



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA - CT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANTONIO CORREIA BRAGA FILHO

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM PROTÓTIPO
EDIFICADO COM BLOCOS DE GESSO - PÓ DE PEDRA E
PROPRIEDADES DESSE COMPOSITO

Orientador: PROF. DR. NORMANDO PERAZZO BARBOSA

JOÃO PESSOA – PB
2021

ANTONIO CORREIA BRAGA FILHO

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM PROTÓTIPO
EDIFICADO COM BLOCOS DE GESSO – PÓ DE PEDRA
E PROPRIEDADES DESSE COMPOSITO**

**TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA,
COMO UM DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DOUTOR.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
DESENVOLVIMENTO E PROPRIEDADES DE
MATERIAIS**

**ORIENTADOR: PROF. DR. NORMANDO
PERAZZO BARBOSA**

**JOÃO PESSOA – PB
2021**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B813d Braga Filho, Antonio Correia.

Desempenho estrutural de um protótipo edificado com blocos de gesso - pó de pedra e propriedades desse compósito / Antonio Correia Braga Filho. - João Pessoa, 2021.

231 f. : il.

Orientação: Normando Perazzo Barbosa.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Gesso. 2. Pó de pedra. 3. Sistemas construtivos.

I. Barbosa, Normando Perazzo. II. Título.

UFPB/BC

CDU 666.9(043)

ANTONIO CORREIA BRAGA FILHO

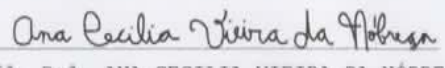
**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM PROTÓTIPO
EDIFICADO COM BLOCOS DE GESSO – PÓ DE PEDRA
E PROPRIEDADES DESSE COMPOSITO**

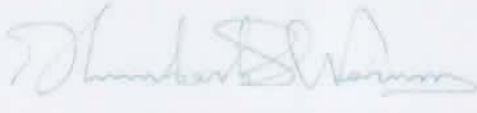
**Defesa de tese de doutorado avaliada por banca examinadora composta pelos
seguintes professores, sob a presidência do primeiro:**

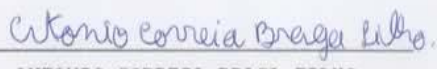

Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA - UFPB/PCEM
(Presidente, Orientador)


Prof. Dr. HEBER SIVINI FERREIRA
(Examinador Interno do Programa)


Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS
(Examinador Interno do Programa)


Profª. Drª. ANA CECILIA VIEIRA DA NÓBREGA
(Examinadora Externa à Instituição)


Prof. Dr. HUMBERTO SALAZAR AMORIM VARUM
(Examinador Externo à Instituição)


ANTONIO CORREIA BRAGA FILHO
Discente

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Janaina, companheira obstinada de todos os momentos, a meus filhos, Antônio Neto e Ana Olga, presentes de Deus e razões para continuar evoluindo. Aos meus pais, Antônio e Cleide, a Nair e ao professor Normando Perazzo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado perseverança, fé, saúde e discernimento nos momentos mais difíceis de minha vida. Também agradeço a Ele por todas as pessoas que cruzaram minha vida, e que de maneira peculiar contribuíram nessa caminhada.

A minha esposa Janaina que, mesmo em momentos difíceis, esteve firme ao meu lado trazendo leveza e bem-estar aos meus dias, cuidando e torcendo por mim, me auxiliando e sendo amável em todo o tempo.

Aos meus filhos, Antônio Neto e Ana Olga, por nascerem e me ensinarem qual é de fato o verdadeiro significado da vida.

Ao meu orientador professor Nomando Perazzo, um nobre exemplo de mestre e ser humano, agradeço pela confiança depositada e pelo incentivo, apoio e orientações recebidas, indispensáveis para a materialização desse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Antônio e Cleide, por todos os ensinamentos passados ao longo da minha vida, servindo sempre como exemplos de dignidade, honestidade e perseverança. Por todo amor, carinho e confiança depositada em mim.

A Nair pelo amor incondicional, e pelas orações que tanto me fortaleceram, mesmo em meio a todas as adversidades enfrentadas nesse percurso.

As minhas irmãs Ana Suely e Olga, pelo apoio.

Aos meus familiares: Dona Edileuza, Juarez Filho, Juliana e Cleylton e suas respectivas famílias, pessoas com quem sempre tive o prazer de contar em todos os momentos da minha vida.

A meu Avô Leandro Jucá e a Seu Juarez, homens que foram essenciais na formação do meu caráter, verdadeiros exemplos de bondade, honestidade e altruísmo. (In Memoriam).

Ao Professor Sandro, pela enorme contribuição durante a realização dos ensaios de caracterização dos corpos de prova.

Ao amigo Aerson, pela enorme generosidade e hospitalidade.

Aos amigos Roberto Maciel, Marcos, Nelly, José Augusto e Seu Brasil, pelas contribuições generosas dadas a esse trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, por todos os ensinamentos e contribuições valiosas ao longo desse período.

À toda equipe do LABEME, em especial Sebastião e Delbi pelo profissionalismo e solidariedade.

A todos, meu muito obrigado!

RIQUEZAS DA SABEDORIA

Desde jovem que eu amei e procurei a sabedoria; esforcei-me por tê-la como esposa, fiquei encantado com a sua beleza.

(...)

Se a riqueza nesta vida é uma coisa que se deve querer, que haverá de mais rico do que a sabedoria, que faz todas as coisas?

Se é a inteligência que nos cria, quem produz melhores coisas do que a sabedoria?

Quando alguém ama a justiça, é a sabedoria que produz estas virtudes: ponderação, prudência, justiça e coragem, que são as mais úteis para a vida dos seres humanos.

(...)

Foi por isso que resolvi ter a sabedoria como minha companheira; sabia que ela me daria bons conselhos e me consolaria nos tempos de tristeza e dor.

(...)

Quando eu voltar para casa, descansarei ao lado da sabedoria, pois conviver com ela não traz desgosto nem tristeza; pelo contrário, traz alegria e contentamento.

Pensei nessas coisas e compreendi que ser da família da sabedoria traz a imortalidade; que a sua amizade produz alegria completa, que conseguimos riquezas sem fim quando fazemos o que ela quer, que nos tornamos inteligentes quando conversamos com ela, que o seu convívio traz consideração.

(...)

Rei Salomão

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. Introdução	1
1.1. Objetivo geral	4
1.2. Objetivos específicos	4
1.3. Estrutura do trabalho	4
CAPÍTULO 2	6
2. Revisão bibliográfica	6
2.1. Gesso	6
2.2. Fabricação do gesso	7
2.3. Tipos de gesso	7
2.4. Mecanismo de ação do hemi-hidratado como material aglomerante	9
2.5. Propriedades da pasta de gesso no estado fresco	10
2.5.1. Trabalhabilidade	10
2.5.2. Tempo de início e de fim de pega	12
2.5.3. Variação dimensional na pasta de gesso	13
2.6. Microestrutura do gesso no estado endurecido	14
2.6.1 Efeito da relação água/gesso (a/g) na microestrutura do gesso no estado endurecido	16
2.6.2 Efeito dos aditivos e adições na microestrutura do gesso no estado endurecido	16
2.6.3 Efeito da umidade na microestrutura do gesso no estado endurecido	18
2.7. Propriedades da pasta de gesso no estado endurecido	19
2.7.1 Dureza superficial	19
2.7.2. Resistência à compressão	20
2.7.3. Resistência à tração na flexão	21
2.8. Prescrições normativas brasileiras para utilização do gesso na construção	22
2.9. Resíduo do gesso na construção civil	24
2.10. Compósitos à base de gesso	27
2.11. Edificações de blocos de gesso	31
2.12. Sistema construtivo modular com blocos de gesso	34
CAPÍTULO 3	41

3. Materiais e métodos da parte 1 – compósitos de gesso - pó de pedra	41
3.1. Materiais	41
3.1.1. Água	41
3.1.2. Gesso	41
3.1.3. Pó de pedra	41
3.2. Métodos	42
3.2.1. Caracterização física do pó de pedra	42
3.2.1.1. Granulometria e módulo de finura	42
3.2.2. Caracterização física do gesso	42
3.2.2.1. Massa unitária do gesso	42
3.2.2.2. Massa específica do gesso	42
3.2.2.3. Composição mineralógica	43
3.2.2.4. Composição química	43
3.2.2.5. Análises térmica	44
3.2.3. Propriedades dos compósitos	45
3.2.3.1. Tempos de início e fim de pega	46
3.2.3.2. Calor de hidratação	46
3.2.3.3. Densidade	47
3.2.3.4. Velocidade de propagação de pulso ultrassónico	47
3.2.3.5. Microscopia eletrônica de varredura – MEV	50
3.2.3.6. Dureza Shore – C	51
3.2.3.7. Absorção por capilaridade e por imersão total	52
3.2.3.8. Resistência à compressão e a tração na flexão	54
3.3. Testes estatísticos	56
CAPÍTULO 4	58
4. Apresentação e análise dos resultados da parte 1 – caracterização dos materiais e dos compósitos de gesso - pó de pedra	58
4.1. Caracterização física do pó de pedra	58
4.1.1. Granulometria e módulo de finura do pó de pedra	58
4.2. Caracterização física do gesso	60
4.2.1. Massa unitária	60
4.2.2. Massa específica	60

4.2.3. Caracterização mineralógica	61
4.2.4. Composição química	62
4.2.5. Análises térmica	62
4.3. Compósitos de gesso - pó de pedra	64
4.3.1. Tempo de início de pega	65
4.3.2. Tempo de fim de pega	69
4.3.3. Termodinâmica das reações das pastas de gesso	72
4.4. Caracterização dos corpos de prova	74
4.4.1. Ensaio de ultrassom	74
4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura – MEV	78
4.4.3. Absorção por imersão total	83
4.4.4. Absorção por capilaridade	87
4.4.5. Densidade	90
4.4.6. Dureza Shore (C)	93
4.4.7. Resistência a compressão	97
4.4.8. Resistência a tração na flexão	101
CAPÍTULO 5	105
5. Metodologia dos ensaios de desempenho	105
5.1. Ensaio de carga suspensa	105
5.2. Fechamento brusco de portas	109
5.3. Sustentação de rede de dormir	112
5.4. Ensaio de impacto de corpo duro	113
5.5. Ensaio de impacto de corpo mole	116
CAPÍTULO 6	119
6. Resultados e discussão dos ensaios de desempenho	119
6.1. Ensaio de carga suspensa	119
6.2. Ensaio de fechamento brusco de porta	121
6.3. Ensaio de sustentação de rede de dormir	123
6.4. Ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo mole	124
6.5 Ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo duro	126
CAPÍTULO 7	131
7. Conclusões	131

7.1. Propriedades dos compósitos no estado fresco	131
7.1.1. Tempo de início de pega	131
7.1.2. Tempo de fim de pega	131
7.1.3. Consistência da pasta	131
7.1.4. Termodinâmica das reações	132
7.2. Propriedades dos compósitos no estado endurecido	132
7.2.1. Ensaio de ultrassom	132
7.2.2. Microscopia eletrônica de varredura – MEV	132
7.2.3. Absorção por imersão total	133
7.2.4. Absorção por capilaridade	133
7.2.5. Densidade	133
7.2.6. Dureza Shore (C)	133
7.2.7. Resistência a compressão	133
7.2.8. Resistência a tração na flexão	134
7.2.9 Testes estatísticos	134
7.3. Blocos e processo construtivo	134
7.4. Ensaio de desempenho	135
7.4.1. Ensaio de carga proveniente de peças suspensas	135
7.4.2. Ensaio de fechamentos bruscos	135
7.4.3. Ensaio de corpo duro	136
7.4.4. Ensaio de corpo mole	136
7.4.5. Ensaio de rede de dormir	136
7.4.6 Avaliação geral	136
7.5 Considerações finais	136
7.6. Trabalhos futuros	137
APÊNDICE A	138
A.1. Fabricação dos blocos de gesso e pó de pedra	138
A.2. Construção do protótipo	142
A.2.1. Projeto do protótipo	142
A.2.2. Locação das fundações	145
A.2.3. Escavação das fundações	146
A.2.4. Fundação de alvenaria de pedra argamassada	146
A.2.5. Alvenaria de embasamento	147

A.2.6. Aterro do caixão	148
A.2.7. Compactação do aterro da fundação	149
A.2.8. Execução do contrapiso	150
A.2.9. Cinta de concreto	151
A.2.10. Execução das alvenarias	151
A.2.11. Vãos das esquadrias	155
A.2.12. Cinta de amarração	156
A.2.13. Altura do piso ao teto	157
A.2.14. Cobertura	158
A.2.15. Portas e janelas	159
A.2.16. Revestimento	160
A.2.17. Pintura e acabamento	160
APÊNDICE B	162
B.1. Testes estatísticos	162
B.1.1. Testes estatísticos do ensaio de início de pega	162
B.1.2. Testes estatísticos do ensaio de fim de pega	166
B.1.3. Testes estatísticos do ensaio de absorção por imersão total	171
B.1.4. Testes estatísticos do ensaio de absorção por capilaridade	175
B.1.5. Testes estatísticos do ensaio de densidade	179
B.1.6. Testes estatísticos do ensaio de dureza Shore (C)	183
B.1.7. Testes estatísticos do ensaio de resistência a compressão	188
B.1.8. Testes estatísticos do ensaio de resistência a tração na flexão	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pinturas sobre paredes revestidas com gesso no Egito	6
Figura 2.2 - Jazidas de gipsita a céu aberto do polo gesseiro do Araripe, PE	7
Figura 2.3 - Ilustração esquemática do fenômeno da retração/expansão da pasta de gesso	13
Figura 2.4 - Cristais de gesso em forma de agulhas	14
Figura 2.5 - Cristais de gesso em forma de placas	15
Figura 2.6 - Microestrutura de matriz de gesso (a) - puro (b) - com nanotubos de carbono, (c) - com pó metalúrgico; (d) - com pó metalúrgico e nanotubos de carbono	15
Figura 2.7 - Dureza do gesso - β (úmido e seco) em função da porosidade	16
Figura 2.8 - Morfologias da microestrutura das pastas de gesso com uso de aceleradores de pega: (a) referência; (b) adição de gipsita e (c) aditivo K_2SO_4	17
Figura 2.9 - Morfologias da microestrutura das pastas de gesso com uso de retardadores de pega: (a) referência; (b) ácido succínico ($C_4H_6O_4$) e (c) ácido cítrico ($C_6H_8O_7$)	17
Figura 2.10 - Decréscimo do módulo de elasticidade em função da umidade relativa, para amostras de gesso com 57% de porosidade	18
Figura 2.11 - Evolução da dureza do gesso (com 52% de porosidade em volume) em função da porcentagem de água evaporada dos poros	19
Figura 2.12 - Ensaio de dureza utilizando o durômetro Shore C	20
Figura 2.13 - Ensaio de Resistencia a Compressão	21
Figura 2.14 - Ensaio de tração na flexão	21
Figura 2.15 - Fotomicrografia do gesso reciclado no microscópio eletrônico de varredura	26
Figura 2.16 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura dos corpos de prova com composição: (a) G1/100, aumento de 50X; (b) G1/100, aumento de 200X; (c) G1/65, aumento de 50 X; (d)G1/65 aumento de 300 X(e)G5/100, aumento de 50X; (f) G5/100, aumento de 300X; (g) G5/65 aumento de 50X; (h) G5/65, aumento de 300X .	29
Figura 2.17 - Microscopias de compósitos de gesso (a) com 1% e (b) 10% de látex, respectivamente	30
Figura 2.18 - Casas de gesso na região do polo gesseiro do Araripe, PE	31

Figura 2.19 - Processo construtivo inadequado: bloco em contato direto com o piso	32
Figura 2.20 - Desgaste do bloco de gesso devido ao contato direto com a água	32
Figura 2.21 - Peças de madeira do telhado apoiando-se diretamente sobre os blocos de gesso e beirais muito curtos	33
Figura 2.22 - Verga de madeira sem rigidez adequada	33
Figura 2.23 - Parede com 34% dos blocos cortados, gerando perdas e resíduos: insustentabilidade desse sistema	34
Figura 2.24 - Encaixe em perspectiva	35
Figura 2.25 - Tipologia dos blocos principais	35
Figura 2.26 - Dimensões dos blocos principais	36
Figura 2.27 - Tipologias dos sub-blocos	36
Figura 2.28 - Cinta onde devem nascer as paredes (em preto) e posicionamento dos blocos de canto	37
Figura 2.29 - Sequência de assentamento dos blocos da primeira fiada	38
Figura 2.30 - Corte esquemático da cinta no topo da parede	39
Figura 2.31 - Fechamento em madeira acima da cinta superior	39
Figura 2.32 - Protótipo construído no campus universitário da universidade federal da paraíba	40
Figura 3.1 - Pó de pedra estocado	41
Figura 3.2 - Equipamento utilizado no ensaio de difração de raio X	43
Figura 3.3 - Espectrômetro Shimadzu	44
Figura 3.4 - Equipamento utilizado nos ensaios térmicos	44
Figura 3.5 - Traços das misturas confeccionadas	45
Figura 3.6 - Calorímetro pseudoadiabático	47
Figura 3.7 - Diferentes formas de transmissão de pulso ultrassônico	48
Figura 3.8 - Convenção das direções para medição	49
Figura 3.9 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de ultrassom	49
Figura 3.10 - Equipamento de calibração de onda ultrassônica	50
Figura 3.11 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	50
Figura 3.12 - Moldagem e corpos de prova deformados	51
Figura 3.13 - Corpos de prova aguardando constância de massa	52
Figura 3.14 - Ensaio de dureza utilizando o durômetro Shore C	52
Figura 3.15 - Ensaio de absorção por imersão total	53

Figura 3.16 - Ensaio de absorção por capilaridade	54
Figura 3.17 - Ensaio de Resistencia a Compressão	55
Figura 3.18 - Ensaio de tração na flexão	55
Figura 4.1 - Curvas granulométricas do pó de pedra e limites da ABNT NBR 7211:2009	59
Figura 4.2 - DRX do gesso utilizado na pesquisa	61
Figura 4.3 - Termogramas da amostra do gesso comercial empregado	63
Figura 4.4 - Variação dos tempos de início de pega	66
Figura 4.5 - Gráfico de superfície de resposta para início de pega	68
Figura 4.6 - Correlações entre tempo de início de pega e relação a/g para cada teor de substituição	68
Figura 4.7 - Variação dos tempos de fim de pega	70
Figura 4.8 - Gráfico de superfície de resposta para fim de pega	71
Figura 4.9 - Correlações entre fim de pega e relação a/g para cada teor de substituição	72
Figura 4.10 - Curvas calorimétricas com diferentes teores de substituição	73
Figura 4.11 - Espectro de ondas dos corpos de prova sem substituição	74
Figura 4.12 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 10% substituição	75
Figura 4.13 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 20% substituição	75
Figura 4.14 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 30% substituição	75
Figura 4.15 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 40% substituição	75
Figura 4.16 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 50% substituição	76
Figura 4.17 - Velocidade do pulso ultrassônico global x resistência à compressão axial	78
Figura 4.18 - Microscopia dos compósitos com relação a/g =0,6	79
Figura 4.19 - Imagens do compósito com 30% de pó de pedra em diferentes aproximações, onde: AG - agregado; M - matriz; ZT - zona de transição	80
Figura 4.20 - Imagem de compósito com 50% de pó de pedra	81
Figura 4.21 - Forma dos cristais do gesso hidratado	82
Figura 4.22 - Exemplo da variabilidade da morfologia dos cristais de gesso	83
Figura 4.23 – Absorção por imersão total em função do teor de substituição e da relação a/g	84
Figura 4.24 - Gráfico de superfície de resposta para absorção por imersão total	86

Figura 4.25 - Correlação entre imersão total e relação a/g para cada teor de substituição	87
Figura 4.26 - Absorção por capilaridade em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra	88
Figura 4.27 - Gráfico de superfície de resposta da absorção por capilaridade	89
Figura 4.28 - Absorção por capilaridade	90
Figura 4.29 - Densidade dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra	91
Figura 4.30 - Gráfico de superfície de resposta da densidade	92
Figura 4.31 - Correlação entre a densidade e a relação a/g para os diferentes teores de pó de pedra	92
Figura 4.32 - Dureza Shore em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra	94
Figura 4.33 - Gráfico de superfície de resposta da dureza Shore C	95
Figura 4.34 - Dureza Shore C para traços com relação (a/g) de 0,5 a 0,9	96
Figura 4.35 - Resistência a compressão dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra	97
Figura 4.36 - Gráfico de superfície de resposta da resistência a compressão	99
Figura 4.37 - Resistência a compressão dos compósitos	100
Figura 4.38 - Resistência a tração na flexão dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra	102
Figura 4.39 - Gráfico de superfície de resposta da resistência a tração	103
Figura 4.40 - Resistência a tração para traços com relação (a/g) de 0,5 a 0,9	104
Figura 5.1 - Mão - Francesa utilizada no ensaio de carga suspensa	105
Figura 5.2 – Esquema de mão francesa padrão ABNT NBR 11678:2016	106
Figura 5.3 - Relógios comparadores fixados a parede oposta do protótipo	106
Figura 5.4 – Elementos fixadores da peça padrão	107
Figura 5.5 - Desenho esquemático do ensaio de carga suspensa	108
Figura 5.6 - Aplicação das cargas no ensaio de carga suspensa	108
Figura 5.7 - Leitura dos relógios comparadores	109
Figura 5.8 - Desenho esquemático do ensaio de fechamento brusco de porta	109
Figura 5.9 - Porta do protótipo para a realização do ensaio de fechamento brusco de porta	110

Figura 5.10 – Determinação do ângulo de abertura da porta	110
Figura 5.11 – Aparelhagem para realização do ensaio de fechamento brusco de porta	111
Figura 5.12 – Execução do ensaio de fechamento brusco de porta	111
Figura 5.13 - Ensaio de sustentação de rede de dormir	112
Figura 5.14 – Esquema para realização do ensaio de rede de dormir	112
Figura 5.15 - Rede com carga de 200 kgf	113
Figura 5.16 - Desenho esquemático do ensaio de corpo duro	114
Figura 5.17 – Aparelhagem utilizada no ensaio de corpo duro	115
Figura 5.18 – Execução do ensaio de corpo duro	115
Figura 5.19 – Medição da profundidade e diâmetro das mossas	116
Figura 5.20 - Desenho esquemático do ensaio de corpo mole	117
Figura 5.21 - Saco de areia suspenso por cordas	117
Figura 5.22 - Realização do ensaio de corpo mole	118
Figura 5.23 – Aparelhagem para captação dos deslocamentos no ensaio de corpo mole	118
Figura 6.1 – Deslocamentos horizontais imediatos (D_{hi}) em função da carga suspensa	120
Figura 6.2 - Deslocamentos horizontais residuais (D_{hr}) em função do posicionamento dos extensômetros após remoção da carga suspensa de 800 N	120
Figura 6.3 - Pontos de fixação da mão francesa ao protótipo sem fissuração	121
Figura 6.4 - Fissuras entre o marco e a parede após ensaio de fechamento brusco de porta	122
Figura 6.5 - Detalhe dos pontos de fixação do ensaio de rede de dormir após ensaio	124
Figura 6.6 - Deslocamento horizontal instantâneo D_{hi} causados pelos impactos de corpo mole na parede do protótipo	125
Figura 6.7 - Detalhe da parede onde foram executados os ensaios de corpo mole	125
Figura 6.8 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 2,5J	128
Figura 6.9 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 5,0J	128
Figura 6.10 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 10J	129
Figura 6.11 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 20J	129
Figura A.1 - Fôrma do bloco M40	138
Figura A.2 - Fôrma M40 recebendo o desmoldante	138

Figura A.3 - Pesagem do material utilizado no traço	139
Figura A.4 - Adição do gesso e do pó de pedra ao traço	139
Figura A.5 - Homogeneização com misturador mecânico	140
Figura A.6 - Moldagem seguida de remoção do excesso de gesso após início de pega	140
Figura A.7 - Acabamento da peça	141
Figura A.8 - Desmoldagem das peças	141
Figura A.9 - Bloco de canto (BC) e Bloco M10	142
Figura A.10 - Blocos M40	142
Figura A.11 - Planta baixa	143
Figura A.12 - Planta de cobertura	144
Figura A.13 - Cortes	144
Figura A.14 - Corte e vista frontal	145
Figura A.15 - Locação das fundações	146
Figura A.16 - Escavação das fundações	146
Figura A.17 - Fundação em alvenaria argamassada	147
Figura A.18 - Alvenaria de embasamento	148
Figura A.19 - Piçarra utilizada como material de aterro	148
Figura A.20 - Aterro das fundações	149
Figura A.21 - Compactação do aterro	150
Figura A.22 - Contrapiso	151
Figura A.23 - Cinta de concreto impermeabilizada	151
Figura A.24 - Posicionamento dos blocos na primeira fiada	152
Figura A.25 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos na parede de frente	152
Figura A.26 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos na parede de fundo	153
Figura A.27 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos nas paredes laterais	153
Figura A.28 - Locação dos blocos de canto	155
Figura A.29 - Armação da cinta	156
Figura A.30 - Pintura isolante para recebimento da cinta	157
Figura A.31 - Cinta concretada	157
Figura A.32 - Prolongamento do beiral para a proteção da alvenaria de gesso	158
Figura A.33 - Madeiramento do telhado	158
Figura A.34 - Telhado após conclusão	159

Figura A.35 - Porta e janelas do protótipo	160
Figura A.36 - Parede rebocada	160
Figura A.37 - Protótipo concluído	161
Figura B.1 - Boxplot da influência das relações (a/g) nos tempos de início de pega	162
Figura B.2 - Boxplot da influência do teor de substituição nos tempos de início de pega	163
Figura B.3 - Diferença na média das relações (a/g) para o tempo de início de pega	165
Figura B.4 - Diferença na média dos teores de substituição para o tempo de início de pega	166
Figura B.5 - Boxplot da influência das relações (a/g) nos tempos de fim de pega	167
Figura B.6 - Boxplot da influência do teor de substituição nos tempos de fim de pega	167
Figura B.7 - Diferença na média das relações (a/g) para o tempo de fim de pega	170
Figura B.8 - Diferença na média dos teores de substituição para o tempo de início de pega	170
Figura B.9 - Boxplot da influência das relações (a/g) na absorção por imersão total	171
Figura B.10 - Boxplot da influência dos teores de substituição na absorção por imersão total	172
Figura B.11 - Diferença na média das relações (a/g) para a absorção por imersão total	174
Figura B.12 - Diferença na média dos teores de substituição para a absorção por imersão total	174
Figura B.13 - Boxplot da influência das relações (a/g) na absorção por capilaridade ...	175
Figura B.14 - Boxplot da influência dos teores de substituição na absorção por capilaridade	176
Figura B.15 - Diferença na média das relações (a/g) para a absorção por capilaridade	178
Figura B.16 - Diferença na média dos teores de substituição para a absorção por capilaridade	179
Figura B.17 - Boxplot da influência das relações (a/g) na densidade	180
Figura B.18 - Boxplot da influência dos teores de substituição na densidade	180
Figura B.19 - Diferença na média das relações (a/g) para a densidade	182
Figura B.20 - Diferença na média dos teores de substituição para a densidade	183

Figura B.21 - Boxplot da influência das relações (a/g) na dureza Shore (C)	184
Figura B.22 - Boxplot da influência dos teores de substituição na dureza Shore (C)	184
Figura B.23 - Diferença na média das relações (a/g) para a dureza Shore (C)	187
Figura B.24 - Diferença na média dos teores de substituição para a dureza Shore (C) ..	187
Figura B.25 - Boxplot da influência das relações (a/g) na resistência a compressão	188
Figura B.26 - Boxplot da influência dos (%) de substituição na resistência a compressão	189
Figura B.27 - Diferença na média das relações (a/g) para a resistência à compressão ...	191
Figura B.28 - Diferença na média dos (%) de substituição na resistência à compressão	191
Figura B.29 - Boxplot da influência das relações (a/g) na resistência a tração	192
Figura B.30 - Boxplot da influência dos teores de substituição na resistência a tração ..	193
Figura B.31 - Diferença na média das relações (a/g) para a resistência à tração	195
Figura B.32 - Diferença na média dos teores de substituição para a resistência à tração	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Reações de desidratação térmica da gipsita	8
Tabela 2.2 - Massas atômicas dos elementos que compõem o gesso	10
Tabela 2.3 - Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção	22
Tabela 2.4 - Exigências físicas do gesso para construção	23
Tabela 2.5 - Exigências químicas do gesso para construção	23
Tabela 2.6 - Geração de resíduos na aplicação do material e de componentes de gesso durante as atividades de construção no brasil	25
Tabela 2.7 - Materiais utilizados no estudo de compósitos à base de gesso	27
Tabela 4.1 - Caracterização do pó de pedra	58
Tabela 4.2 - Tabela da análise granulométrica do pó de pedra	59
Tabela 4.3 - Resultados da massa unitária do gesso	60
Tabela 4.4 - Resultados da massa específica	61
Tabela 4.5 - Composição química do gesso (% mássica)	62
Tabela 4.6 - Valores de tempo de início de pega	65
Tabela 4.7 - Valores do tempo de fim de pega	70
Tabela 4.8 - Resistencia a compressão e velocidade ultrassônica dos corpos de prova	76
Tabela 4.9 - Correlações testadas entre resistência a compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica	77
Tabela 4.10 - Correlação entre resistência teórica pela equação do segundo grau e experimental	101
Tabela 6.1 - Resultado do ensaio de capacidade de suporte de peças suspensas	119
Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios de fechamento brusco de porta	122
Tabela 6.3 - Resultado do ensaio de rede de dormir	123
Tabelas 6.4 - Resultados dos ensaios de impacto de corpo mole na parede do protótipo, impactos externos	124
Tabela 6.5 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 0,5kg e altura 0,5m	126
Tabela 6.6 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 0,5kg e altura 1,0m	126

Tabela 6.7 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 1,0kg e altura 1,0m	127
Tabela 6.8 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 1,0kg e altura 2,0m	127
Tabela 7.1 - Propriedades do compósito escolhido para fabricação dos blocos	134
Tabela A.1 - Quantitativo de blocos e sub blocos	154
Tabela A.2 - Quantitativo de blocos para serem empregados e gerarem os sub-blocos	154
Tabela B.1 - Análise da variância (anova duas vias) para o tempo de início de pega	163
Tabela B.2 - Teste de Tukey das relações (a/g) para o tempo de início de pega	164
Tabela B.3 - Teste de Tukey dos teores da substituição para o tempo de início de pega	164
Tabela B.4 - Análise da variância (anova duas vias) para o tempo de fim de pega	168
Tabela B.5 - Teste de Tukey relação (a/g) para o tempo de fim de pega	168
Tabela B.6 - Teste de Tukey do teor da substituição para o fim de pega	168
Tabela B.7 - Análise da variância (anova duas vias) para a absorção por imersão total	172
Tabela B.8 - Teste de Tukey relação (a/g) para a absorção por imersão total	173
Tabela B.9 - Teste de Tukey do teor da substituição para a absorção por imersão total	173
Tabela B.10 - Análise da variância (anova duas vias) para a absorção por capilaridade	176
Tabela B.11 - Teste de Tukey relação (a/g) para a absorção por capilaridade	177
Tabela B.12 - Teste de Tukey do teor da substituição para a absorção por capilaridade	177
Tabela B.13 - Análise da variância (anova duas vias) para a densidade	181
Tabela B.14 - Teste de Tukey relação (a/g) para a densidade	181
Tabela B.15 - Teste de Tukey do teor da substituição para a densidade	181
Tabela B.16 - Análise da variância (anova duas vias) para a dureza Shore (C)	185
Tabela B.17 - Teste de Tukey relação (a/g) para a dureza Shore (C)	185
Tabela B.18 - Teste de Tukey do teor da substituição para a dureza Shore (C)	185
Tabela B.19 - Análise da variância (anova duas vias) para a resistência à compressão	189

Tabela B.20 - Teste de Tukey relação (a/g) para a resistência à compressão	190
Tabela B.21 - Teste de Tukey do teor da substituição para a resistência à compressão	190
Tabela B.22 - Análise da variância (anova duas vias) para a resistência à tração	193
Tabela B.23 - Teste de Tukey relação (a/g) para a resistência à tração	194
Tabela B.24 - Teste de Tukey do teor da substituição para a resistência à tração	194

RESUMO

O gesso é um dos materiais de construção mais antigos que se tem conhecimento. Em virtude de ser um ligante menos agressivo ao ambiente que o cimento Portland, seu uso deve ser incentivado e novas aplicações estudadas. Este trabalho apresenta uma inovação tecnológica visando novo uso do gesso na construção civil: em blocos estruturais para uso em edificações. Pensando na sustentabilidade da construção, utiliza-se o pó de pedra como material de substituição parcial ao gesso, por ser um resíduo de com excelentes características e pouco utilizado nas construções convencionais. Inicialmente o trabalho aborda as características físicas e mecânicas dos materiais utilizados. Em seguida, dá-se ênfase ao estudo do compósito (gesso/pó de pedra). Foram utilizados teores de substituição do gesso de 0% a 50% com intervalos de 10% e a relação água/gesso variando de 0,5 a 0,9 em intervalos de 0,1. Foram obtidas em cada mistura os tempos de início e de fim de pega, curvas calorimétricas, densidade, absorção de água por imersão e por capilaridade, dureza Shore, resistência à compressão e à flexão. Algumas imagens da microestrutura são apresentadas, assim como foi medida a velocidade de propagação de onda ultrassônica em algumas misturas. Com base nos resultados, foi escolhido o compósito (gesso/pó de pedra), com relação água/gesso igual a 0,6 e teor de substituição do gesso por pó de pedra de 40%, para moldagem de blocos para construção de um protótipo levando em conta o sistema construtivo já desenvolvido na Universidade Federal da Paraíba que praticamente elimina perdas. O protótipo foi submetido a ensaios de desempenho da ABNT NBR 15.575. Foram feitos ensaios de resistência a cargas suspensas, resistência a impacto de corpo rígido, resistência a impacto de corpo mole e fechamento brusco de porta. Os resultados indicam que o sistema construtivo pôde ser classificado com nível de desempenho superior. Dessa forma pode-se dizer que o trabalho resultou na aprovação de um novo compósito, tipo de bloco e sistema construtivo para emprego em alvenarias de edificações com minimização de perdas e de aproveitamento de resíduos.

