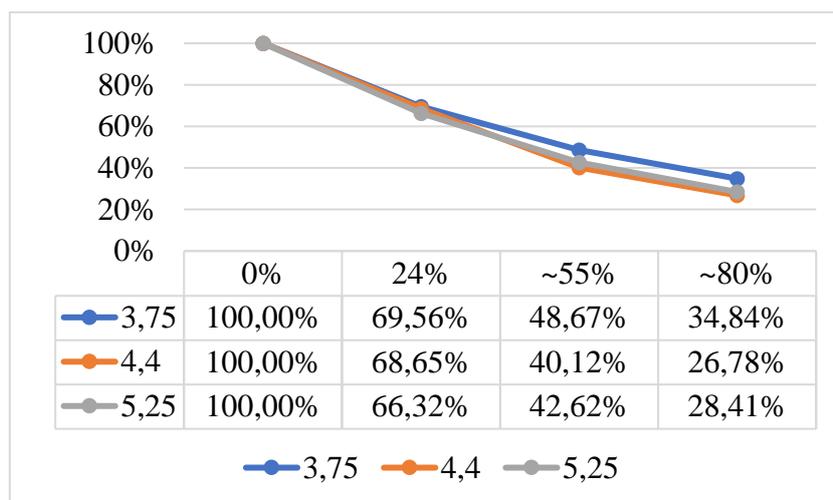


Figura 4.23: Variação da resistência à flexão com a incorporação de partículas de PEAD

Seguindo a metodologia estatística utilizada, os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável resistência à compressão (S_c) relacionando as proporções de matriz cimentícia (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Ajustes do modelo polinomial aplicado à variável resistência à flexão

ANOVA para S_f (MPa)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,001
Cimento*PEAD		0,001
PEAD*Quartzo		0,026
$R^2=97,68\%$	$R^2(\text{pred})=95,73\%$	$R^2(\text{adj})=96,97\%$

Com base na análise estatística, pode-se dizer que o modelo de regressão é satisfatório (R^2 próximos a 100%) e significativo. Neste caso, o método *stepwise* retornou somente os termos de interação quadráticos do cimento com PEAD e do PEAD com quartzo, visto que seus p-valores são menores que o nível de significância adotado neste experimento. A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.24, sendo os resíduos da variável resposta resistência à flexão adequados às condições de normalidade do experimento (p-valor=0,948).

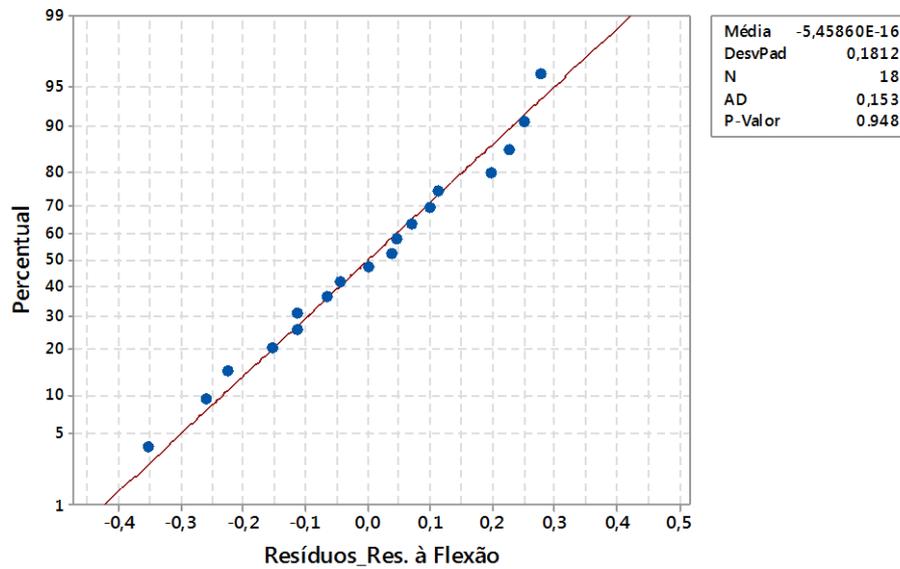


Figura 4.24: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta resistência à flexão

Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido. O polinômio ajustado aos dados experimentais da resistência à compressão é apresentado na Equação (4.2).

$$S_f = 43,84x_1 + 0,0858282x_2 - 2,72754x_3 - 41,806x_1x_2 - 3,13672x_2x_3 \quad (4.2)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta e um gráfico de contorno com o comportamento da variável resistência à flexão em relação às proporções de matriz cimentícia, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrados na Figura 4.25 e na Figura 4.26.

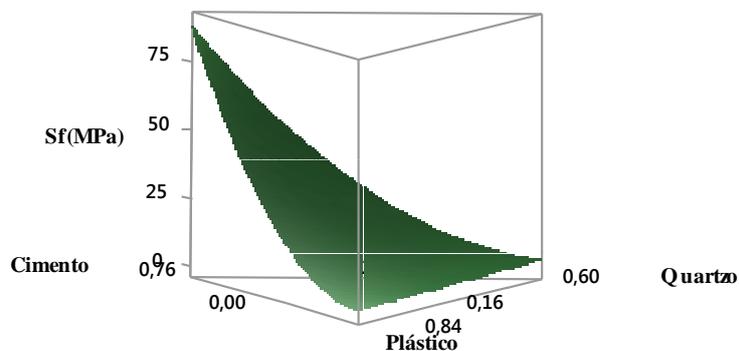


Figura 4.25: Superfície de resposta da variável resistência à flexão

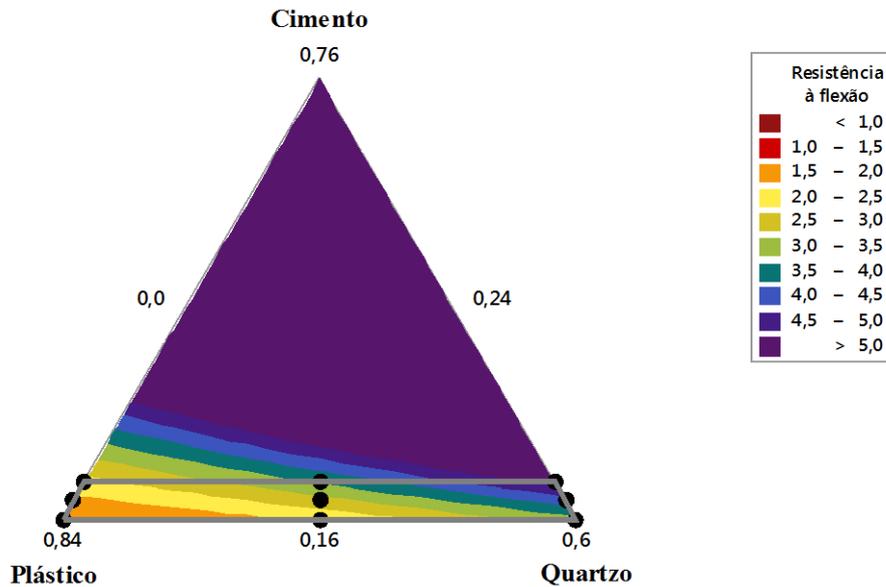


Figura 4.26: Gráfico de contorno da variável resistência à flexão

Com base na análise das Figuras 4.23 e 4.24, é possível notar que, assim como ocorre com a variável resistência à compressão, à medida em que se reduz o percentual de matriz cimentícia e/ou aumenta-se o de PEAD há a redução da resistência à compressão. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para maximizar a variável resistência à flexão (Figura 4.27).

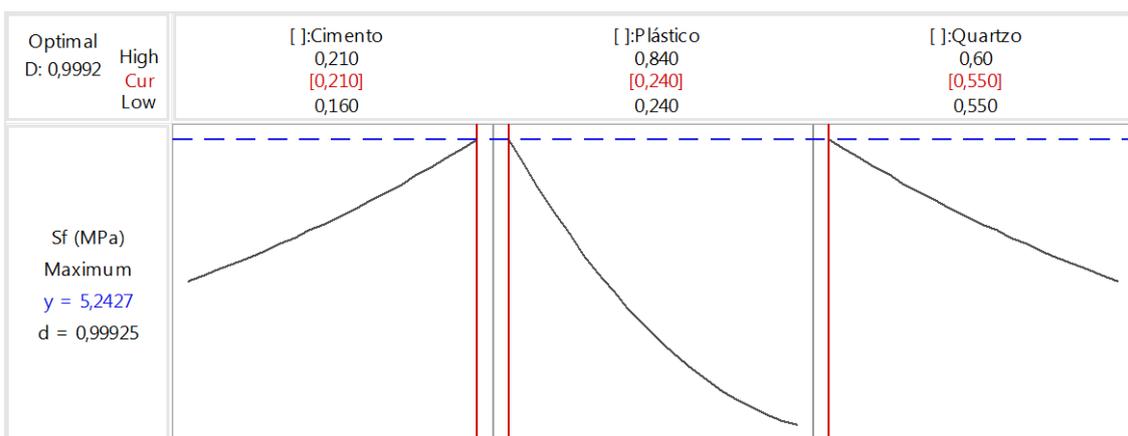


Figura 4.27: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à flexão

A Figura 4.27 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Nota-se que, assim como na resistência à compressão, o cimento influencia positivamente na

resistência à flexão, enquanto os agregados, negativamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso significa que uma maior relação agregado/cimento implica em uma menor resistência à flexão, visto que há a redução do percentual de matriz cimentícia e consequente aumento do percentual de agregados. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica na redução da resistência à flexão, uma vez que há uma baixa adesão das partículas de PEAD à matriz cimentícia, resultando em uma zona de interface de transição mais porosa.

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que, nesse caso são o máximo matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), ou seja, uma relação agregado/cimento de 3,75 com o mínimo de incorporação de PEAD, resultando em uma resistência à compressão de $S_f = 5,2427\text{MPa}$, representada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,99225$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.3. Porosidade aparente

Os valores de porosidade aparente dos compósitos variaram de 17,48% a 29,52% e das referências de 12,96% a 22,60%. A Figura 4.28 mostra os resultados de porosidade aparente exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Em linhas gerais, pode-se dizer que um aumento na relação agregado/cimento, assim como o aumento da incorporação de PEAD, ocasionam um aumento na porosidade aparente.

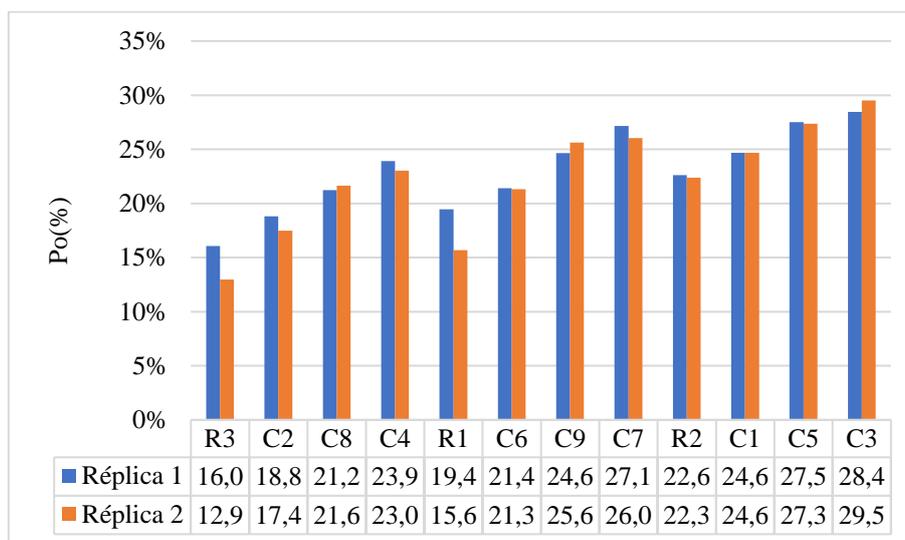


Figura 4.28: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta porosidade aparente

Pode-se notar que a porosidade aparente aumenta em até aproximadamente 60% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.29 mostra a variação percentual na porosidade aparente à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

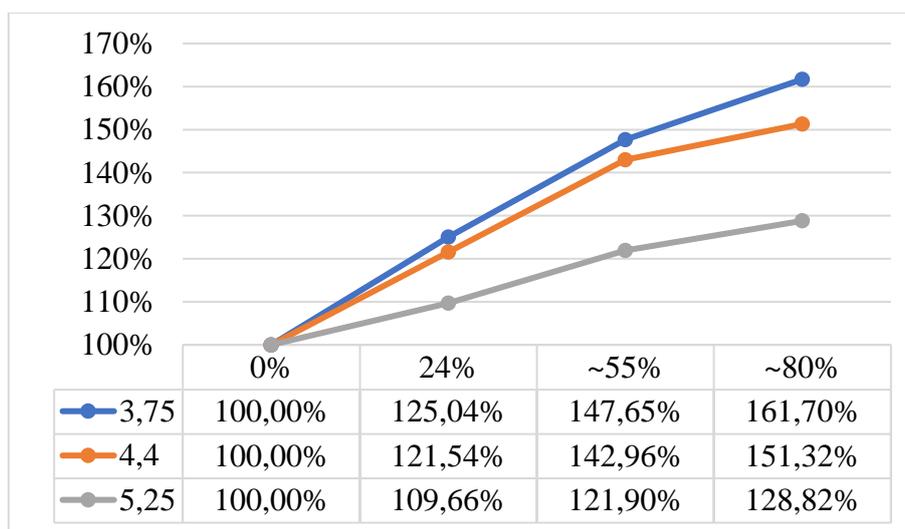


Figura 4.29: Variação da porosidade aparente com a incorporação de partículas de PEAD

Seguindo a metodologia estatística, os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável porosidade (P_o) relacionando as proporções de matriz cimentícia (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: ANOVA para o modelo relativo à variável porosidade aparente

ANOVA para $P_o(\%)$		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,019
PEAD*Quartzo		0,019
$R^2=97,39\%$	$R^2(\text{pred})=95,67\%$	$R^2(\text{adj})=96,83\%$

Com base na análise estatística, pode-se dizer que o modelo de regressão possui ajustes satisfatórios (R^2 próximos a 100%), sendo somente os termos lineares e a interação do PEAD e plástico significativos pelo método *stepwise*. (p – valor < 0,05).

A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos (p – valor $> 0,05$), apresentados na Figura 4.30.

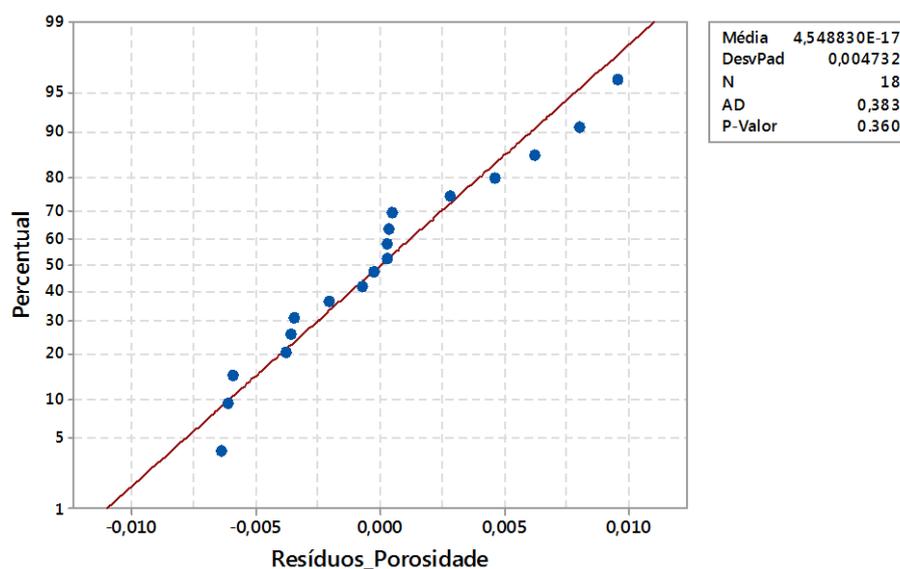


Figura 4.30: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta porosidade aparente

Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido. O polinômio ajustado aos dados experimentais da resistência à compressão é apresentado na Equação (4.3).

$$P_o = -0,746294x_1 + 0,492564x_2 + 0,383643x_3 + 0,0954949x_2x_3 \quad (4.3)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta e um gráfico de contorno com o comportamento da variável porosidade em relação às proporções de cimento, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.31 e Figura 4.30. Os gráficos apresentam as faixas de porosidade aparente dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, à medida em que se aumenta o percentual de matriz cimentícia e/ou reduz-se o de PEAD, há a redução da porosidade aparente.

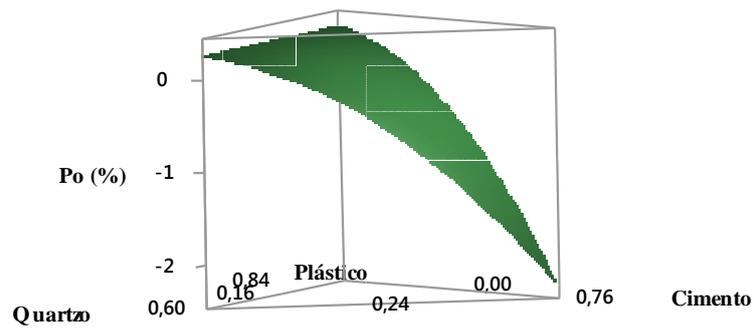


Figura 4.31: Superfície de resposta da variável porosidade aparente

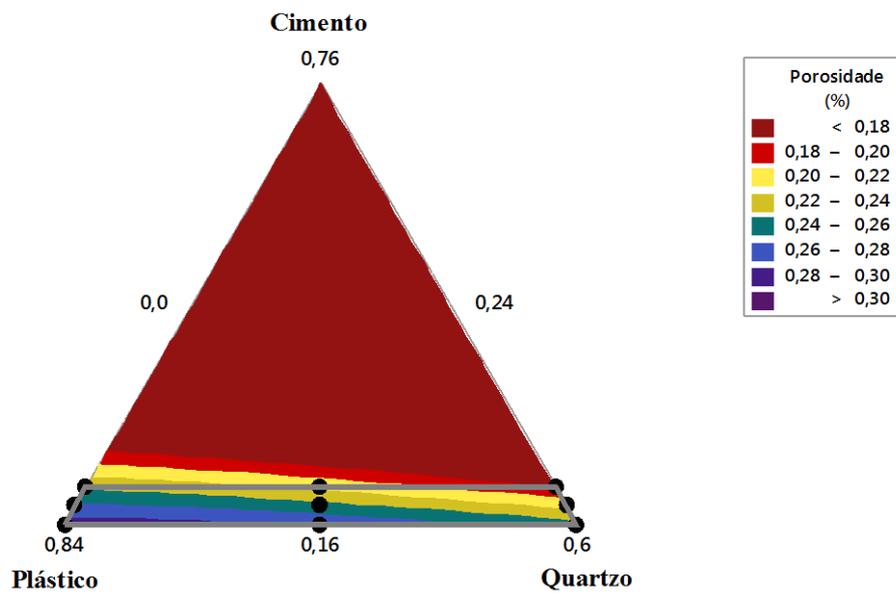


Figura 4.32: Gráfico de contorno da variável porosidade aparente

Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para minimizar a resposta porosidade aparente (Figura 4.33).

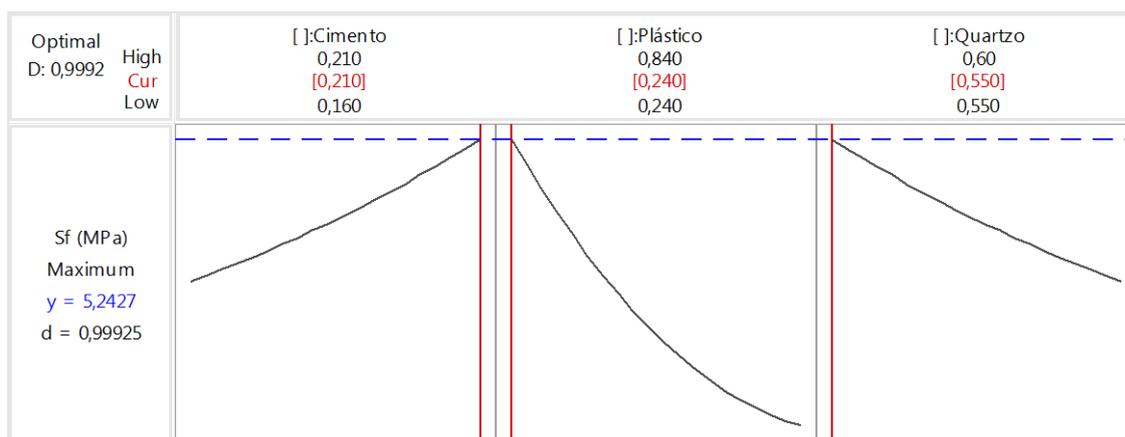


Figura 4.33: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a porosidade aparente

A Figura 4.21 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Uma vez que o objetivo é a redução da porosidade aparente, nota-se que há uma influência positiva da matriz cimentícia e negativa dos agregados, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Ou seja, um aumento na relação agregado/cimento reduz o desempenho da porosidade aparente, visto que há a redução do percentual de matriz cimentícia e conseqüente aumento do percentual de agregados, gerando mais poros no material. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica no aumento da porosidade aparente, uma vez que há uma baixa adesão das partículas de PEAD à matriz cimentícia, resultando em uma zona de interface de transição mais porosa.