Palavras Chaves: gesso, pó de pedra, sistema construtivo, ensaios de desempenho.

ABSTRACT

Gypsum is one of the oldest building materials known. As it is a less aggressive binder to the environment than Portland cement, its use should be encouraged, and new applications studied. This work presents a technological innovation concerning new use of plaster in civil construction: in structural blocks for use in buildings. Thinking about the sustainability of the construction, stone dust is used as a partial replacement of gypsum, as it is a waste with excellent characteristics and little used in conventional constructions. Initially, the work addresses the physical and mechanical characteristics of the materials used. Then, emphasis is placed on the study of the composite (plaster/stone powder). Gypsum replacement contents from 0% to 50% with intervals of 10% and the water/gypsum ratio varying from 0.5 to 0.9 in intervals of 0.1 were used. The initial and final setting time, calorimetric curves, density, water absorption by immersion and by capillary, Shore hardness, resistance to compression and flexion were obtained for each mixture. Some images of the microstructure are presented, as well as the propagation velocity of the ultrasonic wave in some mixtures. Based on the results, the composite (plaster/stone powder), with a water/gypsum ratio equal to 0.6 and 40% replacement of gypsum by stone powder was chosen, for casting blocks to build a prototype taking into account the construction system already developed at the Federal University of Paraíba, which practically eliminates losses. The prototype was submitted to Brazilian Standard ABNT NBR 15.575 performance tests. Resistance to suspended loads, rigid body impact strength, soft body impact strength and behaviour under sudden door closing were obtained. The results indicate that the constructive system could be classified with superior performance level. Thus, it can be said that the work resulted in the approval of a new composite, block type and construction system for use in building masonry with minimization of losses and waste generation.

Keywords: plaster, stone dust, construction system, performance tests

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social em todo o mundo, porém, por outro lado, comporta-se, ainda, como grande geradora de impactos ambientais, por conta do consumo exagerado de energia e de recursos naturais não renováveis, pela modificação da paisagem e pela geração de poluentes e de resíduos (SANTOS, 2007). O setor tem um grande desafio de como conciliar uma atividade produtiva, em condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável, consciente e menos agressiva ao meio ambiente.

A construção civil no Brasil apresenta baixos índices de produtividade em relação a outros países, principalmente no desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir o desperdício de materiais, aliados à baixa qualificação profissional. Enquanto em países desenvolvidos a média de resíduos desperdiçados em novas construções é de 100,0 kg/m², no Brasil gira em torno de 300,0 kg/m². Em termos quantitativos, esses resíduos correspondem a cerca 50% da quantidade em massa de resíduos sólidos urbanos coletados em cidades com mais de 500 mil habitantes, segundo Monteiro et al. (2001).

Esses índices de desperdício são inaceitáveis em um mundo que passa por uma crise energética, ambiental e social sem precedentes. No campo da engenharia, a necessidade de infraestrutura e de habitação é brutal: cerca de um terço da humanidade tem necessidade de casa, o que significa que por volta de 600 milhões de moradias precisam serem construídas para abrigar decentemente a todos no Planeta.

A necessidade de adequação da indústria da construção ao novo modelo de desenvolvimento econômico mundial, onde a busca da sustentabilidade do setor é inquestionável, exige uma análise interativa de toda sua cadeia produtiva, constituída por diferentes segmentos industriais, que fornecem os insumos necessários à construção civil. Entre eles podem ser citados os segmentos da indústria siderúrgica, da indústria cimenteira, da indústria gesseira, entre outros. Em geral, suas atividades se iniciam com a extração de recursos naturais e passam ao beneficiamento de materiais e à aplicação do material na construção propriamente dita (KURESKI, et al., 2008).

O desenvolvimento sustentável da cadeia depende da sustentabilidade de cada segmento, cujos principais elementos a serem controlados, para alcançar este modelo de desenvolvimento, são: (i) a redução do uso de recursos naturais; (ii) a redução de consumo

energético; (iii) a redução da geração de resíduos; (iv) a reutilização e a reciclagem, entre outros (DEGANI, 2003; JOHN, et.al.,2000).

Esse modelo de desenvolvimento inclui a pesquisa de novos materiais e técnicas construtivas para se reduzir os desperdícios na construção e tentar oferecer alternativas aos principais materiais de construção, como cimento e concreto, aço, alumínio, materiais sintéticos, tintas, blocos e revestimentos cerâmicos, visto que eles exigem vultosos investimentos para sua produção, concentrando a riqueza na mão de poucos.

Mesmo em um cenário adverso nos últimos anos houve um crescimento da produção de habitação popular no Brasil. Não obstante, as baixas condições de habitabilidade e a degradação ambiental são características de grande parte das habitações produzidas. As limitações financeiras têm sido a principal causa que justificam essas deficiências. Nesse contexto, muitas pesquisas de materiais estão sendo desenvolvidas na busca de boas soluções para aliar a habitabilidade, baixo impacto ambiental e custos na habitação popular. Um material que tem ganhado destaque nesse cenário é o gesso.

O gesso apresenta vantagens por se tratar de um aglomerante menos agressivo ao meio ambiente, comparado com o cimento e a cal, demonstrando excelente resistência ao fogo e servindo para isolamentos térmico e acústico.

O gesso também tem ao seu favor o fato de ser um material ligante de maior eficiência energética, o que é de grande interesse para o futuro da humanidade. No seu processo de fabricação, enquanto o cimento Portland exige temperaturas da ordem de 1450 °C, o gesso pode ser obtido com menos de 170 °C; enquanto o cimento lança CO₂ na atmosfera, o gesso emite vapor de água.

Nesse contexto, o desenvolvimento de pesquisas científicas vinculadas aos estudos de caracterização de novos materiais menos impactantes ao meio ambiente, se insere diretamente nas primícias do desenvolvimento sustentável.

O gesso como material de construção tem sido estudado na Universidade Federal da Paraíba, já há quase duas décadas. Pode-se contar 8 dissertações e uma tese em que o gesso foi empregado. Em alguns trabalhos o gesso servia de matriz em compósitos com fibras e polpa naturais e também com resíduos diversos; outro gerou gesso a partir do próprio resíduo de gesso; outros desenvolveram produtos, como blocos incorporando garrafas PET, placas para proteção térmica e até pequenos elementos estruturais como vergas e contravergas, de gesso reforçado com bambu. Um outro desenvolveu blocos

especiais e um sistema construtivo baseado na coordenação modular que evita os desperdícios, no qual se baseia a parte 2 desta tese.

Em todas essas pesquisas, a matriz é o próprio gesso. Agora pensou-se em reduzir o consumo desse material cimentício, utilizando a substituição parcial do gesso pelo pó de pedra, que apresenta grande potencial, como vai ser mostrado neste trabalho. Andriolo (2005) define pó de pedra como sendo o material fino, com partículas de diâmetro inferior a 4,8 mm, obtido da britagem de rochas. Ele apresenta uma distribuição granulométrica bem homogênea, o que ajuda a dar compacidade quando misturado com o gesso.

O pó de pedra é tido como um rejeito do processo de extração das britas, não possuindo destinação definida, permanecendo estocado nos pátios das pedreiras formando enormes pilhas, alterando a paisagem e podendo gerar impactos ambientais, como, por exemplo, gerar poeira, obstruir canais de drenagem, e, quando carreados pela chuva, causar o assoreamento de rios.

Na cidade de Cajazeiras, no interior da Paraíba, onde trabalha o autor desta tese, há várias pedreiras produzindo agregados e gerando enormes quantidades de pó de pedra. Pensou-se então em utilizar esse material na fabricação do tipo de blocos desenvolvido em trabalho anterior da UFPB.

Desta forma, objetiva-se estudar nesta tese três aspectos essenciais para o desenvolvimento de elementos estruturais auto portantes de gesso para a construção de edificações.

Primeiro aspecto: compósitos de gesso - pó de pedra, fazendo-se uma completa caracterização física e mecânica do material, variando-se a relação água gesso e a quantidade de pó de pedra incorporada.

Segundo aspecto: aplicação do compósito em blocos do sistema construtivo à base de gesso segundo a teoria da coordenação modular, conforme desenvolvido pela arquiteta Christiane Cavalcanti Rodrigues em dissertação de mestrado na UFPB (RODRIGUES, 2008).

Terceiro aspecto: construção de um protótipo utilizando os blocos de gesso - pó de pedra, com os conceitos da citada arquiteta, para se proceder aos ensaios de desempenho estrutural indicados na (ABNT NBR 15575:2013).

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é conhecer as propriedades físicas e mecânicas de compósitos de gesso e pó de pedra e verificar se o sistema construtivo desenvolvido em Rodrigues, (2008) está conforme a norma de desempenho estrutural ABNT NBR 15575:2013, com relação aos ensaios de impacto de corpo duro, impacto de corpo mole, fechamento brusco de porta e resistência a cargas suspensas, utilizando-se blocos com o compósito citado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o efeito da incorporação de diferentes percentuais de pó de pedra sobre as propriedades das pastas de gesso no estado fresco;
- Analisar o efeito da incorporação de diferentes percentuais de pó de pedra sobre as propriedades do compósito no estado endurecido;
- Analisar as propriedades dos diferentes compósitos para escolher composição adequada para moldagem dos blocos;
- Interagir com uma indústria de pré-moldados de gesso para produção de blocos;
- Construir um protótipo usando o sistema construtivo com os blocos produzidos na indústria, no qual serão feitos os ensaios de desempenho;
- Contribuir para a viabilização do aproveitamento do resíduo de pó de pedra em grande escala, e lhe dar uma destinação ecologicamente correta, bem como desenvolver tecnologia visando a democratização do acesso a moradias de boa qualidade e de custo adequado.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Pode-se dizer que a tese pode ser dividida em duas partes: a primeira referente aos compósitos de gesso - pó de pedra; a segunda referente à fabricação de blocos com um dos compósitos escolhido, construção de um protótipo e avaliação de desempenho desse protótipo, conforme ABNT NBR 15575:2013.

Então o trabalho é composto de 7 capítulos e 2 apêndices.

O Capítulo 1, de introdução, faz uma apresentação do tema e apresenta os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os materiais em estudo, o gesso e o pó de pedra, sendo fornecidas várias informações sobre eles, visto que uma das

intenções desse trabalho é difundi-los no meio acadêmico. Cumpre lembrar que no campo da pesquisa sobre blocos estruturais de gesso, praticamente não se acham artigos na literatura, tão pouco sobre os melhoramentos que se pode fazer nesse material com relação seu desempenho mecânico. Neste capítulo também se trata do pó de pedra, outro material de grande potencial para emprego na Engenharia, e que aqui vai aparecer associado ao gesso. Ainda no capítulo 2 se faz uma explanação sobre um sistema construtivo com blocos de gesso desenvolvido no LABEME - UFPB (Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas) o qual foi o incentivador desta pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia, indica os ensaios realizados nos materiais, com todos os detalhes dos procedimentos executados, desde a caracterização dos materiais individualmente (gesso e pó de pedra), como a caracterização das pastas até a determinação das propriedades física e mecânicas dos compósitos obtidos.

O Capítulo 4 apresenta e analisa os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de caracterização física dos materiais (gesso e pó de pedra) e analisa os resultados das características físicas e mecânicas dos compósitos estudados, correlacionando tais resultados ao estudo de sua micro estrutura. Além de apresentar um vasto estudo estatístico correlacionando as grandezas: relação(a/g) e teor de substituição e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

O Capítulo 5 descreve a metodologia de avaliação e os equipamentos utilizados nos ensaios de desempenho estrutural do protótipo conforme ABNT NBR 15575:2013.

O Capítulo 6 apresenta a análise dos resultados, obtidos após a realização dos ensaios de desempenho estrutural.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões, incluindo recomendações para trabalhos futuros.

O apêndice A apresenta os modelos dos blocos (gesso - pó de pedras) usado na construção do protótipo, seu processo de fabricação desde a mistura dos materiais até a desforma do bloco. Também descreve as etapas construtivas da construção do protótipo, da fundação a cobertura.

O apêndice B apresenta os estudos estatísticos feitos referentes aos traços estudados.

Posteriormente estão relacionadas as referências bibliográficas que serviram de base para este estudo. E, para concluir, os anexos que apresentam os dados obtidos nos ensaios, na íntegra.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sucinta, relativa aos assuntos abordados nesta tese. Algumas informações resumidas sobre o gesso são também apresentadas.

2.1. GESSO

De acordo com a ABNT NBR 12127:2019, gesso é um material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores do tempo de pega.

A RILEM (1982a) apud Alves (2010) define gesso de construção como: “Material pulverulento, constituído predominantemente de hemidrato ou de uma mistura de sulfatos (hemidrato, anidrita ou gipsita), com baixo valor percentual de água livre e de substâncias consideradas como impurezas: carbonato de cálcio e de magnésio, argilominerais e de sais solúveis.

O gesso é um dos mais antigos materiais cimentícios conhecidos pelo Homem. Amostras datadas de cerca de 6000 a.C., provenientes das ruínas das cidades de Jericó, em Israel, e de Anu, no sul do Turquestão, evidenciaram o emprego do gesso, como argamassa de revestimento (GOURDIN e KINGERY, 1975). O gesso foi também muito usado pelos Egípcios, Figura 2.1 e tantas outras civilizações do passado.

Figura 2.1 - Pinturas sobre paredes revestidas com gesso no Egito



Fonte: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/civilizacaoegipcia/imagens/egito10.jpg>

2.2. FABRICAÇÃO DO GESSO

Para a fabricação do gesso utiliza-se uma única matéria prima, que é a gipsita. No Brasil há provavelmente as maiores reservas do mundo, ainda não exploradas. Até agora a principal região produtora de gesso está no interior oeste de Pernambuco, na região conhecida como Araripe. De lá sai cerca de 95% do gesso usado no país. As jazidas locais são de grande pureza.

O processo de produção passa pelas etapas:

- extração da gipsita – no Brasil em minas a céu aberto Figura 2.2.
- transporte
- britagem
- calcinação
- moagem/peneiramento
- ensacagem
- comercialização

Muito material foi escrito sobre essas etapas, mas na edição desta tese, preferiu-se considerar que elas não são objeto deste trabalho.

Figura 2.2 - Jazidas de gipsita a céu aberto do polo gesseiro do Araripe, PE



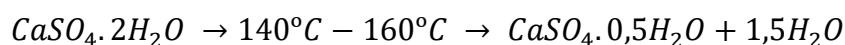
Fonte: <https://gipsomix.com.br/>

2.3. TIPOS DE GESSO

Há vários tipos de gesso, conforme ocorre a desidratação da gipsita. Sem considerar as impurezas, esse minério é composto por sulfato de cálcio di-hidratado: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

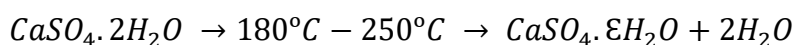
Como se vê, há duas moléculas de água junto ao sulfato, e conforme essa água é retirada do material tem-se diferentes tipos de gesso. A saída da água depende da temperatura de calcinação. Então, simplificadamente, tem-se conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Reações de desidratação térmica da gipsita



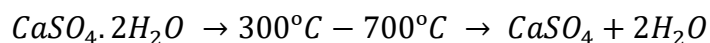
gipsita

bassanita



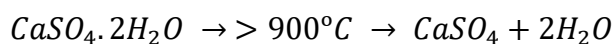
Gipsita

anidrita III



Gipsita

anidrita II



Gipsita

anidrita I

Fonte: DE MILITO, (2007)

Portanto, nas temperaturas baixas, até cerca de 160°C há uma desidratação que não é completa, formando o sulfato de cálcio hemi-hidratado, conhecido como bassanita, em homenagem ao geólogo italiano Francesco Bassani, que o identificou quimicamente pela primeira vez em 1906 em uma rocha vulcânica do Vesúvio.

É a bassanita que é comercializada no mercado da construção civil como gesso de fundição, ou seja, gesso com o qual se fazem peças decorativas, placas de forro, blocos para divisórias, etc. É esse gesso que é considerado neste trabalho.

Ao se aumentar a temperatura, acima dos 160°C até 250°C , o hemi-hidratado perde mais água, mas, não toda, sendo chamado de anidrita III ou anidrita solúvel.

Crescendo a temperatura de calcinação, acima de 300°C começa a desidratação completa, chegando-se a produzir a anidrita II, até os 600°C . Com a entrada em uso do

gesso como material de revestimento de paredes nas construções, que no Estado da Paraíba data de 15 a 20 anos, a indústria passou a fornecer o chamado “gesso de revestimento”, que corresponde a cerca de 70 % de hemi-hidratado e 30% de anidrita II.

Se a temperatura for além dos 600° C, o material perde o poder ligante e é usado como carga para polímeros e tintas.

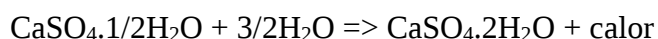
Em temperaturas acima de 1250°C, a gipsita se decompõe em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.

Para fins mais nobres, como emprego na odontologia, a gipsita pode ser calcinada em autoclave, levando a um produto mais uniforme e de melhor qualidade. É o chamado gesso alfa. O gesso calcinado a pressão atmosférica é chamado de gesso beta.

Portanto, o gesso neste trabalho se refere ao sulfato de cálcio beta hemi-hidratado na forma de pó fino (partículas abaixo de cerca de 0,2 mm).

2.4. MECANISMO DE AÇÃO DO HEMI-HIDRATADO COMO MATERIAL AGLOMERANTE

O que se tem é uma reação química com a água regenerando a gipsita:



Trata-se de reação exotérmica que gera expansão: 0,03 a 0,15%

Na secagem apresenta ligeira retração, cerca de um décimo da expansão.

A reação ocorre rapidamente, em questão de minutos. De maneira resumida pode-se dizer que:

- A água dissolve o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), na base de 10g/l
- a água reage com o hemi-hidratado formando gipsita ou dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- esta, por ser menos solúvel (2g/l), faz a solução se tornar supersaturada
- há, então, a precipitação em forma de cristais. Esses cristais correspondem ao que se chama núcleo de cristalização
- com a precipitação, a água fica com capacidade para dissolver mais hemi-hidratado
- forma-se então mais gipsita, preponderantemente nas vizinhanças dos núcleos de cristalização. Há nova precipitação, e esse ciclo se repete, continuamente, até processar todo o hemi-hidratado presente.

A quantidade de água teórica necessária para transformar o hemi-hidratado em di-hidratado pode ser calculada a partir das massas atômicas, Tabela 2.2 como segue. Considerando-se os valores arredondados das massas atômicas tem-se:

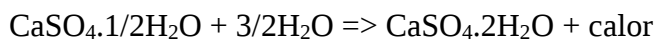
Tabela 2.2 - Massas atômicas dos elementos que compõem o gesso

Elemento	Massa atômica arredondada
Ca	40
S	32
O	16
H	1

Fonte: Organizado pelo AUTOR, (2021)

Então:

$$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} \\ 40 + 32 + 4 \times 16 + 1/2 \times (1 \times 2 + 16) = 136 + 9 = 145$$



$$145 + 3/2(2 \times 1 + 16) = 145 + 27 = 172$$

$$\% \text{ água a adicionar} = 27/145 = 18,62\%$$

Em relação à massa de gesso hemi-hidratado, a hidratação completa precisa de 18,62% de água, ou seja, uma relação água/gesso (a/g) = 0,1862 = 0,19. Como no concreto, essa água não dá trabalhabilidade. Então, nas indústrias se usa valores bem superiores, com a/g = 0,60 a 0,80 ou 0,90.

A maior parte dessa água posta em excesso evapora e deixa poros. Então, quanto maior quantidade de água, maior porosidade e por consequência, menor resistência.

2.5. PROPRIEDADES DA PASTA DE GESSO NO ESTADO FRESCO

Durante a hidratação da pasta de gesso são, geralmente, observadas características de trabalhabilidade, tempos de pega e variação dimensional das pastas (PINHEIRO, 2011).

2.5.1. TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade de uma pasta é definida como a maior ou menor facilidade do material de ser empregado para uma determinada finalidade, sem perder a sua

homogeneidade. É medida pela consistência da pasta, ou seja, pelo grau de umidade necessário para garantir uma determinada plasticidade ao material. Essa consistência é denominada “consistência normal”.

A plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, sendo que a avaliação dessas propriedades em alguns métodos de ensaio ocorre em simultâneo. A plasticidade é influenciada pelo teor de ar, pela natureza do aglomerante e pela intensidade de mistura das argamassas (CINCOTTO et al, 1995). Já a consistência é a propriedade pela qual a pasta tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco (CINCOTTO et al, 1995).

Nas pastas de gesso, a trabalhabilidade depende de dois fatores: a consistência e os tempos de pega, que devem ser adequados à finalidade de seu uso. O tempo de pega deve garantir o manuseio do material, antes que se inicie o processo de endurecimento, e a consistência deve garantir a moldagem e a coesão do material.

A consistência normal de uma pasta de gesso é determinada por ensaios normatizados, que utilizam o equipamento de Vicat modificado. No Brasil, o ensaio é normatizado pela ABNT NBR 12128:2019, e o valor da consistência normal é expresso em massa de água por massa de gesso.

A consistência da pasta também pode ser obtida por meio do ensaio do minislump, método de determinação do abatimento da pasta desenvolvido por Kantro (1980) e adotado em diversos estudos nacionais e internacionais da consistência de pasta de gesso com alta fluidez.

Segundo YE et al. (2011), a água requerida para manter a fluidez da pasta de gesso é função da distribuição do tamanho das partículas em pó e varia de acordo com o diâmetro característico da partícula (finura) e do coeficiente de uniformidade (tamanho de sua distribuição) do material.

Na pasta fresca, a capacidade de retenção de água pelos cristais de gesso está diretamente relacionada com a superfície específica dos grãos do aglomerante e de sua finura. Quanto mais finos são os cristais, maior a área específica e maior a retenção de água.

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar aprisionado na pasta. Este influencia na densidade de massa das pastas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, pois o ar possui densidade menor que a pasta e ocupa uma fração da sua massa.

2.5.2. TEMPO DE INÍCIO E DE FIM DE PEGA

O tempo de início de pega é o tempo decorrido a partir do momento em que o gesso entrou em contato com a água, até o instante em que a agulha do aparelho de Vicat não penetrar mais no fundo da pasta, isto é, aproximadamente 1mm acima da base.

O tempo de fim de pega é o tempo decorrido a partir do momento em que o gesso entrou em contato com a água, até o instante em que a agulha do aparelho de Vicat não mais deixar impressão na superfície da pasta.

Durante a pega, o material vai reduzindo o volume de água, pois ela vai se combinando com o material hemi-hidratado, formando cristais hidratados, com volume superior ao volume de sólidos originais, adquirindo a forma de um sólido contínuo, passando da menor a maior resistência.

Nas pastas de gesso, o início da pega depende essencialmente dos constituintes de reações mais rápidas (hemi-hidratos), e o endurecimento dos constituintes de reações mais lentas (anidritas II), cuja hidratação proporciona o preenchimento dos vazios entre os cristais hidratados dos hemi-hidratos. O preenchimento desses vazios evita a retração por secagem e a fissuração do material. Em condições normais, a pega do gesso se encerra em até duas horas, quando a maior parte das reações de hidratação do material foi processada. Entretanto, o material continua adquirindo resistência até 20 horas, devido ao prosseguimento das reações de hidratação. A partir desse momento o ganho de resistência do material ocorre devido à secagem, por evaporação, da água de amassamento do material.

Na mistura ocorre retração de volume que se prolonga até o início da pega. Depois a pasta passa a sofrer expansão intensa no início da pega, que diminui gradualmente até o final da pega e se encerra após um ou dois dias, quando a massa de gesso já alcançou a temperatura ambiente.

A pega e o endurecimento das pastas de gesso dependem de alguns fatores, como a presença de impurezas, a fração de seus constituintes, a finura e a forma dos grãos, a relação água/gesso, a temperatura da água de amassamento, a velocidade e o tempo de mistura e a presença de aditivos (KARNI e KARNI, 1995).

2.5.3. VARIAÇÃO DIMENSIONAL NA PASTA DE GESSO

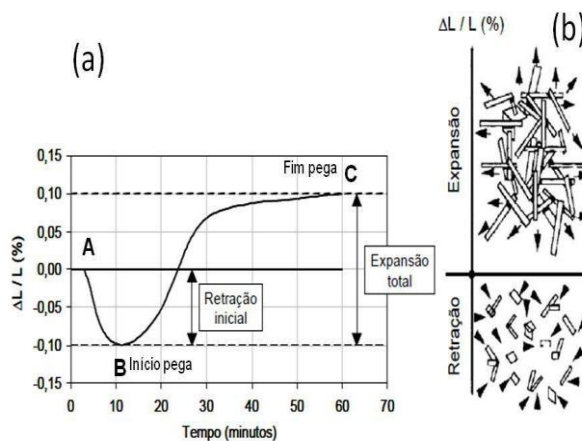
As pastas de gesso apresentam, durante sua hidratação, diferentes variações de volume, em função dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem no processo de hidratação dos hemi-hidratos.

Inicialmente, ocorre uma retração de volume que se prolonga até o início da pega. A seguir, a pasta de gesso sofre uma expansão intensa, que vai diminuindo gradualmente até o final da pega e se encerra após um ou dois dias, quando a massa de gesso já alcançou a temperatura ambiente. Isso sugere que o fenômeno retração/expansão do gesso não é causado pelo aumento de temperatura durante a hidratação do material (KARNI e KARNI, 1995).

Segundo Gmouh et al. (2004), o fenômeno retração/expansão do gesso pode ser representado de forma esquemática, conforme ilustrado pela Figura 2.3.

A retração do volume da pasta ocorre no domínio entre os pontos A e B (Figura 2.4 a), onde o volume de di-hidratos formado é menor que o volume de hemi-hidratos e água anteriormente presente. No domínio entre os pontos B e C, ocorre a formação dos cristais de di-hidratos que vão se ligando, compondo arranjos geométricos em constante crescimento, com formação de poros que resulta em um sólido com maior volume, ocasionando a expansão do material (GMOUH et al., 2004). A expansão termina quando o material se torna rígido (KARNI e KARNI, 1995).

Figura 2.3 - Ilustração esquemática do fenômeno da retração/expansão da pasta de gesso



Fonte: GMOUH et al., (2004).

A retração/expansão das pastas de gesso varia de acordo com o tipo de gesso utilizado, podendo apresentar valores de expansão linear em torno de 1%, para gesso de alta expansibilidade, e valores de 0,1% para gesso de baixa expansibilidade. Esses valores podem representar um aumento de volume de até 3% (KARNI e KARNI, 1995).

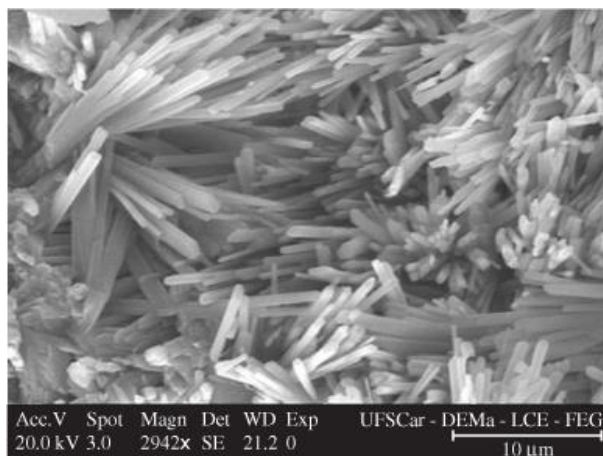
Segundo Karni e Karni (1995), a magnitude da expansão do gesso é influenciada por alguns fatores como: a finura do gesso - materiais mais finos possuem maior expansão; a relação água/gesso – quanto maior a relação água/gesso da pasta, menor a expansão; a utilização de aditivos – diminui a expansão durante a pega e a presença de inertes - como areia e argila, que também reduzem a expansão do material.

2.6. MICROESTRUTURA DO GESSO NO ESTADO ENDURECIDO

A microestrutura da pasta de gesso endurecida é constituída por um sólido de alta porosidade e grande área superficial interna, formada pelo entrelaçamento de cristais em formas de agulhas ou placas (LEWRY e WILLIAMSON, 1994 b).

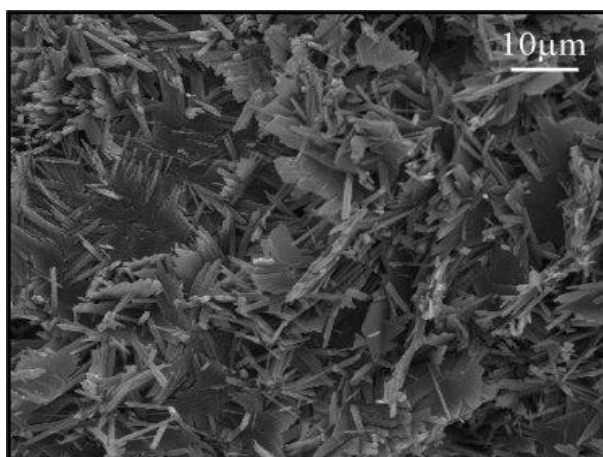
Na Figura 2.4 tem-se uma amostra em que os cristais são majoritariamente na forma de agulhas. Já na Figura 2.5, vê-se uma microfotografia do gesso com relação a/g = 0,8 onde se nota a presença de cristais na forma de placas.

Figura 2.4 - Cristais de gesso em forma de agulhas



Fonte: CARVALHO et al., (2008).

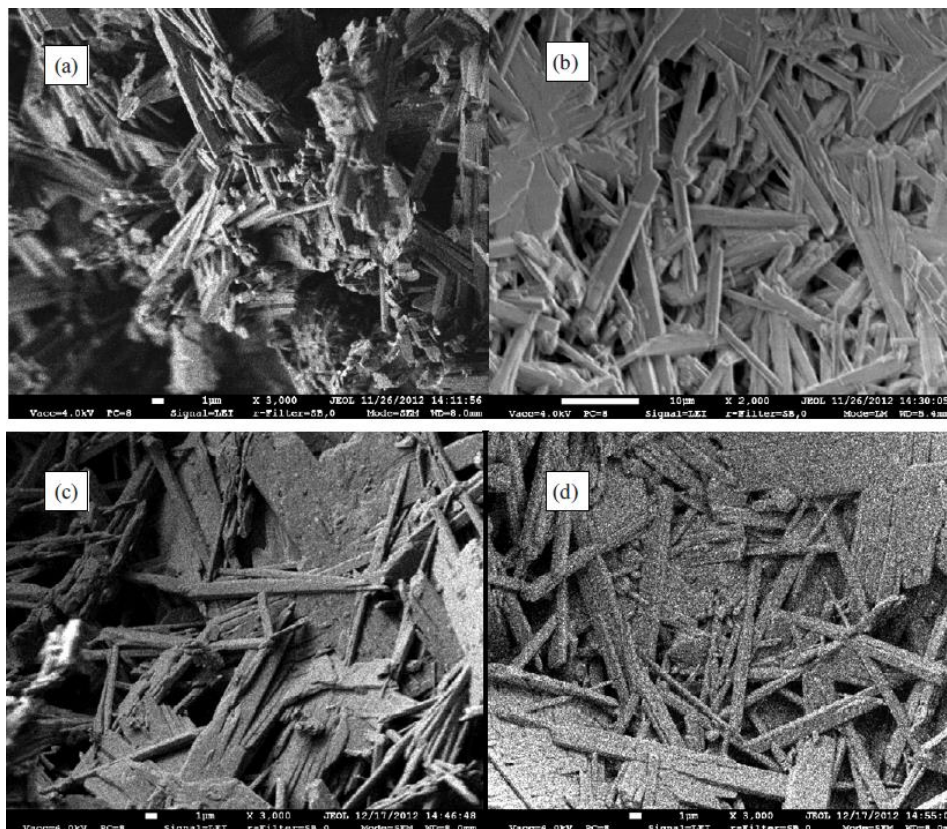
Figura 2.5 - Cristais de gesso em forma de placas



Fonte: HAMOUDA et al., (2006)

A micro-estrutura do gesso pode ser afetada por muitos fatores, como relação água/gesso, presença de aditivos, presença de outros materiais como fibras ou agregados. Na Figura 2.6 vê-se a diferenciação morfológica que pode ocorrer no material.