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que, assim como nas variáveis resistência à compressão e à flexão, são uma relação agregado/cimento de 3,75 e o mínimo de incorporação de PEAD. Em termos do modelo, as proporções ótimas são o máximo de matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), resultando em uma porosidade aparente de $P_o = 18,02\%$, indicada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,95550$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.4. Absorção de água

Os valores de absorção de água dos compósitos variaram de 9,58% a 29,46% e das referências de 6,00% a 11,45%. A Figura 4.34 mostra os resultados de absorção de água exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Por terem

significados práticos semelhantes, pode-se dizer que o comportamento apresentado pela variável absorção de água é semelhante ao da porosidade aparente. Isso significa que há o aumento da absorção de água à medida em que se aumenta a relação agregado/cimento e a incorporação de PEAD.

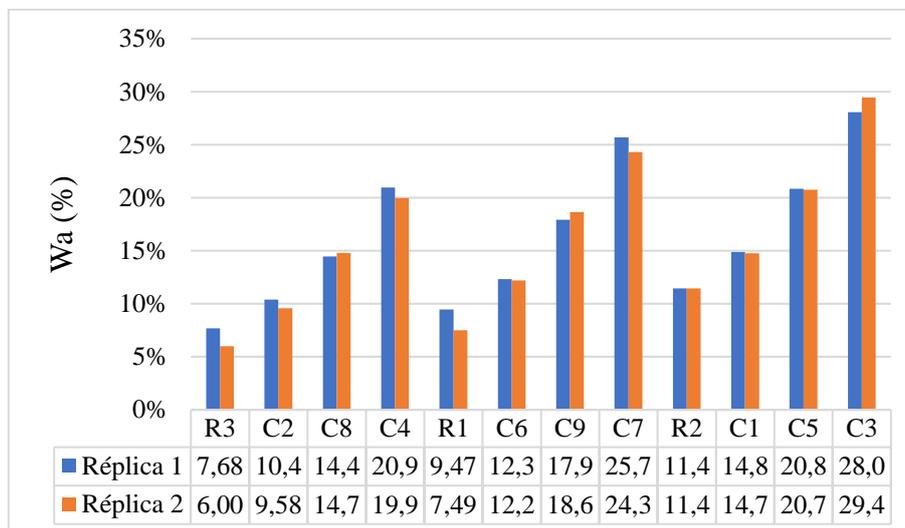


Figura 4.34: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta absorção de água

Pode-se notar que a absorção de água aumenta em até aproximadamente 200% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD, ou seja, quase triplica. A Figura 4.35 mostra a variação percentual na absorção de água à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

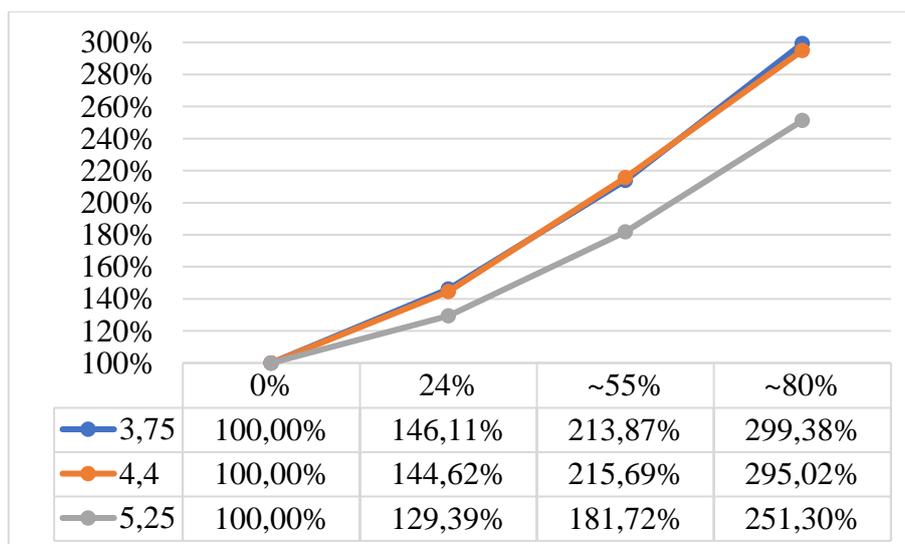


Figura 4.35: Variação da absorção de água com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável absorção de água (W_a) relacionando as proporções de cimento (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na

Tabela 4.6.

Tabela 4.6: ANOVA para o modelo relativo à variável absorção de água

ANOVA para W_a (%)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,006
Cimento*Quartzo		0,008
PEAD*Quartzo		0,030
$R^2=99,37\%$	$R^2(\text{pred})= 98,72\%$	$R^2(\text{adj})= 99,17\%$

Com base na análise estatística, pode-se dizer que o modelo de regressão é significativo e os termos de interação quadráticos relativos a cimento e quartzo e PEAD e quartzo também ($p - \text{valor} < 0,05$). Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório. Por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos, foi verificada a adequação do modelo ($p - \text{valor} > 0,05$), o que é apresentado na Figura 4.36.

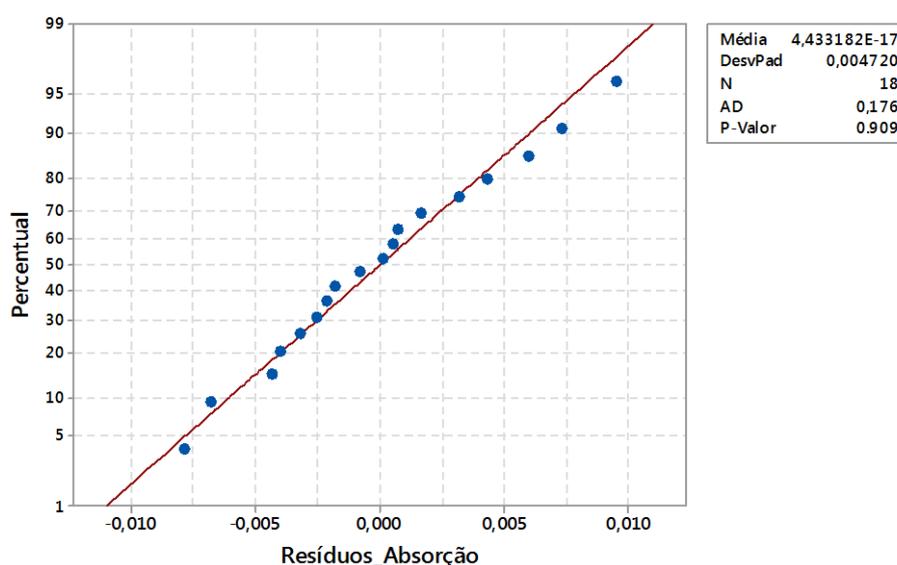


Figura 4.36: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta absorção de água

Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido. O polinômio ajustado aos dados experimentais da absorção de água é apresentado na Equação (4.4).

$$Wa = -1,09118x_1 + 0,551466x_2 + 0,200601x_3 + 0,837164x_1x_3 - 0,0792682x_2x_3 \quad (4.4)$$

Foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável resistência à compressão em relação às proporções de cimento, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.37. Além disso, foi gerado um gráfico de contorno que possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.38

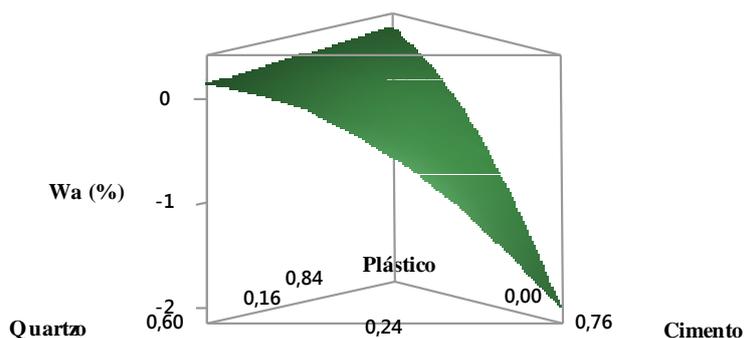


Figura 4.37: Superfície de resposta da variável absorção de água

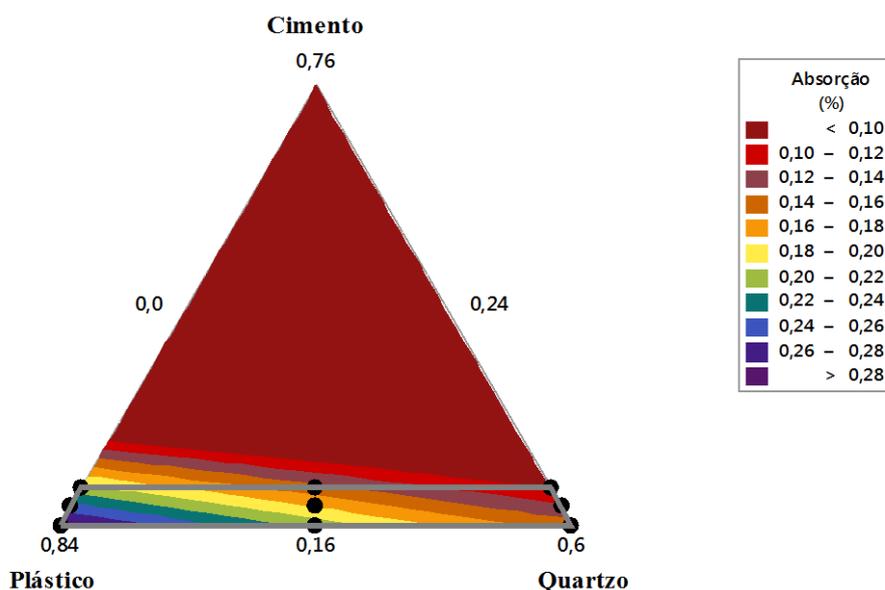


Figura 4.38: Gráfico de contorno da variável absorção de água

O gráfico apresenta as faixas de absorção de água dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, à medida em que se aumenta o percentual de cimento e/ou reduz-se o de PEAD, há a redução da absorção de água. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para minimizar a variável absorção de água (Figura 4.39).

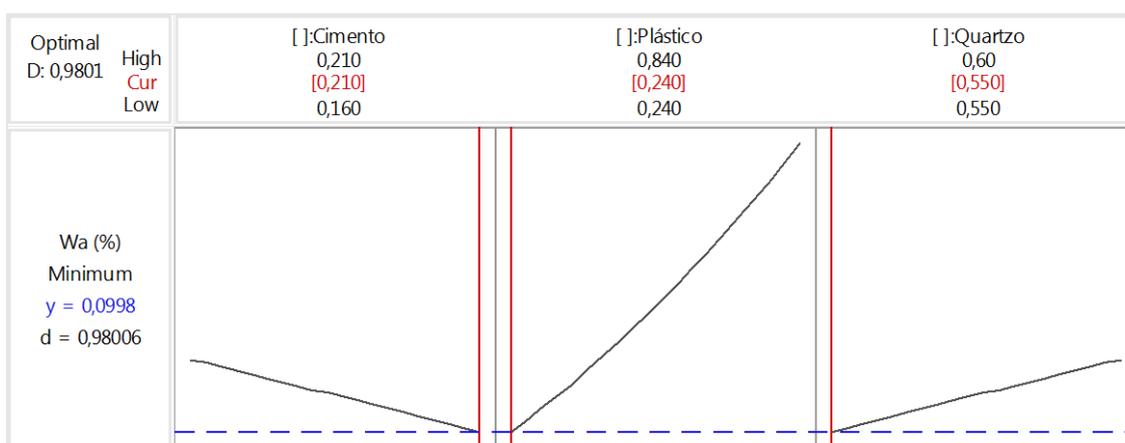


Figura 4.39: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a absorção de água

A Figura 4.39 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Como destacado, por apresentar significado prático bastante semelhante à porosidade aparente, a análise do efeito das proporções sobre a absorção de água ocorre de forma análoga. Uma redução na relação agregado/cimento implica na redução da absorção de água e um aumento na incorporação de PEAD implica no aumento da absorção de água. Ou seja, uma redução na relação agregado/cimento melhora o desempenho da absorção de água, visto que há a o aumento do percentual de matriz cimentícia e conseqüente redução do percentual de agregados. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica no aumento da absorção de água, uma vez que há uma baixa adesão das partículas de PEAD à matriz cimentícia, resultando em uma zona de interface de transição mais porosa.

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que, nesse caso são uma relação agregado cimento de 3,75 e um percentual mínimo de incorporação de PEAD. Em proporções do modelo, o ponto ótimo corresponde ao máximo de matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), resultando em uma absorção de água de $W_a = 9,98\%$

indicada pela linha azul horizontal pontilhada e $d = 0,97185$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.5. Densidade Volumétrica

Os valores de densidade volumétrica dos compósitos variaram de $1,002 \text{ g/cm}^3$ a $1,825 \text{ g/cm}^3$ e das referências de $1,957 \text{ g/cm}^3$ a $2,160 \text{ g/cm}^3$. A Figura 4.40 mostra os resultados de densidade volumétrica exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Uma vez que a redução da densidade é uma característica interessante para compósitos cimentícios, pode-se notar um comportamento diferente das variáveis analisadas até aqui. Ao contrário das resistências à compressão e flexão, porosidade aparente e absorção de água, um aumento da relação agregado/cimento melhora o desempenho da densidade volumétrica, assim como a incorporação de PEAD, ou seja, a reduz.

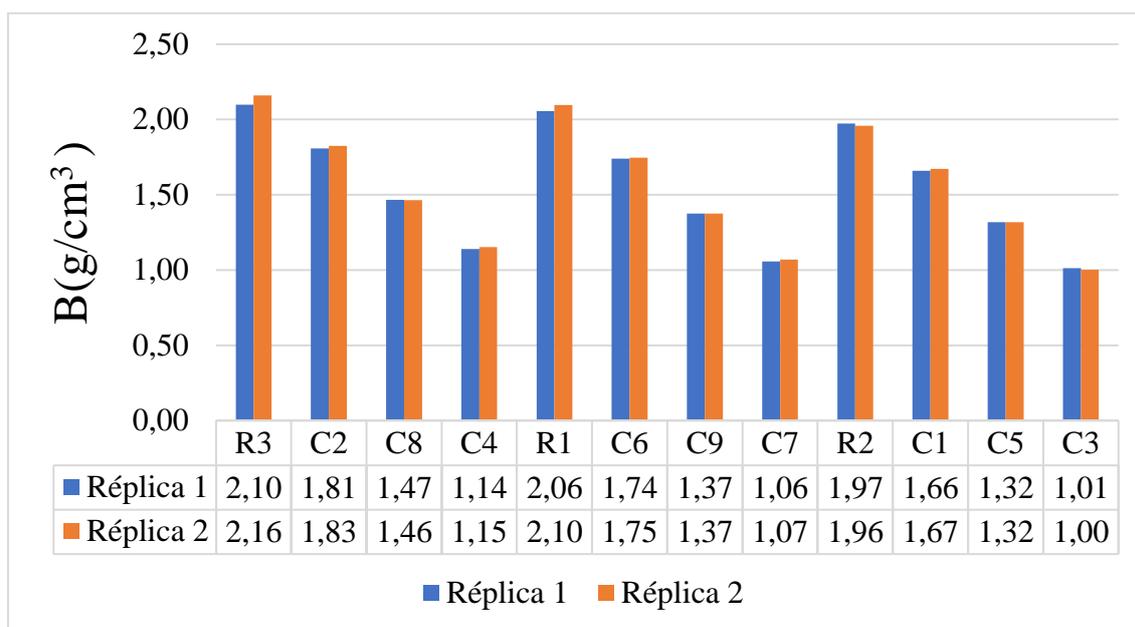


Figura 4.40: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta densidade volumétrica

Pode-se notar que a densidade volumétrica reduz em até aproximadamente 50% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.41 mostra a variação percentual na densidade volumétrica à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

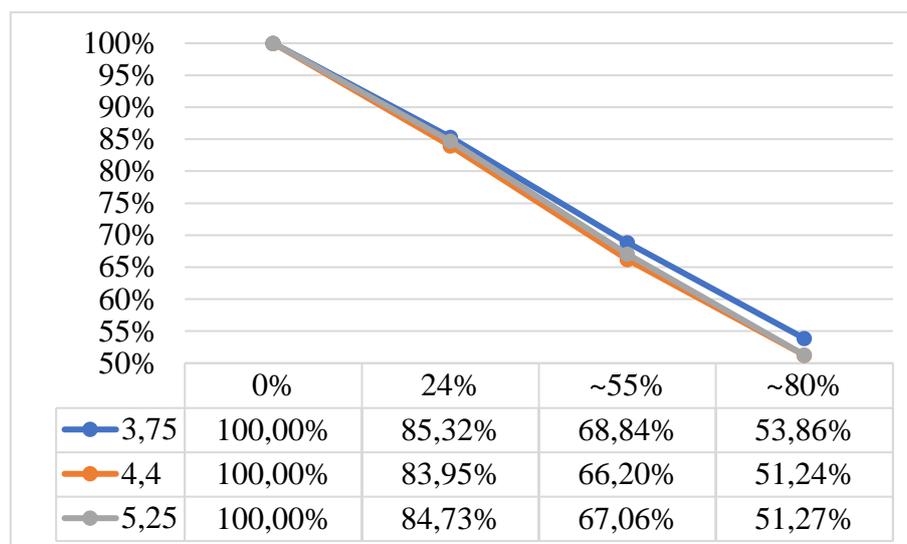


Figura 4.41: Variação da densidade volumétrica com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável densidade volumétrica (B) relacionando as proporções matriz cimentícia (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: ANOVA para o modelo relativo à variável densidade volumétrica

ANOVA para B (g/cm^3)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,000
Cimento*PEAD		0,009
Cimento*Quartzo		0,021
PEAD*Quartzo		0,000
$R^2=99,95\%$	$R^2(\text{pred})= 99,89\%$	$R^2(\text{adj})= 99,93\%$

Utilizando-se o método *stepwise*, é possível obter um modelo completo de regressão, ou seja, todos os termos lineares e de interação quadráticos são significativos (p – valor $< 0,05$). Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório. A adequação do modelo estatístico foi verificada (p – valor $> 0,05$) por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.42.

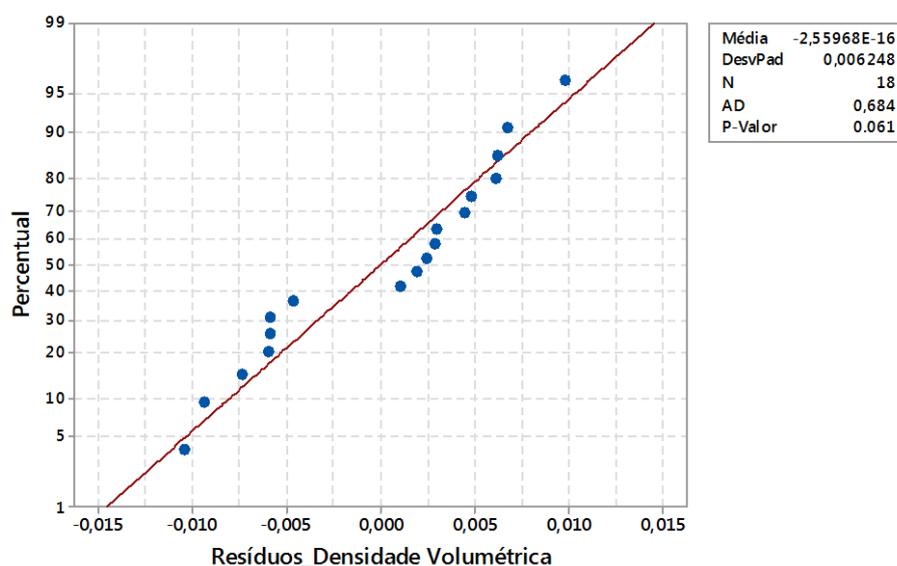


Figura 4.42: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta densidade volumétrica

Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido, sendo o polinômio ajustado aos dados experimentais da densidade volumétrica apresentado na Equação (4.5).

$$B = 15,5669x_1 + 1,17935x_2 + 1,93354x_3 - 18,4121x_1x_2 - 15,8665x_1x_3 - 0,243963x_2x_3 \quad (4.5)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável densidade volumétrica em relação às proporções de cimento, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.43.