Figura 2.6 - Microestrutura de matriz de gesso (a) - puro (b) - com nanotubos de carbono, (c) - com pó metalúrgico; (d) - com pó metalúrgico e nanotubos de carbono

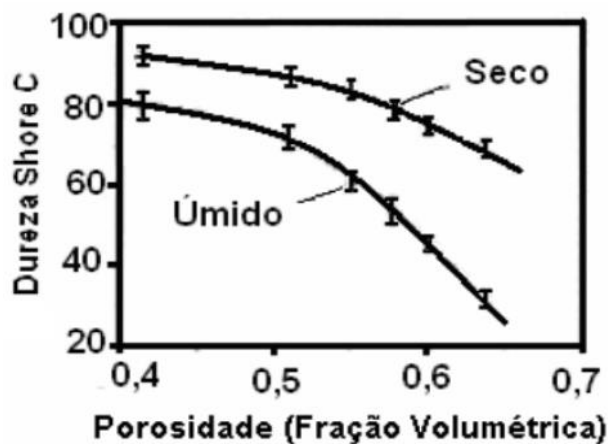


Fonte: ANASTASIIA et al., (2013)

2.6.1 EFEITO DA RELAÇÃO ÁGUA/GESSO (A/G) NA MICROESTRUTURA DO GESSO NO ESTADO ENDURECIDO

Similarmente ao concreto, a relação água/gesso afeta as propriedades mecânicas (resistência à compressão, flexão e dureza.) do dihidrato produzido. Esse fato está relacionado com o aumento da porosidade do material produzido em função do volume de água empregado no preparo da pasta. Os poros são resultantes da evaporação da água durante a secagem, resultando em vazios na estrutura do corpo. Logo, quanto maior a quantidade de água no preparo da pasta de gesso maior será a quantidade de poros formados, o que implica na redução da uniformidade do material e consequente alteração das suas propriedades mecânicas. O aumento da porosidade na estrutura do corpo produzido a partir da pasta de gesso acaba afetando o volume específico do mesmo. A Figura 2.7 apresenta a relação entre a dureza Shore C e a porosidade. Vê-se que a dureza com o material úmido é inferior à do material seco. O mesmo ocorre com as resistências mecânicas.

Figura 2.7 - Dureza do gesso - β (úmido e seco) em função da porosidade



Fonte: COQUARD e BOISTELLE, (1994).

2.6.2 EFEITO DOS ADITIVOS E ADIÇÕES NA MICROESTRUTURA DO GESSO NO ESTADO ENDURECIDO

O uso de aditivos e adições nas pastas de gesso modificam a morfologia e a forma do crescimento dos cristais de gipsita, resultando em mudanças na forma e no tipo de entrelaçamento dos cristais, na porosidade capilar e na resistência do material (SINGH e MIDDENDORF, 2007).

A Figura 2.8 mostra as modificações microestruturais em pastas de gesso produzidas com adição de gipsita e aditivo acelerador de pega (K_2SO_4), que resultaram na formação de uma microestrutura com reduzido grau de entrelaçamento entre os cristais e, conseqüentemente, com resistências mecânicas mais baixas (LEWRY e WILLIAMSON, 1994c).

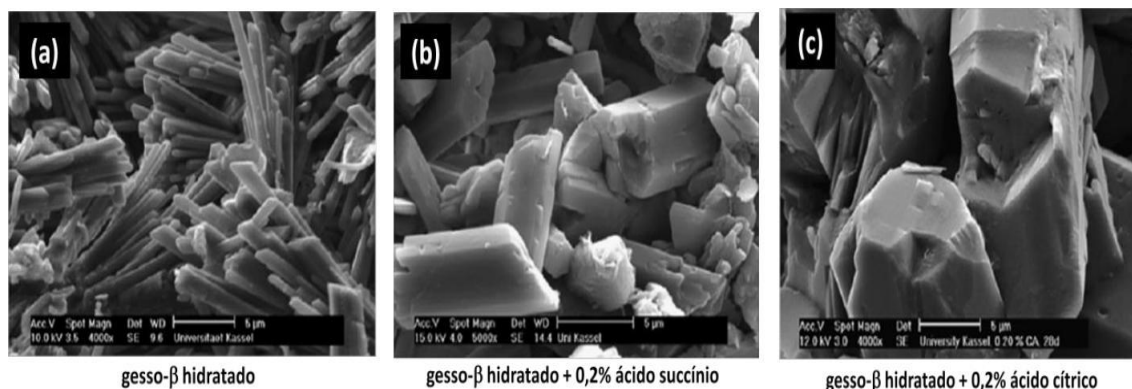
Figura 2.8 - Morfologias da microestrutura das pastas de gesso com uso de aceleradores de pega: (a) referência; (b) adição de gipsita e (c) aditivo K_2SO_4



Fonte: LEWRY e WILLIAMSON, (1994c)

Singh e Middendorf (2007) estudaram a mudança na morfologia dos cristais das pastas de gesso com uso de aditivos retardadores de pega, que apresentaram, também, um reduzido grau de entrelaçamento, resultando no decréscimo da resistência do material quando comparado com a pasta de referência, Figura 2.9.

Figura 2.9 - Morfologias da microestrutura das pastas de gesso com uso de retardadores de pega: (a) referência; (b) ácido succínio ($C_4H_6O_4$) e (c) ácido cítrico ($C_6H_8O_7$)

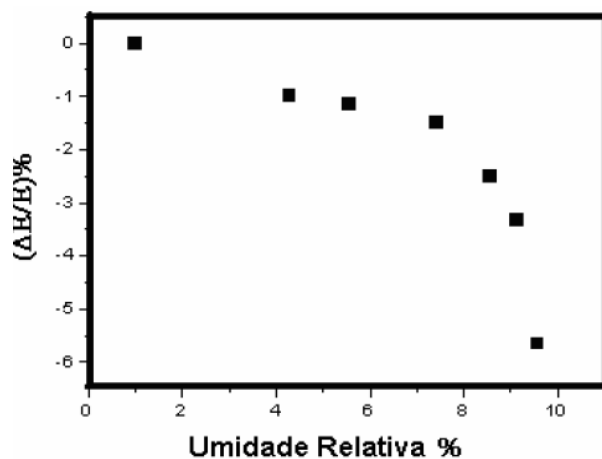


Fonte: SINGH e MIDDENDORF, (2007).

2.6.3 EFEITO DA UMIDADE NA MICROESTRUTURA DO GESSO NO ESTADO ENDURECIDO

Em presença de umidade o gesso sofre um decréscimo na rigidez. Segundo Badens et al (1999), o Módulo de Elasticidade tem uma relação direta com a umidade relativa, Figura 2.10. O decréscimo do Módulo de Elasticidade (E) a altos níveis de umidade é devido a uma fina camada de água nos contornos de grãos que permite o movimento relativo entre os cristais diante de um estímulo externo, reduzindo assim sua rigidez.

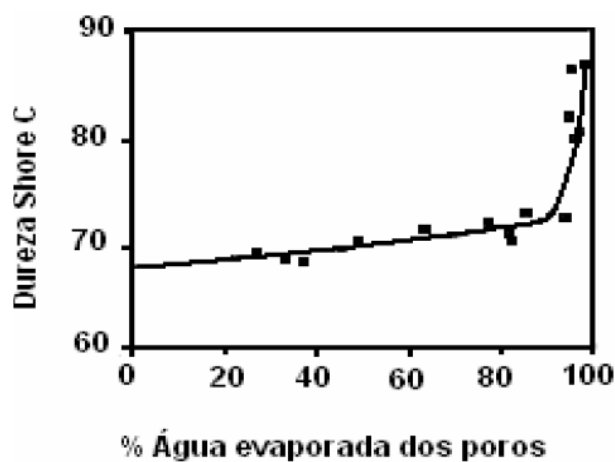
Figura 2.10 - Decréscimo do módulo de elasticidade em função da umidade relativa, para amostras de gesso com 57% de porosidade



Fonte: BADENS et al., (1999)

O efeito da água e de diferentes solventes na dureza do gesso foi estudado também por Coquard e Boistelle (1991), mostrando a redução das resistências mecânicas de tensão de compressão e dureza em função do aumento de líquido. Segundo Coquard et al (1994) a resistência mecânica do gesso se deve as ligações entre os cristais que estão em contato. A presença de água e de outros solventes polares infiltrados entre os cristais enfraquece essas ligações reduzindo a resistência mecânica do gesso. Com a evaporação do líquido as ligações químicas são reestabelecidas e o gesso retoma sua resistência mecânica, Figura 2.11.

Figura 2.11 - Evolução da dureza do gesso (com 52% de porosidade em volume) em função da porcentagem de água evaporada dos poros



Fonte: COQUARD et al., (1994)

2.7. PROPRIEDADES DA PASTA DE GESSO NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades físicas e mecânicas do gesso, no estado endurecido, são influenciadas diretamente pela formação de sua microestrutura, discutidas no item anterior, em particular, pela porosidade e pela forma de entrelaçamento dos cristais além de uma série de outros fatores que serão discutidos na sequência (MIKHAIL e MALEK, 1971 apud LEWRY e WILLIAMSON, 1994 b).

2.7.1 DUREZA SUPERFICIAL

A dureza é uma propriedade do material que permite qualificá-lo em diversos aspectos quanto à sua resistência, trabalhabilidade e durabilidade. É caracterizada como a resistência que os corpos possuem de serem riscados (BAUER, 2012).

Na ABNT NBR 13207:2017 são estabelecidos valores maiores que 30 N mm⁻² para a dureza superficial.

Com relação a dureza Shore um durômetro mede a resistência, tomada como a medida da dureza, à penetração de um pino pressionado contra a superfície rígida pela ação de uma mola sob carga padronizada. Um ponteiro move-se através de uma escala para mostrar a resistência à penetração, as escalas no Durômetro Shore variam de 0 a 100, Figura 2.12.

Figura 2.12 - Ensaio de dureza utilizando o durômetro Shore C



Fonte: Autor, (2021)

2.7.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para Bauer (2012) a resistência à compressão é um dos indicadores da resistência mecânica e representa a capacidade que um determinado corpo tem para resistir aos esforços de compressão. Ela é importante quando o gesso é empregado para a fabricação de blocos de paredes divisórias. As pastas de gesso endurecidas podem atingir resistências à compressão entre 5 e 15 MPa (SAVI, 2012). Ela é muito influenciada, de forma inversa, pela relação água/gesso.

A resistência à compressão é medida em cubos com 5 cm de aresta, Figura 2.13. Ao contrário do concreto, que tem uma idade fixa (em geral 28 dias) como referência, no gesso usa-se o critério da constância de massa. De fato, espera-se a água de amassamento sair do material endurecido para se medir a resistência.

Figura 2.13 - Ensaio de Resistencia a Compressão



Fonte: Autor, (2021)

2.7.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os ensaios de resistência à flexão, com aplicação de carga de ruptura no centro de corpos de prova prismáticos, apoiados nas extremidades, Figura 2.14 são realizados em conformidade com a ABNT NBR 12142:2010, na qual é descrito o método para executar o ensaio, porém não apresenta valores mínimos de resistência a serem alcançados.

Figura 2.14 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor, (2021)

A resistência à tração na flexão é importante principalmente para placas de gesso, cuja solicitação principal é a flexão. Os gessos nacionais, apresentam resistência à tração na flexão que variaram de 4,40 a 10,50 MPa.

2.8. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS PARA UTILIZAÇÃO DO GESSO NA CONSTRUÇÃO

Os gessos nacionais normatizados têm suas características químicas e propriedades físicas e mecânicas especificadas pela ABNT NBR 13207:2017, Tabelas 2.3 a 2.5 e métodos de ensaios determinados pela ABNT NBR 12127:2019, ABNT NBR 12128:2019, ABNT NBR 12129:2019 e ABNT NBR 12130:2017.

As características físicas e mecânicas do gesso exigidas pela ABNT NBR 13207:2017, são a resistência à compressão axial, a dureza superficial e a massa unitária. Os limites propostos para a resistência à compressão axial e a dureza consideram a relação água/gesso (a/g) necessária aquela obtida para uma pasta de consistência normal. E, a Norma estabelece os mesmos limites para todos os tipos de gesso.

Tabela 2.3 - Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção

Determinação física e mecânica	Unidade	Limites	Normas	
Resistencia à compressão	Mpa	> 8,4	ABNT 12129:2017	NBR
	Mpa		ABNT 12129:2017	NBR
Dureza		> 30,00	ABNT 12129:2017	
Massa unitária	kg/m ³	>700,00	ABNT 12129:2017	NBR

Fonte: ABNT NBR 12129:2017

A distinção entre os gessos para fundição e os gessos para revestimento é determinada por meio do tempo de pega e pelo módulo de finura. Os limites para tempo de pega consideram a relação água/gesso necessária à obtenção de uma pasta de consistência normal.

Tabela 2.4 - Exigências físicas do gesso para construção

Classificação do gesso	Tempo de pega (min)		
	NBR 13207:2017	Gesso para construção civil - Requisitos	
	Início	Fim	
Gesso fino para fundição	4-10	20-45	< 1,10
Gesso grosso para fundição	4-10	20-45	>1,10
Gesso fino para revestimento	>10	> 45	<1,10
Gesso grosso para revestimento	>10	> 45	>1,10

Fonte: ABNT NBR 13207:2017

As exigências químicas, Tabela 2.5 fazem referência aos teores de água livre, à água de cristalização, ao óxido de cálcio e ao anidrido sulfúrico, considerados iguais para todos os tipos de gesso. Não há nenhuma referência aos teores de impurezas e aos percentuais das frações de hemi-hidrato e anidrita.

Tabela 2.5 - Exigências químicas do gesso para construção

Determinação químicas	Limites (%)	Normas
Água Livre	Máx 1,3	ABNT NBR 12130:2017
Água de cristalização	4,2 a 6,2	ABNT NBR 12130:2017
Oxido de cálcio (CaO)	min 38,0	ABNT NBR 12130:2017
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	Min 53,0	ABNT NBR 12130:2017

Fonte: ABNT NBR 13207:2017

2.9. RESIDUO DO GESSO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

No Brasil, segundo o DNPM (2010) o valor aproximado de gesso consumido per capita anualmente é de 18 kg. para a produção de hemi-hidrato, na região do Araripe, são consumidos mais de 29000 MWh por mês. Cerca de 95% dessa energia consumida na produção do gesso é utilizada na etapa da calcinação do material. Para a calcinação do hemi-hidrato, diferentes fontes de energia térmica podem ser aplicadas, sendo elas: eletricidade, diesel, BPF, coque, óleo residual e lenha.

Cardoso et al. (2009), estimam que a perda de gesso na construção civil, no Brasil, é da ordem de 30%, gerando grandes volumes de resíduos. Segundo Munhoz e Renóbio (2006), estima-se que 8% do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção, assim como também 4% são perdidos na fabricação de pré-moldados. Já em relação ao gesso aplicado como revestimento, a geração de resíduos é bem maior, estando em torno de 88%. Segundo Nita et al. (2004), cerca de 45% de todo o gesso utilizado para esse fim, se torna desperdício. Já Alves et al. (2006) informam que o desperdício chega a 24%. Um dos fatores que contribuem para essa grande perda é o rápido endurecimento da pasta de gesso, que limita o tempo de aplicação entre 20 e 40 minutos, no máximo, (MAEDA e SOUZA, 2000).

Para reduzir a geração de resíduos no processo de revestimento, seria necessário aumentar o tempo útil das pastas de gesso, propiciar um treinamento melhor à mão-de-obra e também melhorar a quantidade da alvenaria que será revestida (MUNHOZ e RENOFIO, 2007).

Segundo, Ribeiro (2006), apud Pinheiro, (2011) o volume estimado gerado de resíduos de gesso por atividade, por natureza e seus referidos impactos ambientais são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Geração de resíduos na aplicação do material e de componentes de gesso durante as atividades de construção no Brasil

Aspectos	Atividades		
Volume gerado	revestimento	C* D**	30% a 40% ausência de dados
	chapas de gesso acartonado	C* D**	12% ausência de dados
	alvenaria blocos	C* D**	5% ausência de dados
	forro de placas de gesso	C* D**	ausência de dados ausência de dados
	elementos decorativos	C* D**	ausência de dados ausência de dados
	pasta de gesso hidratada peças danificadas		
Natureza			
Impactos ambientais	contaminação do solo contaminação de lençol freático degradação ambiental		

Fonte: PINHEIRO, (2011)

Segundo Kijjanapanich et al. (2013), isso ocorre porque o gesso, quando não é manejado adequadamente, ao entrar em contato com umidade em condições anaeróbicas, com baixo pH, e sob ação de bactérias redutoras de sulfatos, condições presentes em muitos aterros sanitários e lixões, pode formar gás sulfídrico (H_2S) que possui odor característico de ovo podre, e contribui para o efeito estufa, sendo tóxico e inflamável, vindo a contaminar o solo e o lençol freático quando não drenado. Além de provocar danos causados pelos gases emitidos em aterros de resíduos sólidos à saúde humana, pode-se formar ácido sulfúrico que é um ácido forte com alto poder corrosivo.

È por esta razão que o gesso vem sendo banido de vários aterros sanitários nos Estados Unidos, principalmente quando se trata de gesso acartonado, material que tem uma composição bem mais complexa do que o gesso comum. O gesso acartonado, é predominante composto de gesso natural hidratado (gipsita), papel (em torno de 4 a 12%), fibras de vidro, vermiculita, argilas (até 8%), amido, potassa (KOH), agentes espumantes (sabões), dispersantes e hidro-repelentes nas placas resistentes à água. É sabido que em algumas jazidas de vermiculita podem conter amianto (ADDISON, 1995). Este autor também registra a presença de metais pesados. A presença de boro é a que mais preocupa, por se tratar de um elemento tóxico.

Devido ao seu poder contaminante em relação aos demais resíduos gerados nas obras, os resíduos de gesso deverão ser devidamente separados na fonte, acondicionados em caçambas específicas e posteriormente encaminhados para aterros de inertes ou

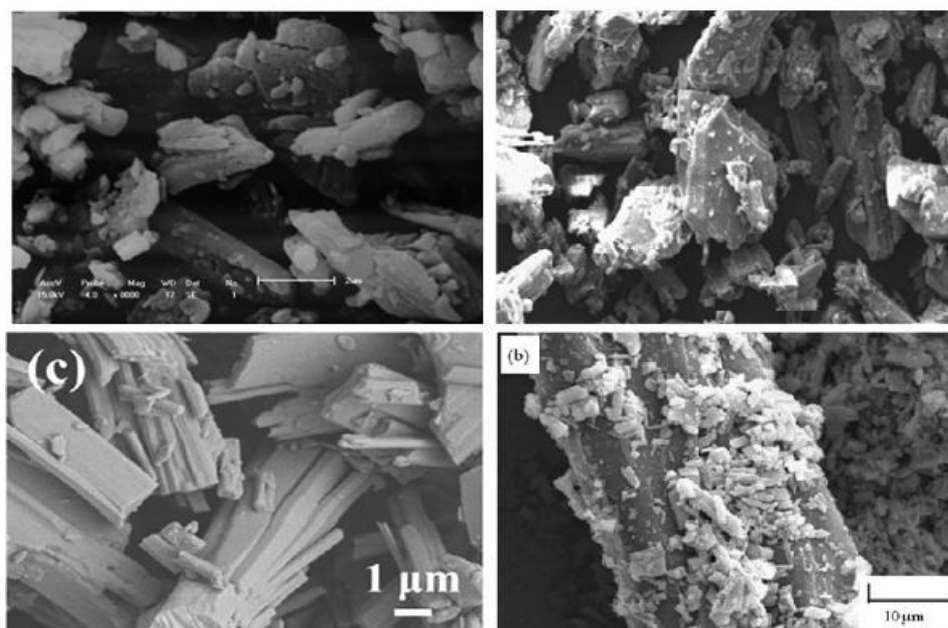
reutilizados alternativamente, sendo reincorporado como matéria prima para produção de gesso ou na agricultura.

Sendo assim, levando-se em consideração a crescente preocupação com a geração e disposição adequada dos resíduos de gesso, bem como os enormes gastos e impactos ambientais ocasionados quando se dispõe este material de forma inadequada, fica clara a necessidade da reutilização deste resíduo em atividades rentáveis, como por exemplo, reincorporando-o como matéria prima para produção de gesso reciclado ou na agricultura como corretivo de solos salino-sódicos ou sódicos, o que seria benéfico diante de vários parâmetros.

Pelo parâmetro da economia, a reciclagem do gesso se torna importante pela possibilidade de reintroduzir no mercado um produto cuja matéria prima é fruto de descarte, com custo reduzido em relação às despesas de logística e reprocessamento. Após a reciclagem pode-se obter um produto com características idênticas ao original, sem os custos de transporte e beneficiamento.

Os cristais de di-hidrato do resíduo de gesso, devido às condições em que foram hidratados, podem apresentar morfologias diferenciadas da gipsita natural, o que pode ser contemplado na Figura 2.15, (KOJIMA e YASUE, 2016) APUD (ERBS, 2016).

Figura 2.15 - Fotomicrografia do gesso reciclado no microscópio eletrônico de varredura



Fonte: a) ZUHAIMI *et al.* (2015); b) SAVI *et al.* (2012); c) ZHOU *et al.* (2015); d) GMOUH *et al.* (2003) apud, (ERBS, 2016)

2.10. COMPÓSITOS À BASE DE GESSO

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas nos últimos anos com utilização do gesso como matriz para a produção de compósitos incorporando materiais fibrosos ou particulados. A inclusão desses materiais na matriz frágil de gesso endurecido pode trazer como resultado uma melhoria das suas propriedades mecânicas, resistência ao impacto e à tração na flexão, modificando a ruptura frágil do gesso em uma ruptura quase plástica.

Como a matriz de gesso não se constitui em meio alcalino, diferentemente do cimento e da cal, diversas são as possibilidades de utilização de fibras têxteis como reforço. Dentre os materiais fibrosos utilizados podem ser citadas as fibras de vidro, de sisal, de algodão, de coco e juta entre outras. Quanto aos materiais particulados experimentos foram realizados com madeira, poliestireno expandido triturado, pó da fibra de coco, vermiculita e resíduos de etileno acetato de vinila (EVA). Na Tabela 2.7 são apresentados os principais materiais utilizados como reforço em uma matriz base de gesso para a produção de compósitos.

Tabela 2.7 - Materiais utilizados no estudo de compósitos à base de gesso

Materiais fibrosos	• vidro • sisal • celulose • algodão
Materiais particulados	• madeira • cortiça • vermiculita • resíduos industriais

Fonte: OLIVEIRA, (2009)

Silva (2010) analisou matriz de gesso com adição de 1% e 5% de pó de coco como carga para análise mecânica com diâmetro de 0,210 mm e 0,149 mm. Houve um aumento da temperatura inicial de decomposição do gesso comercial e do dihidrato com a adição. O melhor resultado de resistência a compressão ($6,12 \pm 0,44$ MPa) foi do compósito com 1% de pó de coco em granulometria maior em relação à resistência da amostra de

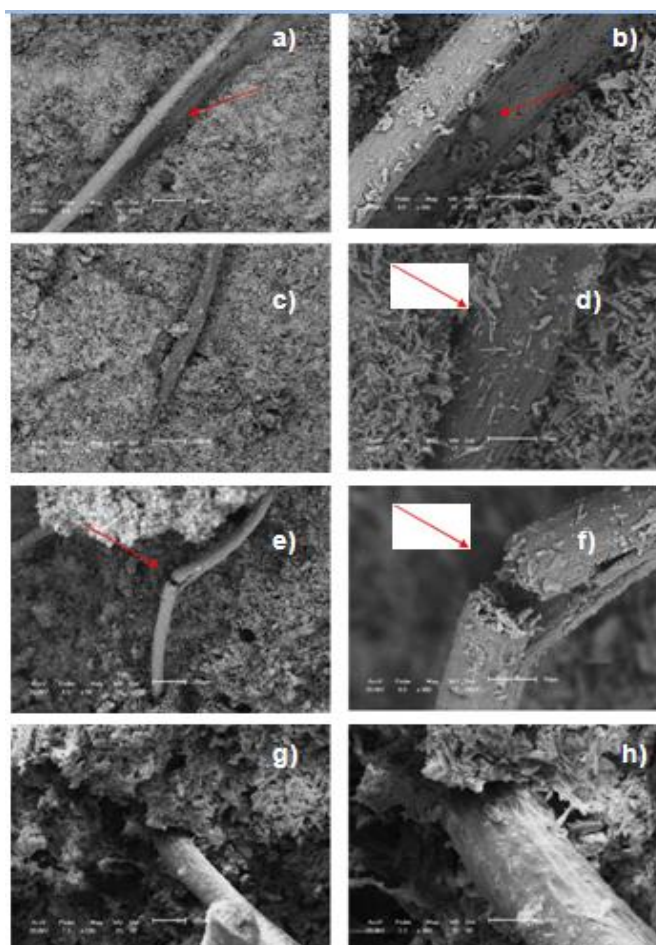
referência (5,30 MPa), enquanto o melhor desempenho à resistência à flexão ($1,27 \pm 0,17$ MPa) ocorreu com a adição de 5% e maior granulometria e módulo elástico de $0,37 \pm 0,12$ MPa. Em geral a adição da fibra gerou aumento do módulo de elasticidade e resistência à flexão em relação à referência. As análises estruturais indicam que o coco não altera a estrutura cristalina do gesso comercial e dihidrato. A adição de fibra em matriz frágil de gesso tem contribuição no desenvolvimento de materiais com maior deformação antes do colapso. A variação no teor adicionado gera comportamentos variados do material compósito e modifica suas propriedades, entretanto os torna menos frágeis que os observados em amostras de matriz referência.

Nesse mesmo trabalho conforme Figura 2.16, observa-se a presença das microfibras em todas as composições, podendo ser observado cristais de gesso nas superfícies das fibras. As Figuras 2.16 (a) e (b) mostra o arrancamento de uma fibra da superfície matriz, nota-se que os cristais de gesso continuam agregados no local da interface com a fibra mesmo após o arrancamento.

Nas Figuras 2.16, (e) e (f) é possível observar que a fibra fraturou, o que indica uma transferência de esforços da matriz para fibra, podendo evidenciar uma boa aderência na interface fibra matriz.

Compósito à base de gesso reforçado com fibras de vidro tipo E foi utilizado para desenvolvimento de painéis para utilização em vedações verticais internas de edificações (OLIVEIRA, et al., 1996). Os resultados demonstraram a viabilidade técnica dos compósitos para o uso pretendido tendo os mesmos apresentados, propriedades superiores à do gesso. O desempenho deste tipo de painel é satisfatório e tem custos compatíveis com a alvenaria de blocos quando computadas as despesas de revestimento, limpeza de entulho e demora dos serviços.

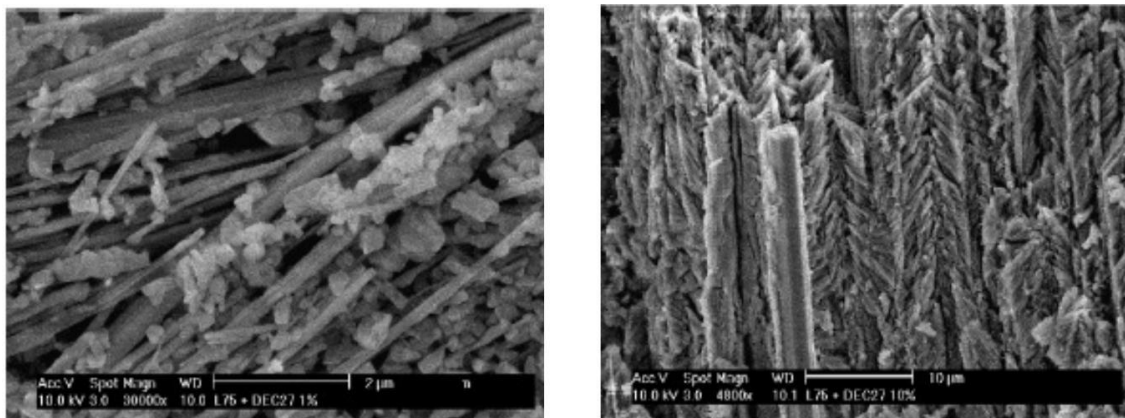
Figura 2.16 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura dos corpos de prova com composição: (a) G1/100, aumento de 50X; (b) G1/100, aumento de 200X; (c) G1/65, aumento de 50 X; (d)G1/65 aumento de 300 X(e)G5/100, aumento de 50X; (f) G5/100, aumento de 300X; (g) G5/65 aumento de 50X; (h) G5/65, aumento de 300X



Fonte: SILVA, (2010)

A incorporação do látex no gesso após a hidratação resulta na modificação da rede de poros interferindo na sua hidratação, interrompe sua decomposição e dificulta a cristalização. Além disso, o aumento do teor de látex reduz a porosidade devido ao preenchimento dos vazios entre os cristais de gesso com pequenas unidades, onde seus grãos são revestidos com polímero látex dificultando a hidratação do gesso o que contribui para a melhor compactação das misturas. As Figuras 2.17 (a) e (b) ilustram a microestrutura do gesso com adição de látex (EVE *et al.*, 2007).

Figura 2.17 - Microscopias de compósitos de gesso (a) com 1% e (b) 10% de látex, respectivamente



Fonte: EVE et al, (2007)

Trabalhos relativamente recentes sobre gesso como material cimentício que têm aparecido na literatura internacional em geral são relativos à incorporação de materiais lignocelulósicos, como os já citados, para melhorar propriedades térmicas, de fibras diversas e de outros produtos como aditivos e adições, com tentativa de reduzir a suscetibilidade das matrizes de gesso à água ou aumentar sua resistência mecânica (M. Singh, G. Mridul 1992); H.E. Mark (1998); M. Singh, M. Garg (1996); G. Li, J. Li, R. Guan (2003); G. Li, Y. Yu 2003); J. Li, G. Li, Y. Yu (2007); A.A. Khalilet al (2010); Ana Magalhães, Jaime Almeida (2010) J.Q. Li et al (2011); G.N. Pervyshin (2017); Thaísa Mariana Santiago Rocha et al (2019).

Pouquíssimos trabalhos tratam de usar o gesso como matriz em argamassa. Normalmente o gesso é aplicado puro nos revestimentos. Nenhum artigo foi encontrado buscando usar gesso como matriz e pó de pedra como agregado, com o fim de se fabricar blocos estruturais.

Um dos poucos artigos sobre o gesso incorporando agregado miúdo pétreo foi o de Jitka Krejsobá et al (2018). Nele foi usado um gesso da República Tcheca cuja composição química detecta que ele é constituído de 85,6 % de sulfato de cálcio hemi-hidratado, quase 4 % de anidrita e quase 11 % de impurezas. Procurou-se verificar a influência da forma e tamanho de quatro agregados em argamassa de gesso. Todo ele tinha dimensão menor que 2 mm. Foi usada uma relação gesso:agregado 1:2 e a relação água/gesso de 0,53. Na referência, só pasta de gesso, usou-se a/g = 0,45. No caso foi empregado como retardador de pega 0,03% de ácido cítrico. Os autores concluem que a

influência das partículas dos agregados nas argamassas de gesso é similar à influência dos agregados em argamassas de cimento e que a presença do agregado não prejudica significativamente as propriedades do gesso. A resistência à compressão variou com o tipo de agregado, entre 13,4 MPa e 22,2 MPa, ao passo que a da referência chegou a 17,6 MPa.

Outra publicação em que aparece areia em matriz de gesso é apresentado por A.A. Khalil et al (2018). A intenção dos autores é aumentar a resistência à compressão e a resistência em relação a água do gesso endurecido. Então usaram materiais como sílica ativa, sílica gel, casca de arroz, carbonato de cálcio e outros, além de areia fina ($d < 0,090$ mm) e muito fina ($d < 0,075$ mm), estas na proporção de 5% em massa. Os resultados mostraram que a incorporação de areia aumentou a resistência de 13, 5 MPa para 13, 9 MPa (areia fina) e para 14,8 MPa (areia muito fina). Os demais materiais também surtiram efeito. Em todos os casos, a resistência à água também foi melhorada.

Nada foi encontrado relativo ao uso do pó de pedra no gesso.

2.11. EDIFICAÇÕES DE BLOCOS DE GESSO

Na região do Pólo Gesseiro de Araripina já se constrói casas e outras edificações com blocos de gesso, inclusive nas paredes externas, como se vê na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Casas de gesso na região do polo gesseiro do Araripe, PE



Fonte: RODRIGUES, (2008)

No entanto, vários aspectos que podem comprometer a durabilidade e a sustentabilidade dessas construções são a seguir apresentados.

Note-se que o bloco está diretamente assente a nível do piso Figura 2.19, e isso é um inconveniente, pois pode haver contato com água. Embora se recomende o uso de

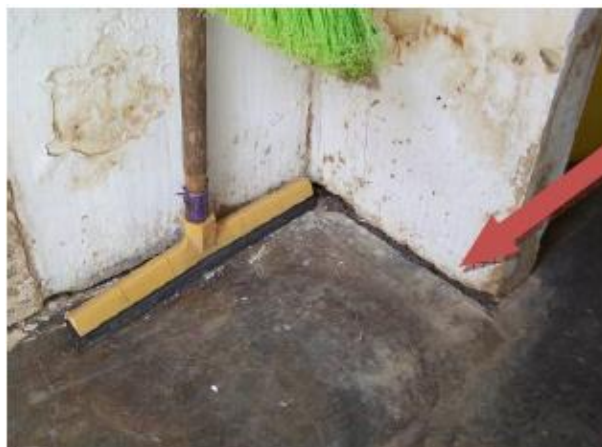
blocos hidrofugados na primeira fiada, a durabilidade fica comprometida, como se vê na Figura 2.20. Quando se lava o ambiente, vai-se estragando a base da parede, a umidade ascendente provoca o aparecimento de manchas que prejudicam seu aspecto estético.