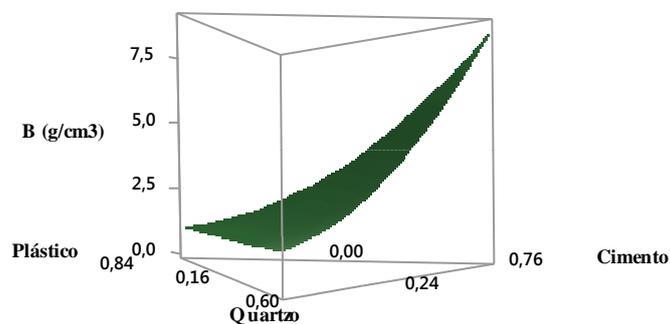


Figura 4.43: Superfície de resposta da variável densidade volumétrica

A equação ajustada aos dados experimentais possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.44.

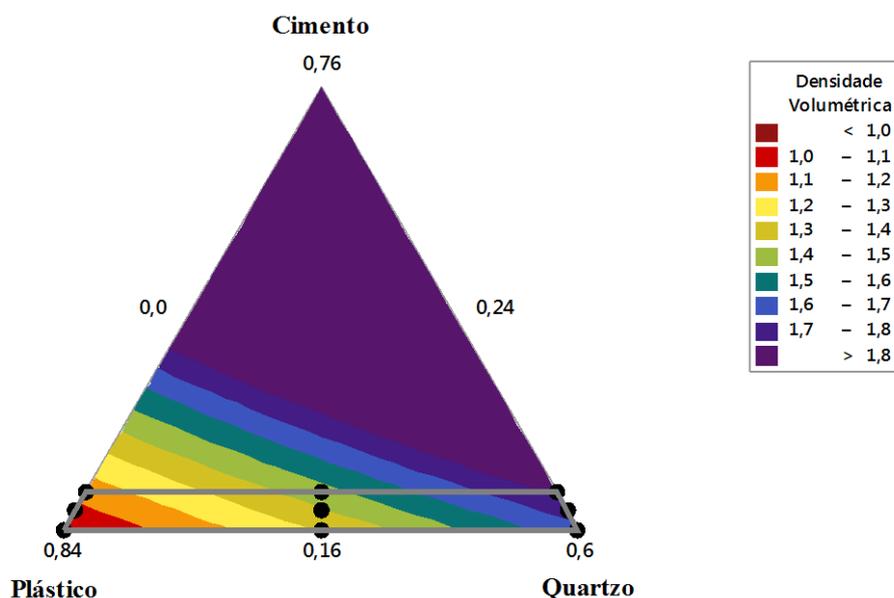


Figura 4.44: Gráfico de contorno da variável densidade volumétrica

O gráfico apresenta as faixas de densidade volumétrica dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, à medida em que se aumenta o percentual de cimento e/ou reduz-se o de PEAD, há o aumento da densidade volumétrica. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para minimizar a variável densidade volumétrica (Figura 4.45).

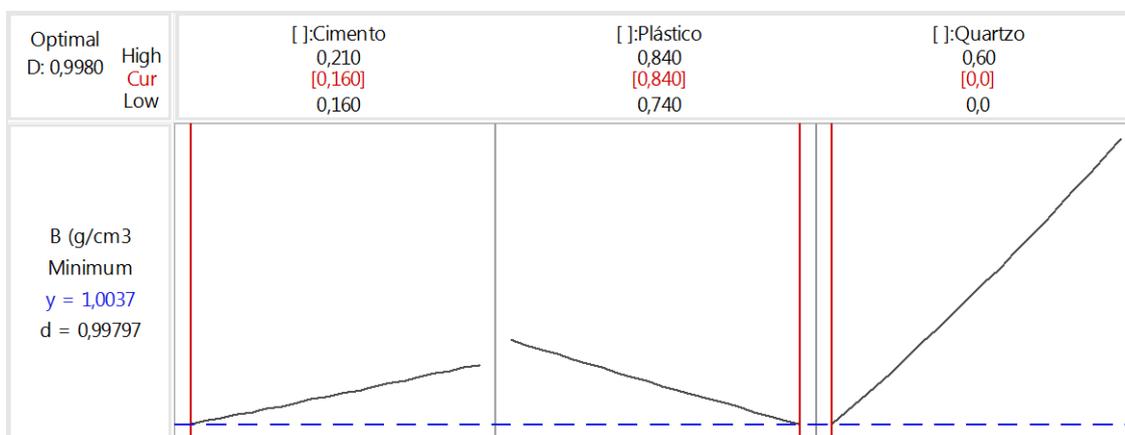


Figura 4.45: Resposta ótima da proporção dos componentes para minimizar a densidade volumétrica

A Figura 4.45 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Como apresentado anteriormente, o efeito dos componentes sobre a variável resposta densidade volumétrica é contrário ao observado nas variáveis resistência à compressão e à flexão, porosidade aparente e absorção de água. Levando em conta o interesse em reduzir a densidade volumétrica, nota-se que o cimento a influencia negativamente, enquanto os agregados, positivamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso ocorre, pois uma redução na relação agregado/cimento implica no aumento do percentual de matriz cimentícia e conseqüente redução do percentual de agregados, resultando em um material mais denso, com menos poros. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica no aumento densidade volumétrica, uma vez que a densidade dessas partículas é aproximadamente 2,5 vezes menor que densidade das partículas de quartzo, impactando diretamente na densidade volumétrica do compósito.

Para a densidade volumétrica, ótimo individual é obtido com uma maior relação agregado/cimento, ou seja, de 5,25 e um percentual máximo de incorporação de PEAD. As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que, nesse caso são o mínimo matriz ($x_1 = 0,16$) e a totalidade dos agregados de PEAD ($x_2 = 0,84$ e $x_3 = 0,00$), resultando em uma densidade volumétrica de $B = 10037\text{g/cm}^3$, indicada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,99797$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.6. Densidade Aparente

Os valores de densidade aparente dos compósitos variaram de $1,416\text{ g/cm}^3$ a $2,226\text{ g/cm}^3$ e das referências de $2,482\text{ g/cm}^3$ a $2,553\text{ g/cm}^3$. A Figura 4.46 mostra os resultados de densidade aparente exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Assim como na densidade volumétrica, a densidade aparente é reduzida com o aumento da relação agregado/cimento e do percentual de incorporação de PEAD.

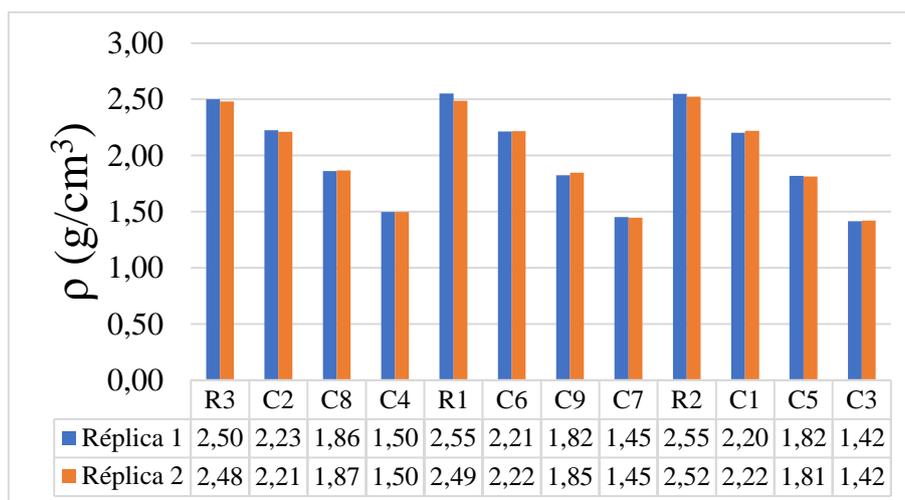


Figura 4.46: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta densidade aparente

Pode-se notar que a densidade aparente reduz em até aproximadamente 50%, ou seja, em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.47 mostra a variação percentual na densidade aparente à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

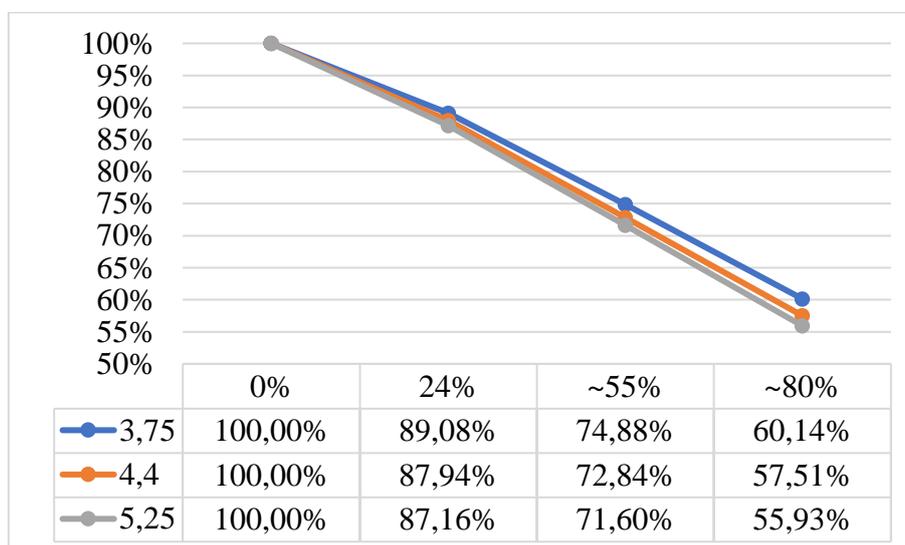


Figura 4.47: Variação da densidade aparente com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável densidade aparente (ρ) relacionando as proporções de cimento (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: ANOVA para o modelo relativo à variável densidade aparente

ANOVA para $\rho(\text{g/cm}^3)$		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
$R^2=99,95\%$	$R^2(\text{pred})= 99,93\%$	$R^2(\text{adj})= 99,95\%$

Para esta variável resposta, são significativos somente os termos lineares do modelo (p – valor $<0,05$). Os termos de interação quadráticos para esse modelo não apresentaram significância, sendo portanto desconsiderados no método *stepwise*. Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório. O modelo apresentou condições de normalidade adequadas, o que pode ser verificado por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.48.

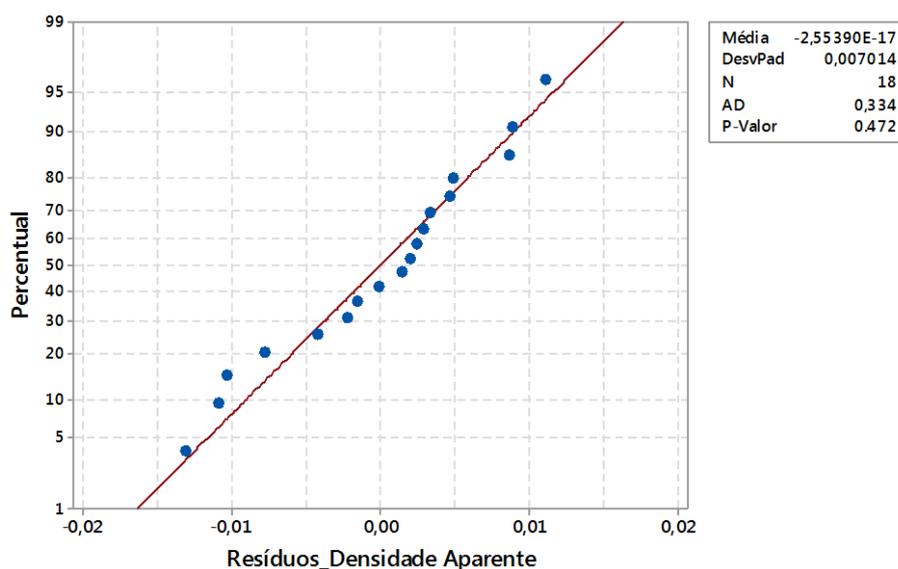


Figura 4.48: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta densidade aparente

Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido e o polinômio ajustado aos dados experimentais da densidade aparente é apresentado na Equação (4.6).

$$\rho = 2,738x_1 + 1,116x_2 + 2,488x_3 \quad (4.6)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta e gráfico de contorno com o comportamento da variável densidade aparente em relação às

proporções de cimento, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.49 e Figura 4.48.

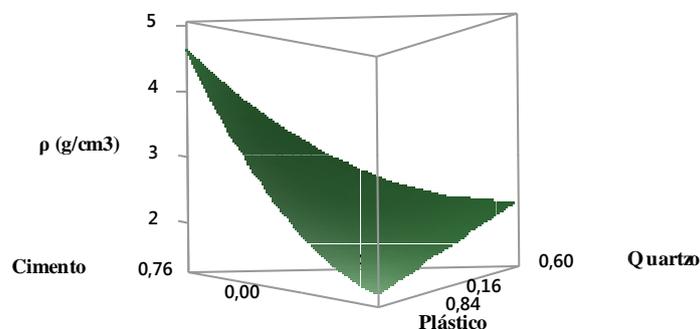


Figura 4.49: Superfície de resposta da variável densidade aparente

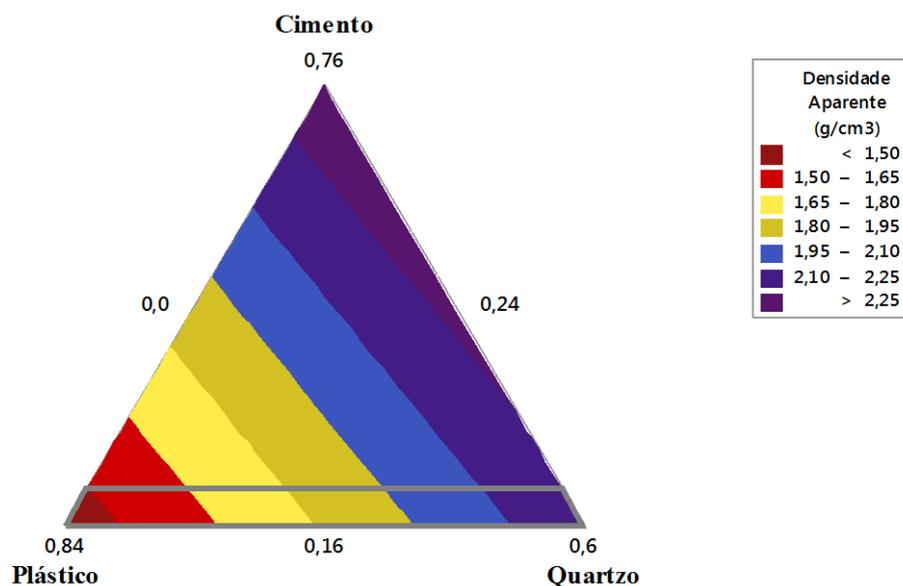


Figura 4.50: Gráfico de contorno da variável densidade aparente

O gráfico apresenta as faixas de densidade aparente dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, assim como ocorre com a densidade volumétrica, à medida em que se aumenta o percentual de cimento e/ou reduz-se o de PEAD, há o aumento da densidade aparente. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para minimizar a variável densidade aparente (Figura 4.51).

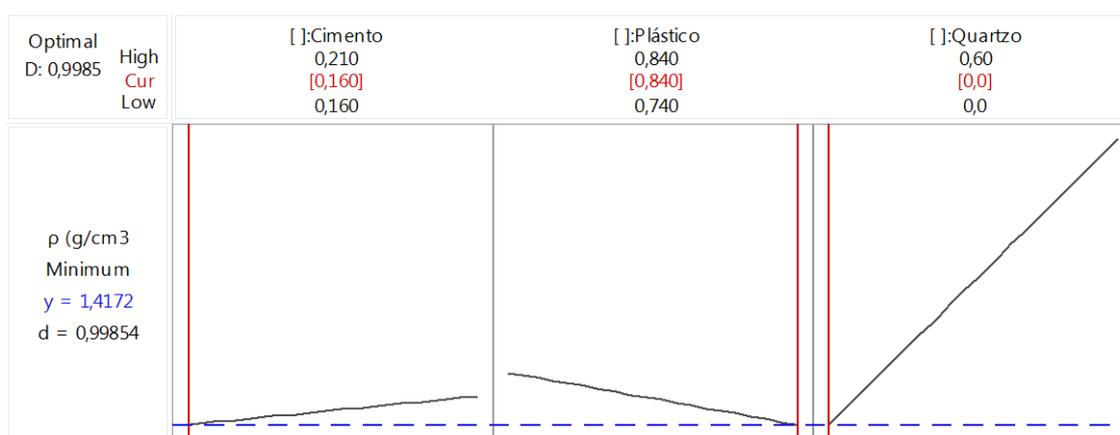


Figura 4.51: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar densidade aparente

A Figura 4.51 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta, sendo este bastante semelhante ao que ocorre com a variável densidade volumétrica. Uma vez que o interesse é reduzir a densidade aparente, nota-se que a matriz cimentícia a influencia negativamente, enquanto os agregados, positivamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso ocorre, pois uma redução na relação agregado/cimento implica no aumento do percentual de matriz cimentícia e conseqüente redução do percentual de agregados, resultando em um material mais denso, com menos poros. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica no aumento densidade aparente, uma vez que a densidade dessas partículas é aproximadamente 2,5 vezes menor que densidade das partículas de quartzo, impactando diretamente na densidade volumétrica do compósito.

Para a densidade volumétrica, ótimo individual é obtido com uma maior relação agregado/cimento, ou seja, de 5,25 e um percentual máximo de incorporação de PEAD. As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que são o mínimo matriz cimentícia ($x_1 = 0,16$) e a totalidade dos agregados de PEAD ($x_2 = 0,84$ e $x_3 = 0,00$), resultando em uma densidade aparente de $\rho = 1,4172 \text{ g/cm}^3$, indicada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,99854$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.7. Velocidade de ultrassom

Os valores de velocidade de ultrassom aos 28 dias dos compósitos variaram de 1,657 km/s a 3,438 km/s e das referências de 3,601 km/s a 4,180 km/s. A Figura 4.52 mostra os resultados de velocidade de ultrassom exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições. Pode-se notar que a velocidade de ultrassom reduz com o aumento da relação agregado/cimento e do percentual de PEAD incorporado, pois o material torna-se menos denso e mais poroso.

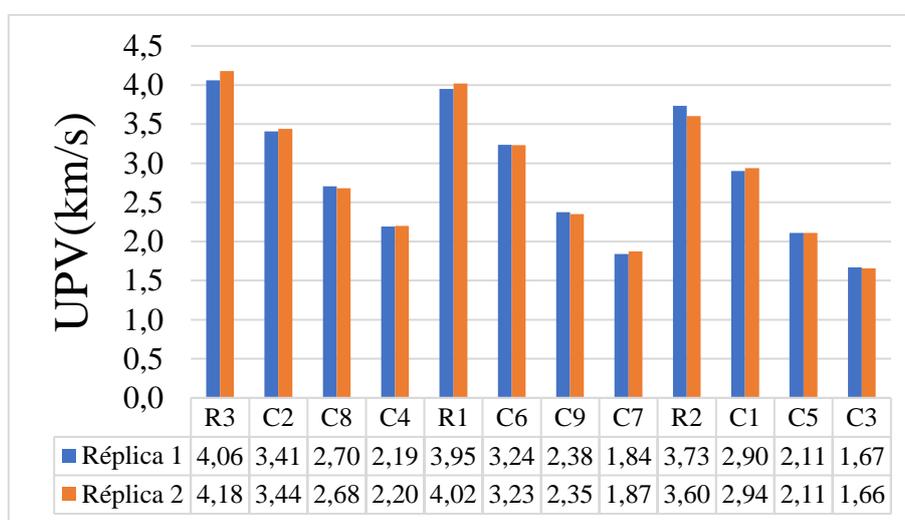


Figura 4.52: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta velocidade de ultrassom

Pode-se notar que a velocidade de ultrassom reduz em até aproximadamente 55% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.53 mostra a variação percentual na resistência à compressão à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

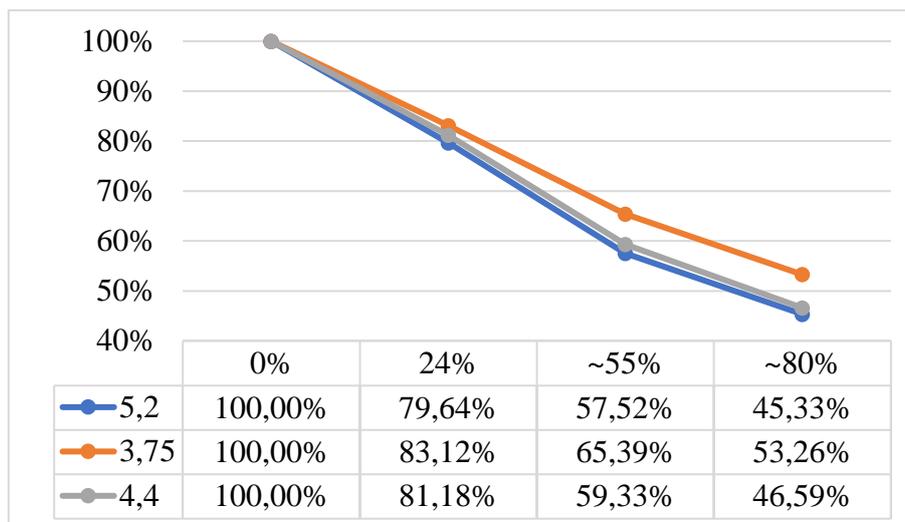


Figura 4.53: Variação da UPV com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável velocidade de ultrassom (v) relacionando as proporções de cimento (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: ANOVA para o modelo relativo à variável velocidade de ultrassom

ANOVA para v (km/s)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,000
PEAD*Quartzo		0,000
$R^2=99,65\%$	$R^2(\text{pred})= 99,43\%$	$R^2(\text{adj})= 99,58\%$

Utilizando-se o método *stepwise*, obtém-se o modelo de regressão com os termos lineares e o termo quadrático de interação do PEAD e quartzo significativos (p – valor $< 0,05$). Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório e o teste de normalidade de Anderson Darling e o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, apresentados na Figura 4.54, indicam a adequação do modelo obtido.