Figura 2.19 - Processo construtivo inadequado: bloco em contato direto com o piso



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Figura 2.20 - Desgaste do bloco de gesso devido ao contato direto com a água



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Constatou-se que há casos em que a madeira do telhado está apoiada diretamente nas paredes, Figura 2.21, prática incorreta, pois a concentração de tensão naquele ponto pode gerar fissura vertical sob a madeira. Também se pode notar que os beirais são muito curtos, incapazes de proteger as paredes de chuvas com vento. Assim, há o desgaste com o passar do tempo e o aspecto estético da construção fica bastante comprometido.

Figura 2.21 - Peças de madeira do telhado apoiando-se diretamente sobre os blocos de gesso e beirais muito curtos



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Também foram observadas vergas de madeira, com pouca rigidez, Figura 2.22 futura causa de patologias. Note-se a fissura já formada no canto superior da abertura da janela. A ausência de contra-vergas também se constata nas construções existentes.

Figura 2.22 - Verga de madeira sem rigidez adequada

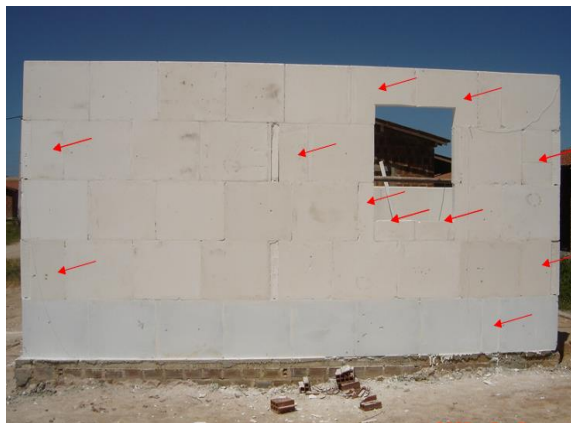


Fonte: RODRIGUES, (2008)

No que diz respeito à sustentabilidade, no exemplo da Figura 2.23, tem-se uma parede de 32 blocos, na qual 11 tiveram que ser cortados gerando perdas. Isto quer dizer que 34% dos blocos geraram resíduo. Isto é incompatível com qualquer critério de sustentabilidade. Além do desperdício de material, a maioria dos resíduos são jogados aleatoriamente no meio ambiente, contaminando o solo e as águas subterrâneas. Embora a solubilidade do gesso seja baixa (menos de 2 g/l), ao longo do tempo em meio aquoso os íons SO_4^{2-} podem se unir com os íons H^+ da água e formar o ácido sulfúrico, H_2SO_4 ,

extremamente danoso à natureza. Evitar perdas é essencial para se ter um sistema construtivo aceitável. Então, para que o se tenha construções, em que o gesso é o principal componente, duráveis e com sustentabilidade há necessidade de modificar a maneira de construir que foi acima apresentada.

Figura 2.23 - Parede com 34% dos blocos cortados, gerando perdas e resíduos:
insustentabilidade desse sistema



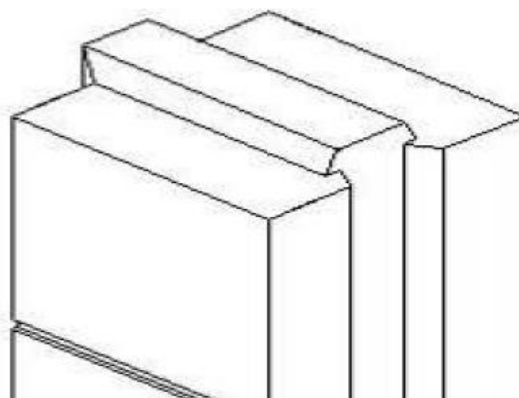
Fonte: RODRIGUES, (2008)

2.12. SISTEMA CONSTRUTIVO MODULAR COM BLOCOS DE GESSO

No laboratório de Ensaaios de Materiais e Estruturas (LABEME), na UFPB, foi desenvolvido um sistema construtivo de paredes com componentes a base de gesso sob a ótica de coordenação modular. Trata-se de pesquisa financiada pelo programa HABITARE de FINEP, que gerou a dissertação de mestrado da arquiteta Christiane Rodrigues (Rodrigues, 2008).

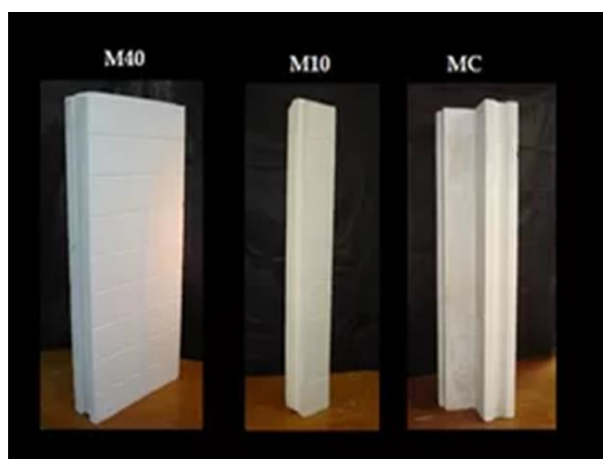
Um dos preceitos fundamentais desta pesquisa foi de buscar a menor variação tipológica de blocos, buscando atender às necessidades construtivas do conjunto edificado e eliminar as perdas (Rodrigues, 2008). Assim, apenas com três tipos de moldes são produzidos os blocos. A partir do corte deles, geram-se sub-blocos, conforme a necessidade da obra, não havendo perdas. A espessura dos blocos corresponde à dimensão modular de 10 cm.

Foi adotado um tipo de encaixe tipo macho e fêmea. Esse tipo de encaixe além de garantir o intertravamento entre os componentes, serve como “guia” durante o assentamento, como ilustrado na Figura 2.24. Esses encaixes auxiliam na colocação a prumo das fiadas sucessivas e são contínuos nas quatro faces (Rodrigues, 2008).

Figura 2.24 - Encaixe em perspectiva

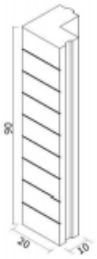
Fonte: RODRIGUES, (2008)

Os três tipos de blocos principais podem ser vistos na Figura 2.25. O bloco principal que é usado em maior quantidade, tem modulação 4M, denominado de BM40. O bloco de modulação 1M, designado BM10, é utilizado para permitir vencer dimensões de valores ímpares, 1M, 3M, 5M e assim por diante. Finalmente, para os cantos das paredes foi desenvolvido o bloco BMC (Rodrigues, 2008). Na Figura 2.26, tem-se as dimensões deles.

Figura 2.25 - Tipologia dos blocos principais

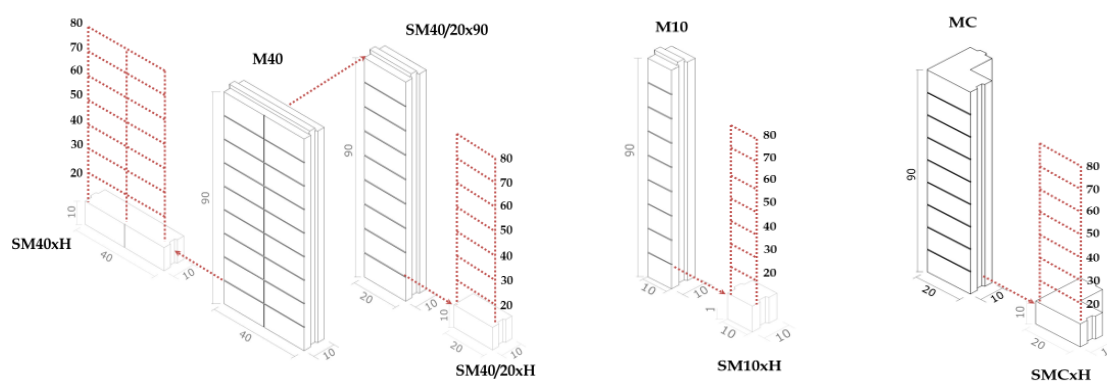
Fonte: RODRIGUES, (2008)

Figura 2.26 - Dimensões dos blocos principais

Designação	Bloco principal	Dimensão modular (cm)	Dimensão nominal (cm)	Unidade-base para modulação (cm)
M40		10x90x40	10x89,8x39,8	10
M10		10x90x10	10x89,8x9,8	10
MC		10x90x20	10x89,8x19,8	10

Fonte: RODRIGUES, (2008)

Os sub-blocos, Figura 2.27, são originados do corte dos blocos principais BM40, BM10 e BMC. O corte deve ser previsto e quantificado no projeto modular e pode ser executado no canteiro de obras, usando-se disco diamantado.

Figura 2.27 - Tipologias dos sub-blocos

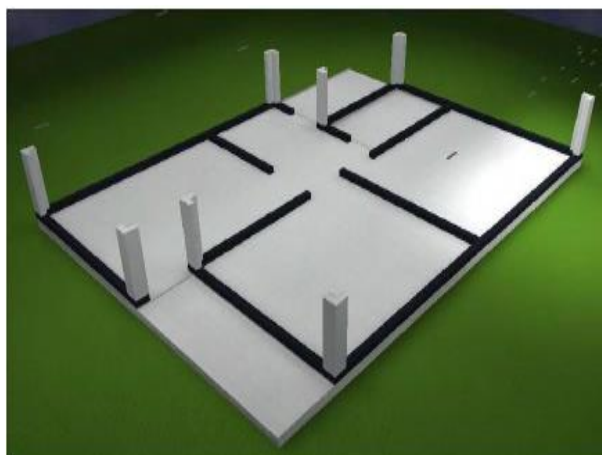
Fonte: Adaptado de RODRIGUES, (2008)

A utilização do sistema oferece ganho em produtividade e economia, mas para que as vantagens em relação à construção convencional possam surgir, é importante que as técnicas construtivas desse sistema sejam empregadas adequadamente.

As fundações devem ser locadas precisamente de acordo com a modulação e sem desvio em relação ao alinhamento das paredes, para as quais servirão de suporte. A fundação que pode ser usada é a tradicionalmente feita de alvenaria de pedra argamassada. Blocos cerâmicos ou de concreto podem constituir a alvenaria de embasamento para se chegar ao nível do piso. Nele molda-se um elemento de concreto de 10 cm x 10 cm, aqui chamado de cinta, onde haverá parede. Ela serve de rodapé e proteção a base da alvenaria de gesso. É conveniente aplicar-se uma pintura impermeabilizante sobre a cinta para impedir que o gesso e o concreto entrem em contato. Lembrar de interromper essa cinta onde há portas, como se vê na Figura 2.28.

O processo de execução das alvenarias inicia-se pela locação dos blocos de canto MC, pois são eles que definem o alinhamento da construção. No sistema modular de referência essa altura equivale a 1m (10M), que é a altura da cinta inferior (M) mais a primeira fiada de blocos (9M).

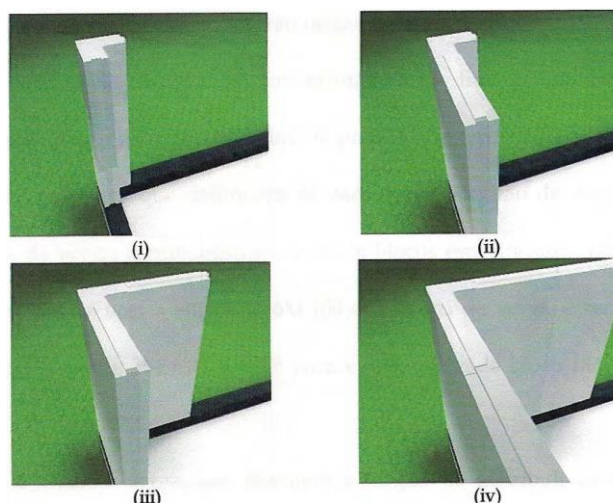
Figura 2.28 - Cinta onde devem nascer as paredes (em preto) e posicionamento dos blocos de canto



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Em seguida, a primeira fiada deve ser executada priorizando-se o emprego do bloco principal (M40), Figura 2.29, seguido quando necessário do seu sub-bloco e/ou bloco principal M10, conforme o projeto modular.

Figura 2.29 - Sequência de assentamento dos blocos da primeira fiada



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Na segunda e terceira fiadas, a colocação dos blocos segue a mesma regra anterior, mas o posicionamento deles deve ser defasado da fiada inferior, de forma a evitar sempre que possível que as juntas verticais fiquem contínuas. Para isto, é necessário o uso do bloco BM10 e dos sub-blocos.

A locação dos vãos de esquadrias deve estar representada, detalhadamente, na elevação das paredes do projeto modular.

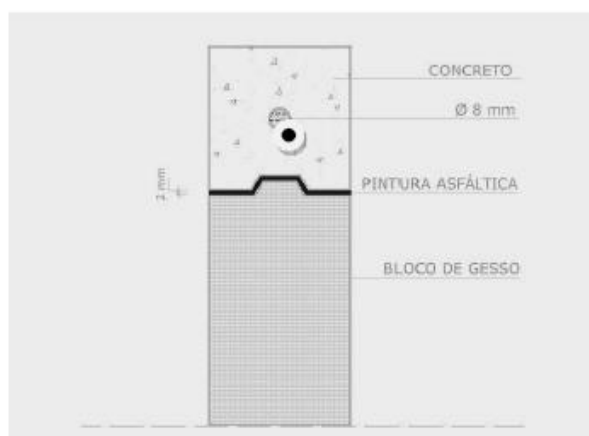
As aberturas, no caso de janelas, terão origem na segunda fiada, com a colocação das contra-vergas, indicando que ali haverá uma janela. Em seguida, é feita a colocação dos demais blocos especificados no projeto. Na terceira fiada, assentam-se primeiramente os blocos que delimitam os vãos e que servirão de encaixe, para a verga. Acima da verga, complementam-se com blocos especificados, concluindo a terceira fiada. Para vencer a altura de 6M (60 cm) acima da verga, é recomendado usar dois sub-blocos de 3M (SM 40X30) para evitar que cada bloco M40 gere uma sobra de um sub-bloco (SM 40X30).

A verga e contra-verga, que possuem função estrutural de distribuir as cargas que seriam suportadas pelos blocos que supostamente preencheriam os vãos, são dimensionadas de acordo com as medidas estabelecidas no projeto modular em função do tamanho da esquadria. Elas podem ser de madeira ou pré-fabricadas de gesso com fibras e podem ser confeccionadas no canteiro de obras. Silva (2010) utilizou peças de gesso reforçado com varas de bambu que funcionaram muito bem.

Sobre todas as paredes deve ser colocada uma cinta de amarração com a função de solidarizá-las entre si, pelo seu topo, de forma que os esforços horizontais e verticais

provenientes do telhado e do forro sejam bem distribuídos ao longo das paredes. Essa cinta, em concreto armado, com seção transversal de 10 cm x 10 cm, deve ser moldada no local. Para casa popular, uma vara de aço de 8 mm posicionada no centro da cinta, já é suficiente. Como o contato direto do gesso com o concreto não é desejável, convém que a mesma pintura isolante aplicada na cinta inferior seja também usada no topo da parede. Esta fica solidarizada mecanicamente com a cinta por conta da saliência do encaixe, como ilustrada na Figura 2.30.

Figura 2.30 - Corte esquemático da cinta no topo da parede



Fonte: RODRIGUES, (2008)

O fechamento das paredes, acima da cinta de amarração até a altura da terça cumeeira, pode ser feito em madeira como apresentado na Figura 2.31 ou outro sistema qualquer.

Figura 2.31 - Fechamento em madeira acima da cinta superior



Fonte: RODRIGUES, (2008)

Na Figura 2.32, vê-se um protótipo construído com esse sistema no campus da UFPB, em João Pessoa, em 2008 e atualmente, 2021. A construção acha-se em ótimo estado, sem apresentar patologias. Note-se a existência de alpendre que protege as paredes da chuva e promove sombreamento o que é favorável do ponto de vista de conforto térmico nas regiões tropicais.

Figura 2.32 - Protótipo construído no campus universitário da universidade federal da paraíba



Fonte: Autor, (2021)

O sistema construtivo apresentado mostrou-se muito adequado, porém não foram ainda feitos testes relativos ao desempenho mecânico. Para reduzir o consumo de gesso, foram usados blocos com incorporação de pó de pedra. Então, este trabalho vem para validar o sistema construtivo, reduzir o consumo de gesso e aproveitar um resíduo danoso ao ambiente.

Os ensaios de desempenho são apresentados na parte 2 desta tese, com descrição detalhada sobre eles.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS DA PARTE 1 – COMPÓSITOS DE GESSO - PÓ DE PEDRA

3.1. MATERIAIS

Os materiais objeto de estudo dessa tese foram, água, gesso comercial e pó de pedra.

3.1.1. ÁGUA

Toda a água utilizada na confecção das pastas, limpeza dos equipamentos, dispositivos ou outras finalidades foi fornecida pela concessionária local (CAGEPA), considerada potável e própria para utilização nas atividades da construção civil.

3.1.2. GESSO

O gesso utilizado nos ensaios experimentais foi o gesso comercial, conforme as condições específicas na ABNT NBR 13207:2017. De acordo com as informações da empresa fornecedora, o mais utilizado na cidade de Cajazeiras - PB e entorno.

3.1.3. PÓ DE PEDRA

O pó de pedra Figura 3.1, foi adquirido no britador CAJABRITA, localizado também na cidade de Cajazeiras - PB. Após sua aquisição todo o material utilizado na pesquisa foi peneirado na peneira de nº 4.8 utilizando-se apenas o material passante nessa peneira.

Figura 3.1 - Pó de pedra estocado



Fonte: Autor, (2021)

3.2. METODOS

Aqui estão relatados todos os ensaios realizados nos materiais, desde sua caracterização, mistura, estudos dos compósitos até a determinação de suas propriedades.

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PÓ DE PEDRA

3.2.1.1. GRANULOMETRIA E MÓDULO DE FINURA

A obtenção da granulometria e do módulo de finura foram feitas com base na norma ABNT NBR NM 248:2003.

O ensaio de peneiramento é executado para partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro. Consistindo em agitar uma amostra de agregado por um conjunto de peneiras que tenham aberturas progressivamente menores. As peneiras granulométricas são padronizadas pela ABNT NBR NM ISO 2395:1997, geralmente com aberturas quadradas, e de malha de aço. As porções retidas em cada peneira são medidas e transformadas em porcentagem retida. Esses valores são plotados em um gráfico: Porcentagem Passante x Tamanho das Partículas, sendo o eixo das abscissas em escala logarítmica. Esse gráfico é chamado de Curva de Distribuição Granulométrica.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO GESSO

3.2.2.1. MASSA UNITÁRIA DO GESSO

A determinação da massa unitária foi realizada conforme ABNT NBR 12127:2019. Foi utilizado um aparelho constituído de um funil cônico de material não corrosivo (aço inoxidável), sobre tripé, com peneira de 2 mm ajustada na metade da altura do funil e um recipiente medida com capacidade de 1000 (+ 20) cm³. Usou-se balança, com precisão de uma casa decimal em grama. A Massa Unitária foi calculada pela média de dois ensaios.

3.2.2.2. MASSA ESPECÍFICA DO GESSO

A massa específica é a massa do material por unidade de volume, excluindo aquele devido aos vazios. Seu valor foi determinado pela ABNT NBR 16605:2017. Esse valor não faz parte dos requisitos de conformidade das normatizações brasileiras de gesso, entretanto, é importante ser conhecido.

3.2.2.3. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Com o intuito de ampliar o conhecimento sobre o gesso utilizado na pesquisa foram realizadas análises de Difração de Raios X (DRX) para caracterizá-lo mineralogicamente. A técnica de difração de raios X permite a identificação dos minerais presentes. As amostras foram passadas na peneira 200 mesh (74 μ m) e acondicionados em porta amostra para a análise em equipamento XRD 6000 da Shimadzu, Figura 3.2, pertencente ao Laboratório de Tecnologia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A amostra foi analisada sob voltagem 40 KV e amperagem de 30 mA, em sistema $\Theta/2\Theta$, com velocidade de varredura de 0,02°/seg, de 3° a 70° 2 Θ . Foi usada como fonte de energia um filamento de tungstênio (catodo) e um tubo de raios-X de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: K α 1,5418 Å e K β 1 1,3922 Å. As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados. Para a interpretação dos resultados foi acessado o banco de dados JCPDS.

Figura 3.2 - Equipamento utilizado no ensaio de difração de raio X



Fonte: Autor, (2021)

3.2.2.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Foi utilizado o método da Fluorescências de Raios X (FRX) para se obter a composição química do material.

Amostra do gesso foi submetida à análise química por meio desta técnica no Laboratório de Tecnologia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A amostra foi preparada na forma de pastilhas. Foi utilizado o equipamento EDX 720 da Shimadzu, Figura 3.3.

Figura 3.3 - Espectrômetro Shimadzu



Fonte: Autor, (2021)

3.2.2.5. ANÁLISES TÉRMICA

As análises termogravimétricas (TG) e termodiferencial (ATD) foram realizadas por meio de equipamento da Shimadzu TA 60h, Figura 3.4 com razão de aquecimento de 10 °C/min com atmosfera de ar comprimido. A temperatura máxima para ambos os casos foi de 1000 °C e o padrão utilizado na ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da (UFCG).

Figura 3.4 - Equipamento utilizado nos ensaios térmicos



Fonte: Autor, (2021)

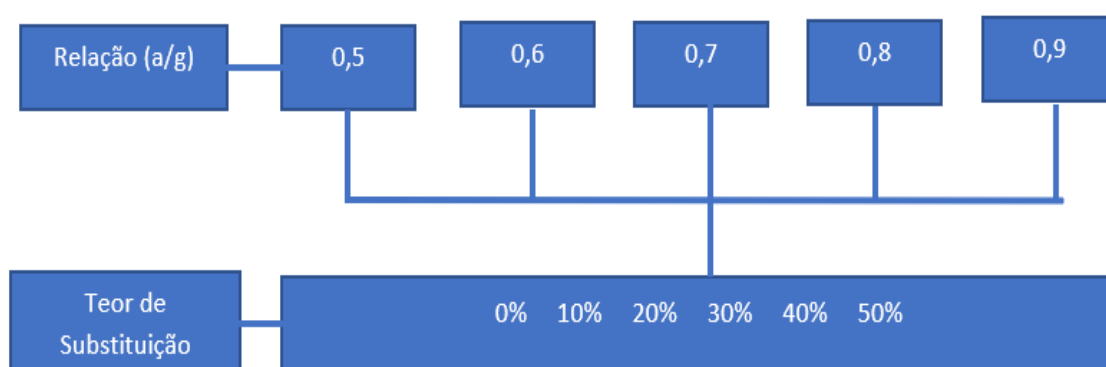
As curvas de análise termogravimétricas (TG) permitiram analisar de forma quantitativa as perdas de massa sofridas pelas amostras durante o processo de

aquecimento. As variações de massa são atribuídas à perda da água de cristalização que o gesso sofre durante a sua decomposição térmica com formação de anidrita.

3.2.3. PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS

Em virtude da falta de dados na literatura sobre matriz de gesso incorporando pó de pedra, foram preparadas amostras com relação água/gesso (a/g) que pudessem ser usadas na prática e teores de incorporação do pó de pedra de 0 a 50% em intervalos de 10%, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Traços das misturas confeccionadas



Fonte: Autor, (2021)

As misturas e preparação dos corpos de prova foram realizadas à temperatura ambiente de aproximadamente 30°C. Elas foram feitas em um recipiente plástico, com auxílio de um fouet, colocando-se inicialmente a água e o gesso sendo pulverizado sobre ela pelo período de 1 minuto. Então a pasta foi misturada durante 1 minuto e em seguida posta em descanso por 2 minutos. Só então as pastas foram colocadas nos moldes.

Para as misturas contendo pó de pedra, esse componente era misturado a seco ao gesso e após a completa homogeneização realizava-se o mesmo procedimento para as misturas contendo apenas gesso.

Nas misturas com relação água/gesso de 0,5 com percentuais de substituição de 40% e 50% não foi possível a realização do ensaio visto que as misturas não adquiriram plasticidade por conta da quantidade de água insuficiente.

Nos compósitos foram estudadas as seguintes propriedades:

- Tempos de início e fim de pega
- Calor de hidratação

- Densidade
- Velocidade de propagação de onda ultrassônica
- Dureza Shore
- Absorção por capilaridade
- Absorção por imersão
- Microestrutura por MEV
- Resistência à compressão
- Resistência à flexão

3.2.3.1. TEMPOS DE INICIO E FIM DE PEGA

Os ensaios, utilizando o aparelho de Vicat, foram executados de acordo com os métodos descritos na ABNT NBR 16607:2017.

3.2.3.2. CALOR DE HIDRATAÇÃO

Este ensaio teve como objetivo principal a obtenção das curvas de liberação de calor ao longo do tempo à medida que se processa a hidratação do gesso. Tais curvas possibilitam efetuar a análise do comportamento das pastas à base de gesso, observando-se com clareza as delimitações das etapas 1 (indução), 2 (consistência útil) e 3 (fim do período de utilização).

O ensaio ainda indica o tempo de início e de fim de pega por meio da análise das curvas de calor de hidratação em função do tempo, gerado pela variação de temperatura durante as reações de hidratação do gesso (que libera energia). O parâmetro adotado para determinar o início de pega foi a observação de quando o gradiente térmico ultrapassasse 0,1 °C/min, e o fim de pega foi o instante em que a temperatura máxima foi atingida, evidenciado pela interrupção da elevação de temperatura.

Neste ensaio foi utilizado um calorímetro pseudoadiabático proposto por Murat e Jeandot (1973) e um cronômetro, Figura 3.6.

Figura 3.6 - Calorímetro pseudoadiabático



Fonte: Autor, (2021)

Após a mistura, os compósitos foram colocados em copos plásticos, conectados ao termômetro. Posteriormente, tais recipientes foram inseridos em recipiente de poliestireno expandido (EPS), preenchidos por material termicamente isolante, visando à não interferência da temperatura externa.

Neste ensaio a temperatura foi medida a cada dois minutos, passando por sua elevação brusca (ápice das reações), até o momento em que o aumento da temperatura foi interrompido, tendo sido alcançada a temperatura máxima.

3.2.3.3. DENSIDADE

O ensaio foi realizado conforme descrição da norma ABNT NBR 14715-2:2010. Os corpos de prova foram medidos com exatidão de 1mm, e a massa com exatidão de 1g. A densidade foi obtida pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova. Estes eram cúbicos com aproximadamente 5 cm de aresta.

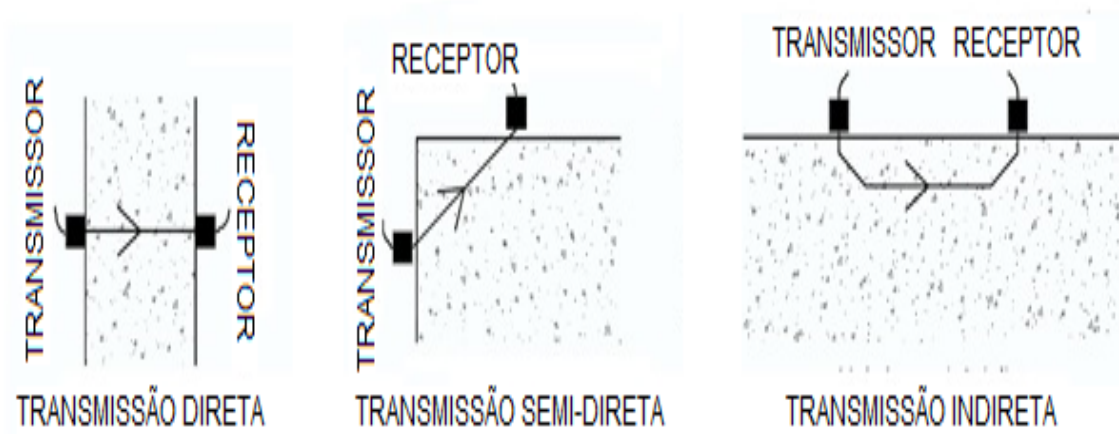
3.2.3.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PULSO ULTRASSONICO

A técnica básica de métodos de velocidade de propagação de onda ultrassônica envolve a transformação de um pulso de tensão em uma onda ultrassônica. Um transdutor emissor é colocado sobre a superfície do corpo de prova e um outro receptor em outra parte do mesmo. A onda ultrassônica percorre o elemento e é medido o tempo de

propagação entre o emissor e receptor. Conhecendo-se a distância entre os pontos de envio e de recebimento, a velocidade da onda pode ser determinada. A velocidade da onda ultrassônica fornece uma descrição detalhada do componente sob investigação. (HELAL; SOFI; MENDIS, 2015). Nesse caso o tempo para a realização dos ensaios foi o tempo decorrido até a constância de massa dos corpos de prova ou seja, até quando os corpos de prova já não perdiam mais água.

Neste ensaio é necessário definir o tipo de transmissão desse pulso. Essa escolha está relacionada à posição do transdutor receptor (R) em relação ao transdutor transmissor (T) do aparelho. Na Figura 3.7, é apresentado os tipos de transmissão: (a) direto, (b) semidireto e (c) indireto.

Figura 3.7 - Diferentes formas de transmissão de pulso ultrassônico

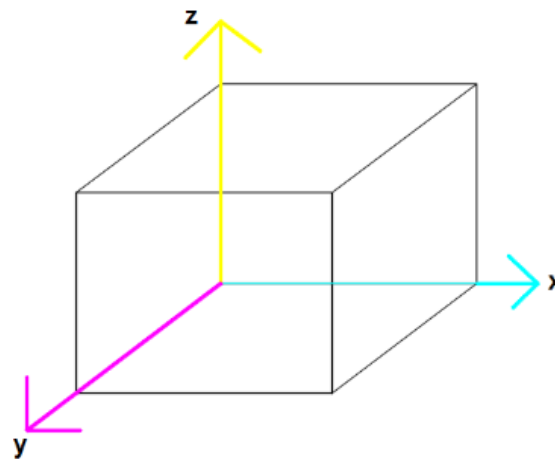


Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8802, (2019)

O tipo de transmissão escolhido influencia alguns parâmetros do ensaio, como o tipo de onda a ser analisada, e, conseqüentemente, o modo de análise dos resultados (L. MIRANDA *et al.*, 2015).

Para a análise da velocidade das ondas e controle dos eixos em que se posicionaram os transdutores, convencionou-se as direções X, Y e Z como mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Convenção das direções para medição



Fonte: Autor, (2021)

No caso foi usado corpo de prova prismático, de 4 cm x 4 cm x 16 cm. O aparelho de pulso ultrassônico foi o PUNDIT PL 200 da empresa PROCEQ, composto por 02 transdutores de 54 kHz com diâmetro de superfície de contato de 36,77 mm e datalogger foi utilizado. Os corpos de prova foram ensaiados em uma estrutura que impedisse qualquer vibração externa que pudesse alterar o resultado, conforme pode ser observado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de ultrassom



Fonte: Autor, (2021)

Para melhoria da aderência na acoplagem dos transdutores com as amostras foi usado gel medicinal, que é normalmente utilizado nesse tipo de ensaio. Esse gel contribui para evitar o mau contato entre os transdutores e receptores e a superfície do gesso que

pode interferir nas leituras do aparelho. Antes do início dos ensaios é recomendado verificar a calibração do equipamento com a medida de um cilindro padrão fornecido pela Procep® (Calibration Rod - 25,4 μ s), mostrado na Figura 3.10. As leituras foram realizadas em 06 barras do compósito de gesso com relação água/gesso igual a 0,6, que foi a utilizada na segunda parte deste trabalho.

Figura 3.10 - Equipamento de calibração de onda ultrassônica



Fonte: Autor, (2021)

3.2.3.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

Os ensaios de MEV foram realizados, com o uso do microscópio eletrônico de varredura modelo Modelo INSPECT (FEI Company), Figura 3.11 que permite a observação morfológica do arranjo cristalino dos corpos de prova de gesso com substituição de pó de pedra, com ampliações de até 50.000x.

Figura 3.11 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: Autor, (2021)

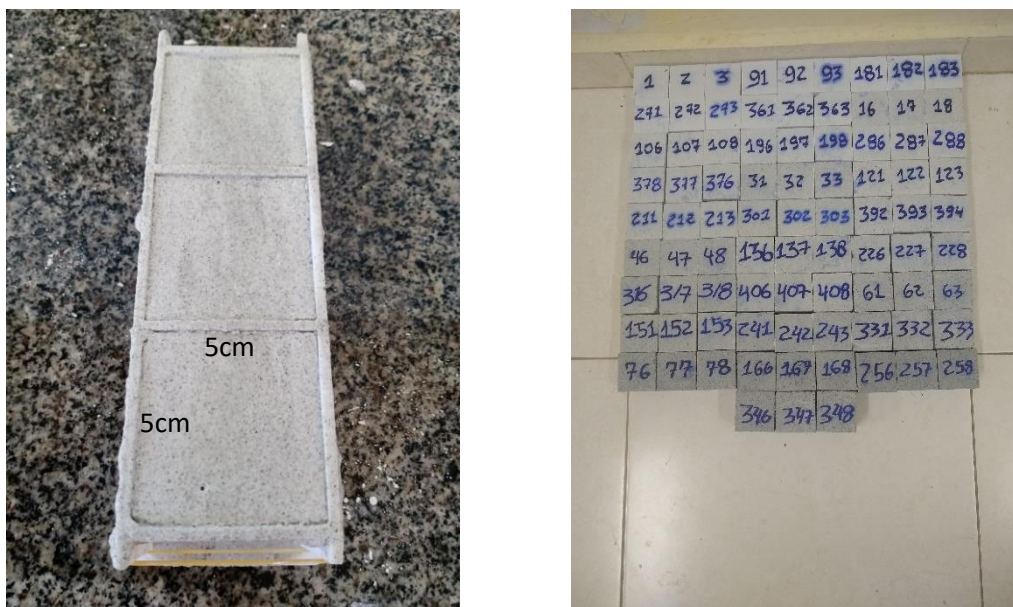
Foram analisadas 06 amostras, da série com relação $a/g = 0,6$ e teores de incorporação que variaram de 0 a 50%. Esta série foi escolhida por ser aquela cuja relação a/g que foi usada na segunda parte dessa tese.

3.2.3.6. DUREZA SHORE – C

Os ensaios, realizados para a medição da resistência à Dureza Shore-C, para construção civil, devem ser executados em corpos-de-prova cúbicos de 50 mm x 50 mm, segundo Norma francesa (AFNOR-CENT/TC241, 1994).

Para cada mistura foram moldados três corpos de prova cúbicos de 50,0 mm de aresta simultaneamente em molde impermeável e rígido, não reativo ao sulfato de cálcio, Figura 3.12. Após a desmoldagem, todos os corpos de prova tiveram suas arestas medidas, confirmando-se não ter havido retração e identificados na face rasada.

Figura 3.12 - Moldagem e corpos de prova desformados



Fonte: Autor, (2021)

Para secagem os corpos de prova foram mantidos em ambiente seco com temperatura de aproximadamente 35°C até atingirem constância de massa, o que levou aproximadamente 7 dias, Figura 3.13.

Figura 3.13 - Corpos de prova aguardando constância de massa



Fonte: Autor, (2021)

Foram ensaiados, conforme Figura 3.14, três corpos-de-prova para cada composição.

Figura 3.14 - Ensaio de dureza utilizando o durômetro Shore C



Fonte: Autor, (2021)

3.2.3.7. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE E POR IMERSÃO TOTAL

O ensaio de absorção por capilaridade foi efetuado tomando-se como base as especificações da ABNT NBR 16072:2012 para argamassa e concreto endurecidos,

realizando-se as adaptações pertinentes, considerando-se que esse ensaio com gesso ainda não foi normatizado pela ABNT.

Os ensaios de absorção por imersão total foram realizados utilizando o método proposto pela ABNT NBR 14715-2:2010 adaptado para o gesso comum.

Tanto o planejamento experimental como o processo de moldagem dos corpos de provas foram idênticos aos apresentados no item 3.2.7.

Após o período de descanso da mistura, a pasta foi colocada em formas prismáticas de 50 mm x 50 mm para o ensaio de absorção total e em formas de 40 mm x 40 mm x 160 mm para o ensaio de absorção por capilaridade.

Após o desmolde dos corpos de prova, foram feitas as primeiras medições de peso. Posteriormente, os mesmos foram colocados em ambiente controlado com temperatura de aproximadamente 35°C até constância de massa. Após esse período os cubos com 50mm de aresta, foram imersos em água por 24 horas, Figura 3.15 tendo sido posteriormente pesados.

Figura 3.15 - Ensaio de absorção por imersão total



Fonte: Autor, (2021)

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado pela adaptação da ABNT NBR 16072:2012, que prescreve ensaios para argamassa e concreto, uma vez que a ABNT não apresenta norma que contemple este experimento para gesso.

O ensaio é realizado imergindo-se parcialmente os corpos de prova de gesso em água, com uma temperatura de aproximadamente 23 °C.

De acordo com a norma, a lâmina d'água deve ter altura de (5 ± 1) mm, acima da base inferior dos corpos de prova, tomando-se cuidado para não molhar outras superfícies das amostras, conforme ilustrado na Figura 3.16.

Após 24 horas de contato entre os corpos de prova e a água, foram determinadas as massas das series com o auxílio de uma balança digital com sensibilidade de 0,01g.

Figura 3.16 - Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autor, (2021)

3.2.3.8. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à compressão foi obtida com a média da resistência de 3 corpos de prova cúbicos de 5 cm de aresta. Cada resultado individual não deve diferir mais de 15 % da média calculada. Caso contrário, a norma permite que esse resultado seja descartado e se considera apenas a média dos outros 2 corpos de prova. Havendo mais de um resultado com diferença maior que 15% da média, deve-se desconsiderar os resultados e repetir o ensaio.

Utilizou-se a máquina de ensaios da Figura 3.17, tentando-se manter uma velocidade de aplicação de carga constante até a ruptura.

Para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão foi utilizada a ABNT NBR 12142:2010. O equipamento utilizado foi prensa da Figura 3.18 que promove a aplicação controlada da carga sobre o corpo de prova prismático de 40 mm x 40 mm x 160 mm. A distância entre centros do apoio é 100 mm. Nesse ensaio, corpos de prova prismáticos são submetidos à flexão simples a três pontos até a ruptura. A resistência

mecânica à flexão é definida pela máxima tensão de flexão suportada pelo corpo durante o ensaio.

Figura 3.17 - Ensaio de resistência a compressão



Fonte: Autor, (2021)

Figura 3.18 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor, (2021)

3.3. TESTES ESTATÍSTICOS

Para análise dos resultados obtidos nos ensaios de tempos de início e fim de pega, densidade, dureza Shore, absorção por capilaridade, absorção por imersão total e parcial, resistência à compressão e a flexão, de cada mistura, foi utilizado o teste estatístico ANOVA - Análise de Variância, com base na comparação entre as médias obtidas. Este método visa testar se os resultados das amostras diferem significativamente entre si, medidos a partir do nível-p. O nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido. Usualmente um nível de 0,05 é considerado estatisticamente significativo, porém envolvendo uma probabilidade de 5% de erro. Resultados com nível-p de 0,01 são considerados “altamente” significativos, devido à menor probabilidade de erro, de 1%.

A análise de variância baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos (variância entre) e ao erro experimental (variância dentro). Essa variação pode ser medida por meio das somas de quadrados definidas para cada um dos componentes da série de medida (ANJO et al., 2009).

Se $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$, rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

Outra maneira de avaliar a significância da estatística F é utilizando o p-valor. Se o p-valor $< \alpha$, rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 . Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

Quando é feita a análise de variância de um experimento com apenas dois tratamentos, pode-se visualizar apenas pela média qual o melhor tratamento. Porém, quando há mais de dois tratamentos, aplica-se apenas o teste de “F” (teste que mostra se existe diferença entre as médias dos tratamentos), porém, não se pode indicar qual o melhor tratamento. Neste caso, é necessário aplicar um teste de comparação de médias dos tratamentos, podendo-se então concluir qual o melhor tratamento.

Os testes de comparação de média servem como um complemento para o estudo da análise de variância. Há vários testes de comparação de médias, entre os quais pode-

se citar: teste de Tukey, teste de Duncan, teste de Scheffé, teste de Dunnet e teste de Bonferroni (MEYERS; MONTGOMERY, 2002).

O teste de Tukey permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos, ou seja, não permite comparar grupos entre si. O teste baseia-se na Diferença Mínima Significativa (DMS).

Também, em um teste de comparações de médias, deve-se determinar um nível de significância α . Normalmente, utiliza-se o nível de 5% de significância para estudos em Engenharia. O valor $q(\alpha, r, N-r)$ é um valor tabelado (tabela para o teste de Tukey).

Como o teste de Tukey é, de certa forma, independente do teste F, é possível que, mesmo sendo significativo o valor de $F_{\text{calculado}}$, não se encontrem diferenças significativas entre contrastes de médias.

Para tamanhos de amostra iguais (dados balanceados), o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças amostrais ultrapassarem Δ . Em outras palavras, rejeita-se a igualdade da média de dois níveis se:

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > \Delta, \quad i \neq j$$

Utiliza-se também nas análises estatísticas os gráficos tipo box plot relativos aos dados utilizados nas análises. Os gráficos desse tipo dão informações sobre as diferenças entre os tratamentos aplicados. Caso os pontos extremos dos tratamentos não apresentem valores internos aos pontos extremos de outro tratamento, então esses dois tratamentos são diferentes entre si; caso contrário, são semelhantes.

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PARTE 1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOS COMPÓSITOS DE GESSO - PÓ DE PEDRA

Neste capítulo apresenta-se e comenta-se os resultados relativos aos ensaios desenvolvidos ao longo dessa primeira etapa do trabalho.

Inicialmente mostra-se o que foi obtido nos ensaios de caracterização envolvendo os dois materiais, pó de pedra e gesso. Em seguida, trata-se dos compósitos.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PÓ DE PEDRA

4.1.1. GRANULOMETRIA E MÓDULO DE FINURA DO PÓ DE PEDRA

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo em termos de massa específica, módulo de finura, massa unitária no estado solto e diâmetro máximo característico

Tabela 4.1 - Caracterização do pó de pedra

Característica	Unidade	Valores
Massa Específica	g/cm ³	2,66
Módulo de Finura	-	3,37
Massa Unitária no Estado Solto	g/cm ³	1,44
Diâmetro Máximo Característico	mm	4,75

Fonte: Autor, (2021)

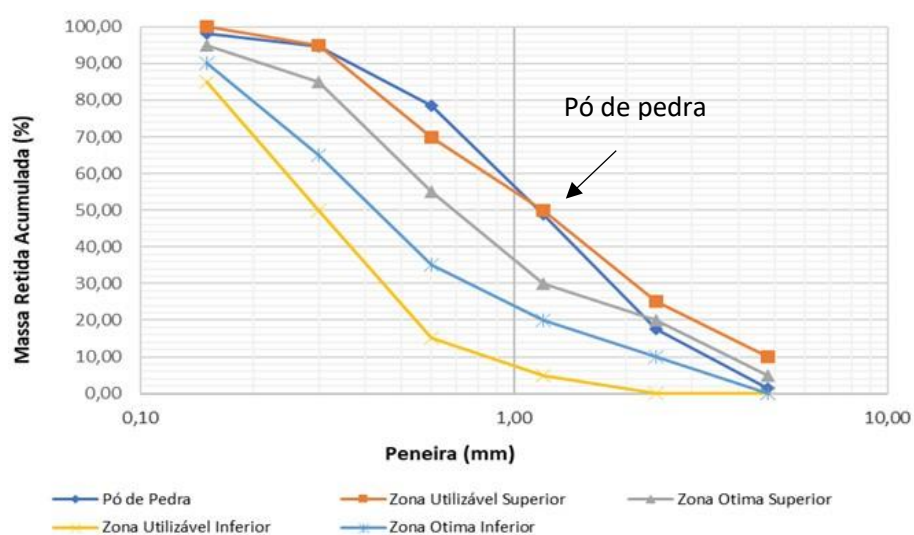
Na Tabela 4.2 estão representados os dados obtidos da análise granulométrica do pó de pedra com a porcentagem retida acumulada dos agregados utilizados para produzir os traços a serem analisados.

Tabela 4.2 - Tabela da análise granulométrica do pó de pedra

Peneira (mesh)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante
4	4,80	13,6	1,36	1,36	98,64
8	2,40	160,8	16,13	17,50	82,50
14	1,20	312	31,31	48,81	51,19
28	0,60	295,7	29,67	78,48	21,52
48	0,30	162,1	16,27	94,74	5,26
100	0,15	34,8	3,49	98,23	1,77
FUNDOS		17,6	1,77	100,00	0,00
TOTAL		996,6	100,00	-	
Diâmetro Máximo Característico (mm)				4,75	
Modulo de Finura				3,37	

Fonte: Autor, (2021)

Para melhor visualização das análises granulométricas, na Figura 4.1, é mostrada a curva granulométrica do pó de pedra bem como os limites de utilização especificados na ABNT NBR 7211:2009.

Figura 4.1 - Curvas granulométricas do pó de pedra e limites da ABNT NBR 7211:2009

Fonte: Autor, (2021)

Nota-se na Figura 4.1 que a granulometria do pó de pedra está próxima da zona superior utilizável relativa a agregados para concreto. O módulo de finura indica que, como agregado miúdo se trata de um material relativamente grosso.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO GESSO

4.2.1. MASSA UNITÁRIA

Na Tabela 4.3 está apresentado o resultado da massa unitária do gesso ensaiado.

Tabela 4.3 - Resultados da massa unitária do gesso

Amostra	Massa Unitária (kg/m³)	Comentários
Gesso	610	Dentro da faixa da NBR

Fonte: Autor, (2021)

O valor da massa unitária exigido pela ABNT NBR 13207:2011 é igual ou maior que 600 kg/m³. A massa unitária, para Carneiro et al. (1997), é um parâmetro relevante para os agregados no estudo de desempenho das argamassas, pois esta pode afetar a dosagem, interferindo diretamente no consumo de aglomerantes o reduzindo a capacidade de retenção da consistência das argamassas. Para os aglomerantes, embora tenha seus valores definidos e limitados, pode representar ao mesmo tempo a distribuição granulométrica, a formas dos grãos e a capacidade de empacotamento.

A massa unitária do gesso convencional, segundo Bauer (2001), apresenta variação entre 0,70 e 1,00, e tem relação direta com o grau de finura. Para Campos et al. (2007) a massa unitária é influenciada pelo índice de vazios e pela massa específica da rocha que originou o material.

Então, com referência a essa propriedade, o material está conformidade com a norma. Ferreira et al (2018) em 5 gessos analisados da mesma região daquele empregado neste trabalho acharam valores entre 590 e 700 kg/m³.

4.2.2. MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 4.4 está apresentado o resultado da massa específica do gesso. O valor encontrado foi de 2,59 g/cm³, que está próximo aos obtidos por (CINCOTTO et al, 1985) que analisaram 15 gessos comercializados em São Paulo. Já (Ferreira e al, 2018) acharam

valores entre 2,54 e 2,60 g/cm³, em cinco amostras de gesso, coerentes com o valor aqui achado.

Tabela 4.4 - Resultados da massa específica

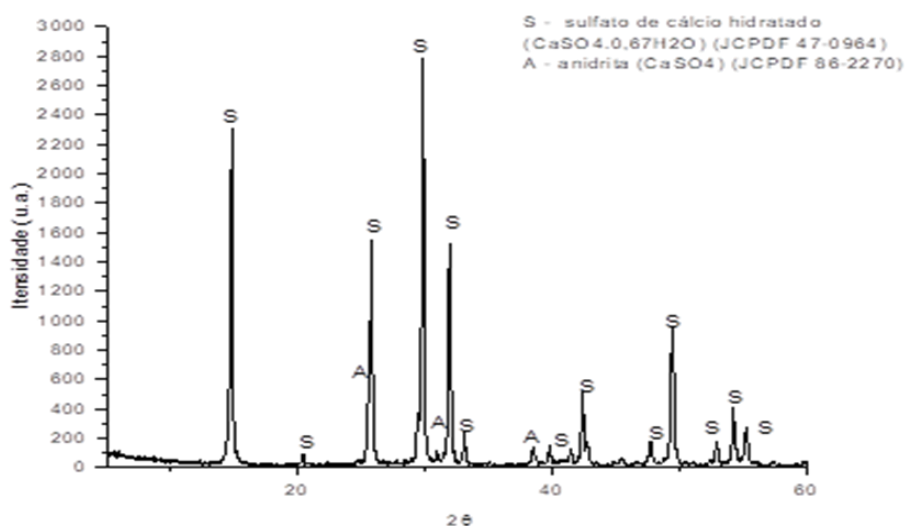
Amostra	Massa Específica (g/cm ³)	Comentários
Gesso	2,59 g/cm ³	-

Fonte: Autor, (2021)

4.2.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica do gesso através da Difração de Raios - X está apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - DRX do gesso utilizado na pesquisa



Fonte: Autor, (2021)

No DRX da amostra de gesso foram identificados os picos de maior intensidade, tendo-se a presença predominante das fases mineralógicas: sulfato de cálcio com 0,67 moléculas de água (CaSO₄·0,67H₂O) (JCPDF 47-0964) e anidrita (CaSO₄) (JCPDF 86-2270). Teoricamente o gesso deveria ser composto majoritariamente pelo mineral bassanita, que é o sulfato de cálcio hemi-hidratado. Provavelmente o processo de fabricação não é perfeito, desidratando desigualmente a gipsita, chegando mesmo a produzir anidrita.

4.2.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 4.5 observa-se os resultados obtidos pela análise de fluorescência realizada no gesso em estudo, em percentual de massa de óxidos.

O material é preferencialmente constituído de óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃). O teor de CaO atende as exigências da norma ABNT NBR 13207:2011 que determina um teor mínimo de 38%, visto que na análise obteve-se 44,29% para esse componente, porém o anidrido sulfúrico está um pouco abaixo da faixa especificada pela mesma norma (mínimo de 53%), mas ficando extremamente próximo deste valor com 52,47%. Apesar dessa pequena discrepância no resultado, optou-se pela utilização desse gesso por achar o autor que tão insignificante alteração pudesse ser algo representativo para o conjunto dos experimentos, além de ser o gesso mais consumido para construção civil na região. O teor de impurezas é pequeno, pouco superior a 3%.

Tabela 4.5 - Composição química do gesso (% mássica)

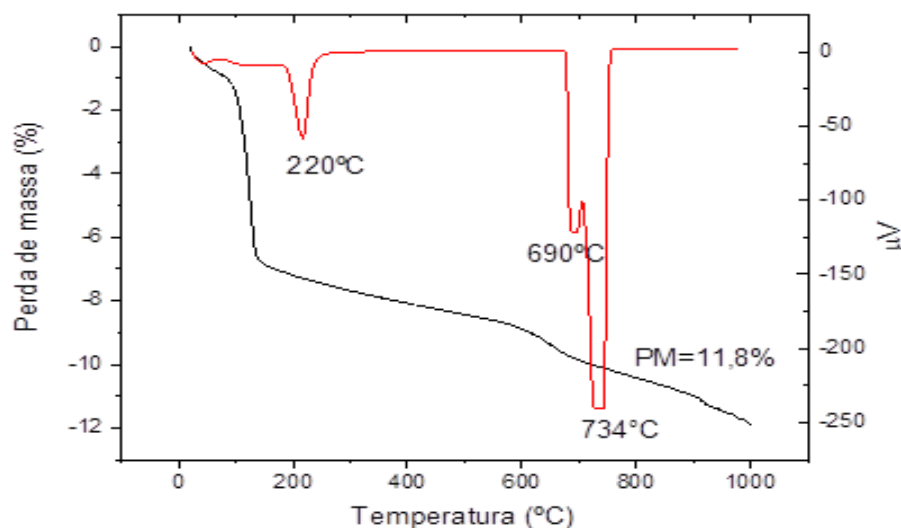
Composto	Resultado (%)
SO ₃	52,467
CaO	44,289
P ₂ O ₅	2,238
SiO ₂	0,703
Fe ₂ O ₃	0,139
SrO	0,126
Tb ₄ O ₇	0,039

Fonte: Autor, (2021)

4.2.5. ANÁLISES TÉRMICA

Através das curvas de análise termodiferencial (DTA) foi possível estabelecer de forma qualitativa as mudanças de fase ocorridas durante a desidratação do gesso.

A Figura 4.3, apresentam a curva TG/DTA obtidas para a amostra de gesso em estudo.

Figura 4.3 - Termogramas da amostra do gesso comercial empregado

Fonte: Autor, (2021)

Observa-se na curva termogravimétrica que a amostra analisada apresentou perda de massa de aproximadamente 11,8%.

Já na curva térmica diferencial observa-se pico endotérmico em aproximadamente 222°C possivelmente relacionada à perda de água estrutural do material. Observam-se também picos endotérmicos em aproximadamente 690° e 734°C possivelmente relacionados a decomposição de fases amorfas carbonatadas e calcita cristalizada respectivamente. Esse mesmo comportamento foi observado por Gabrovsek et al (2006).

Teoricamente, se o material fosse composto unicamente por sulfato de cálcio hemi-hidratado, a perda de massa, considerando as massas atômicas arredondadas, seria:

$$\text{CaSO}_4: 40 + 32 + 4 \times 16 = 136$$

$$\text{H}_2\text{O}: 2 \times 1 + 16 = 18$$



$$2 \times [136 + 0,5 \times 18] = 290 \Rightarrow 2 \times 136 + 18$$

Portanto, a perda de água seria: $18/290 \times 100 = 6,2 \%$.

Este valor é o aproximadamente o encontrado no pico de 220 °C da Figura 4.3. Há ainda água livre, não ligada quimicamente, mas presente entre os grãos. A ABNT NBR 13207:2011 limita esse valor a 1,3 %.

Mesmo após a saída da água livre e da desidratação do hemi hidratado, continuou a haver perda de massa no ensaio, chegando 11,8 %. Esse valor maior pode ser creditado também à presença no gesso comercial de gipsita que não calcinou adequadamente no

processo de fabricação, e de possíveis carbonatos não detectados no DRX, já citados acima.

Khalil et al (2018) acharam para gesso do Egito a perda de água aos 1000°C o valor de 7,75%, o que significa que se trata de um hemi-hidratado mais puro que o utilizado neste trabalho.

John e Cincoto (2007) sugerem que se a perda de água, for maior que 6,2% significa que há no gesso em pó há ainda gipsita, como já enfatizado.

4.3. COMPÓSITOS DE GESSO - PÓ DE PEDRA

Convém sempre lembrar que nos compósitos de gesso - pó de pedra a relação água/gesso variou de 0,50 a 0,90 em intervalos 0,10 e o teor de pó de pedra variou de 0% a 50% em intervalos de 10%. O pó de pedra entra como substituição do gesso, assim quando se diz que o teor é de 30%, significa que em 100 g da mistura seca gesso - pó de pedra, por exemplo, tem-se 70 g de gesso e 30 g de pó de pedra. Assim, a quantidade do ligante gesso presente no compósito vai diminuindo à medida que se aumenta o teor de substituição.

No caso da relação água/gesso de 0,50, não se apresentam resultados dos teores de substituição de 40% e 50% porque a quantidade de água empregada é insuficiente para dar trabalhabilidade à mistura no processo de moldagem manual.

Os resultados da experimentação nos compósitos gesso - pó de pedra, envolvem:

- Tempos de início e fim de pega
- Calor de hidratação
- Densidade
- Velocidade de propagação de onda ultrassônica
- Dureza Shore
- Absorção por capilaridade
- Absorção por imersão
- Microestrutura por MEV
- Resistência à compressão
- Resistência à flexão

4.3.1. TEMPO DE INÍCIO DE PEGA

A Tabela 4.6 e Figura 4.4, apresentam os resultados da influência da relação (a/g) e do teor de substituição de pó de pedra no tempo de início de pega dos diferentes compósitos. Convém lembrar que esses valores não são absolutos, podendo ser influenciados pela temperatura do ambiente onde está sendo aplicado o gesso.

Tabela 4.6 - Valores de tempo de início de pega

TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA – APARELHO DE VICAT (hora:min:seg)					
Teor de Substituição	Relação (a/g)				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0%	00:07:42	00:10:22	00:16:49	00:22:01	00:55:54
10%	00:05:55	00:10:07	00:13:28	00:17:28	00:38:52
20%	00:04:35	00:09:35	00:11:17	00:13:09	00:27:07
30%	00:03:40	00:09:15	00:10:34	00:12:45	00:19:45
40%		00:08:24	00:10:00	00:12:01	00:17:41
50%		00:08:12	00:09:27	00:10:37	00:11:32

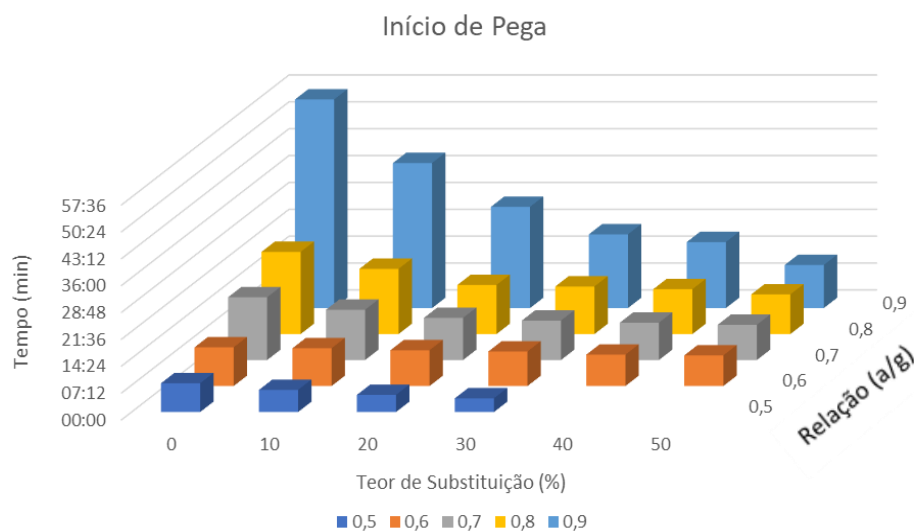
Fonte: Autor, (2021)

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que a presença do pó de pedra independentemente da relação (a/g) reduziu o tempo de início de pega em relação ao gesso sem nenhuma incorporação. Observou-se também uma diminuição na plasticidade do material. Isso ocorre porque os cristais de di-hidrato crescem a partir de gemas de cristalização ou núcleos. A quantidade de núcleos presentes na solução influencia diretamente na taxa de crescimento da microestrutura. Quando existem muitos núcleos o crescimento dos cristais se torna mais rápido o que acelera o endurecimento da pasta e consequentemente o início da pega. Havendo poucos núcleos o crescimento é mais lento. Diante dessa característica os grãos do pó de pedra agiram como núcleos de cristalização acelerando as reações de hidratação.

Pôde-se observar que a influência do pó de pedra na diminuição do tempo de início de pega é particularmente relevante nas misturas com maiores relações água/gesso. Nessas misturas esse fenômeno ocorre devido a maior quantidade de água presente na sua estrutura, visto que os núcleos de cristalização por estarem mais afastados fazem com que

os cristais de di-hidrato originários desses núcleos demorem mais para se entrelaçarem e darem consistência a pasta. A adição do pó de pedra nas pastas com essa característica, mesmo em pequena quantidade, faz com que se aproximem os núcleos de cristalização permitindo o mais rápido entrelaçamento, o que em termos percentuais é mais significativo nas pastas com baixa relação água/gesso.

Figura 4.4 - Variação dos tempos de início de pega



Esse fenômeno é claramente observado ao se analisar a mistura com relação (a/g) 0,9 sem qualquer adição que teve seu início de pega em 55min e 54s, quando comparado ao traço com a mesma relação (a/g) com incremento de 10% de pó de pedra, que teve esse período alterado para 38 min e 52s, acarretando um decréscimo de 30,47% no tempo de pega. Já o traço com relação (a/g) 0,5 sem substituição teve seu início de pega em 7min e 42s e com o incremento dos mesmos 10% de substituição esse valor alterou-se para 5min e 55s, o que representa um decréscimo de 10,40%.

Observou-se também que para todas as misturas estudadas o aumento do incremento da substituição do pó de pedra por gesso produziu um gradual achatamento da curva de início de pega, fato esse explicado por três aspectos principais. O primeiro refere-se à saturação da pasta pelos chamados núcleos de cristalização. Como o número desses núcleos aumenta exponencialmente com o teor de substituição, em certo momento esses núcleos estarão tão próximos que a influência de cada um individualmente na formação dos cristais de di-hidrato é menos significativa. O segundo refere-se ao fato que

como nesse estudo o pó de pedra entra como substituição parcial do gesso, mantendo-se constante a relação água/gesso ocasionando uma redução da relação água/materiais secos fazendo com que haja menos água presente na mistura, diminuindo consequentemente a velocidade de hidratação. O terceiro fator está relacionado ao fato que ao se substituir o gesso por pó de pedra diminui-se significativamente a área específica da mistura, visto que o gesso é bem mais fino que o pó de pedra, havendo dessa forma uma menor área de hidratação o que desacelera os processos das reações.

Tal comportamento torna-se nítido quando se observa a mistura (a/g) 0,7 com 10% de substituição que teve seu início de pega em 19min e 48s e a mistura com (a/g) 0,7 com 50% de substituição que teve seu início de pega em 12min e 49s. Nessas misturas verifica-se o decréscimo de 35,27% no tempo de início de pega mesmo que o incremento da substituição tenha passado de 10% para 50%.

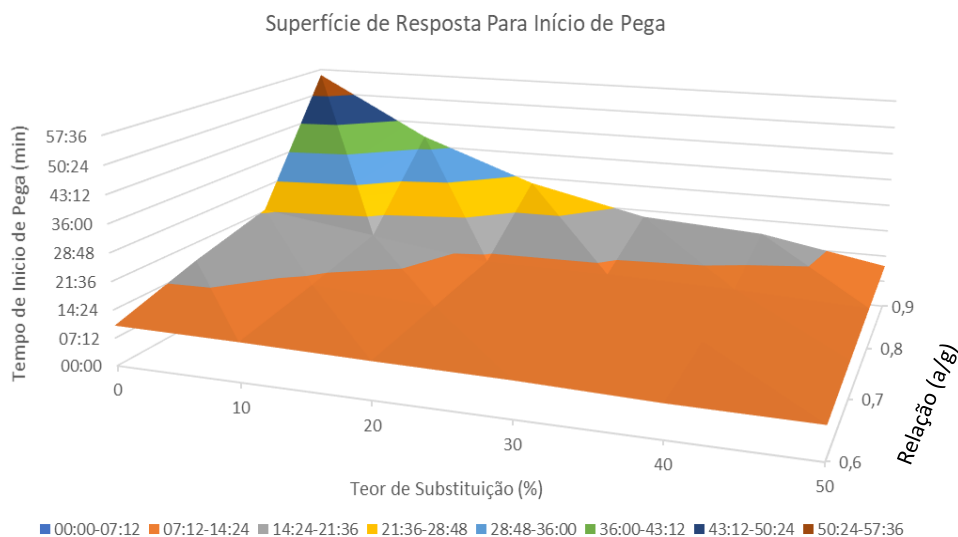
Observou-se também que para todas as composições estudadas ao se alterar o valor da substituição de 20% para 40% praticamente não há alteração no tempo de início de pega das pastas. Tal observação torna-se explícita quando analisamos o traço com relação água/gesso 0,8 com 20% de substituição que teve início de pega em 16min e 45s e o traço de 0,8 com 40% que teve início de pega em 16min e 08s havendo uma variação no tempo de início de pega nessas duas pastas de 3,30%.

Na Figura 4.5 é apresentado o gráfico de superfície de resposta para o início de pega dos corpos de prova ensaiados nas diversas series, que corroboram os dados anteriores.

Uma característica observada foi a linearidade no acréscimo nos tempos de início de pega quando da variação da relação (a/g) entre os valores de 0,5 a 0,8 para os teores de substituição variando de 0 a 30% havendo a partir dessa relação um rápido crescimento nos tempos de início de pega. Ao compararmos os traços com relação 0,8 e o traço com relação 0,9 sem substituição verificamos que o tempo de início de pega mais do que dobrou, saindo de 22:01 para 55:54. Caracterizando dessa forma, para os teores de substituição de 0 a 30%, que o ponto referente a relação (a/g) de 0,9 é um ponto fora da curva, o que fez com que o coeficiente de determinação também chamado de R^2 , se distanciasse da unidade. Tal característica foi observada para todos os traços estudados. Para os teores de substituição de 40 e 50% a linearidade no crescimento do tempo de início de pega se mostrou constante sem que a relação (a/g) de 0,9 produzisse pontos discrepantes na curva.

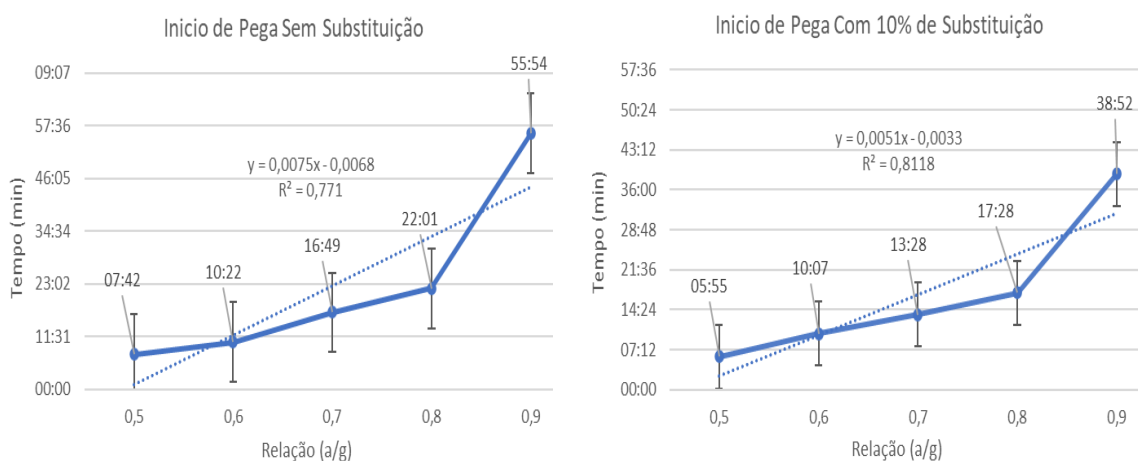
Os gráficos de todas as misturas com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.6. Nos traços com 40% e 50% de substituição foram encontrados valores para o R^2 de 0,9055 e 0,9953 respectivamente.