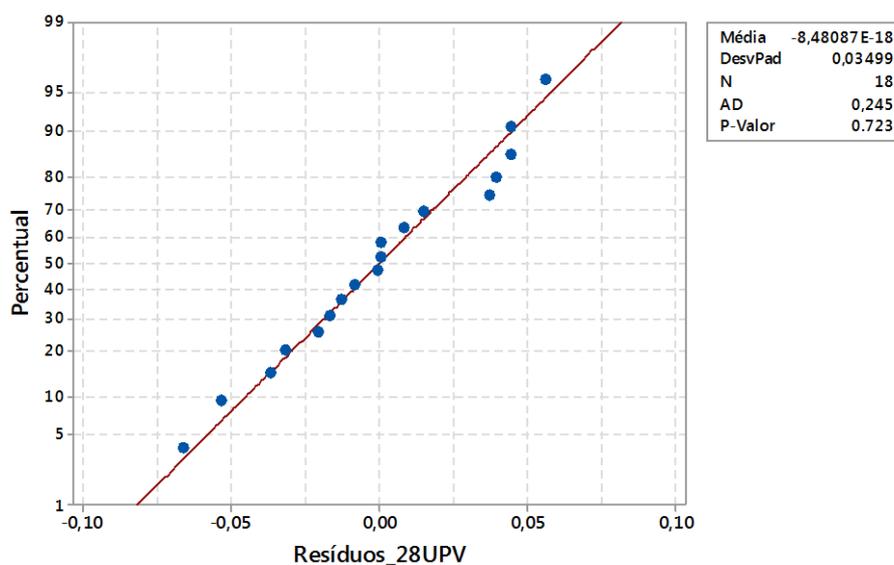


Figura 4.54: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta velocidade de ultrassom

O polinômio ajustado aos dados experimentais da resistência à compressão é apresentado na Equação (4.7).

$$v = 11,4556x_1 - 0,262818x_2 + 2,44278x_3 - 1,9431x_2x_3 \quad (4.7)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável velocidade de ultrassom em relação às proporções de matriz cimentícia, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.55.

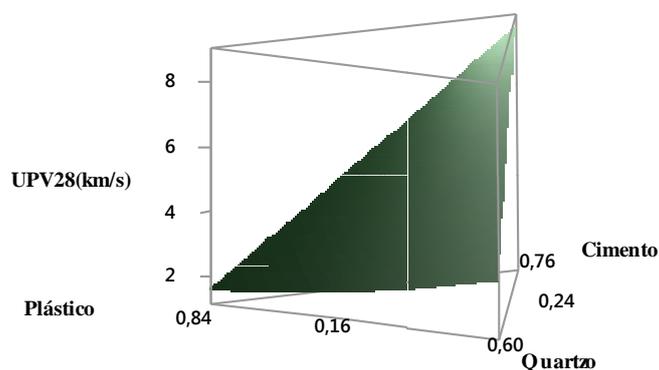


Figura 4.55: Superfície de resposta da variável velocidade de ultrassom

A equação ajustada aos dados experimentais possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.56.

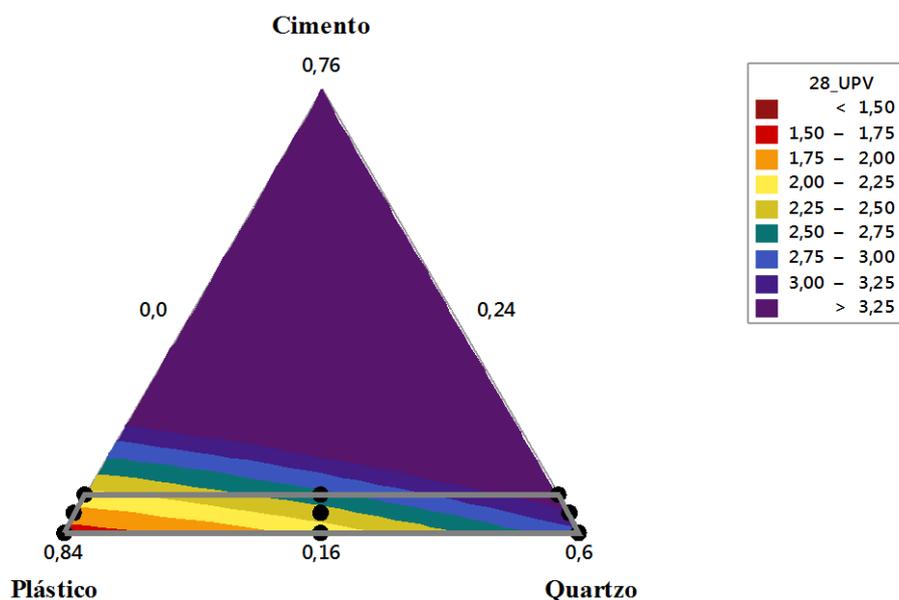


Figura 4.56: Gráfico de contorno da variável velocidade de ultrassom

O gráfico apresenta as faixas de velocidade de ultrassom dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para maximizar a variável velocidade de ultrassom (Figura 4.57).

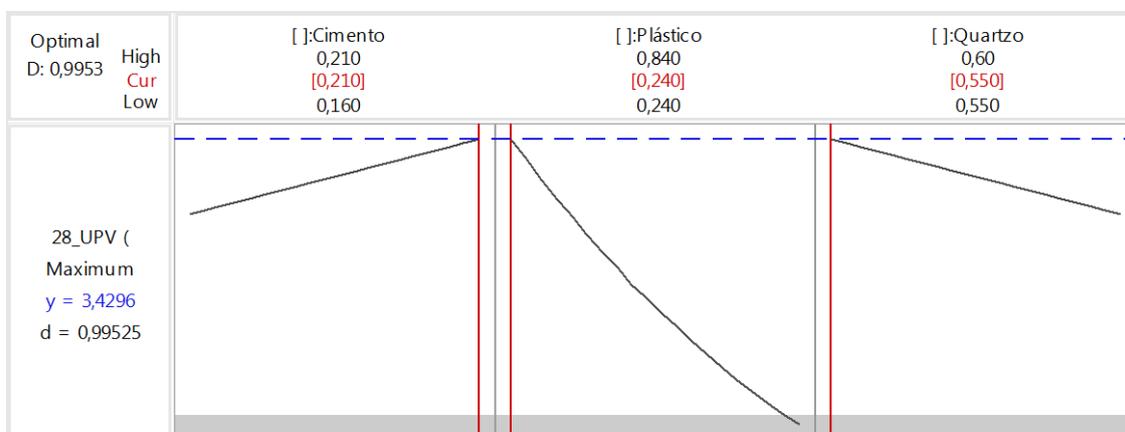


Figura 4.57: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar resistência à compressão

A Figura 4.57 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Nota-se que a matriz cimentícia influencia positivamente na velocidade de ultrassom, enquanto os agregados, negativamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso ocorre pois maior relação agregado/cimento e um maior percentual de incorporação de PEAD implicam no aumento da porosidade do material. Com isso, o tempo para que o pulso percorra o comprimento do corpo de prova torna-se maior.

Sendo assim, o ótimo individual para a velocidade de ultrassom é semelhante ao das resistências à compressão e à flexão, porosidade aparente e absorção de água, ou seja, uma relação agregado/cimento de 3,75 e um percentual de incorporação mínimo de PEAD. Em termos do modelo, as linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que são o máximo de matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), resultando em uma velocidade de ultrassom de $v = 3,4296 km/s$, representada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,99525$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.8. Módulo de Elasticidade (Dinâmico)

Os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias dos compósitos variaram de 2,61 GPa a 20,53 GPa e das referências de 24,03 GPa a 35,75 GPa. A Figura 4.58 mostra os resultados de módulo dinâmico exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições.

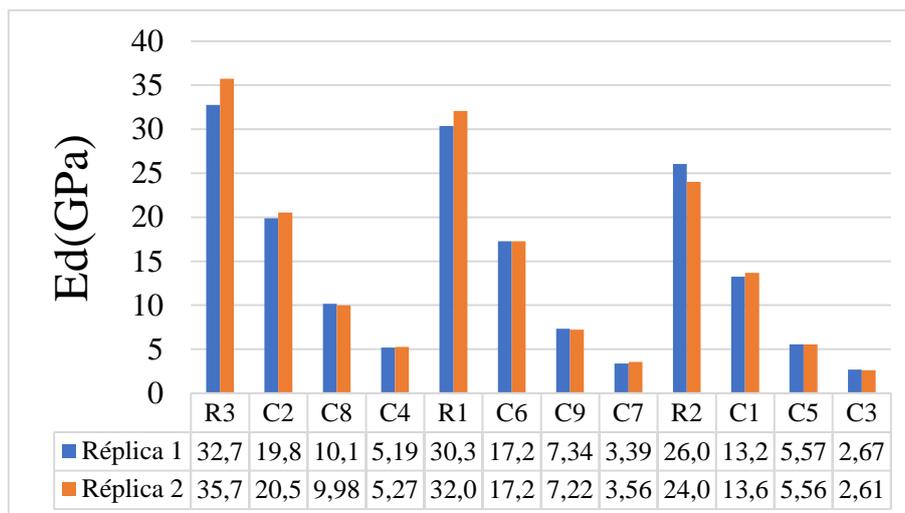


Figura 4.58: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta módulo dinâmico

Pode-se notar que o módulo dinâmico reduz em até aproximadamente 90% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.59 mostra a variação percentual no módulo dinâmico à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

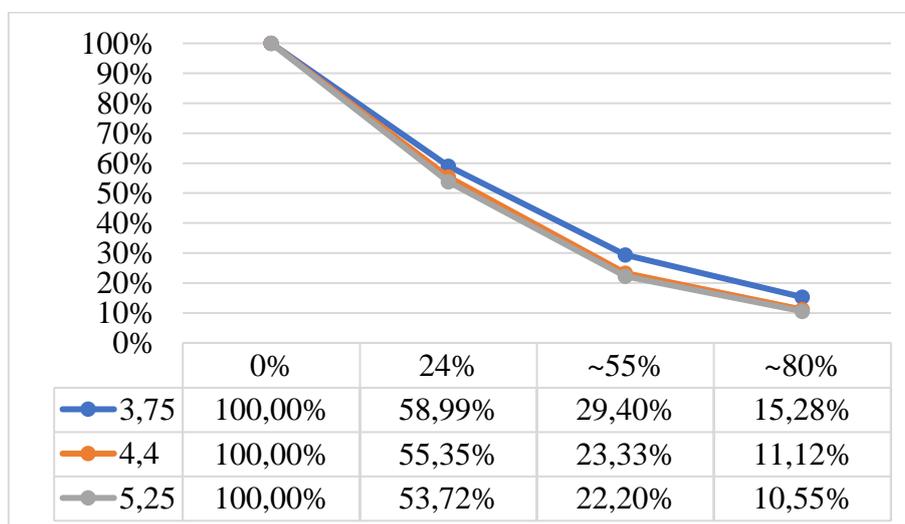


Figura 4.59: Variação do módulo dinâmico com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável módulo de elasticidade dinâmico (E_d) relacionando as proporções de matriz cimentícia (x_1), PEAD

(x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: ANOVA para o modelo relativo à variável módulo dinâmico

ANOVA para E_d (GPa)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,000
Cimento*PEAD		0,000
PEAD*Quartzo		0,000
$R^2=99,78\%$	$R^2(\text{pred})= 99,58\%$	$R^2(\text{adj})= 99,72\%$

Com base na análise estatística, pode-se dizer que o modelo de regressão é significativo, incluindo os termos quadráticos de interação do cimento e PEAD e do PEAD e quartzo ($p - \text{valor} < \alpha$). Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório. A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.54.

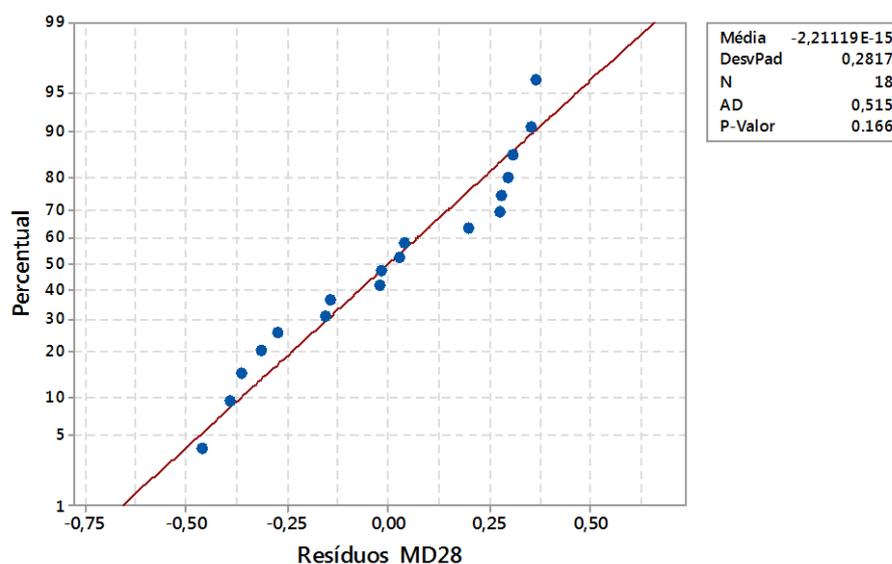


Figura 4.60: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta módulo dinâmico

Os resíduos da variável resposta módulo dinâmico apresentaram comportamento adequado às condições de normalidade do experimento ($p - \text{valor} > \alpha$). Dessa forma,

pode-se validar a adequação do modelo obtido. O polinômio ajustado aos dados experimentais do módulo de elasticidade é apresentado na Equação (4.8).

$$E_d = 165,8x_1 + 1,32658x_2 - 2,1048x_3 - 186,073x_1x_2 - 32,9218x_2x_3 \quad (4.8)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável módulo de elasticidade dinâmico em relação às proporções de cimento, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.61.

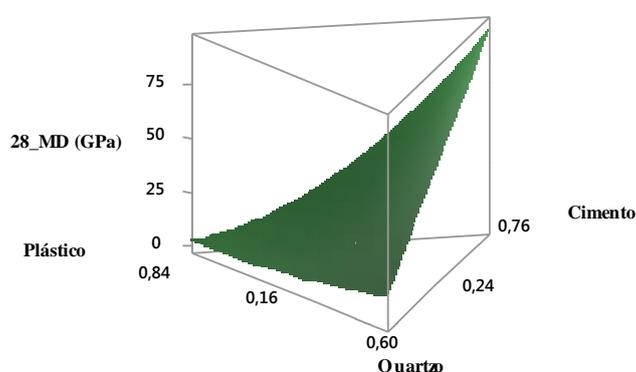


Figura 4.61: Superfície de resposta da variável módulo dinâmico

A equação ajustada aos dados experimentais possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.62.

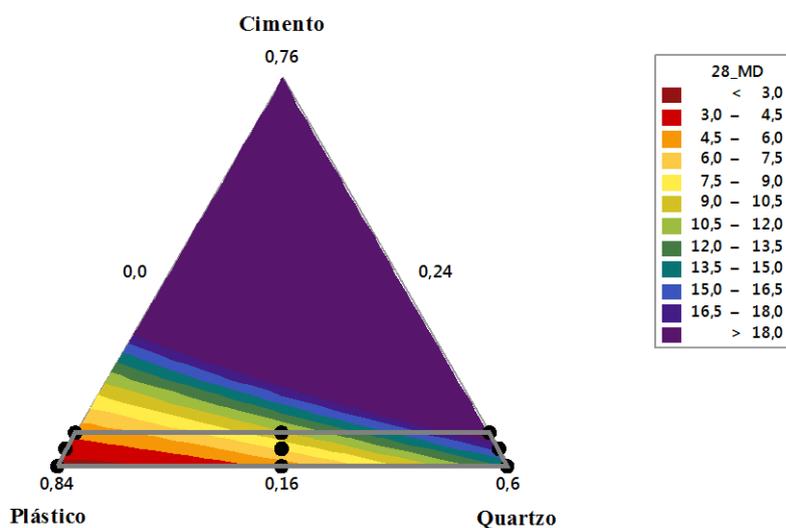


Figura 4.62: Gráfico de contorno da variável módulo dinâmico

O gráfico apresenta as faixas de módulo de elasticidade dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, à medida em que se aumenta o percentual de cimento e/ou reduz-se o de PEAD, há o aumento do módulo de elasticidade. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para maximizar a variável o módulo de elasticidade (Figura 4.63).

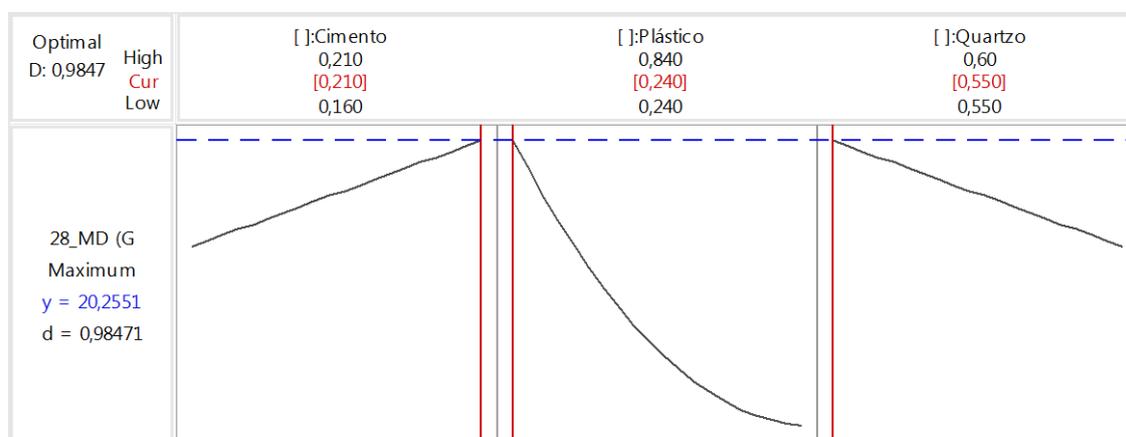


Figura 4.63: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar módulo dinâmico

A Figura 4.63 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Nota-se que o cimento influencia positivamente no módulo de elasticidade, enquanto os agregados, negativamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo. Isso significa que uma maior relação agregado/cimento implica em um menor módulo dinâmico, visto que há a redução do percentual de matriz cimentícia e consequente aumento do percentual de agregados. Ao mesmo tempo, um percentual maior de PEAD implica na redução do módulo dinâmico, uma vez que há uma baixa adesão das partículas de PEAD à matriz cimentícia, resultando em uma zona de interface de transição mais porosa. Esse comportamento assemelha-se ao apresentado pelas variáveis resistência à compressão e à flexão, porosidade aparente, absorção de água e velocidade de ultrassom. As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que são uma relação agregado/cimento de 3,75 e o mínimo de incorporação de PEAD. Em termos do modelo, o ótimo individual é obtido pelo máximo de matriz

cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), resultando em um módulo de elasticidade de $E_d = 20,26$ GPa, representada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,98471$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.3.8.1. Módulo de elasticidade dinâmico específico

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico específico aos 28 dias dos compósitos variaram de 2,61 GPacm³/g a 11,25 GPacm³/g e das referências de 12,28 GPa cm³/g a 16,55 GPa cm³/g. A Figura 4.64 mostra os resultados de módulo dinâmico específico exibidos pelas referências e pelos compósitos com diferentes composições.