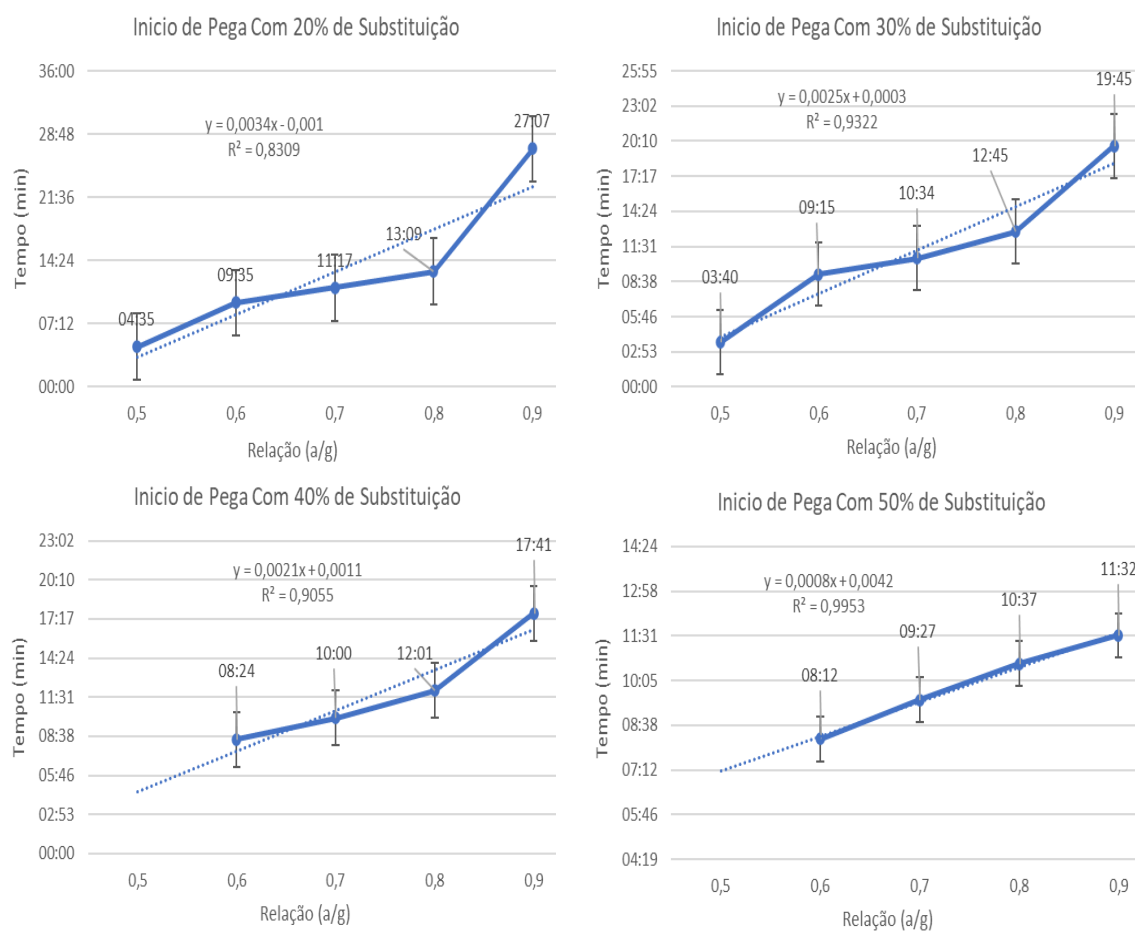
Figura 4.5 - Gráfico de superfície de resposta para início de pega



Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.6 - Correlações entre tempo de início de pega e relação a/g para cada teor de substituição





Fonte: Autor, (2021)

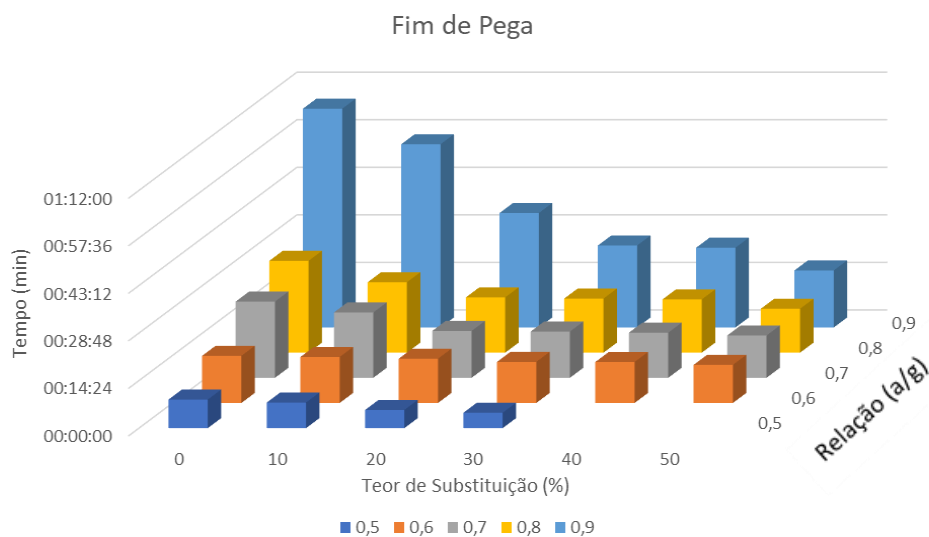
4.3.2. TEMPO DE FIM DE PEGA

A Tabela 4.7 apresenta os dados numéricos do efeito dos diferentes teores de pó de pedra utilizados nessa pesquisa nos tempos de fim de pega dos compósitos. Na Figura 4.7, pode-se ver a representação gráfica.

Tabela 4.7 - Valores do tempo de fim de pega

TEMPOS DE FIM DE PEGA – APARELHO DE VICAT (hora:min:seg)					
Teor de Substituição	Relação (a/g)				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0%	00:08:39	00:14:16	00:23:06	00:27:49	01:06:16
10%	00:07:45	00:13:55	00:19:48	00:21:19	00:55:30
20%	00:05:30	00:13:24	00:14:12	00:16:45	00:34:40
30%	00:04:39	00:12:26	00:14:00	00:16:23	00:24:50
40%		00:12:24	00:13:40	00:16:08	00:24:10
50%		00:11:32	00:12:49	00:13:18	00:17:17

Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.7 - Variação dos tempos de fim de pega

Fonte: Autor, (2021)

Nota-se que os tempos de fim de pega apresentados têm comportamento semelhante ao observado no tempo de início de pega.

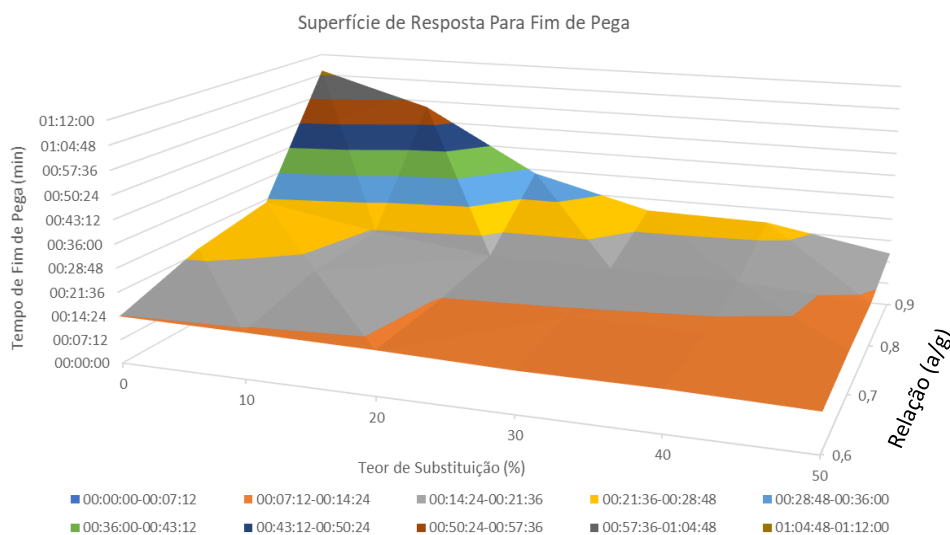
Um dado relevante verificado foi que para o traço com (a/g) de 0,7 sem substituição o início de pega ocorreu em 16min e 49s e o final de pega em 23min e 9s o que resulta em um intervalo de tempo decorrido entre o início e o fim de pega de 6min e 17s. Já o traço de (a/g) 0,7 com substituição de 40% que teve início de pega em 10min e 00s e final de pega em 13min e 10s. Assim, verifica-se que a variação no teor da

substituição ocasionou uma redução de 3min e 40s, no fim de pega o que comprova que a adição de 40% de pó de pedra na mistura ocasiona uma redução de 58,35% no tempo entre o início e o fim de pega. Diminuição essa que foi observada em todas as misturas analisadas.

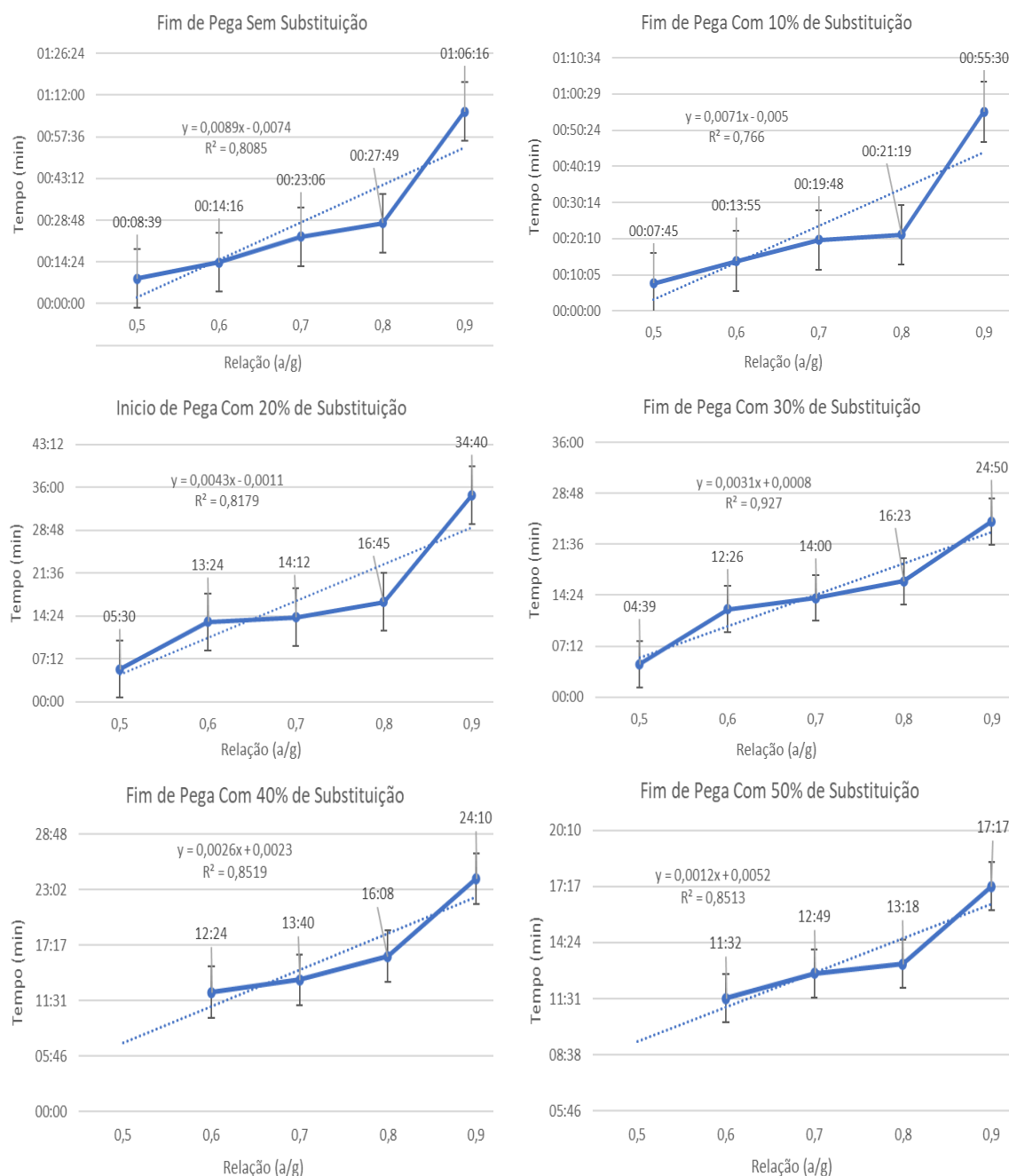
Na Figura 4.8, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para o fim de pega dos corpos de prova ensaiados.

Os resultados obtidos para o fim de pega foram semelhantes aos encontrados para o início de pega havendo também para os compósitos com substituição variando entre 0 e 30% um rápido crescimento do tempo de fim de pega para traços com relação (a/g) de 0,9. Os dados para os corpos de prova com teores de 40% e 50% de substituição se mostraram mais lineares, mas ainda apresentando para os corpos de prova com relação (a/g) 0,9 valores acentuados no incremento no tempo de início de pega quando comparados as demais relações (a/g). Os gráficos de todos os traços com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.9.

Figura 4.8 - Gráfico de superfície de resposta para fim de pega



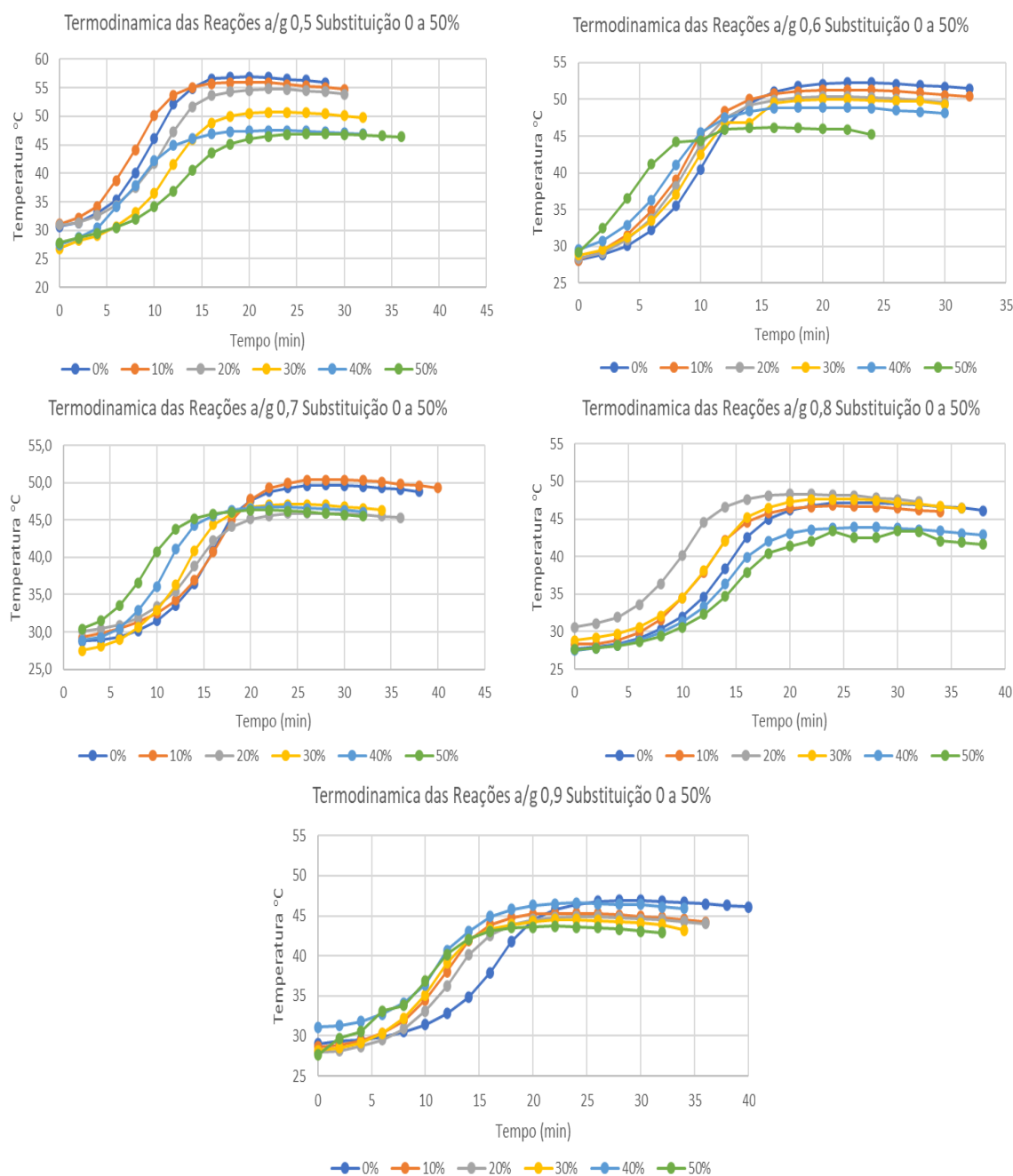
Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.9 - Correlações entre fim de pega e relação a/g para cada teor de substituição

Fonte: Autor, (2021)

4.3.3. TERMODINÂMICA DAS REAÇÕES DAS PASTAS DE GESSO

No ensaio de calorimetria, em todas as misturas, identificou-se um comportamento típico das curvas calorimétricas em pastas de gesso. Os gráficos obtidos estão exibidos na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Curvas calorimétricas com diferentes teores de substituição

Fonte: Autor, (2021)

Analisando a Figura 4.10, percebe-se uma redução no período de indução das pastas com incorporação do pó de pedra, quando comparados com as pastas de referência, produzindo um aumento na velocidade das reações de hidratação. Esse fenômeno ocorre porque os grãos de pó de pedra atuam como núcleo de cristalização nas pastas.

Na comparação entre as granulometrias, identificam-se comportamentos similares, entretanto o estágio 2 das curvas (estágio de aceleração e início da pega) as

curvas se mostram com menor ângulo de inclinação nas misturas com resíduo. Isso se justifica, porque o pó de pedra pelo mesmo motivo que ele reduz o período de indução formando núcleos de cristalização provoca a aceleração das reações.

Observou-se que o aumento no teor de resíduo além de alterar os tempos de início e fim de pega, promove uma diminuição no pico da temperatura máxima, o que é justo, porque a quantidade de ligante vai diminuído.

Analisando-se as misturas com relação (a/g) 0,9 nota-se que a adição do pó de pedra não alterou significativamente a temperatura máxima de hidratação da pasta visto que ao se comparar as misturas sem substituição que atingiu a temperatura máxima em 30min e a mistura com 50% de substituição que teve a sua temperatura máxima atingida em 24 min. Ocorreu um decréscimo nesse tempo de 20%.

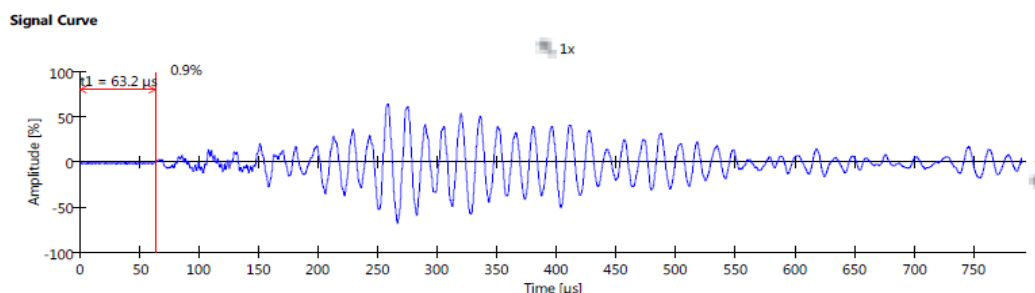
Ao verificar-se os dados obtidos nas misturas com relação (a/g) 0,6 percebeu-se que com o incremento da substituição houve um gradual decréscimo do calor máximo de hidratação atingido. Isto se deve ao fato que parte do gesso, material responsável pelas reações exotérmicas, foi substituído por material inerte que não libera calor, diminuindo consequentemente o calor total liberado no processo de hidratação. O comportamento observado nesse traço corrobora as análises anteriores.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.4.1. ENSAIO DE ULTRASSOM

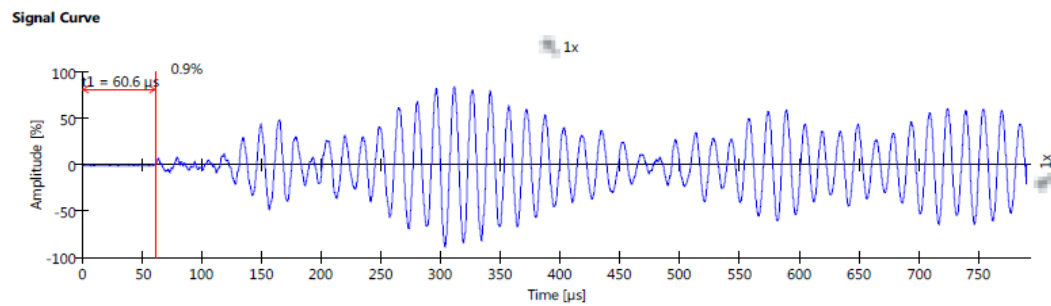
Nas Figuras de 4.11 a 4.16 são apresentados os espectros de onda dos corpos de prova com diferentes teores de substituição, com a relação água/gesso igual a 0,60.

Figura 4.11 - Espectro de ondas dos corpos de prova sem substituição



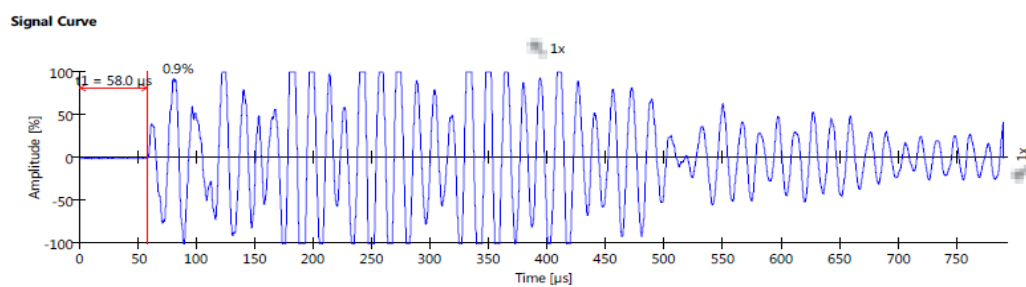
Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.12 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 10% substituição



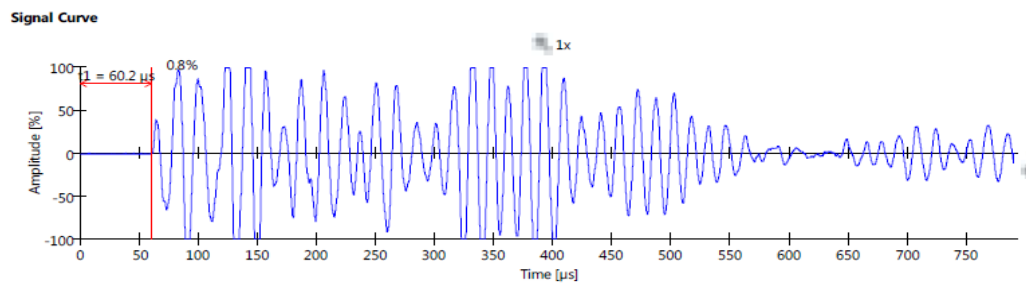
Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.13 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 20% substituição



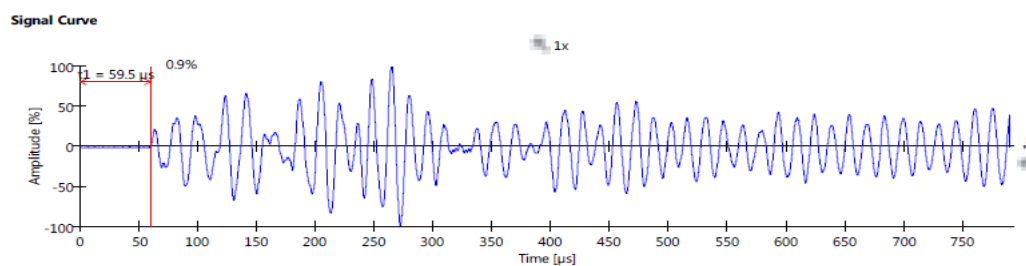
Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.14 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 30% substituição

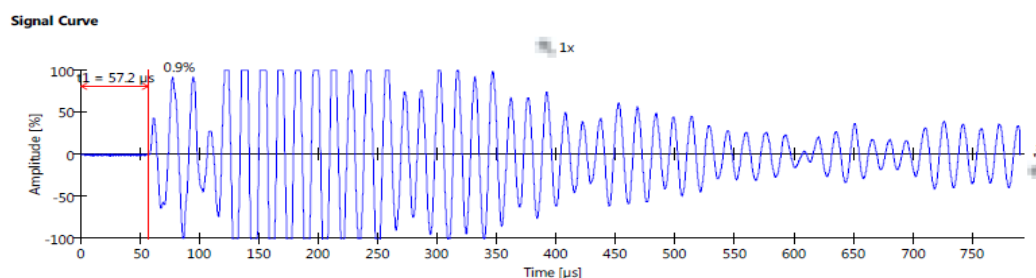


Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.15 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 40% substituição



Fonte: Autor, (2021)

Figura 4.16 - Espectro de ondas dos corpos de prova com 50% substituição

Fonte: Autor, (2021)

Os resultados obtidos pela medição das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas foram associados à resistência à compressão como se vê na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resistencia a compressão e velocidade ultrassônica dos corpos de prova

CARACTERIZAÇÃO ULTRASSÔNICA			
Corpo de Prova	Resistencia a Compressão (MPa)	Velocidade ultrassônica (m/s)	Tempo (μs)
CP com 0% de Subs. (a/g) 0,6	7,57	2547	63.2
CP com 10% de Subs. e (a/g) 0,6	8,52	2657	60.6
CP com 20% de Subs. e (a/g) 0,6	10,46	2793	58.0
CP com 30% de Subs. e (a/g) 0,6	10,05	2674	60.2
CP com 40% de Subs. e (a/g) 0,6	10,03	2706	59.5
CP com 50% de Subs. e (a/g) 0,6	10,64	2815	57.2

Fonte: Autor, (2021)

Ao observar a Tabela 4.8, percebe-se uma tendência de as amostras que possuem valores de velocidade de propagação de onda maiores a terem maiores valores de resistência à compressão. Tal característica, pode ser explicada pelo fato de as amostras

mais resistentes terem maior densidade e compacidade, viabilizando um meio contínuo com menor índice de vazios por onde a onda se propaga de maneira mais rápida.

Com os dados de velocidade do pulso ultrassônico global e resistência à compressão do elemento, foram traçadas curvas de correlação por regressão não linear simples.

Os ensaios foram feitos após a constância de massa dos corpos de prova.

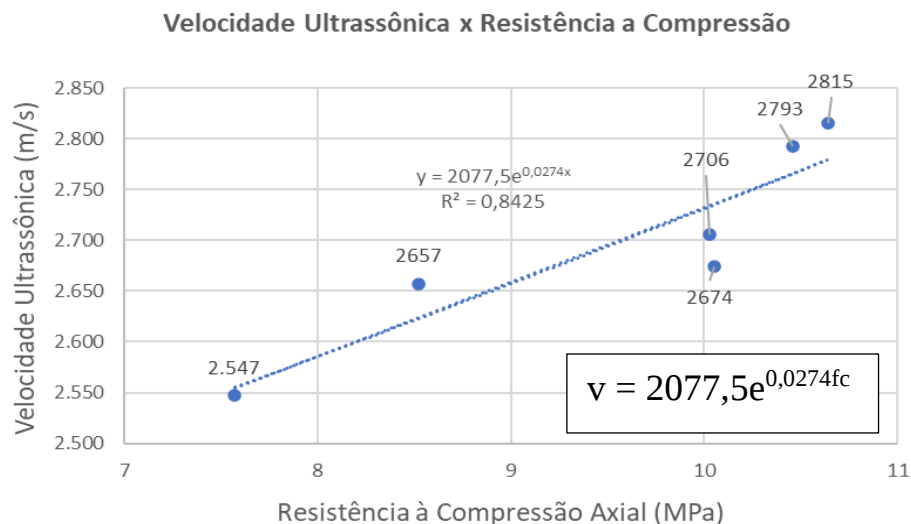
Na escolha do tipo de curva, aquele que conduz a maior r^2 é considerado o que melhor se ajusta. A Tabela 4.9 apresenta as correlações testadas. A correlação exponencial foi a que conduziu a melhor precisão, mas as demais expressões estão próximas.

Tabela 4.9 - Correlações testadas entre resistência a compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica

Correlação	Tipo de curva	Equação	r^2
Resistência à	Exponencial	$y = 2077,5e^{0,0274x}$	0,8425
Compressão X	Linear	$y = 73,157x + 2000,4$	0,8367
Velocidade de	Logarítmica	$y = 657,72\ln(x) + 1219,7$	0,8285
Propagação	Potência	$y = 1551x^{0,2461}$	0,8354

Fonte: Autor, (2021)

Ao se analisar a relação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão descrita pela curva exponencial mostrada na Figura 4.17, observa-se um índice de correlação $R^2 = 0,8425$. Regra geral, este valor encontrado para R^2 está próximo de 1, valor de referência considerado ideal para efeitos de correlação. Isso mostra a boa correlação existente entre a velocidade de propagação da onda do ultrassom e a resistência a compressão dos corpos de prova.

Figura 4.17 - Velocidade do pulso ultrassônico global x resistência à compressão axial

Note-se que o aspecto da expressão exponencial se aproxima muito de uma reta. Como o coeficiente de correlação da expressão linear é muito próxima da exponencial, pode-se obter, a partir da primeira, a resistência em função da velocidade, o que é de maior interesse para o engenheiro.

Fazendo-se $v = y$ e $fc = x$ (resistência à compressão) então a partir de:

$$y = 73,157x + 2000,4$$

tira-se

$$fc = 0,01367.v - 27,34 \quad (R^2 = 0,837), \quad \text{com } v \text{ em m/s e } fc \text{ em MPa}$$

Lanzon e Ruiz (2012) acharam uma velocidade de pulso ultrassônico de 2381 m/s, com gesso da região da Catalunha, Espanha. No entanto, sobre a relação água gesso, os autores apenas informam que os experimentos deles foram feitos “with a constant water/binder ratio”.

A título de informação, nos concretos, a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas está entre 3000 m/s a 4500 m/s.

4.4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

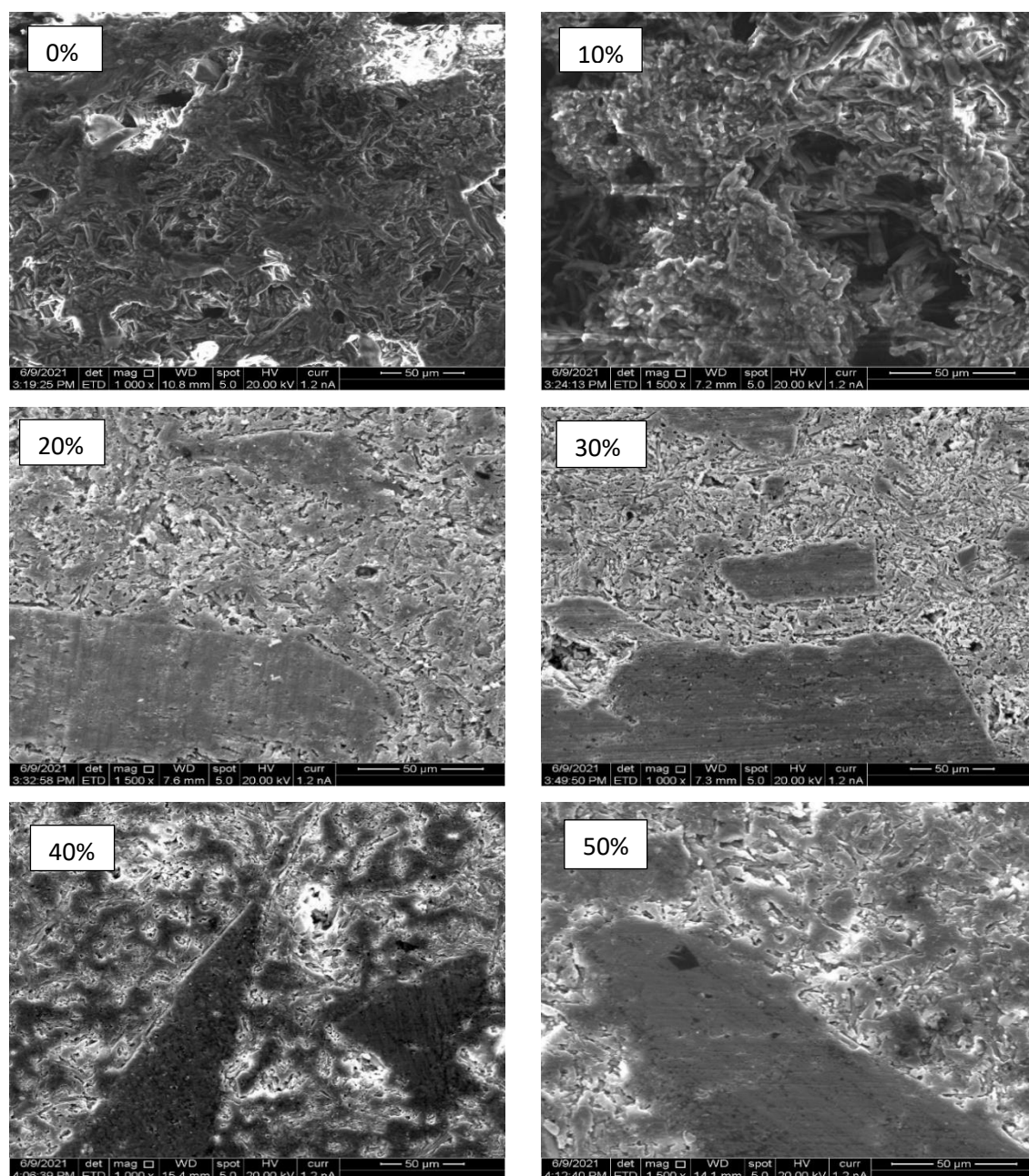
Foram escolhidos para se fazer o MEV os compósitos com relação água/gesso igual a 0,6 porque foi o valor empregado nos blocos da parte 2 deste trabalho.

Aqui vão se apresentar parte das imagens obtidas, e no anexo constam em maior número.

Na Figura 4.18, tem-se imagens com escala de 50 μm marcada no fundo de cada imagem. Nota-se que com 0% e 10 % de pó de pedra não há grandes diferenças na estrutura do material que se apresenta bem poroso. Nos maiores teores de incorporação, a porosidade da matriz aparenta ser menor.

Nas imagens pode-se ver a presença dos grãos de pó de pedra dispersos na matriz de gesso.

Figura 4.18 - Microscopia dos compósitos com relação a/g = 0,6

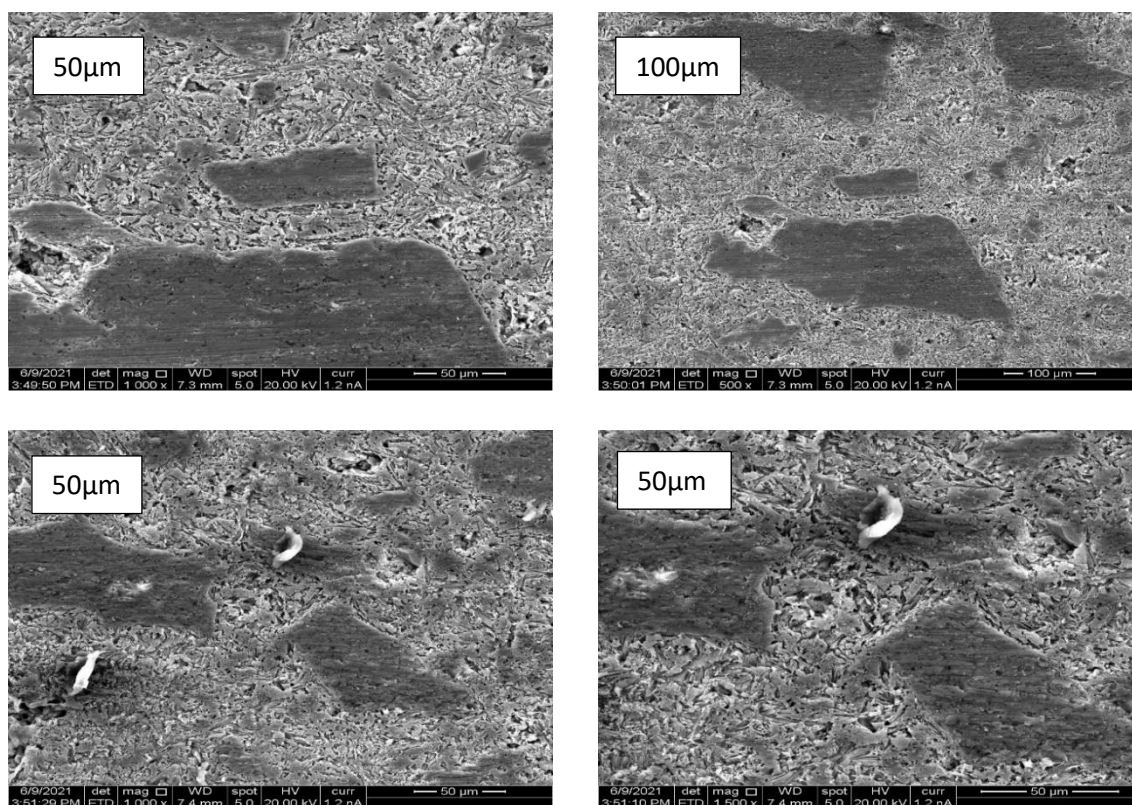


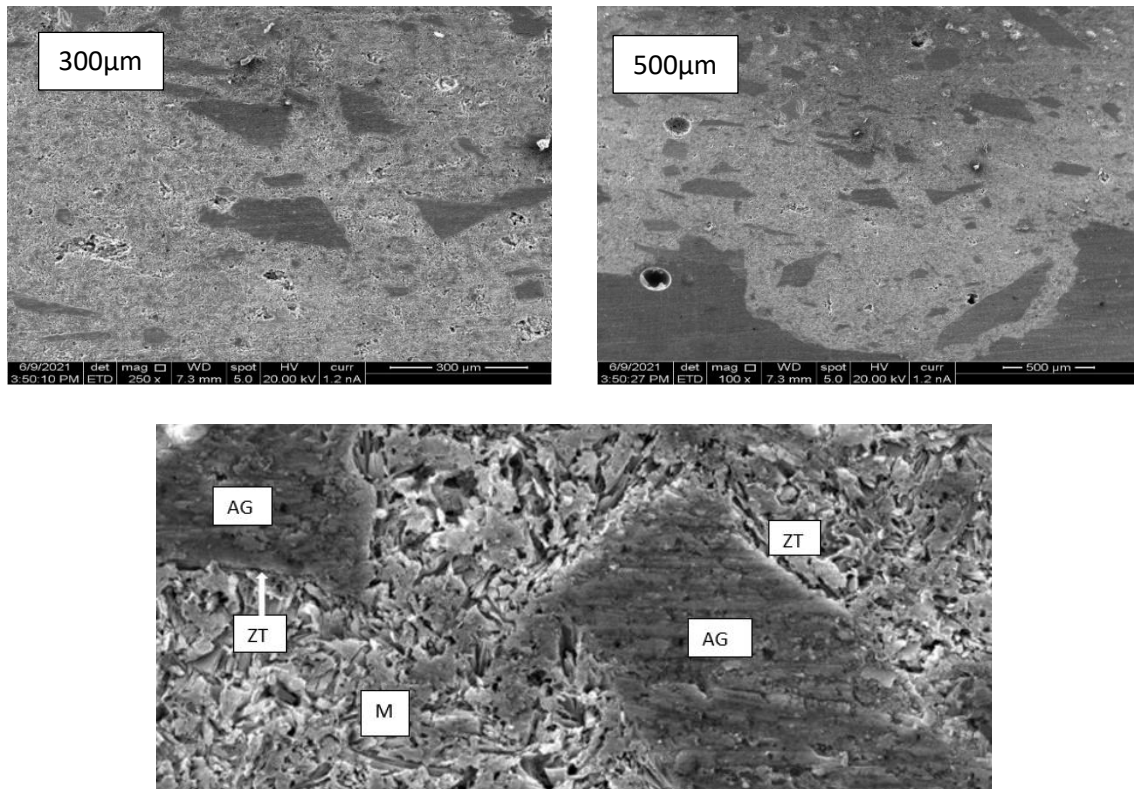
Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 4.19, tem-se imagens do compósito com 30% de pó de pedra em diversas escalas. Macroscopicamente tem-se a impressão de uma aderência perfeita entre o agregado e a pasta. Porém, analisando-se ao microscópio vê-se que na ligação há intensa porosidade, vista na última imagem da Figura, aparentemente superior à da matriz, formando como se fosse uma zona de transição.

A alta porosidade é proveniente da evaporação de parte da água não consumida pela reação química. Poros maiores são devidos à incorporação de ar durante o processo de mistura.

Figura 4.19 - Imagens do compósito com 30% de pó de pedra em diferentes aproximações, onde: AG - agregado; M - matriz; ZT - zona de transição

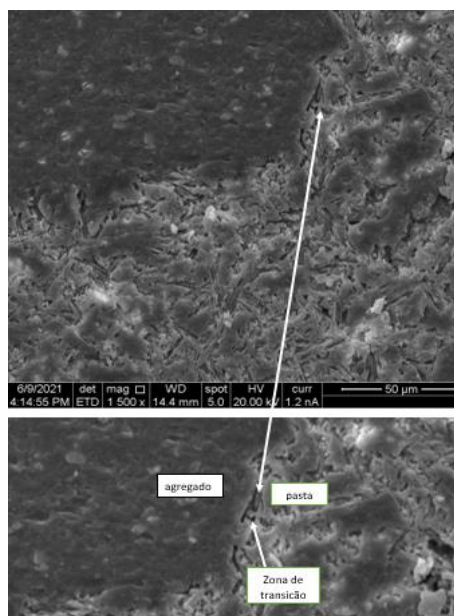




Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 4.20, tem-se uma imagem do material em estudo com 50 % de pó de pedra. Aqui também se vê que a ligação da pasta com o agregado não é perfeita. A quantidade de vazios é elevada.

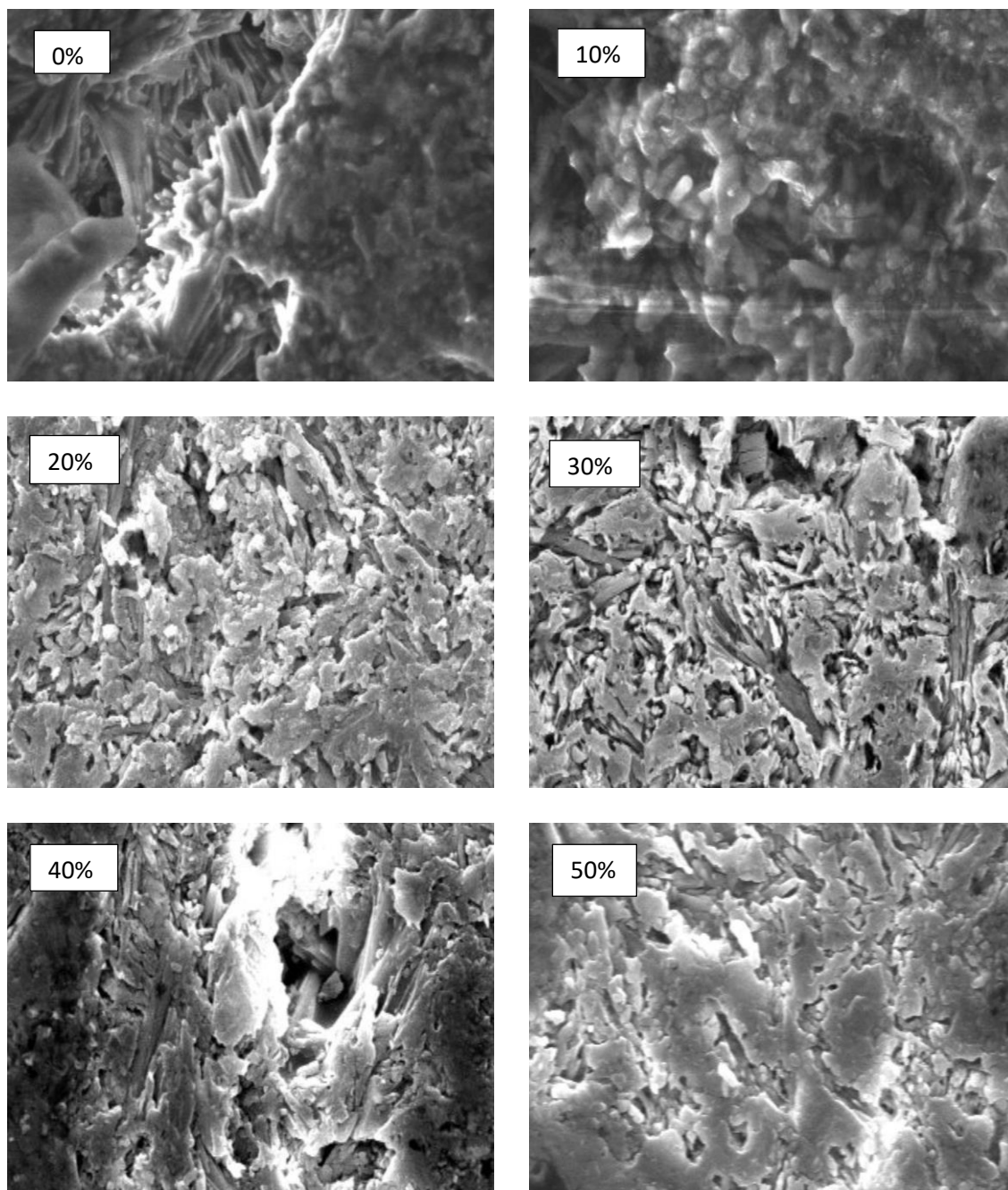
Figura 4.20 - Imagem de compósito com 50% de pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

Na figura 4.21, tem-se uma tentativa de verificar a forma dos cristais do gesso hidratado. Estes dependem de numerosos fatores, desde a relação água/gesso até a finura dos grãos e mesmo presença de aditivos.

Figura 4.21 - Forma dos cristais do gesso hidratado

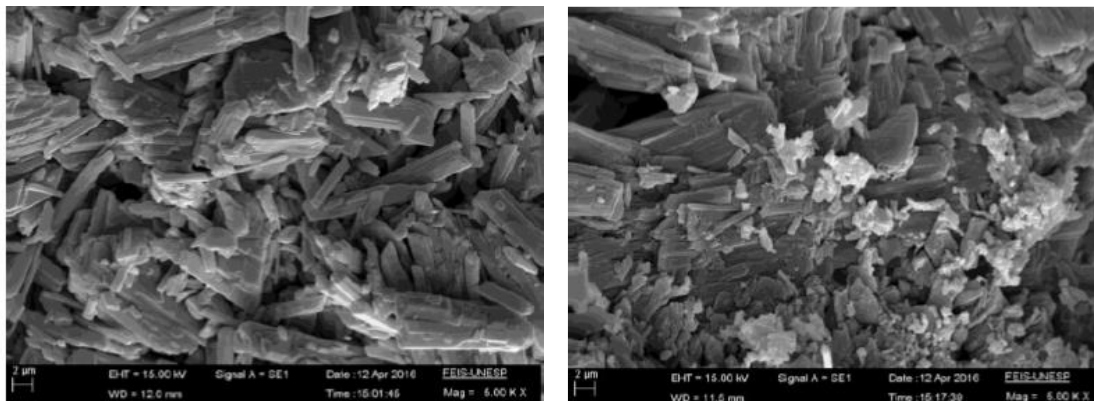


Fonte: Autor, (2021)

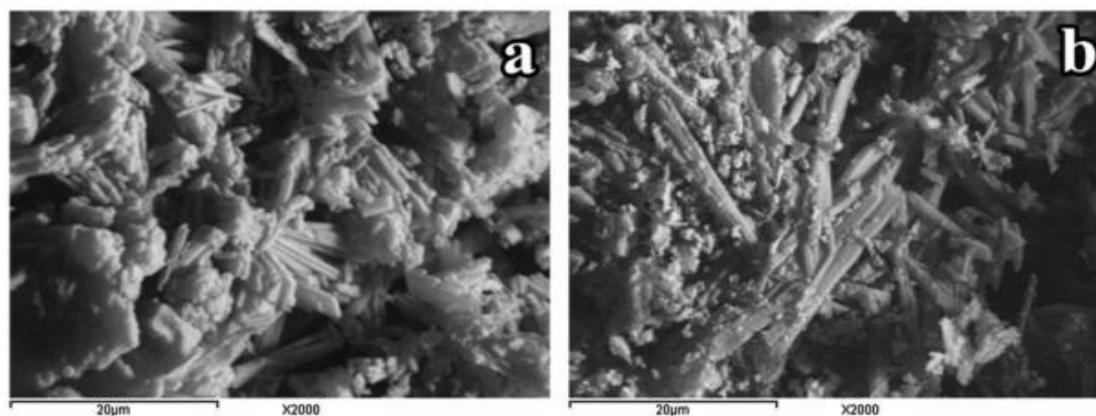
Torna-se difícil nessa escala verificar a real morfologia dos cristais de gesso após sua hidratação. Várias são as formas de abertura e interconexão, estando os poros de

contato espalhados por toda a seção. Aparentemente na matriz sem adição, aparecem alguns cristais aciculares, difíceis de se ver nos demais casos. Com 10% de pó de pedra, a morfologia parece ser bem granular. Com maiores teores de agregado, há uma grande diversidade na forma dos cristais. A literatura mostra que, de fato, não há uma morfologia única, como se vê na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Exemplo da variabilidade da morfologia dos cristais de gesso



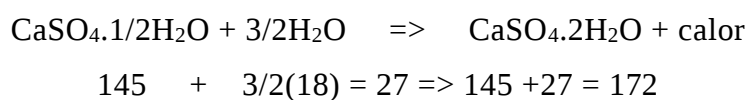
Fonte: Urzulini et al., (2016)



Fonte: A.A. Khalil et al., (2018)

4.4.3. ABSORÇÃO POR IMERSÃO TOTAL

A absorção de água em um material depende da quantidade de poros permeáveis nele existentes. No caso do gesso, pode-se calcular a relação água/gesso teórica para hidratar o pó de hemi-hidratado, a partir das massas atômicas e da equação química:

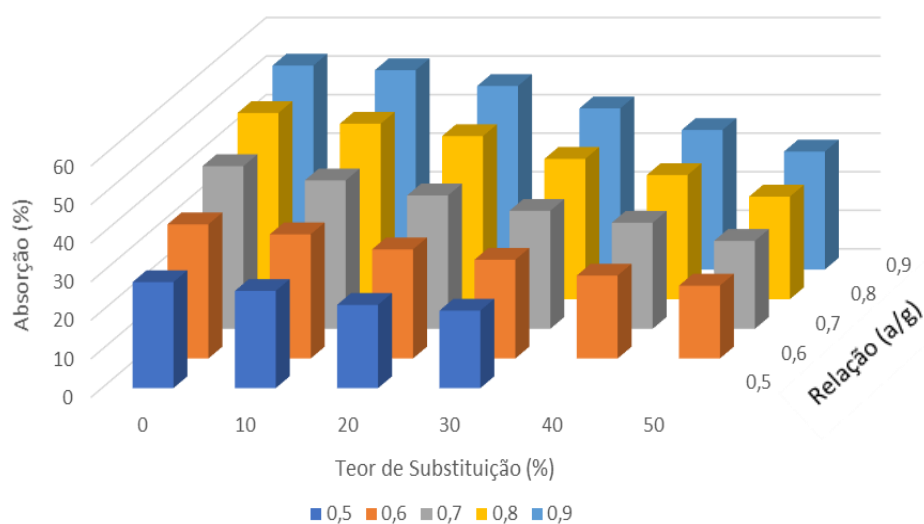


A relação água/gesso seria então: $= 27/145 = 0,1862$ que é aproximadamente 0,19.

Com essa relação a/g a quantidade de água é insuficiente para dar trabalhabilidade à pasta, de maneira similar ao que ocorre com o concreto de cimento Portland. Então se usa muito mais água que a necessária para a reação química. Após o endurecimento, a tendência é a maior parte da água que não reagiu quimicamente sair do material, provocando vazios. Resta apenas a água de equilíbrio com a umidade atmosférica.

Na Figura 4.23, apresenta-se a representação gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por imersão total dos corpos de prova dos compósitos em estudo.

Figura 4.23 – Absorção por imersão total em função do teor de substituição e da relação a/g



Fonte: Autor, (2021)

Analisando-se o gráfico acima verifica-se o efeito benéfico da adição do pó de pedra na diminuição da absorção por imersão total. De fato, o material pó de pedra de origem granítica absorve muito menos água que a pasta de gesso endurecida. Então, à medida que se inclui mais pó de pedra menor vai ser a absorção.

Comparando-se os resultados da série com relação (a/g) 0,9 com teores de 0% e 50% de substituição pode-se verificar uma diminuição na absorção em 46,1%.

Outro dado observado, nos corpos de prova com relação (a/g) 0,9 é o fato de o decréscimo da absorção não ocorrer de forma linear. No traço com substituição de 10%

tem-se um decréscimo de 4,43% em relação à referência. Já o compósito com 20% de pó de pedra conduz a um mais rápido aumento na diminuição da absorção que passou a 9,1% quase dobrando em termos percentuais.

Para essa mesma serie a faixa de variação do percentual de substituição mais significativa ocorreu quando se variou os teores de substituição de 30% para 40%, que resultou em valores de absorção de 33,0% e 40,2% respectivamente, sendo a variação do teor de substituição nessa faixa responsável pela redução da absorção em 17,9%.

Para a série com relação (a/g) 0,8 verificou-se que os efeitos benéficos da adição do pó de pedra no tocante a absorção por imersão total, foi relevante mesmo para pequenos percentuais de substituição. O traço sem substituição resultou em uma absorção de 47,1% quando comparado ao traço com 10% que resultou em uma absorção de 42,6%, redução de 9,5%.

Para essa mesma serie no tocante a diminuição da absorção ao se comparar os traços com 0 e 50% de substituição verifica-se uma redução de 47,1%, praticamente não se alterando quando comparado a série com relação (a/g) 0,9 com as mesmas relações de substituição que foi de 46,1% resultando em um decréscimo de 2,1%.

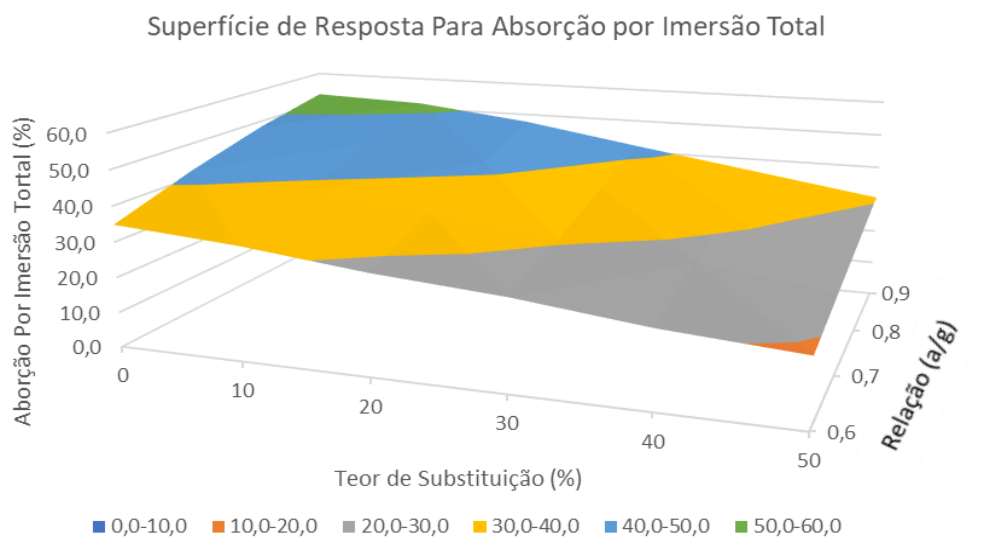
Para a série com relação (a/g) de 0,7, pode-se comparar com os valores obtidos por Knauf (SAVI, 2012) e Eires et al. (2007 apud SAVI, 2012), que estudaram pastas com essa mesma relação (a/g), chegaram a valores de 40% a 45%. Aqui os resultados foram um pouco inferiores, 39,1 %, mas compatíveis. Pode-se concluir que a substituição foi benéfica para todos os teores estudados. Para a mistura com 30% de substituição verificou-se uma diminuição na absorção em 37,8% já no traço com substituição de 50% a redução foi ainda mais significativa passando a 50,2%.

Com relação a série com (a/g) 0,6 e substituição de 50% verificou-se uma redução na absorção de 46,6% sendo um pouco menor quando comparada a serie anterior que foi de 50,2% isso se justifica pela diminuição da relação água/gesso, que resulta em corpos de prova mais compactos e com a tendência de absorverem menores quantidades de água. Devido a essa característica a diferença na absorção entre o traço sem substituição e o traço com 50% para a mesma relação (a/g) tende também a ser menor.

Nos corpos de prova da série com relação (a/g) 0,5 também se verifica uma tendência de diminuição na absorção com o aumento do teor da adição do pó de pedra. Quando comparados os corpos de prova dessa série sem substituição com os corpos de prova com 30%, se verifica uma redução na absorção de 29,0%.

Na Figura 4.24, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a absorção por imersão total dos corpos de prova ensaiados nas diversas series. Pode-se observar o efeito da substituição do gesso por pó de pedra em cada uma das series ensaiadas.

Figura 4.24 - Gráfico de superfície de resposta para absorção por imersão total



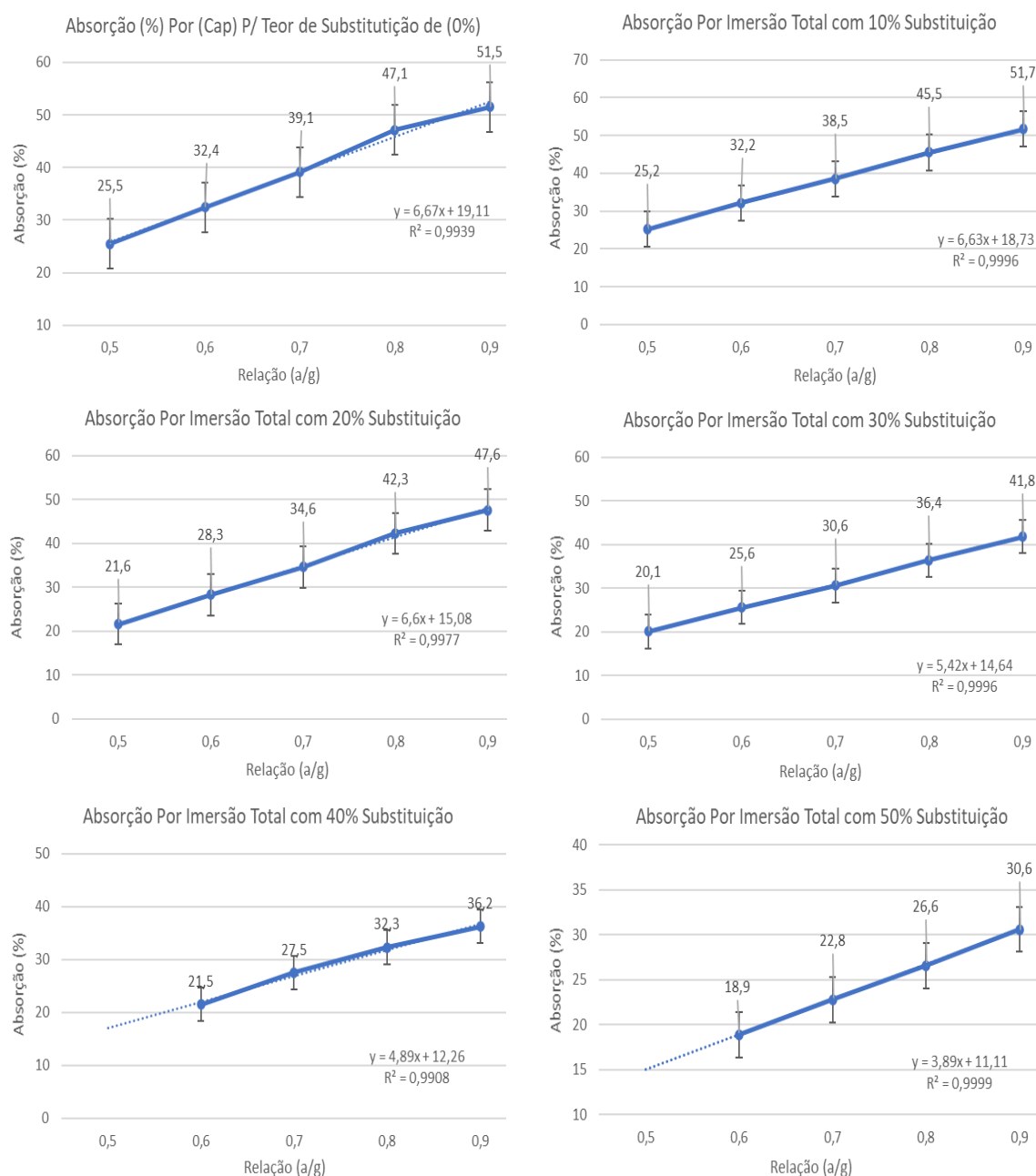
Fonte: Autor, (2021)

Também se verificou que a variação da relação (a/g) produz efeitos na diminuição da absorção. Ao se comparar corpos de provas que foram moldados com relação (a/g) de 0,5 e 0,9, para o mesmo teor de substituição pode-se verificar uma diminuição de até 50,5% na absorção. Isso é lógico porque a quantidade de poros permeáveis aumenta com a relação água/gesso.

Esses resultados foram alcançados devido ao aumento da compactidade dos corpos de prova, tendo o pó de pedra preenchido os vazios que antes seriam ocupados por ar, dificultando a penetração da água, além da diminuição da relação (a/g) fazer com que haja menos poros provenientes da evaporação da água após secagem dos corpos de prova.

Outra característica que pode ser observada, é uma quase perfeita linearidade nos valores de absorção quando da variação da relação (a/g) para um mesmo teor de substituição, com o coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , muito próximo de 1. Os gráficos de todos os traços com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura, 4.25. Nos traços com 10% e 50% de substituição foram encontrados valores para o R^2 de 0,9996 e 0,9999 respectivamente.

Figura 4.25 - Correlação entre imersão total e relação a/g para cada teor de substituição

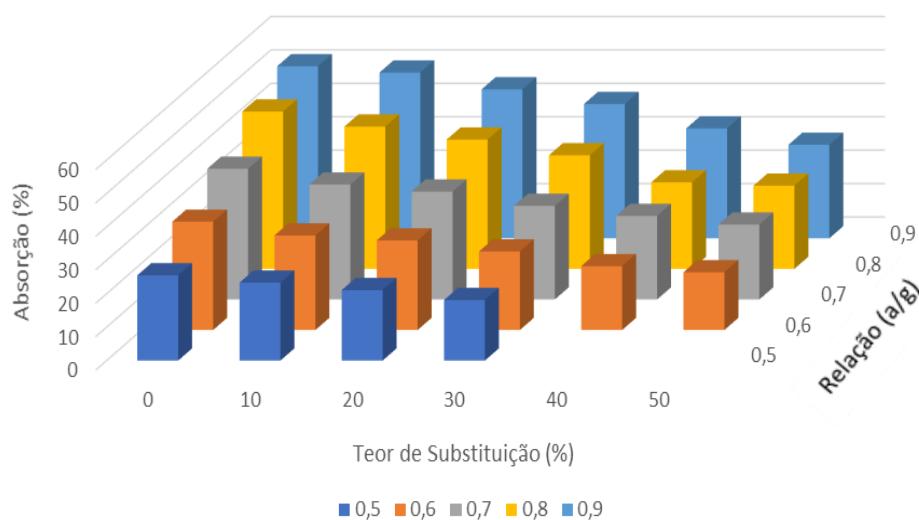


Fonte: Autor, (2021)

4.4.4. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Na Figura 4.26, apresenta-se a representação gráfica dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade dos compósitos.

Figura 4.26 - Absorção por capilaridade em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

Os resultados observados na absorção por capilaridade foram similares aos encontrados para os ensaios de absorção total, havendo em todas as series uma diminuição da absorção com o incremento do teor de substituição.

Na série com relação (a/g) 0,9, ao se comparar os corpos de prova de referência com aqueles com 50% de substituição, houve uma redução na absorção capilar em 42,5%. Já na absorção por imersão total houve redução de 46,1%, verificando-se que a adição de pó de pedra foi mais efetiva em reduzir essa propriedade.

No traço com substituição de 40%, verifica-se que o efeito desse percentual de substituição produziu uma redução na absorção por capilaridade em 32,4%.

Na série com relação (a/g) 0,8 observa-se que a diminuição na absorção, quando se utiliza o incremento máximo da substituição, em comparação aos corpos de prova sem qualquer substituição foi de 44,9%.

A faixa mais efetiva dessa serie na diminuição da absorção capilar, ocorreu quando os teores de substituição foram alterados de 20% para 30% o que produziu um decréscimo relativo de 13,9%.