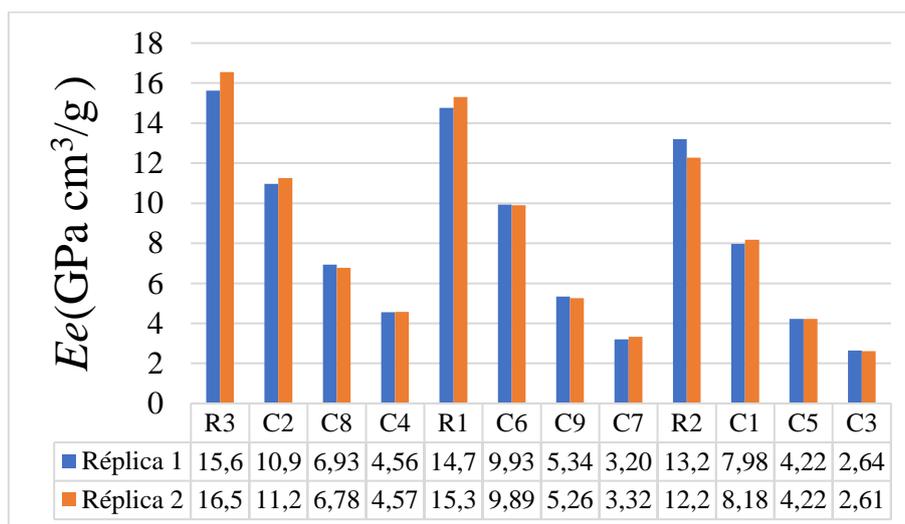


Figura 4.64: Gráfico com os resultados apresentados para a variável resposta módulo dinâmico específico

Pode-se notar que o módulo dinâmico específico reduz em até aproximadamente 80% em relação às referências ao se utilizar o máximo de agregados de PEAD. A Figura 4.59 mostra a variação percentual no módulo específico à medida em que os agregados de PEAD vão sendo incorporados.

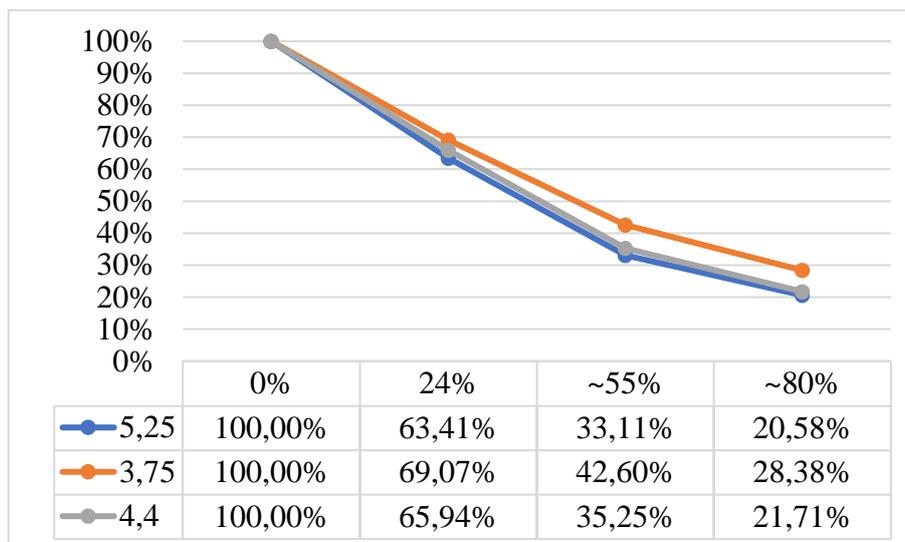


Figura 4.65: Variação do módulo dinâmico específico com a incorporação de partículas de PEAD

Os valores obtidos nos ensaios para as condições experimentais foram usados para determinar os coeficientes dos polinômios de misturas para a variável módulo dinâmico específico (E_e) relacionando as proporções de cimento (x_1), PEAD (x_2) e quartzo (x_3). A ANOVA realizada para avaliar o modelo é apresentada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: ANOVA para o modelo relativo à variável módulo dinâmico específico

ANOVA para E_e (GPa)		p-valor
Regressão		0,000
Linear		0,000
Quadrático		0,000
Cimento*PEAD		0,000
PEAD*Quartzo		0,000
$R^2=99,72\%$	$R^2(\text{pred})=99,47\%$	$R^2(\text{adj})=99,63\%$

Os valores de R^2 próximos a 100% indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório e o modelo de regressão obtido pelo método *stepwise* inclui os termos lineares e quadráticos de interação do cimento e PEAD e do PEAD e quartzo (p – valor < 0,05). A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson Darling e do gráfico de probabilidade normal para os resíduos apresentados na Figura 4.66.

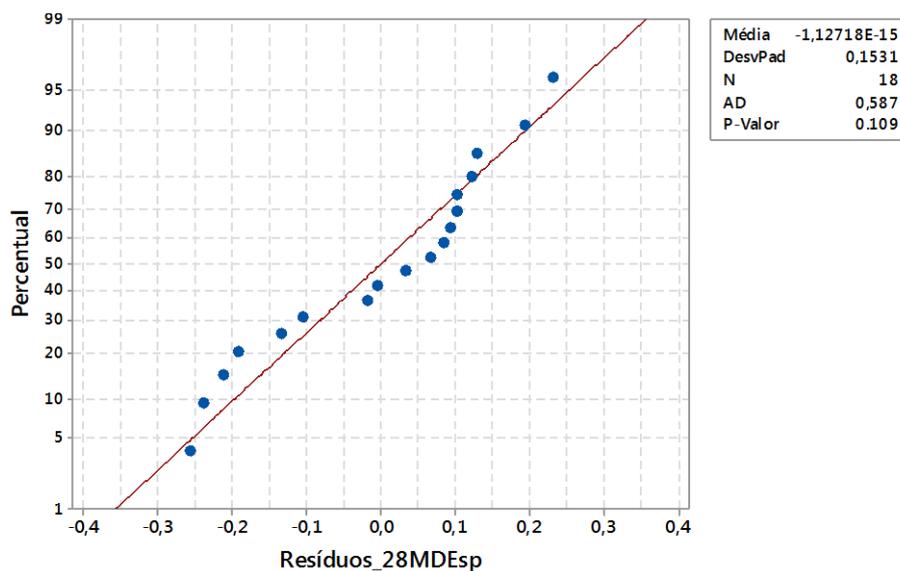


Figura 4.66: Gráfico de probabilidade normal de resíduos da variável resposta módulo dinâmico específico

Os resíduos da variável resposta módulo de elasticidade específico apresentaram comportamento adequado às condições de normalidade do experimento (p – valor $> 0,05$). Dessa forma, pode-se validar a adequação do modelo obtido e o polinômio ajustado aos dados experimentais do módulo de elasticidade específico é apresentado na Equação (4.9).

$$E_e = 72,8802x_1 - 1,65270x_2 + 1,84481x_3 - 57,6461x_1x_2 - 13,6967x_2x_3 \quad (4.9)$$

Por meio do experimento de misturas foi possível gerar uma superfície de resposta com o comportamento da variável módulo de dinâmico específico em relação às proporções matriz cimentícia, PEAD e quartzo dentro do espaço experimental, mostrado na Figura 4.67.

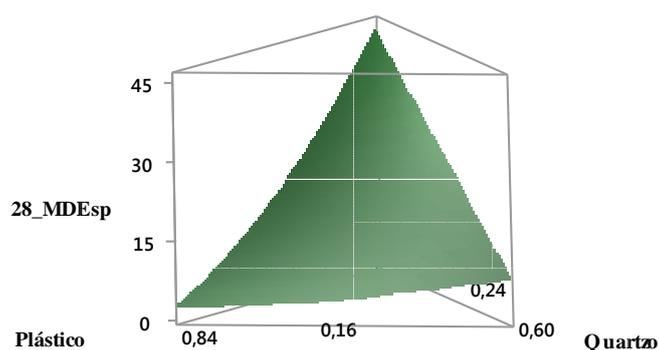


Figura 4.67: Superfície de resposta da variável módulo dinâmico específico

A equação ajustada aos dados experimentais possibilita prever o comportamento da variável resposta para todas as diferentes combinações de composições dos elementos da mistura, respeitando-se as restrições definidas, o que pode ser visto na Figura 4.68.

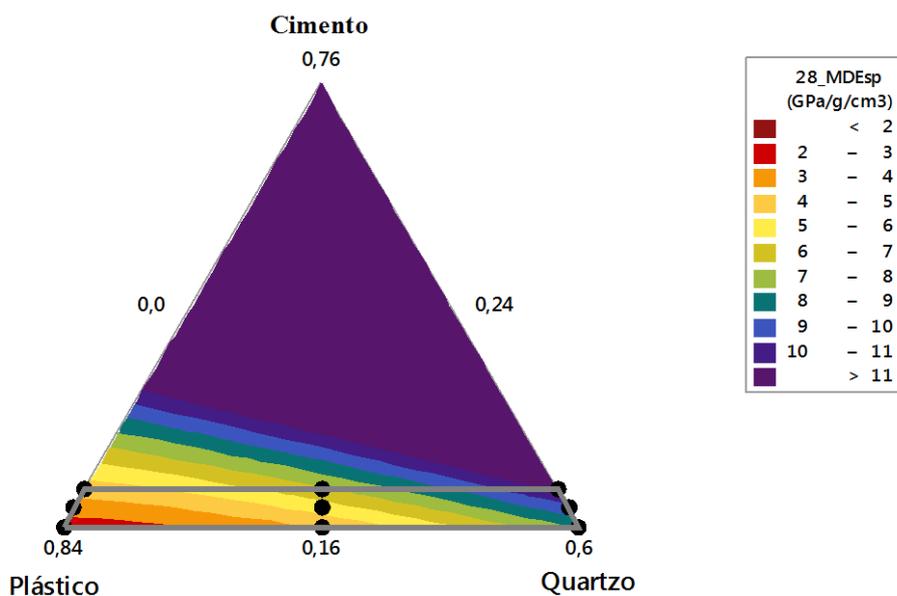


Figura 4.68: Gráfico de contorno da variável módulo dinâmico específico

O gráfico apresenta as faixas de módulo de elasticidade específico dentro da região experimental, sendo as condições experimentais representadas pelos pontos no trapézio. É possível notar que, à medida em que se aumenta o percentual de cimento e/ou reduz-se o de PEAD, há o aumento do módulo dinâmico específico. Por meio do modelo estatístico, é possível encontrar a resposta ótima para maximizar a variável o módulo de elasticidade específico (Figura 4.69).

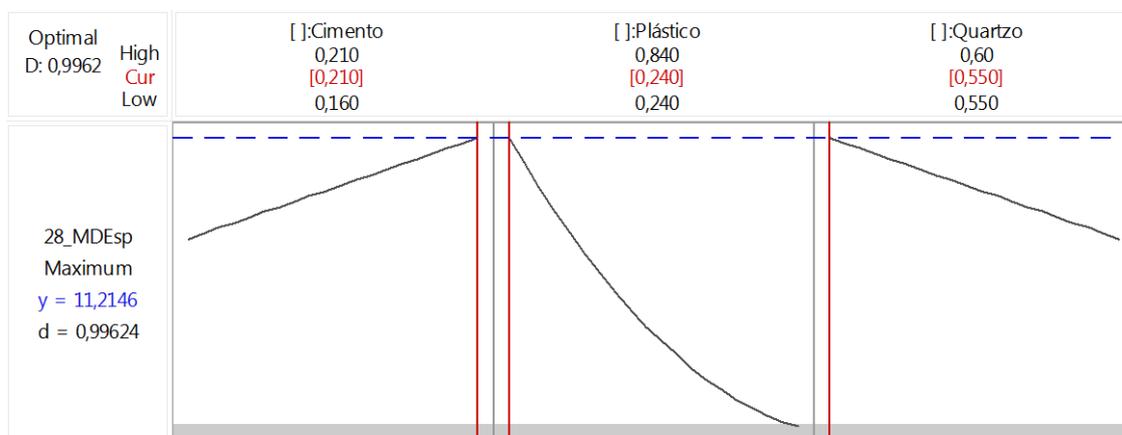


Figura 4.69: Resposta ótima da proporção dos componentes para maximizar módulo dinâmico específico

A Figura 4.69 apresenta o efeito de cada um dos componentes na variável resposta. Nota-se que o cimento influencia positivamente no módulo de elasticidade específico, enquanto os agregados, negativamente, sendo a influência do PEAD mais intensa que a do quartzo, comportamento análogo ao apresentado pela variável módulo de elasticidade dinâmico. As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para a variável que são o máximo matriz cimentícia ($x_1 = 0,21$), o mínimo de PEAD ($x_2 = 0,24$) e o restante de quartzo ($x_3 = 0,55$), ou seja, relação agregado/cimento de 3,75 e mínimo de incorporação de PEAD, resultando em um módulo dinâmico específico de $E_e = 11,21$ GPa, representada pela linha azul horizontal pontilhada. Nesse caso, tem-se $d = 0,99624$, o que indica que as restrições parecem alcançar resultados favoráveis para resposta.

4.4. Otimização

Por meio das otimizações individuais apresentadas anteriormente e resumidas na Tabela 4.12, pode-se notar que as repostas ótimas para resistência à compressão e à flexão, porosidade aparente, absorção de água, velocidade de ultrassom, módulo de elasticidade dinâmico e módulo dinâmico específico são iguais e correspondem a uma relação agregado/cimento de 3,75 e o mínimo de incorporação de PEAD, ou seja, em termos do modelo ao máximo de matriz cimentícia, mínimo de PEAD e o restante de quartzo ($x_1 = 0,21$, $x_2 = 0,24$ e $x_3 = 0,55$) e para densidade volumétrica e aparente são iguais e correspondem ao mínimo de matriz cimentícia e máximo de PEAD ($x_1 = 0,16$, $x_2 =$

0,84 e $x_3 = 0,00$), ou seja, uma relação agregado cimento de 5,25 e o máximo de incorporação de PEAD.

Tabela 4.12: Ótimos individuais

Variável	Componentes			Ótimo Individual
	x_1	x_2	x_3	
S_c (MPa)				18,11
S_f (MPa)				5,43
P_o (%)				18,02
W_a (%)	0,210	0,240	0,550	9,98
v (km/s)				3,43
E_d (GPa)				20,26
E_e (GPa/g/cm ³)				11,21
B (g/cm ³)	0,16	0,84	0	1,00
ρ (g/cm ³)				1,42

Para realização da otimização global não serão utilizadas todas as variáveis respostas. As variáveis densidade volumétrica e aparente possuem significado prático similar e houve melhor ajuste do modelo da variável densidade aparente, sendo esta selecionada para a realização da otimização. O mesmo ocorre com as variáveis porosidade aparente e absorção de água sendo a variável absorção de água com modelo mais ajustado. A variável velocidade de ultrassom é utilizada para o cálculo de módulo de elasticidade dinâmico e, conseqüentemente, de módulo de elasticidade específico. Dentre as três foi selecionado o módulo de elasticidade dinâmico. As variáveis resistência à compressão e à flexão também fizeram parte da otimização visto que são importantes para a caracterização mecânica dos materiais. Em resumo, serão utilizadas: resistência à compressão (S_c), resistência à flexão (S_f), absorção de água (W_a), módulo de elasticidade dinâmico (E_e) e densidade aparente (ρ).

A otimização foi baseada no método *desirability*. Ao realizar a otimização, tem-se como objetivo a combinação das variáveis respostas de maneira mais eficiente e não necessariamente o alcance dos valores alvos de máximo ou mínimo de cada uma delas. Sendo assim, para todas as variáveis foram atribuídos pesos de 0,1.

As notas dadas às importâncias variaram de acordo com o cenário estabelecido. Levando em conta que a importância pode variar de 0,1 a 10, foi determinada a importância máxima como 10, intermediária como 5,05 e mínima de 0,1. Foram traçados seis diferentes cenários que são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Variação das importâncias nos cenários de otimização

Cenário	S_c	S_f	W_a	ρ	E_e
1	1	1	1	1	1
2	0,1	0,1	0,1	10	0,1
3	10	10	10	0,1	10
4	5,05	5,05	0,1	10	0,1
5	0,1	10	10	5,05	0,1
6	10	0,1	10	5,05	0,1

Eles foram definidos levando em conta:

1. Importâncias iguais para todas as variáveis envolvidas;
2. Priorização da densidade aparente (ρ);
3. Priorização das resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f), absorção de água (W_a) e módulo dinâmico específico (E_e) em detrimento da densidade aparente (ρ);
4. Priorização da densidade aparente (ρ) e em segundo lugar das resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f);
5. Priorização da resistência à flexão (S_f) e absorção de água (W_a) (variáveis de interesse para aplicação em telhas) e em segundo lugar da densidade aparente (ρ);
6. Priorização da resistência à compressão (S_c) e absorção de água (W_a) (variáveis de interesse para aplicação blocos vazados) e em segundo lugar da densidade aparente (ρ).

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em cada um dos cenários estabelecidos.

4.4.1.1. Cenário 1

Conforme descrito, no cenário 1 foram definidas importâncias iguais a todas variáveis respostas. A Figura 4.70 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis.

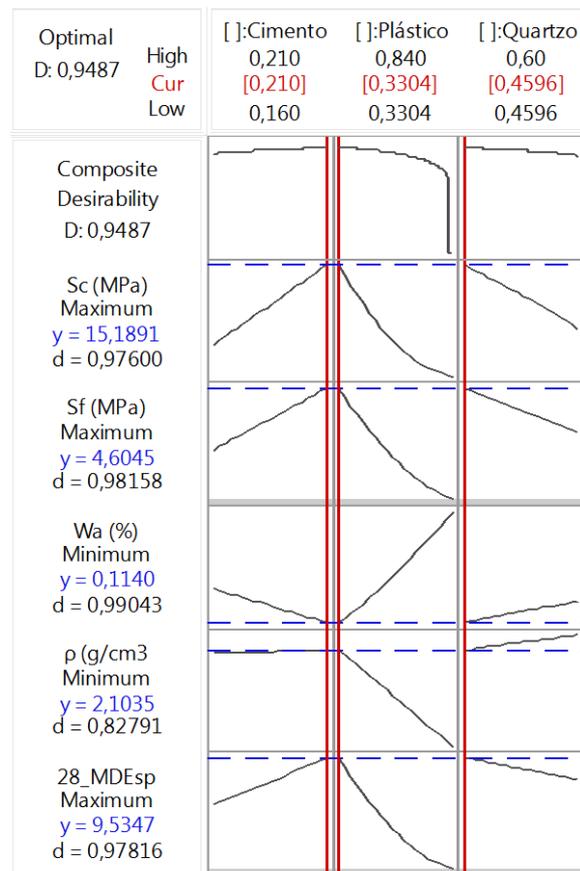


Figura 4.70: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 1

Para o intervalo representado no gráfico, pode-se notar que o cimento tem um efeito positivo e o PEAD e o quartzo um efeito negativo sobre as variáveis respostas, exceto a densidade aparente. Isso significa que o cimento auxilia no aumento da resistência à compressão e à flexão e do módulo dinâmico específico e na redução da absorção de água. O PEAD e o quartzo possuem efeito contrário ao cimento, sendo o efeito do PEAD mais intenso que o do quartzo. A influência sobre a densidade aparente é linear no caso do cimento, positiva para o PEAD e negativa para o quartzo, mas ainda assim o efeito gerado pela incorporação de PEAD é mais intenso que pelo quartzo. A Tabela 4.14 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.14: Respostas Ótimas para o Cenário 1

Variável	Componentes			Respostas Ótimas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				15,1891	0,97600	
S_f (MPa)				4,6045	0,98158	
W_a (%)	0,210	0,3304	0,4593	11,40	0,99043	0,9487
ρ (g/cm ³)				2,1035	0,82791	
E_e (GPa/g/cm ³)				9,5347	0,97816	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,21$, PEAD $x_2 = 0,3304$ e o restante de quartzo $x_3 = 0,4593$, resultando em resistência à compressão $S_c = 18,19$ MPa, resistência à flexão $S_f = 4,60$ MPa, absorção de água $W_a = 11,40\%$, densidade aparente $\rho = 2,104$ g/cm³ e módulo dinâmico específico $E_e = 9,54$ GPacm³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9487, sendo que somente a *desirability* individual da densidade aparente de 0,82791 foi menor que 0,9700,

Pode-se notar que neste cenário em que é dada a mesma importância a todas as variáveis, a densidade aparente possui um desempenho pior que as demais, porém, ainda assim, apresenta uma redução em relação ao valor de referência para a relação agregado/cimento de aproximadamente 20% (de 2,49 g/cm³ para 2,09g/cm³).

4.4.1.2. Cenário 2

Neste cenário, foi feita a priorização da densidade aparente (ρ). Dessa forma, foi atribuída importância 10 para ρ e 0,1 para as demais variáveis. A Figura 4.71 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis.

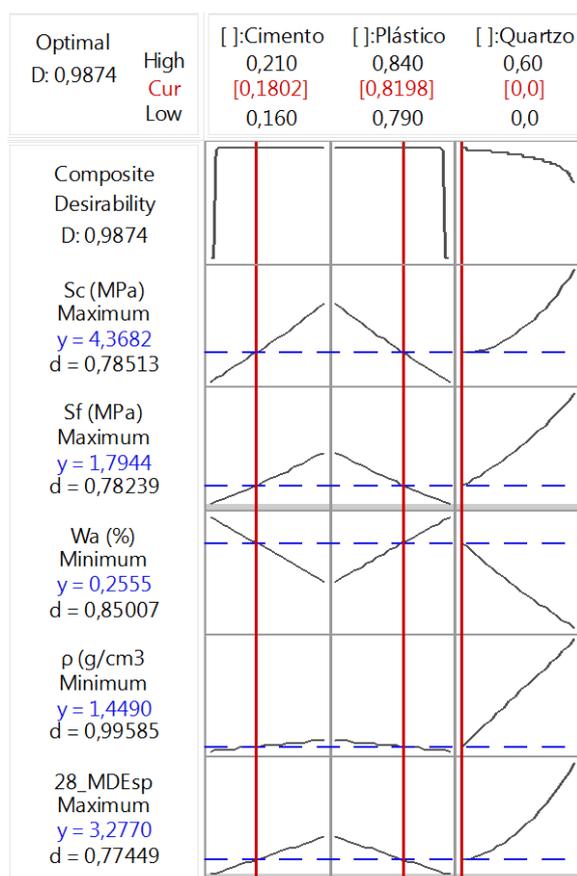


Figura 4.71: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 2

Diferentemente do cenário anterior, no intervalo apresentado no gráfico, um aumento na proporção de cimento e de quartzo ocasiona um efeito positivo sobre as resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f), absorção de água (W_a) e módulo dinâmico específico (E_e) e o PEAD um efeito negativo sobre elas. Para a densidade aparente acontece o contrário. A

Tabela 4.15 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.15: Respostas Ótimas para o Cenário 2

Variável	Componentes			Respostas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				4,3682	0,78513	
S_f (MPa)				1,7944	0,79239	
W_a (%)	0,1802	0,8198	0,000	0,2555	0,85007	0,9874
ρ (g/cm ³)				1,4490	0,99585	
E_e (GPA/g/cm ³)				3,2770	0,77449	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,1802$, PEAD $x_2 = 0,8198$ sem a utilização de agregados de quartzo $x_3 = 0,000$), resultando em resistência à compressão $S_c = 4,37$ MPa, resistência à flexão $S_f = 1,79$ MPa, absorção de água $W_a = 25,55\%$, densidade aparente $\rho = 1,449$ g/cm³ e módulo dinâmico específico $E_e = 3,28$ GPa cm³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9874, sendo que maior dentre as *desirability* individuais foi a densidade aparente de 0,99585.

4.4.1.3. Cenário 3

Neste cenário foi feita a priorização das resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f), absorção de água (W_a) e módulo dinâmico específico (E_e) em detrimento da densidade aparente (ρ). Dessa forma, foi dada importância 0,1 para ρ e 10 para as demais variáveis. A Figura 4.72 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis.

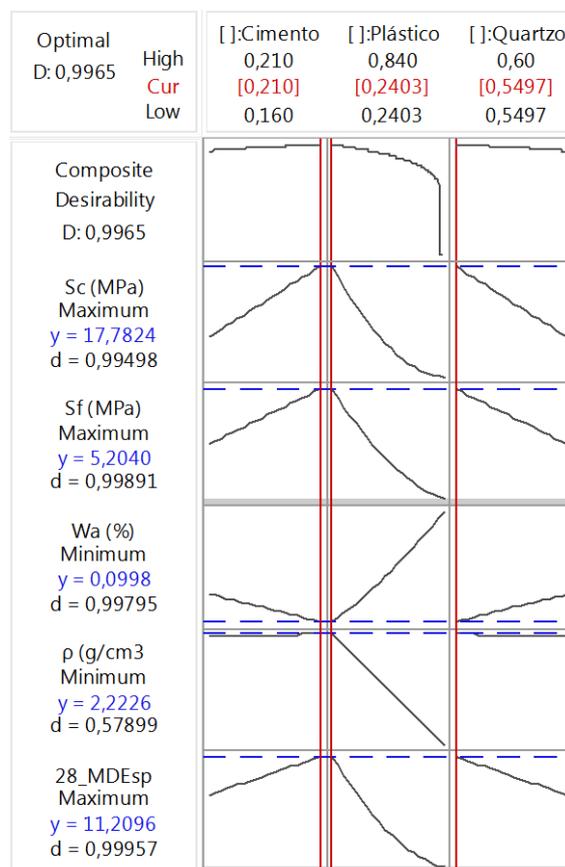


Figura 4.72: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 3

Para o intervalo representado no gráfico, pode-se notar que o cimento tem um efeito positivo e o PEAD e o quartzo um efeito negativo sobre as variáveis respostas, exceto sobre a densidade aparente. Isso significa que o cimento auxilia no aumento da resistência à compressão e à flexão e do módulo dinâmico específico e na redução da absorção de água. O PEAD e o quartzo possuem efeito contrário ao o cimento, sendo o efeito do PEAD mais intenso que o do quartzo. A influência sobre a densidade aparente é aparentemente linear no caso do cimento e quartzo e positiva para o PEAD. A Tabela 4.16 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.16: Respostas Ótimas para o Cenário 3

Variável	Componentes			Respostas Ótimas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				17,78	0,99498	
S_f (MPa)				5,20	0,99891	
W_a (%)	0,210	0,2403	0,5497	9,98	0,99795	0,9965
ρ (g/cm ³)				2,22	0,57899	
E_e (GPa/g/cm ³)				11,21	0,99957	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,21$, PEAD $x_2 = 0,2403$ e o restante de quartzo $x_3 = 0,5497$, resultando em resistência à compressão $S_c = 17,78$ MPa, resistência à flexão $S_f = 5,20$ MPa, absorção de água $W_a = 9,98\%$, densidade aparente $\rho = 2,22$ g/cm³ e módulo dinâmico específico $E_e = 11,21$ GPa cm³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9965, sendo a *desirability* individual da densidade aparente de 0,57899 e todas as demais são maiores que 0,9900.

Então, como esperado, pode-se notar que neste cenário, a densidade aparente possui um desempenho pior que as demais, porém, ainda assim, apresenta uma redução em relação ao valor de referência para a relação agregado/cimento de aproximadamente 10% (de 2,49 g/cm³ para 2,22 g/cm³).

4.4.1.4. Cenário 4

Neste cenário foi feita a priorização da densidade aparente (ρ) e em segundo lugar das resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f). Desta forma, foram dadas importâncias intermediárias (5,05) para S_c e S_f , mínimas (0,1) para W_a e E_e de e máxima (10) para ρ . A Figura 4.73 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis neste cenário.

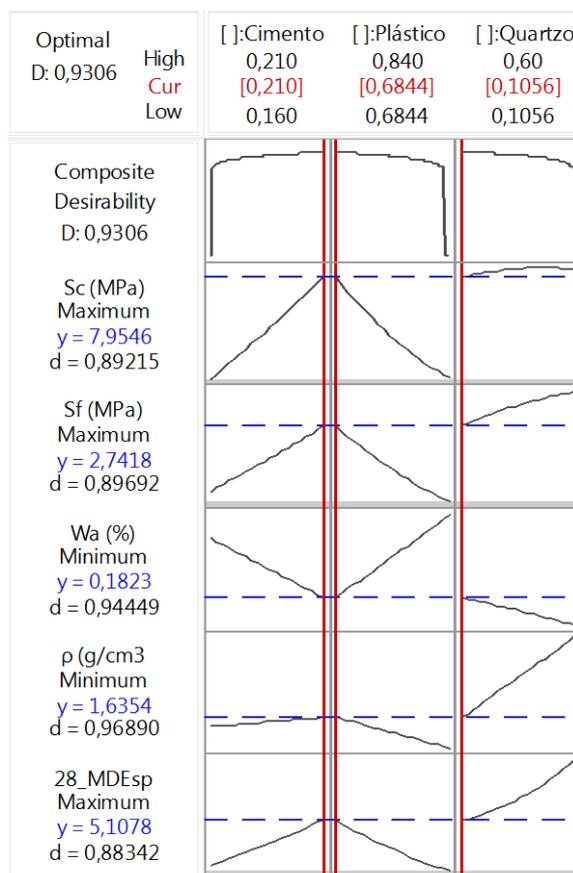


Figura 4.73: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 4

No intervalo apresentado no gráfico, um aumento na proporção de cimento e de quartzo ocasionam um efeito positivo sobre as resistências à compressão (S_c) e à flexão (S_f), absorção de água (W_a) e módulo dinâmico específico (E_e) e o PEAD um efeito negativo sobre elas. Para a densidade aparente (ρ) acontece o contrário. A

Tabela 4.17 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.17: Respostas Ótimas para o Cenário 4

Variável	Componentes			Respostas Ótimas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				7,9546	0,89215	
S_f (MPa)				2,7418	0,89692	
W_a (%)	0,210	0,6844	0,1056	18,23	0,94449	0,9306
ρ (g/cm ³)				1,6354	0,96890	
E_e (GPA/g/cm ³)				5,1078	0,88342	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,1802$, PEAD $x_2 = 0,8198$ sem a utilização de agregados de quartzo $x_3 = 0,000$), resultando em resistência à compressão $S_c = 4,37$ MPa, resistência à flexão $S_f = 1,79$ MPa, absorção de água $W_a = 25,55\%$, densidade aparente $\rho = 1,449$ g/cm³ e módulo dinâmico específico $E_e = 3,28$ GPAc³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9874, sendo que maior dentre as *desirability* individuais foi a densidade aparente de 0,99585.

4.4.1.5. Cenário 5

Neste cenário foram priorizadas as variáveis resistência à flexão (S_f) e absorção de água (W_a) e em segundo lugar da densidade aparente (ρ). O objetivo é priorizar as variáveis avaliadas neste trabalho que são exigidas pela norma ABNT NBR 13858-2 (2007) que descreve os requisitos para telhas. Desta forma, foram dadas importâncias máximas (10) para S_f e W_a , mínimas (0,1) para S_c e E_e e intermediária (5,05) para ρ . A Figura 4.74 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis neste cenário.

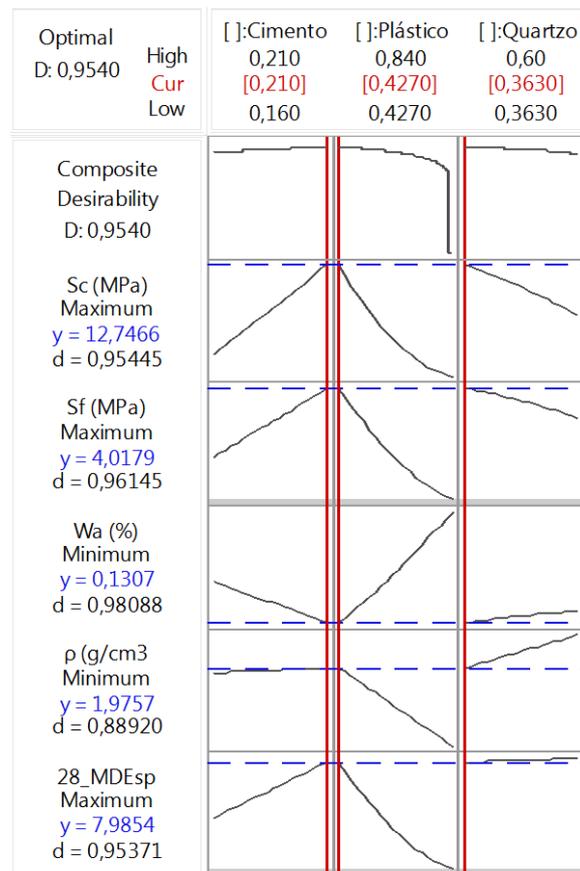


Figura 4.74: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 5

Para o intervalo representado no gráfico, pode-se notar que o cimento tem um efeito positivo e o PEAD e o quartzo um efeito negativo sobre as variáveis respostas resistência à compressão e a flexão e absorção de água. Isso significa que o cimento auxilia no aumento da resistência à compressão e à flexão e na redução da absorção de água. O PEAD e o quartzo possuem efeito contrário ao do cimento, sendo o efeito do PEAD mais intenso que o do quartzo. No caso do módulo dinâmico específico, o cimento e o quartzo têm um efeito positivo, sendo o do cimento mais intenso que o do quartzo e o PEAD, um efeito negativo. A influência sobre a densidade aparente é aproximadamente linear no caso do cimento, positiva para o PEAD e negativa para o quartzo, mas ainda assim o efeito gerado pela incorporação de PEAD é mais intenso que pelo quartzo.

A Tabela 4.18 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.18: Respostas Ótimas para o Cenário 5

Variável	Componentes			Respostas Ótimas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				12,7466	0,95445	
S_f (MPa)				4,0179	0,96145	
W_a (%)	0,210	0,4270	0,3630	13,07	0,98088	0,9540
ρ (g/cm ³)				1,9757	0,88920	
E_e (GPa/g/cm ³)				7,9854	0,95371	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,21$, PEAD $x_2 = 0,427$ e o restante de quartzo $x_3 = 0,0,363$, resultando em resistência à compressão $S_c = 12,75$ MPa, resistência à flexão $S_f=4,02$ MPa, absorção de água $W_a=11,40\%$, densidade aparente $\rho = 1,98$ g/cm³ e módulo de elasticidade específico $E_e = 7,99$ GPacm³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9540,

4.4.1.6. Cenário 6

Neste cenário foram resistência à compressão (S_c) e absorção de água (W_a) (variáveis de interesse para blocos vazados) e em segundo lugar da densidade aparente (ρ). O objetivo é priorizar as variáveis avaliadas neste trabalho que são exigidas pela norma ABNT NBR 6136 (2007) que descreve os requisitos para blocos vazados de concreto. Desta forma, foram dadas importâncias máximas (10) para S_c e W_a , mínimas (0,1) para S_f e E_e e intermediária (5,05) para ρ . A Figura 4.74 mostra o efeito dos componentes sobre cada uma das variáveis neste cenário.

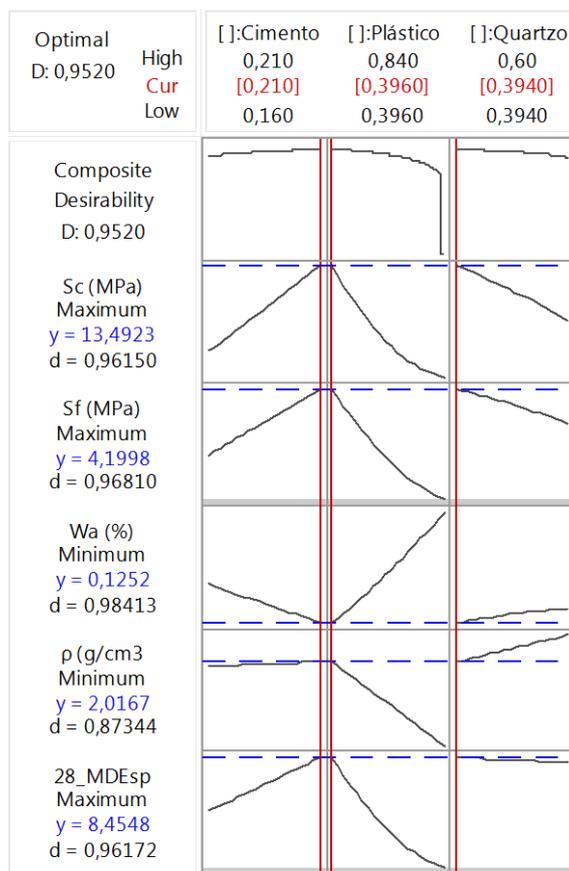


Figura 4.75: Resposta ótima da proporção dos componentes para o cenário 6

Para o intervalo representado no gráfico, pode-se notar que o cimento tem um efeito positivo e o PEAD e o quartzo um efeito negativo sobre as variáveis respostas resistência à compressão e a flexão e absorção de água. Isso significa que o cimento auxilia no aumento da resistência à compressão e à flexão e na redução da absorção de água. O PEAD e o quartzo possuem efeito contrário ao do cimento, sendo o efeito do PEAD mais intenso que o do quartzo. No caso do módulo dinâmico específico, o cimento tem um efeito positivo, o quartzo, um efeito aproximadamente linear e o PEAD, um efeito negativo. A influência sobre a densidade aparente é aproximadamente linear no caso do cimento, positiva para o PEAD e negativa para o quartzo, mas ainda assim o efeito gerado pela incorporação de PEAD é mais intenso que pelo quartzo.

A Tabela 4.19 apresenta as proporções ótimas de cimento, PEAD e quartzo para este cenário, bem como o valor referente às variáveis respostas e as *desirability* individuais e composta.

Tabela 4.19: Respostas Ótimas para o Cenário 6

Variável	Componentes			Respostas Ótimas	<i>Desirability</i> Individual	<i>Desirability</i> composta
	x_1	x_2	x_3			
S_c (MPa)				13,4923	0,96150	
S_f (MPa)				4,1998	0,96810	
W_a (%)	0,210	0,3960	0,3940	12,52	0,98413	0,9520
ρ (g/cm ³)				2,0167	0,87344	
E_e (GPa/g/cm ³)				8,4548	0,96172	

As linhas vermelhas verticais representadas no gráfico indicam as proporções ótimas para o cenário que são: cimento $x_1 = 0,21$, PEAD $x_2 = 0,396$ e o restante de quartzo $x_3 = 0,394$), resultando em resistência à compressão $S_c = 13,49$ MPa, resistência à flexão $S_f = 4,20$ MPa, absorção de água $W_a = 11,40\%$, densidade aparente $\rho = 2,02$ g/cm³ e módulo dinâmico específico $E_e = 8,46$ GPa cm³/g indicadas pelas linhas pontilhadas em azul. Como resultado da otimização neste cenário, tem-se uma *desirability* composta de 0,9520.

4.5. Relação entre as variáveis respostas

Uma análise de regressão foi feita para modelar a relação entre as variáveis-resposta. A Figura 4.76 mostra graficamente a correlação e a Figura 4.76 e Tabela 4.20 e Tabela 4.21 mostram as equações e os ajustes dos modelos gerados (R^2 adj).

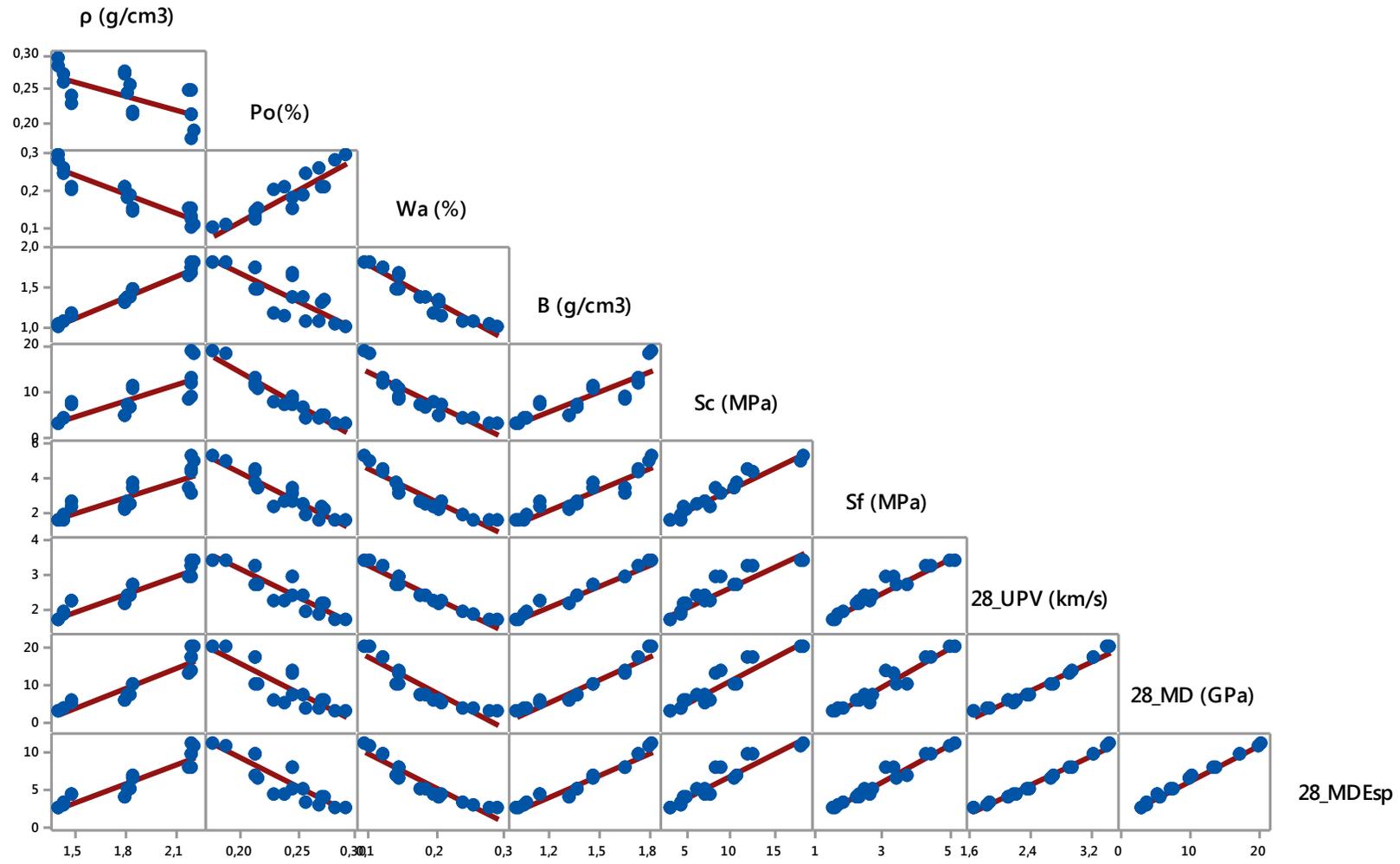


Figura 4.76: Correlação entre as variáveis respostas

Tabela 4.20: Análise de regressão (Parte 1)

Variáveis		Equações			R ² (adj)	
ρ (g/cm ³)	Po(%)	ρ (g/cm ³) = 3,372 - 6,363 Po(%)	(4.10)	$Po(\%) = 0,3686 - 0,06932 \rho$ (g/cm ³)	(4.11)	40.60%
Sc (MPa)	ρ (g/cm ³)	Sc (MPa) = - 12,13 + 11,19 ρ (g/cm ³)	(4.12)	Sc (MPa) = - 12,13 + 11,19 ρ (g/cm ³)	(4.13)	56.30%
Po(%)	B (g/cm ³)	Po(%) = 0,3678 - 0,09034 B (g/cm ³)	(4.14)	B (g/cm ³) = 3,025 - 6,730 Po(%)	(4.15)	58.30%
Po(%)	Ed (GPa)	Po(%) = 0,2855 - 0,004667 Ed (GPa)	(4.16)	Ed (GPa) = 46,64 - 154,1 Po(%)	(4.17)	70.10%
Sf (MPa)	ρ (g/cm ³)	Sf (MPa) = - 2,875 + 3,198 ρ (g/cm ³)	(4.18)	Sf (MPa) = - 2,875 + 3,198 ρ (g/cm ³)	(4.19)	72.50%
Sc (MPa)	B (g/cm ³)	Sc (MPa) = - 11,15 + 13,97 B (g/cm ³)	(4.20)	B (g/cm ³) = 0,9523 + 0,05328 Sc (MPa)	(4.21)	72.80%
Po(%)	Ee (GPa cm ³ /g)	Po(%) = 0,3043 - 0,01014 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.22)	Ee (GPa cm ³ /g) = 24,44 - 75,54 Po(%)	(4.23)	75.10%
Po(%)	v (km/s)	Po(%) = 0,3648 - 0,04949 v (km/s)	(4.24)	v (km/s) = 6,255 - 15,58 Po(%)	(4.25)	75.70%
Wa (%)	Po(%)	Wa (%) = - 0,1990 + 1,585 Po(%)	(4.26)	Po(%) = 0,1489 + 0,5040 Wa (%)	(4.27)	78.60%
Sc (MPa)	Wa (%)	Sc (MPa) = 21,43 - 70,98 Wa (%)	(4.28)	Sc (MPa) = 21,43 - 70,98 Wa (%)	(4.29)	80.00%
ρ (g/cm ³)	Wa (%)	ρ (g/cm ³) = 2,736 - 4,903 Wa (%)	(4.30)	Wa (%) = 0,4918 - 0,1679 ρ (g/cm ³)	(4.31)	81.20%
ρ (g/cm ³)	Ee (GPa cm ³ /g)	ρ (g/cm ³) = 1,201 + 0,1023 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.32)	Ee (GPa cm ³ /g) = - 9,040 + 8,306 ρ (g/cm ³)	(4.33)	84.00%
ρ (g/cm ³)	Ed (GPa)	ρ (g/cm ³) = 1,375 + 0,04874 Ed (GPa)	(4.34)	Ed (GPa) = - 22,72 + 17,53 ρ (g/cm ³)	(4.35)	84.50%
Sf (MPa)	Po(%)	Sf (MPa) = 10,94 - 32,92 Po(%)	(4.36)	Po(%) = 0,3192 - 0,02599 Sf (MPa)	(4.37)	84.70%
Wa (%)	Ed (GPa)	Wa (%) = 0,2691 - 0,009049 Ed (GPa)	(4.38)	v (km/s) = 1,504 + 0,1177 Sc (MPa)	(4.39)	85.10%
Ed (GPa)	Wa (%)	Ed (GPa) = 26,89 - 95,00 Wa (%)	(4.40)	Sc (MPa) = - 9,804 + 7,302 v (km/s)	(4.41)	85.10%
Sf (MPa)	B (g/cm ³)	Sf (MPa) = - 2,383 + 3,841 B (g/cm ³)	(4.42)	B (g/cm ³) = 0,7234 + 0,2260 Sf (MPa)	(4.43)	86.00%
Sc (MPa)	Ed (GPa)	Sc (MPa) = 1,627 + 0,7171 Ed (GPa)	(4.44)	Ed (GPa) = - 0,736 + 1,212 Sc (MPa)	(4.45)	86.10%

Tabela 4.21: Análise de regressão (Parte 2)

Variáveis		Equações			R ² (adj)
ρ (g/cm ³)	v (km/s)	ρ (g/cm ³) = 0,5790 + 0,5040 v (km/s)	(4.46) v (km/s) = - 0,6792 + 1,728 ρ (g/cm ³)	(4.47)	86.30%
Sc (MPa)	Ee (GPa cm ³ /g)	Sc (MPa) = - 1,038 + 1,521 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.48) Ee (GPa cm ³ /g) = 1,328 + 0,5807 Sc (MPa)	(4.49)	87.60%
Sf (MPa)	Wa (%)	Sf (MPa) = 6,481 - 19,00 Wa (%)	(4.50) Sf (MPa) = 6,481 - 19,00 Wa (%)	(4.51)	88.90%
Wa (%)	Ee (GPa cm ³ /g)	Wa (%) = 0,3047 - 0,01951 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.52) Ee (GPa cm ³ /g) = 14,70 - 46,25 Wa (%)	(4.53)	89.60%
Wa (%)	B (g/cm ³)	Wa (%) = 0,4581 - 0,1961 B (g/cm ³)	(4.54) B (g/cm ³) = 2,253 - 4,647 Wa (%)	(4.55)	90.60%
Sc (MPa)	Po (%)	Sc (MPa) = 40,70 - 133,8 Po (%)	(4.56) Po (%) = 0,2990 - 0,006854 Sc (MPa)	(4.57)	91.20%
Sf (MPa)	Ed (GPa)	Sf (MPa) = 1,202 + 0,1897 Ed (GPa)	(4.58) Ed (GPa) = - 5,353 + 4,945 Sf (Mpa)	(4.59)	93.40%
Sf (MPa)	Sc (MPa)	Sf (MPa) = 0,9209 + 0,2467 Sc (MPa)	(4.60) B (g/cm ³) = 0,9649 + 0,04604 Ed (GPa)	(4.61)	93.50%
Ed (GPa)	B (g/cm ³)	Ed (GPa) = - 19,11 + 20,40 B (g/cm ³)	(4.62) Sc (MPa) = - 2,987 + 3,804 Sf (MPa)	(4.63)	93.50%
B (g/cm ³)	Ee (GPa cm ³ /g)	Ee (GPa cm ³ /g) = - 7,390 + 9,712 B (g/cm ³)	(4.64) B (g/cm ³) = 0,7974 + 0,09708 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.65)	93.90%
Sf (MPa)	v (km/s)	Sf (MPa) = - 1,867 + 1,950 v (km/s)	(4.66) v (km/s) = 1,042 + 0,4847 Sf (MPa)	(4.67)	94.20%
Wa (%)	v (km/s)	Wa (%) = 0,4260 - 0,09721 v (km/s)	(4.68) v (km/s) = 4,280 - 9,734 Wa (%)	(4.69)	94.30%
Sf (MPa)	Ee (GPa cm ³ /g)	Sf (MPa) = 0,4948 + 0,4027 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.70) Ee (GPa cm ³ /g) = - 0,8893 + 2,370 Sf (MPa)	(4.71)	95.20%
B (g/cm ³)	v (km/s)	B (g/cm ³) = 0,2132 + 0,4759 v (km/s)	(4.72) v (km/s) = - 0,3224 + 2,012 B (g/cm ³)	(4.73)	95.50%
ρ (g/cm ³)	B (g/cm ³)	ρ (g/cm ³) = 0,3045 + 1,094 B (g/cm ³)	(4.74) B (g/cm ³) = - 0,2294 + 0,8876 ρ (g/cm ³)	(4.75)	96.90%
Ed (GPa)	v (km/s)	Ed (GPa) = - 15,71 + 10,09 v (km/s)	(4.76) v (km/s) = 1,584 + 0,09626 Ed (GPa)	(4.77)	97.00%
v (km/s)	Ee (GPa cm ³ /g)	Ee (GPa cm ³ /g) = - 5,868 + 4,842 v (km/s)	(4.78) v (km/s) = 1,224 + 0,2046 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.79)	99.00%
Ed (GPa)	Ee (GPa cm ³ /g)	Ee (GPa cm ³ /g) = 1,731 + 0,4736 Ed (GPa)	(4.80) Ed (GPa) = - 3,568 + 2,098 Ee (GPa cm ³ /g)	(4.81)	99.30%

É possível afirmar que há uma relação linear entre todas as variáveis. Há um ajuste satisfatório dos modelos, exceto para (4.10-4.15), que apresentam R^2 menor de 60%. É importante destacar que os modelos que apresentaram maior ajuste (4.76-4.81) envolvem variáveis dependentes entre si (velocidade de ultrassom (v), módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e módulo dinâmico específico (E_e), 55% na velocidade de ultrassom. Isso significa que uma é utilizada para calcular a outra e, conseqüentemente espera-se um R^2 de 100%.

Como a maioria dos modelos apresentou alto R^2 , é possível estimar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos investigados com base nesses modelos. Ressalta-se que esta metodologia pode ser aplicada em outro conjunto de compósitos para obter seus respectivos modelos. Para aumentar a confiabilidade estatística das análises, o aumento do número de amostras e o uso de curvas de calibração serão o escopo de futuras investigações. Vale destacar que os modelos envolvendo UPV podem ser extremamente úteis, pois são obtidas por meio de teste não destrutivo, sendo possível estimar as demais propriedades, impactando no custo, facilidade e velocidade da caracterização (PANZERA, CHRISTOFORO e COTA, 2011).

4.6. Velocidade de ultrassom e módulo dinâmico ao longo do tempo

Ao realizar o ensaio de velocidade de ultrassom ao longo do período de cura, pôde-se observar o comportamento da variável UPV e do módulo dinâmico (E_d), à medida em que a reação de hidratação ocorria nos corpos de prova. As medições foram feitas com 1, 7, 14, 21 e 28 dias de cura e os resultados são representados pela Figura 4.77.

Pode-se notar que há um aumento principalmente entre o primeiro e sétimo dia, sendo que nos demais a velocidade de ultrassom e o módulo de elasticidade dinâmico se mantêm praticamente constantes, com pequeno aumento. Essa variação ocorre devido à reação de hidratação da matriz cimentícia.

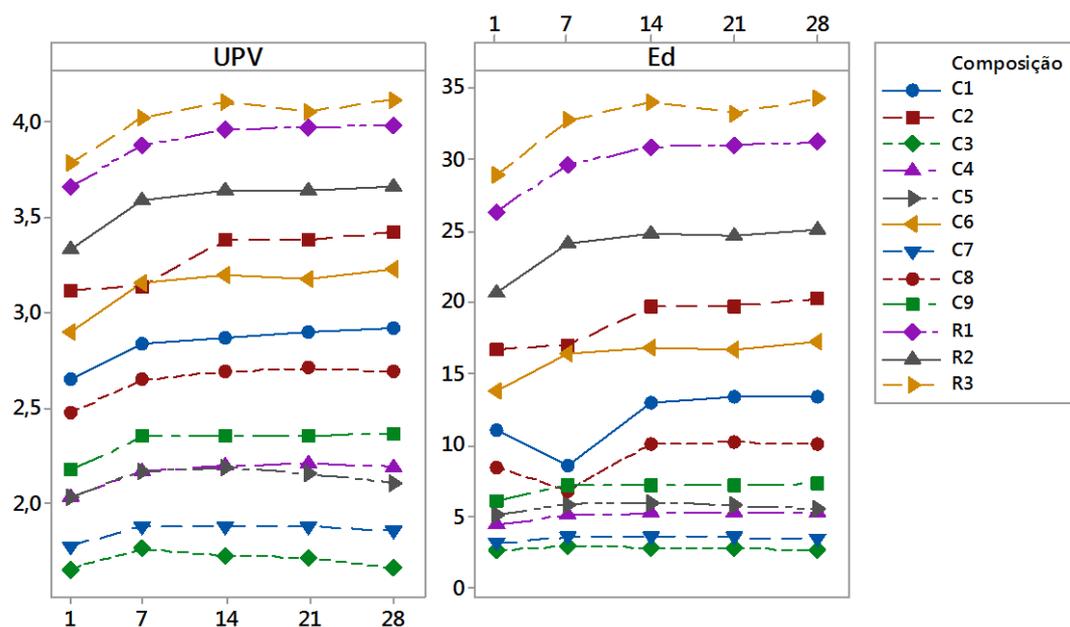


Figura 4.77: UPV e Ed ao longo do período de cura

4.7. Umidade influenciando velocidade de ultrassom e módulo dinâmico

Além das medições ao longo do tempo de cura, foi analisado também como ocorre a variação na velocidade de ultrassom e o módulo de elasticidade dinâmico com a variação da umidade dos corpos de prova. Aos 28 dias, após serem mantidos envolto por plástico filme e em recipiente fechado em todo o período de cura foram realizadas medições. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas para saturação e novamente fez-se uma medição. Por fim, após 24 horas na estufa e 12 horas para resfriamento, foi feita a última medição.

Foi possível notar que a velocidade de ultrassom e o módulo de elasticidade dinâmico não variaram de forma expressiva antes e depois da saturação. Isso pode ser explicado, pois a umidade dos corpos de prova foi mantida por meio da utilização do plástico filme e do recipiente para armazenamento, fazendo com que a variação da quantidade de água pode ter ocorrido pela reação de hidratação. Após ser colocado em estufa, a velocidade de ultrassom e o módulo de elasticidade dinâmico caíram significativamente (Figura 4.78). Este comportamento (informação) é bastante útil quando deseja-se utilizar a técnica

de ultrassom na medição do módulo e principalmente verificação da evolução de hidratação da pasta cimentícia.

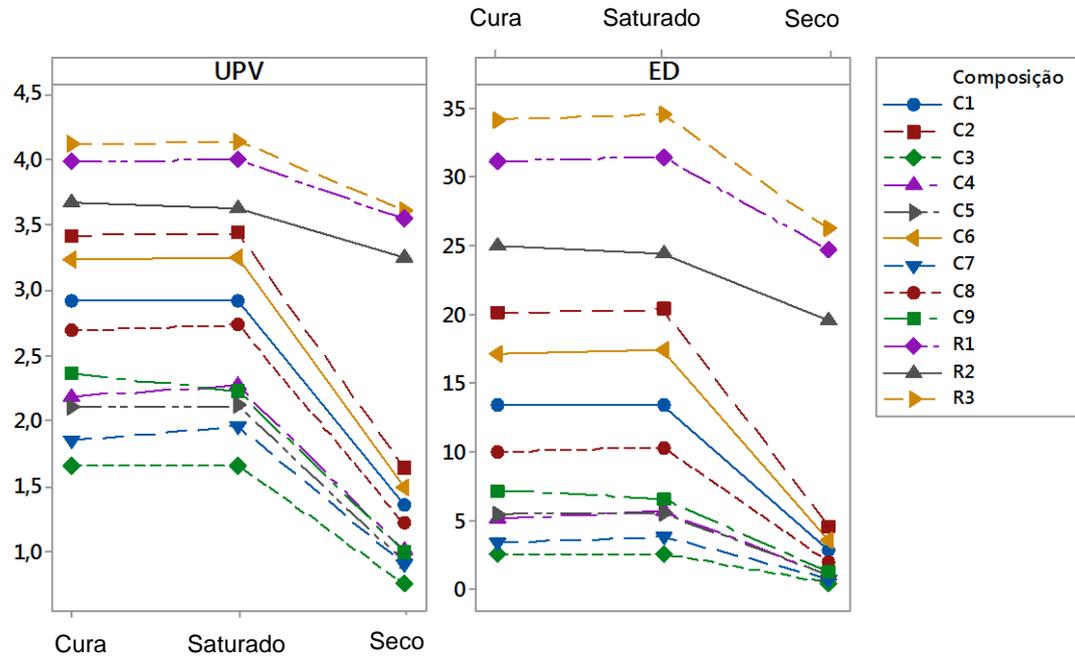


Figura 4.78: UPV e Ed com diferentes níveis de umidade

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudada a otimização da incorporação de resíduos poliméricos em compósitos cimentícios por meio de arranjos de misturas entre matriz cimentícia e agregados de PEAD e de quartzo e analisada sua influência na microestrutura e propriedades físico-mecânicas. Com base no experimento realizado, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- É possível incorporar resíduos de PEAD em substituição a agregados de quartzo para a fabricação de compósitos cimentícios.
- A incorporação de resíduos de PEAD afeta a estrutura dos compósitos cimentícios uma vez que há uma baixa adesão das partículas poliméricas na matriz cimentícia, prejudicando a zona de transição de interface. Além disso, o comportamento dúctil das partículas poliméricas faz com que haja o aumento da ductilidade dos compósitos cimentícios.
- A incorporação de resíduos de PEAD afeta as propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios. Há uma redução de até aproximadamente 75% na resistência à flexão (S_f), 80% na resistência à compressão (S_c) e no módulo de elasticidade dinâmico específico (E_e), 90% no módulo de elasticidade dinâmico (E_d), 55% na velocidade de ultrassom (v), 50% nas densidades volumétrica (B) e aparente (ρ) e um aumento de até aproximadamente 60% na porosidade (P_o) e 200% na absorção de água (W_a).
- A redução nas densidades volumétrica (B) e aparente (ρ) e melhoria da ductilidade são comportamentos interessantes, porém a queda no desempenho das demais variáveis respostas limita sua utilização para fins estruturais. Assim, os compósitos cimentícios resultantes da incorporação de partículas de PEAD podem ser utilizados em aplicações de concreto não estrutural.
- As repostas ótimas para resistência à compressão (S_c), resistência à flexão (S_f), porosidade aparente (P_o), absorção de água (W_a), velocidade de ultrassom (v), módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e específico (E_e) são iguais e correspondem à menor relação agregado/cimento estudada (3,75), sendo o máximo de matriz cimentícia, mínimo de PEAD e o restante de quartzo ($x_1 = 0,21$, $x_2 = 0,24$ e $x_3 = 0,55$) e para as densidades volumétrica (B) e aparente (ρ) são iguais e

correspondem a uma relação agregado/cimento de 5,25, sendo o mínimo de matriz cimentícia e máximo de PEAD ($x_1 = 0,16$, $x_2 = 0,84$ e $x_3 = 0,00$).

- Ao realizar a otimização multiobjectivo com o método *desirability* envolvendo as variáveis respostas resistência à compressão (S_c), resistência à flexão (S_f), absorção de água (W_a), módulo de elasticidade dinâmico (E_e) e densidade aparente (ρ), foi possível fazer uma combinação adequada das proporções de matriz cimentícia, PEAD e quartzo em seis diferentes cenários, obtendo *desirability* individuais e compostas satisfatórias:
 - Ao atribuir importâncias iguais a todas as variáveis, o ótimo global é uma relação agregado/cimento de 3,75, sendo uma proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,21$, de partículas de PEAD de $x_2 = 0,3304$ e de quartzo de $x_3 = 0,4593$.
 - Ao atribuir o máximo de importância à densidade aparente (ρ) e o mínimo às demais variáveis, o ótimo global é uma relação agregado/cimento de 4,55 com a totalidade de agregados de PEAD, sendo a proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,1802$, de PEAD de $x_2 = 0,8198$.
 - Ao atribuir o mínimo de importância à densidade aparente (ρ) e o máximo às demais, o ótimo global envolve uma relação agregado/cimento de 3,76 e o mínimo de incorporação de PEAD, sendo a proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,21$, de partículas de PEAD de $x_2 = 0,2403$ e de quartzo de $x_3 = 0,5497$. Por priorizar as variáveis respostas que possuem ótimos individuais iguais, o ótimo global se apresentou bem próximo deles.
 - Ao atribuir importância máxima à densidade aparente (ρ), intermediária para resistência à compressão (S_c) e resistência à flexão (S_f) e mínima para as demais variáveis, o ótimo global corresponde a uma relação agregado/cimento de 3,75, sendo a proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,21$, de partículas de PEAD de $x_2 = 0,6844$ e de quartzo de $x_3 = 0,1056$.
 - Ao priorizar as variáveis respostas envolvidas nas normas de telhas, ou seja, dar importância máxima à resistência à flexão (S_f) e absorção de água (W_a), intermediária para a densidade aparente (ρ) e mínima para as demais, tem-se como ótimo global uma relação agregado/cimento de 3,75,

sendo a proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,21$, de partículas de PEAD de $x_2 = 0,427$ e de quartzo de $x_3 = 0,363$.

- Ao priorizar as variáveis respostas envolvidas na norma de blocos cimentícios resistência à compressão (S_c) e absorção de água (W_a), intermediária para a densidade aparente (ρ) e mínima para as demais, o ótimo global é relativo a uma relação agregado cimento de 3,75, sendo uma proporção de matriz cimentícia de $x_1 = 0,21$, de partículas de PEAD de $x_2 = 0,3964$ e de quartzo de $x_3 = 0,394$.
- É possível modelar a relação entre as variáveis respostas, sendo que a maioria dos modelos apresentou ajuste satisfatório. Pode-se dizer que os modelos obtidos podem ser utilizados para estimar propriedades físico-mecânicas dos compósitos com base umas nas outras. É importante destacar, porém, que os modelos correspondem somente aos compósitos estudados, sendo necessária a aplicação de curvas de calibração para aumento da confiabilidade dos resultados.
- Há uma variação na velocidade de ultrassom (v), e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) de acordo com o tempo de cura e umidade. À medida que vão passando os dias, as respostas sofrem um aumento. Após a cura, ao retirar a umidade da amostra, nota-se uma redução na velocidade de ultrassom (v), e módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

APÊNDICE A

Dimensões dos corpos de prova cilíndricos

		Diâmetro			Altura		
C1	Réplica 1	54,838	±	1,133	127,611	±	0,262
	Réplica 2	54,924	±	0,857	126,465	±	0,319
C2	Réplica 1	54,698	±	0,674	118,536	±	0,133
	Réplica 2	54,685	±	1,317	118,692	±	0,187
C3	Réplica 1	55,090	±	1,956	133,845	±	0,336
	Réplica 2	55,241	±	1,863	132,521	±	0,295
C4	Réplica 1	55,102	±	0,924	124,672	±	0,336
	Réplica 2	54,980	±	2,373	120,969	±	0,247
C5	Réplica 1	55,049	±	0,773	130,230	±	0,317
	Réplica 2	54,963	±	0,445	130,914	±	0,315
C6	Réplica 1	54,837	±	1,035	122,176	±	0,203
	Réplica 2	54,739	±	1,516	122,776	±	0,175
C7	Réplica 1	55,202	±	0,696	131,226	±	0,787
	Réplica 2	55,142	±	0,785	130,280	±	0,312
C8	Réplica 1	54,859	±	1,157	122,478	±	0,232
	Réplica 2	54,819	±	0,720	121,761	±	0,192
C9	Réplica 1	54,988	±	1,293	127,048	±	0,226
	Réplica 2	54,894	±	1,267	127,423	±	0,187
R1	Réplica 1	54,596	±	1,292	117,321	±	0,209
	Réplica 2	54,620	±	0,703	116,085	±	0,179
R2	Réplica 1	54,617	±	0,797	121,406	±	0,222
	Réplica 2	54,476	±	1,001	123,488	±	0,255
R3	Réplica 1	54,906	±	2,766	114,116	±	0,334
	Réplica 2	55,022	±	0,863	112,384	±	0,300

Dimensões dos corpos de prova prismáticos

		Comprimento		Largura		Altura	
C1	Réplica 1	160,905	± 0,225	40,921	± 0,120	46,738	± 0,582
	Réplica 2	160,612	± 0,494	41,141	± 0,333	46,475	± 0,384
C2	Réplica 1	160,698	± 0,162	40,923	± 0,141	43,740	± 0,362
	Réplica 2	160,505	± 0,317	41,213	± 0,326	43,630	± 0,506
C3	Réplica 1	161,124	± 0,371	40,996	± 0,232	48,676	± 1,445
	Réplica 2	161,367	± 0,390	41,200	± 0,282	49,537	± 0,459
C4	Réplica 1	161,055	± 0,371	41,090	± 0,234	46,821	± 0,722
	Réplica 2	161,005	± 0,112	40,972	± 0,082	46,181	± 1,402
C5	Réplica 1	161,090	± 0,374	41,341	± 0,299	48,111	± 0,411
	Réplica 2	160,795	± 0,368	41,158	± 0,214	47,719	± 1,204
C6	Réplica 1	160,533	± 0,348	41,093	± 0,276	45,390	± 0,437

	Réplica 2	160,424	±	0,539	41,396	±	0,370	45,781	±	1,146
C7	Réplica 1	161,240	±	0,201	41,004	±	0,138	48,204	±	0,340
	Réplica 2	161,302	±	0,270	40,995	±	0,114	48,060	±	0,285
C8	Réplica 1	160,924	±	0,354	41,121	±	0,458	45,028	±	0,720
	Réplica 2	161,019	±	0,287	41,242	±	0,383	45,432	±	0,588
C9	Réplica 1	161,117	±	0,193	40,973	±	0,082	47,134	±	0,383
	Réplica 2	161,040	±	0,219	41,010	±	0,133	47,117	±	0,521
R1	Réplica 1	159,905	±	0,237	39,357	±	7,919	42,753	±	0,695
	Réplica 2	159,648	±	0,424	41,136	±	0,223	42,622	±	0,547
R2	Réplica 1	160,124	±	0,239	41,111	±	0,271	42,604	±	7,257
	Réplica 2	159,719	±	0,402	41,035	±	0,186	44,888	±	0,400
R3	Réplica 1	160,012	±	0,209	41,106	±	0,194	41,411	±	0,936
	Réplica 2	159,736	±	0,445	41,259	±	0,232	41,328	±	0,571

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil 2016**, 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, 2013
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5732** - Cimento Portland comum, 1991.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13858-2**: Telhas de concreto Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio, 2007,
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732** - Cimento Portland comum, 1991.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial, 1991.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos, 2007.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação, 2009.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, 1996.
- ADEYEYE, A., D.; OYAWALE, F., A. Mixture Experiments and their Applications in Welding Flux Design. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, v.4, n.4, p.319-326, 2008.
- AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Tradução de Geraldo Serra, 2000. .
- AKALIN, O.; AKAY, K. U.; SENNAROGLU, B.; TEZ, M. Optimization of chemical admixture for concrete on mortar performance tests using mixture experiments. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.104, n.2, p.233-242, 2010.
- ALFAHDAWI, I. H. *et al.* Utilizing waste plastic polypropylene and polyethylene terephthalate as alternative aggregates to produce lightweight concrete: A review. **Journal of Engineering Science and Technology** v. 11, n. 8, p. 1165–1173 , 2016.
- ALI, N. *et al.* Compressive strength and initial water absorption rate for cement brick containing high-density polyethylene (HDPE) as a substitutional material for sand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** v. 271, n. 1 , 2017.
- Ali-Benyahia, K.; Sbartai, Z. M.; Breyse, D.; Kenai, S.; Ghrici, M. “Analysis of the single and combined non-destructive test approaches for on-site concrete strength assessment: General statements based on a real case-study,” **Case Stud. Constr. Mater.**, vol. 6, pp. 109–119, 2017.
- ALVES, R. A. A. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos cerâmicos e cerâmico-poliméricos destinados a restauração de monumentos históricos**

fabricados em esteatito (pedra-sabão). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São João del Rei. , 2017

ARULRAJAH, A. *et al.* Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: Resilient moduli and strength characteristics. **Construction and Building Materials** v. 147, p. 639–647, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.178>>.

ASKELAND, D. R. **Ciencia E Ingenieria De Los Materiales.** 3ed., México, 1998. 649 p. .

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM C109** - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens), 2010,

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM C109/C 109M - 07** - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) , 2007,

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM C305-06** - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, 2006,

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM C348-02** - Flexural strength of hydraulic-cement mortars, 2002,

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM C349-02** - Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (Using portions of prisms broken in flexure), 2002,

ASTM. American Society For Testing And Materials. **ASTM D3878** - Standard Terminology for Composite Materials. , 2007,

BADACHE, A. *et al.* Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). **Construction And Building Materials** v. 163, p. 40–52 , 2018.

BAJZA, A. Structure of compacted cement pastes. **Cemente and Concrete Research**, 1983: 239 - 245

Bogas, J.; Gomes, M.; Gomes, A. “Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method,” **Ultrasonics**, vol. 53, no. 5, pp. 962–972, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>

BSI, British Standards Institution. **BS 1881-203:** Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, 1986

BSI, British Standards Institution. **BS 1881-209** - Testing concrete - Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity. , v. 3, p. 1–8, 1990

BSI, British Standards Institution. **BS EN 12390:** Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, 2009

BSI, British Standards Institution. **BS EN ISO 10545** - Ceramic Tiles - Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density, 1997,

Bui, D.Kodjo, S. A.; Rivard, P.; Fournier, B. “Evaluation of concrete distributed cracks by ultrasonic travel time shift under an external mechanical perturbation: Study of indirect and semi-direct transmission configurations,” **J. Nondestruct. Eval.**, vol. 32, no. 1, pp. 25–36, 2013, [http://dx.org/ 10.1007/s10921-012-0155-7](http://dx.org/10.1007/s10921-012-0155-7)

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas: UNICAMP, 2005. .

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7ed. ed. Rio de Janeiro, 2007. 705 p. .

CASARIL, A. **Modelagem Matemática E Avaliação Experimental Do Módulo De Elasticidade De Materiais Compósitos Particulados De Matriz Fenólica Para Uso Como Material De Fricção** , 56p. Dissertação (Mestrado).Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2009

CHEN, Yuzhi *et al.* Experimental study on four-point cyclic bending behaviours of concrete with high density polyethylene granules. **Construction and Building Materials** v. 201, p. 691–701 , 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.191>>.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**: Fundação Getúlio Vargas, 1991. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PuBaygAACAAJ>>. .

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures**: Designs, Models, and the Analysis of Mixture data. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

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

COTA, Fábio de Paiva. **Efeito Da Incorporação De Resíduos Vítreos Nas Propriedades Físico- Mecânicas De Compósitos Cimentícios** .Dissertação. São João del-Rei: Universidade Federal de São João del Rei. , 2013

DANIEL, Isaac.M.; ISHAI, Ori. *Engineering mechanics of composite materials* .**Mechanics of Composite Materials**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.egr.msu.edu/classes/me426/aloos/reference_books.pdf%5Cnhttp://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080064215500496>. , 1994

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous-Optimization of Several Response Variables.**Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980

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

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

FERNANDES, I. **Bloco e pavers: produção e controle de qualidade**. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2008.

FERREIRA, Luís; DE BRITO, Jorge; SAIKIA, Nabajyoti. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. **Construction and Building Materials** v. 36, p. 196–204 , 2012.

GAVELA, S.; KARAKOSTA, C.; NYDRIOTIS, C.; et al. A study of concretes containing thermoplastic wastes as aggregates, 2004.

Gehlot, T.; Sankhla, D. S. S.; Gehlot, D. S. S.; Gupta, A. “Study of Concrete Quality Assessment of Structural Elements Using Ultrasonic Pulse Velocity Test,” **IOSR J. Mech. Civ. Eng.**, vol. 13, no. 5, pp. 15–22, 2016.

GEYER, R.; JAMBECK, J.; LAW, K. L.. Production, uses, and fate of all plastics ever made. **Science Advances** v. 3, n. 7, p. 5 , 2017.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**, McGraw-Hill, 1994,

GU, Lei; OZBAKKALOGLU, Togay. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. **WASTE MANAGEMENT** v. 51, p. 19–42 , 2016.

HARRINGTON, E. C. The Desirability Function, **Industrial Quality Control**, n 21, p. 494-498, 1965.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production** v. 17, n. 7, p. 668–675 , 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>>.0959-6526.

JAMBOR, J. Influence of water cement ratio on the structure and strength of hardened cement pastes. 1976.

JASSIM, A. K. Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. **Procedia Manufacturing** v. 8, n. October 2016, p. 635–642 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.081>>.

JONES, R. M. **Mechanics Composite Materials Jones**, 1999.

JUVAS, K. **Very dry precasting concrete**. In: *Special Concretes: Workability and Mixing*. Proceedings of the International RILEM Workshop, London, p. 155 – 165, 1993,

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. [S.l: s.n.], 2006.

KHURI, A. I.; CONLON, M. Simultaneous Optimization of Multiple Responses Represented by Polynomial Regression Functions. *Terchnometrics*, v. 23, n. 4, p. 363-375.

Kurtulus, C.;Bozkurt, A. “Determination of concrete compressive strength of the structures in Istanbul and Izmit Cities (Turkey) by combination of destructive and non-destructive methods,” **Int. J. Phys. Sci.**, vol. 6, no. 16, pp. 3929–3932, 2011.

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

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

LUTTROPP, C.; LAGERSTEDT, J.. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. **Journal of Cleaner Production** v. 14, n. 15–16, p. 1396–1408, 2006.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis, O: Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais**. [S.l.]: EDUSP, 2002. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0-VDAAAACAAJ>>.

MCGEARY, R. K. Mechanical Packing of Spherical Particles. **Journal of the American Ceramic Society** v. 44, n. 10, p. 513–522, 1961.

MEHTA, P K; MONTEIRO, P J M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. [S.l.]: Pini, 1994. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=u77JPAAACAAJ>>. .9788572660402.

MENDONÇA, P. de T. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. Barueri, São Paulo, 2005. .

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments-second edition* .**Quality and Reliability Engineering International**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qre.4680030319>>, 2001

MONTICELI, A. R.. **Delineamento de Experimento de Mistura na Otimização de Portfólios de Geração de Energia Elétrica Delineamento de Experimento de Mistura na Otimização de Portfólios de Geração de Energia Elétrica**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2016

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

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5th ed. London, England: [s.n.], 2011. 846 p. .9780273755807.

NEWELL, J. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. 1ed. ed. Rio de Janeiro, 288 p, 2010.

NUNES, D. B. **Rotinas para a otimização experimental de misturas**. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia de produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. Universidade Federal de Florianópolis, 296 p, 2004.

OLIVEIRA, I. R. *et al*. **Dispersão e empacotamento de partículas - Princípios e aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, L. R. D. *et al*. Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. **Production** v. 22, n. 1, p. 70–82 , 2012. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132012000100006&lng=pt&tlng=pt>.1100500006.

ORTIZ, F. JR.; SIMPSON, J.R.; PIGNATIELLO, J. J. JR.; HEREDIA-LANGNER, A. Genetic Algorithm Approach to Multiple-Response Optimization, **Journal of Quality Technology**, v 36, n 4, pp. 432-450, 2004

OSBORNE, D. M., ARMACOST, R. L., PET-EDWARDS, J. State of the Art in Multiple Response Surface Methodology, 1997 IEEE International Conference on Computacional Cybernetics and Simulation, v 4, pp. 3833-3838, 1997

OZBAKKALOGLU, T.; GU, L.; GHOLAMPOUR, A. Short-term mechanical properties of concrete containing recycled polypropylene coarse aggregates under ambient and elevated temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 10, 2017. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002046](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046)>.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. 1º ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2007. 352 p. .

PAIVA, A. P. . **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas** . Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030715.pdf>>. , 2006

PANDOLFELLI, V. C. et al. Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editora, 2000.PANZERA, T. H. *et al.* Microstructural design of materials for aerostatic bearings. **Cement and Concrete Composites** v. 30, n. 7, p. 649–660, 2008.

Panzera, T. H.; Borges, P. H. R.; Sabariz, A. L. R.; Cota, F. P. “Recycled glass as potential aggregate for concrete tiles: a statistical analysis of the physical and engineering properties,” **Int. J. Environ. Waste Manag.**, vol. 12, no. 3, p. 280, 2013, <https://doi.org/10.1504/IJEW.2013.056196>

PANZERA, T. H.; STRECKER, K.; MIRANDA, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; BORGES, P. H. R. Cement – Steatite Composites Reinforced with Carbon Fibres: na Alternative for Restoration of Brazilian Historical Buildings. **Materials Research**, v. 14, p. 118-123, 2011

PANZERA, TH; CHRISTOFORO, AL; COTA, FP. Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. **Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials**. [S.l: s.n.], 2011. p. 411–436. Disponível em: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/18861/InTech-Ultrasonic_pulse_velocity_evaluation_of_cementitious_materials.pdf>. 978-953-307-449-8.

Popovics, J. S.; Subramaniam, K. V. L. “Review of Ultrasonic Wave Reflection Applied to Early-Age Concrete and Cementitious Materials,” **J. Nondestruct. Eval.**, vol. 34, no. 1, 2015, <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-014-0267-3>.

Pucinotti, R. “Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete,” **Constr. Build. Mater.**, vol. 75, pp. 331–341, 2015, [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(84\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0308-9126(84)90002-6)

RAHIM, Nur Liza *et al.* Use of Plastic Waste (High Density Polyethylene) in Concrete Mixture as Aggregate Replacement. **Advanced Materials Research** v. 701, p. 265–269 , 2013.

Rao, S. K.; Sravana, P.; Rao, T. C.; “Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand Studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller compacted concrete pavement,” **Int. J. Pavement Res. Technol.**, vol. 9, pp. 289–301, 2016.

Rashid K.; Waqas, R. “Compressive strength evaluation by non-destructive techniques: An automated approach in construction industry,” **J. Build. Eng.**, vol. 12, no. May, pp. 147–154, 2017.

RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 1999. .

Sadromtazi, A.; Zanoosh, R. Z. “Properties of Cement Composite Containing Waste Tire Rubber, Silica Fume and Polypropylene Fiber,” *Sustain. Constr. Mater. Comput. Eng.*, vol. 346, pp. 12–17, 2012, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.346.12>

SANTOS, R. M. **Efeito da adição de partículas de borracha de pneus nas propriedades físico-mecânicas de compósito cimentício**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São João del Rei, 2012.

SAPUAN, S.M. Introduction. **Composite Materials** v. 22, p. 1–27 , 2017.9780128025079.

SCHEFFÉ, H.. Experiments With Mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society** v. 20, n. 2, p. 344–360 , 1958.

SCHUMACHER, H. R. S. P. **Caracterização do concreto convencional com pó de pedra em substituição parcial a areia natural**. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 2007. 89 p.

SHACKELFORD, J. F. **Introducción a La Ciencia de Materiales para Ingenieros**. 6ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2006. 821 p. .

SHARMA, R.; BANSAL, P. P. Use of different forms of waste plastic in concrete - A review. **Journal of Cleaner Production** v. 112, p. 473–482 , 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>>.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I.. Use of recycled plastic in concrete: A review. **WASTE MANAGEMENT** v. 28, n. 10, p. 1835–1852 , 2008.

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

ŞİMŞEK, B.; UYGUNOĞLU, T.. Polimerik Atıklar İçeren Betonun Ultrason Hızının ve Dinamik Elastisite Modülünün Çok Yanıtlı Eniyilenmesi. **Journal of Polytechnic** v. 0900, n. 4, p. 1009–1017 , 2017.

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

TAFHEEM, Z. *et al.* Experimental investigation on the properties of concrete containing post-consumer plastic waste as coarse aggregate replacement | Request PDF. **Journal of Materials and Engineering Structures** v. 5, p. 23–31 , 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323969098_Experimental_investigation_on_the_properties_of_concrete_containing_post-consumer_plastic_waste_as_coarse_aggregate_replacement>.

VAN GYSEGHEM, E., JIMIDAR, M., SNEYERS, R., REDLICH, D., VERHOEVEN, E., MASSART, D. L., VANDER HEYDEN, Y. Selection of Reversed-Phase Liquid Chromatographic Columns with Diverse Selectivity Towards the Potential Separation of Impurities in Drugs, **Journal of Chromatography A**, n 1042, pp. 69-80, 2004

Wang, C. C.; Wang, H. Y. “Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity,” **Constr. Build. Mater.**, vol. 137, pp. 345–353, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.117>.

WIT, W. D. *et al.* *Solucionar A Poluição Plástica: Transparência E Responsabilização*. WWF, 2019

YANG, S. *et al.* Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. **Construction and Building Materials** v. 84, n. June, p. 444–453 , 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038>>.0950-0618.