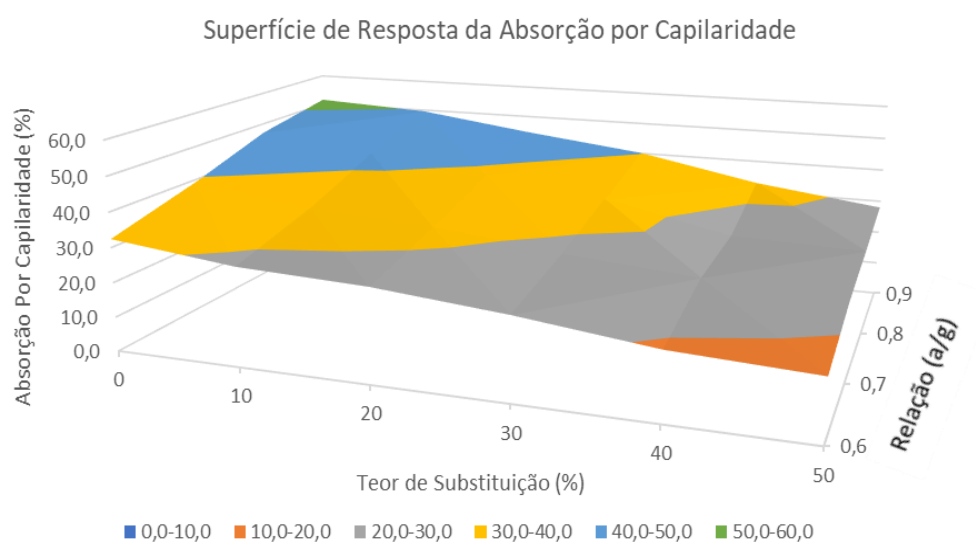
Na série com relação (a/g) 0,7, com 50% de pó de pedra a redução na absorção por capilaridade foi de 46,0% sendo o melhor valor encontrado em todas as series.

No traço com relação (a/g) 0,6 a redução total na absorção capilar foi de 45,7%, muito próximo ao valor encontrado para a série anterior.

Nos corpos de prova da série com relação (a/g) 0,5 também se verificou haver uma tendência na diminuição da absorção com o aumento do teor da adição do pó de pedra. Quando comparados os corpos de prova dessa série sem substituição com os corpos de prova com 30%, verifica-se uma redução da absorção na ordem de 27,2%.

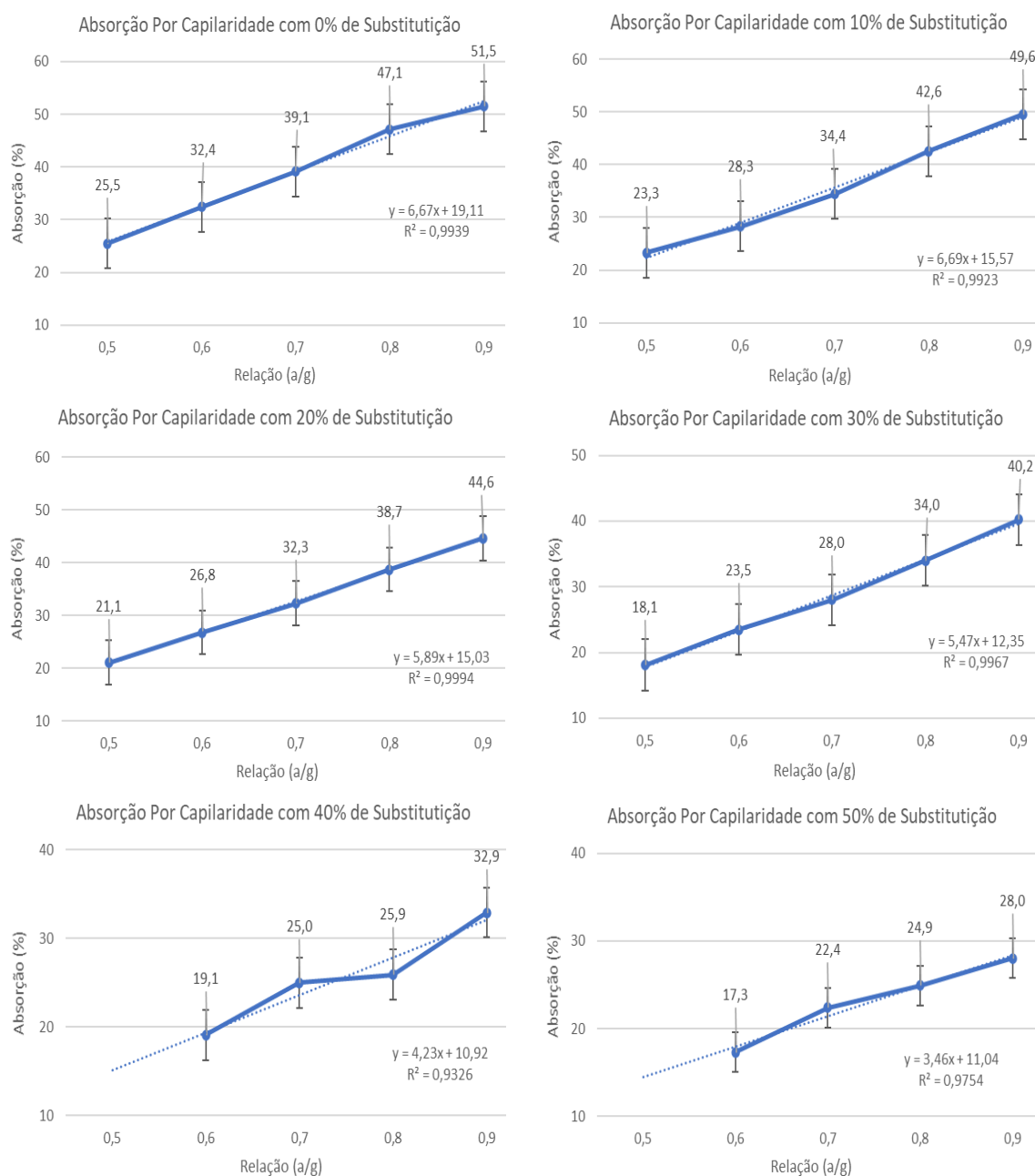
Na Figura 4.27, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a absorção por capilaridade dos corpos de prova ensaiados nas diversas series.

Figura 4.27 - Gráfico de superfície de resposta da absorção por capilaridade



Fonte: Autor, (2021)

Como observado na absorção por imersão total, na absorção por capilaridade houve uma quase perfeita linearidade nos valores da variação da absorção, quando da variação da relação (a/g) para um mesmo teor de substituição. Os gráficos de todos os traços com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.28. Nos traços com 20% e 30% de substituição foram encontrados valores para o R^2 de 0,9994 e 0,9967 respectivamente.

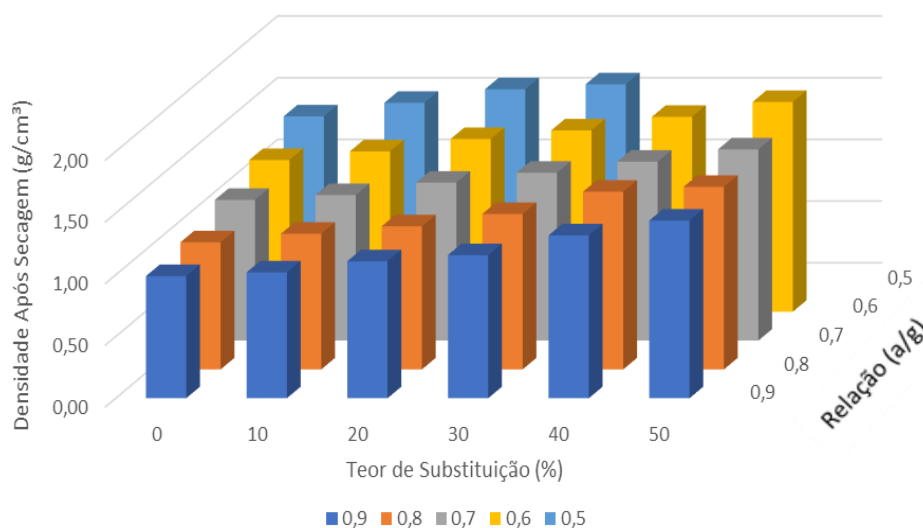
Figura 4.28 - Absorção por capilaridade

Fonte: Autor, (2021)

4.4.5. DENSIDADE

Na Figura 4.29 é apresentado o gráfico dos ensaios de densidade para todas as séries estudadas.

Figura 4.29 - Densidade dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

Ao se analisar o gráfico acima para todas as séries percebe-se que há uma tendência no aumento da densidade dos corpos de prova com o incremento da substituição, o que era de se esperar por conta da maior massa específica do pó de pedra em relação ao gesso.

Nos corpos de prova da relação (a/g) 0,9 verifica-se um aumento da densidade de 68,75% quando se usa 50% de pó de pedra no compósito.

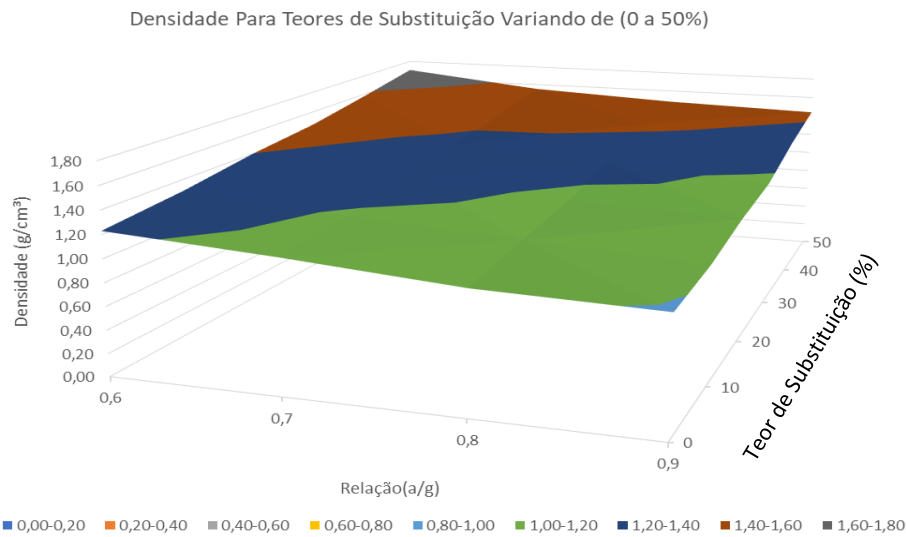
Na série com relação (a/g) 0,8 essa tendência de crescimento atingiu, praticamente o mesmo percentual, ficando com 69,59% o ganho na densidade dos corpos de prova.

Na relação (a/g) 0,7 o incremento na densidade foi de 73,55%.

Na relação (a/g) 0,6 o incremento na densidade foi de 72,35%.

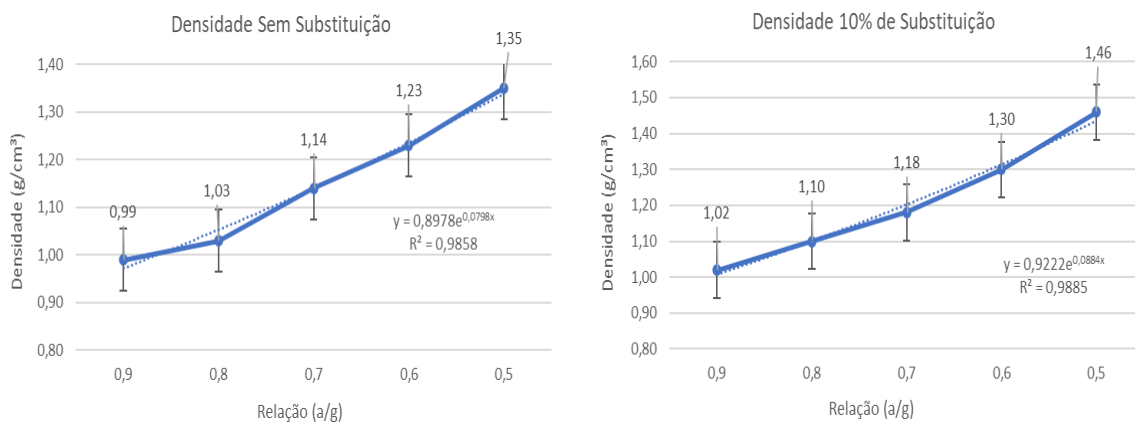
Já na relação (a/g) 0,5 quando comparados os corpos de prova de referência e os corpos de prova com 30% de substituição tem-se um aumento da densidade em 83,85%

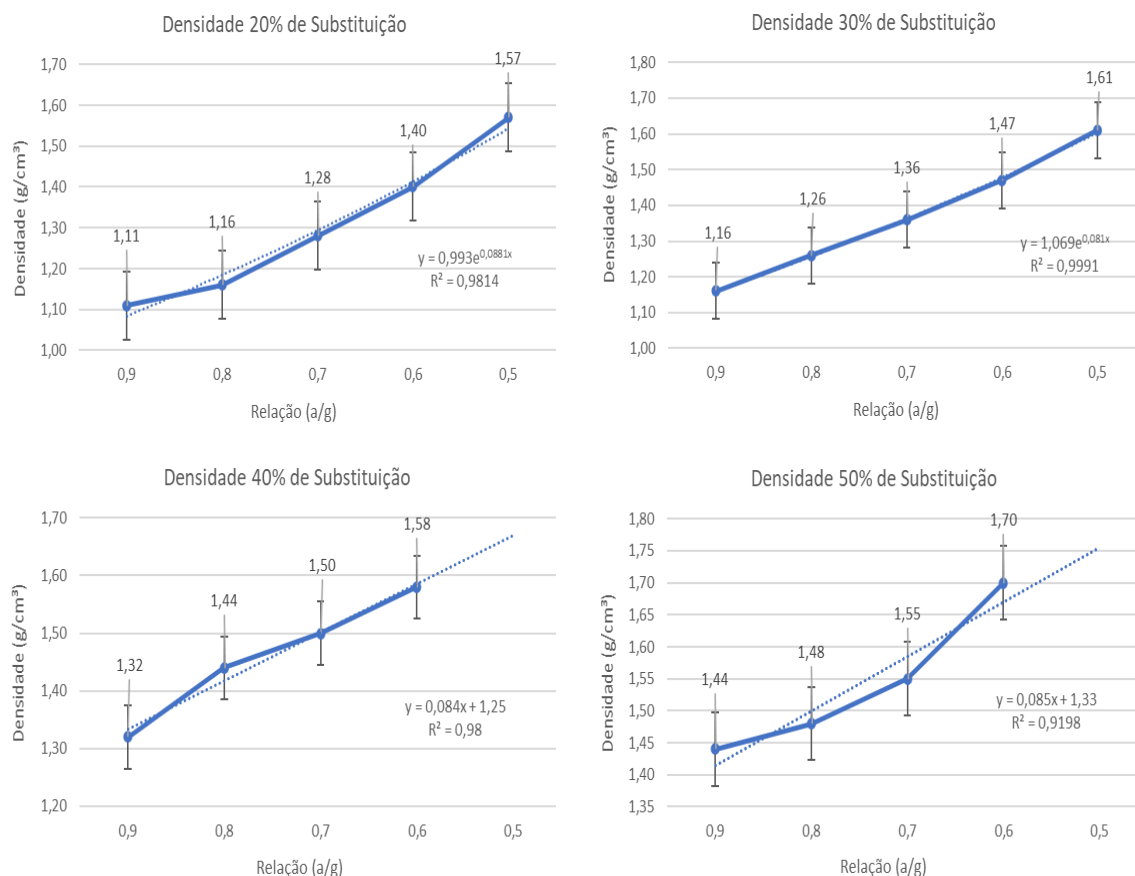
Na Figura 4.30, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a densidade dos corpos de prova ensaiados nas diversas series.

Figura 4.30 - Gráfico de superfície de resposta da densidade

Fonte: Autor, (2021)

Nos gráficos da Figura 4.31 verifica-se uma correlação exponencial entre o teor de substituição e o ganho de densidade dos corpos de prova. Ficando o valor de R^2 , próximo de 1. Os gráficos de todos os traços com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.31.

Figura 4.31 - Correlação entre a densidade e a relação a/g para os diferentes teores de pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

4.4.6. DUREZA SHORE (C)

Na Figura 4.32, é apresentada a representação gráfica dos ensaios de dureza para todas as séries estudadas.

Na série com (a/g) 0,9 percebe-se que há uma tendência no aumento na dureza Shore C nos corpos de prova com o incremento da substituição. Quando comparados os corpos de prova com teor de substituição de 50% com aqueles da referência percebe-se haver um aumento na dureza em 11,02%.

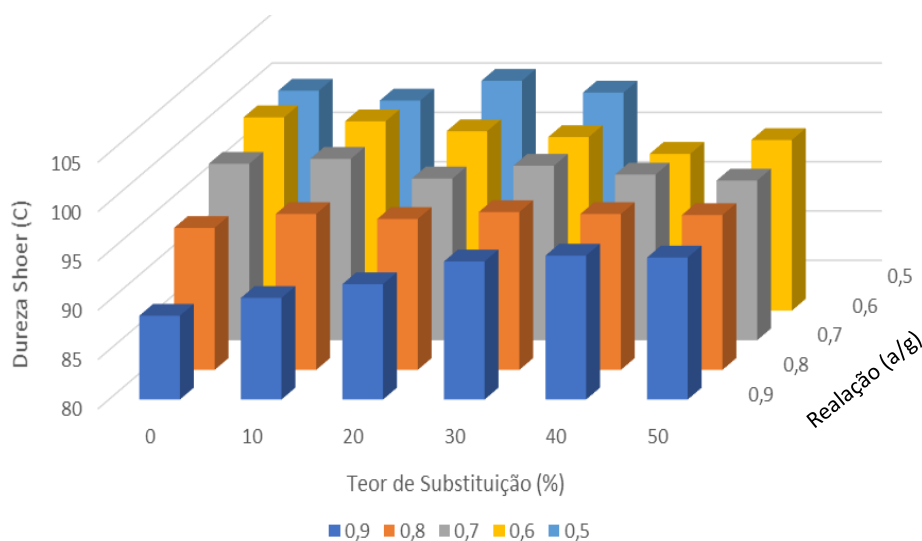
Os corpos de prova com teor de substituição de 20% foram os que menos tiveram efeito no aumento na dureza, mesmo assim ainda sendo superiores ao controle, produzindo um acréscimo nessa grandeza de 0,67%.

Quando alterados os percentuais de substituição de 30% para 50% percebe-se que o valor da dureza praticamente não se altera aumentando apenas 0,42%.

Para a série (a/g) 0,8 a tendência de aumento na dureza com o incremento da substituição se mantém, porém com efeitos menos relevantes. Ao analisarem-se os valores obtidos na mistura controle com relação a mistura com 50% de substituição

verifica-se que esse incremento produziu um aumento na dureza de 1,35%

Figura 4.32 - Dureza Shore em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

Observa-se também para essa série que o teor de substituição com resultado mais significativo na melhoria dessa grandeza foi de 30% que propiciou um aumento na dureza de 1,67%

O teor de substituição de 20% praticamente não produziu efeitos significativos na dureza.

Ao se aumentar os teores de substituição de 30% para 40 e 50% verifica-se um decréscimo na dureza do material.

Para a série com relação (a/g) 0,7, identifica-se um efeito interessante, a tendência de crescimento na dureza Shore C com o incremento da substituição se inverte. Essa tendência torna-se evidente quando comparados os resultados obtidos nos corpos de prova controle com aqueles com 50% de substituição onde se observa que houve um decréscimo de 1,73% na dureza.

Quando comparados a mistura com 30% de substituição com o de 50% verifica-se uma queda de 1,55%.

O único compósito que produziu efeito positivo no ganho de dureza quando comparado ao de referência foi o traço com 10% de substituição que propiciou o ganho quase irrelevante de 0,51%

Para a série (a/g) 0,6 verifica-se que a tendência de decréscimo da dureza Shore C com o incremento da substituição não apenas se manteve mas também aumentou. Diferentemente da série com relação (a/g) 0,7 em que com a substituição de 10% na qual ainda é possível verificar uma melhora nessa propriedade, na série com relação (a/g) 0,6 todas as misturas resultaram em valores inferiores aos obtidos com relação a mistura controle.

Quando se compara a mistura controle com aquela com 40% de substituição do gesso por pó de pedra verifica-se um decréscimo de 3,71% na dureza.

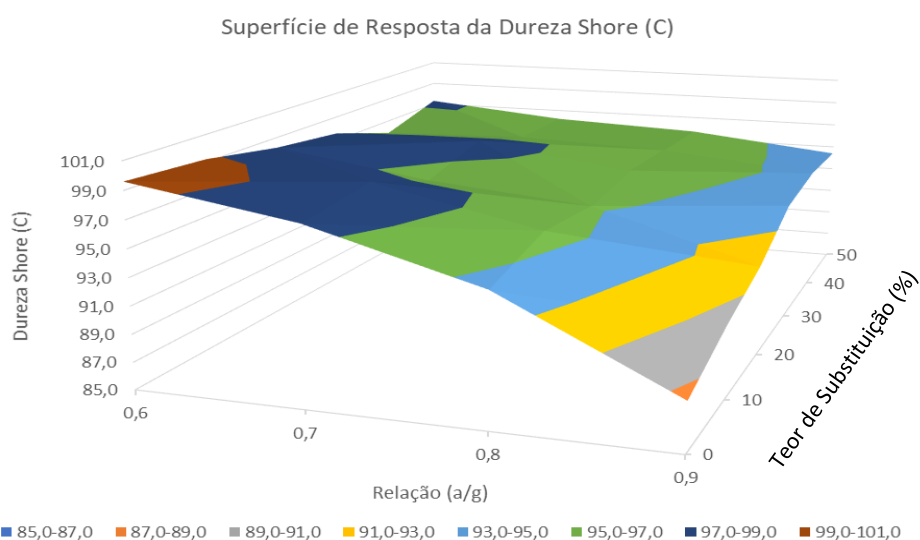
Embora essa tendência de queda na dureza Shore seja clara, em termos percentuais ela é pequena o que não produziria qualquer efeito prático significativo.

Ao se comparar as misturas com 10% e 30% de substituição percebe-se que esse incremento produz um decréscimo de apenas 2,02% na dureza.

Para a série (a/g) 0,5 os dados obtidos nessa serie permite chegar à conclusão de que o aumento do teor de substituição produz um aumento na dureza Shore C quase inexpressivo. Ao comparar os valores da dureza Shore C para os corpos de prova sem substituição com os corpos de prova com 30% verifica-se um acréscimo de 3,1% nessa grandeza.

Na Figura 4.33, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a dureza Shore C dos corpos de prova ensaiados nas diversas series.

Figura 4.33 - Gráfico de superfície de resposta da dureza Shore C

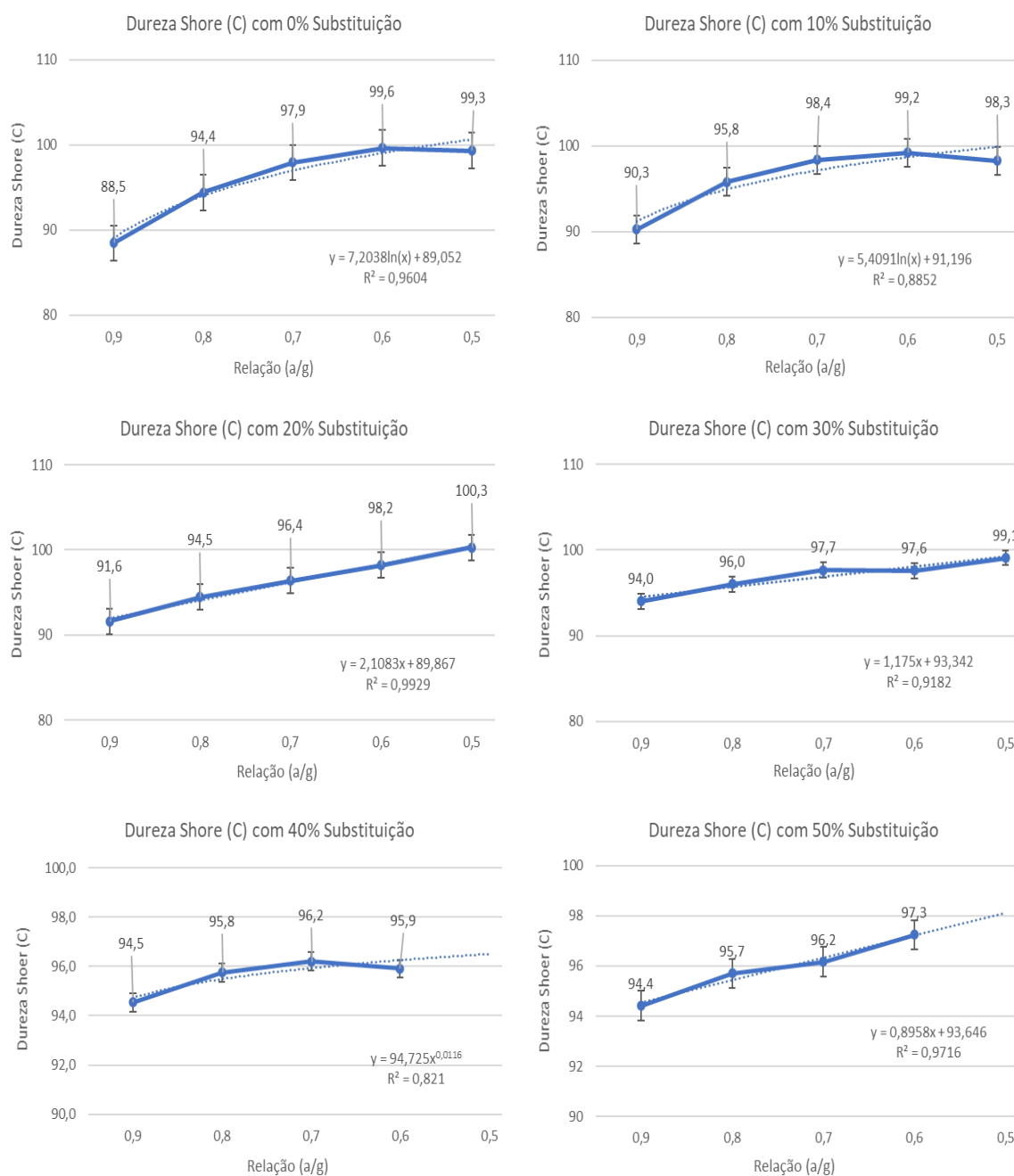


Fonte: Autor, (2021)

Aqui também pode-se aproximar a dureza Shore C com a relação a/g por uma relação linear. Há casos em que o coeficiente R^2 fica próximo de 1. Nas series com 20 e 30% de substituição foram encontrados valores para o R^2 de 0,9929 e 0,9182 respectivamente.

Os gráficos relativos a todas as misturas com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.34.

Figura 4.34 - Dureza Shore C para braços com relação (a/g) de 0,5 a 0,9

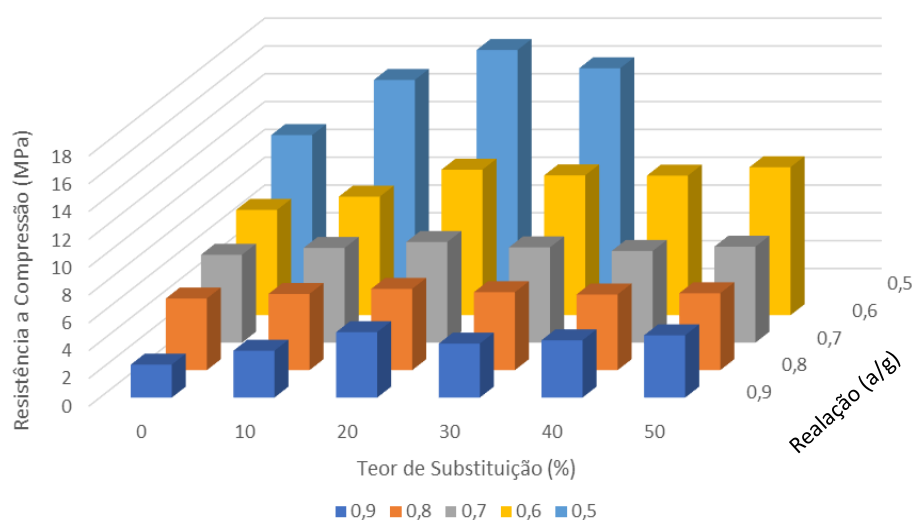


Fonte: Autor, (2021)

4.4.7. RESISTENCIA A COMPRESSÃO

Na Figura 4.35, apresenta-se os resultados dos ensaios de resistência a compressão dos corpos de prova dos compósitos.

Figura 4.35 - Resistencia a compressão dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

Ao se analisar o gráfico acima verifica-se o efeito benéfico da adição do pó de pedra no aumento da resistência mecânica dos corpos de prova. Comparados os resultados da série com relação (a/g) 0,9 sem substituição e aquela com 20% pode-se verificar um aumento considerável na resistência a compressão, 98,31%, quase dobrando a resistência. Em todos os outros traços, embora tenha havido um pequeno decréscimo quando comparado com o de 20% de substituição, todos permaneceram com valores da resistência a compressão superiores ao corpo de prova controle. Com 30%, 40% e 50% houve acréscimos na resistência a compressão de 63,7%, 73,8% e 89,0%, respectivamente.

Outro fator relevante é que mesmo para grandes percentuais de substituição como no compósito com 50% de substituição os resultados da resistência a compressão foram influenciados de maneira benéfica pela substituição do gesso pelo pó de pedra.

Para a série com relação (a/g) 0,8, verificou-se que os efeitos benéficos da adição do pó de pedra no tocante a resistência à compressão, embora percentualmente menos efetiva também produziu bons resultados.

Quando se compara a resistência a compressão dos corpos de prova controle e os corpos de prova com 20% de substituição observa-se um acréscimo na resistência em 13,39%.

Mesmo nos corpos de prova com 40% de substituição que apresentaram os piores resultados, eles ainda tiveram resistência de 5,63% superior com relação aos corpos de prova sem substituição.

Os corpos de prova com 50% de substituição produziram um acréscimo de 7,37% na resistência.

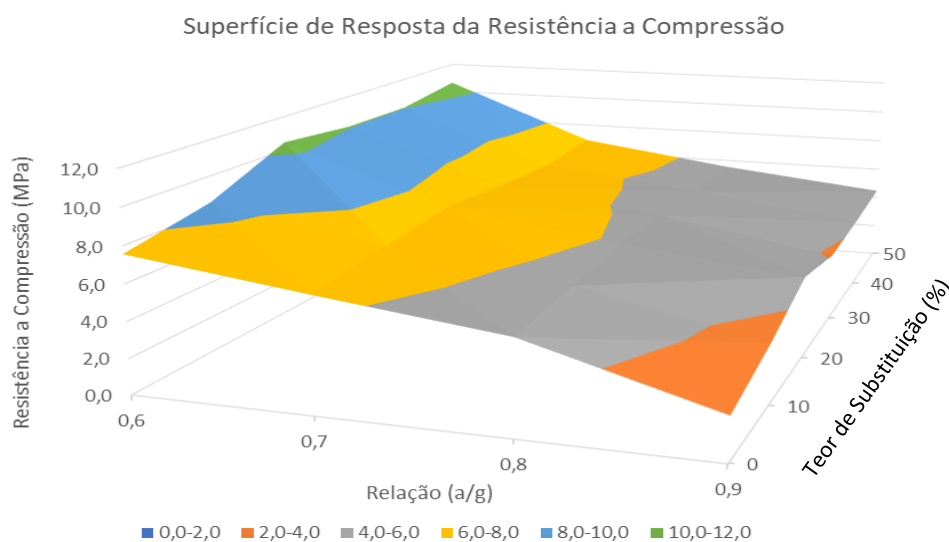
Para a série com relação (a/g) de 0,7 encontra-se um comportamento muito semelhante aos corpos de prova com relação (a/g) de 0,8. Altera-se apenas percentualmente o valor do ganho da resistência com o incremento das substituições. Quando se compara novamente os corpos de prova com 20% de substituição com os corpos de prova controle observa-se um acréscimo da resistência em 14,55%.

Para os corpos de prova com 50% de substituição houve um acréscimo de 9,17% na resistência.

Com relação a série com relação (a/g) 0,6 observa-se um dado interessante que foi o fato que o traço com 50% de substituição foi o mais efetivo no aumento da resistência. Nesse traço a resistência com relação aos corpos de prova sem substituição foi 40,55% superior, o que comprova que se pode optar por traços com altos teores de substituição.

Nos corpos de prova da série com relação 0,5 também se pode verificar a tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento do teor da adição do pó de pedra nos corpos de prova se mantem. Com essa relação a/g, o teor máximo de pó de pedra que pôde ser incorporado foi 30%, por questões de trabalhabilidade. Com esse teor, teve-se um ganho de resistência de 43,8 %.

Na Figura 4.36, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a resistência a compressão dos corpos de prova ensaiados nas diversas series.

Figura 4.36 - Gráfico de superfície de resposta da resistência a compressão

Os gráficos de todos os compósitos com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.37.

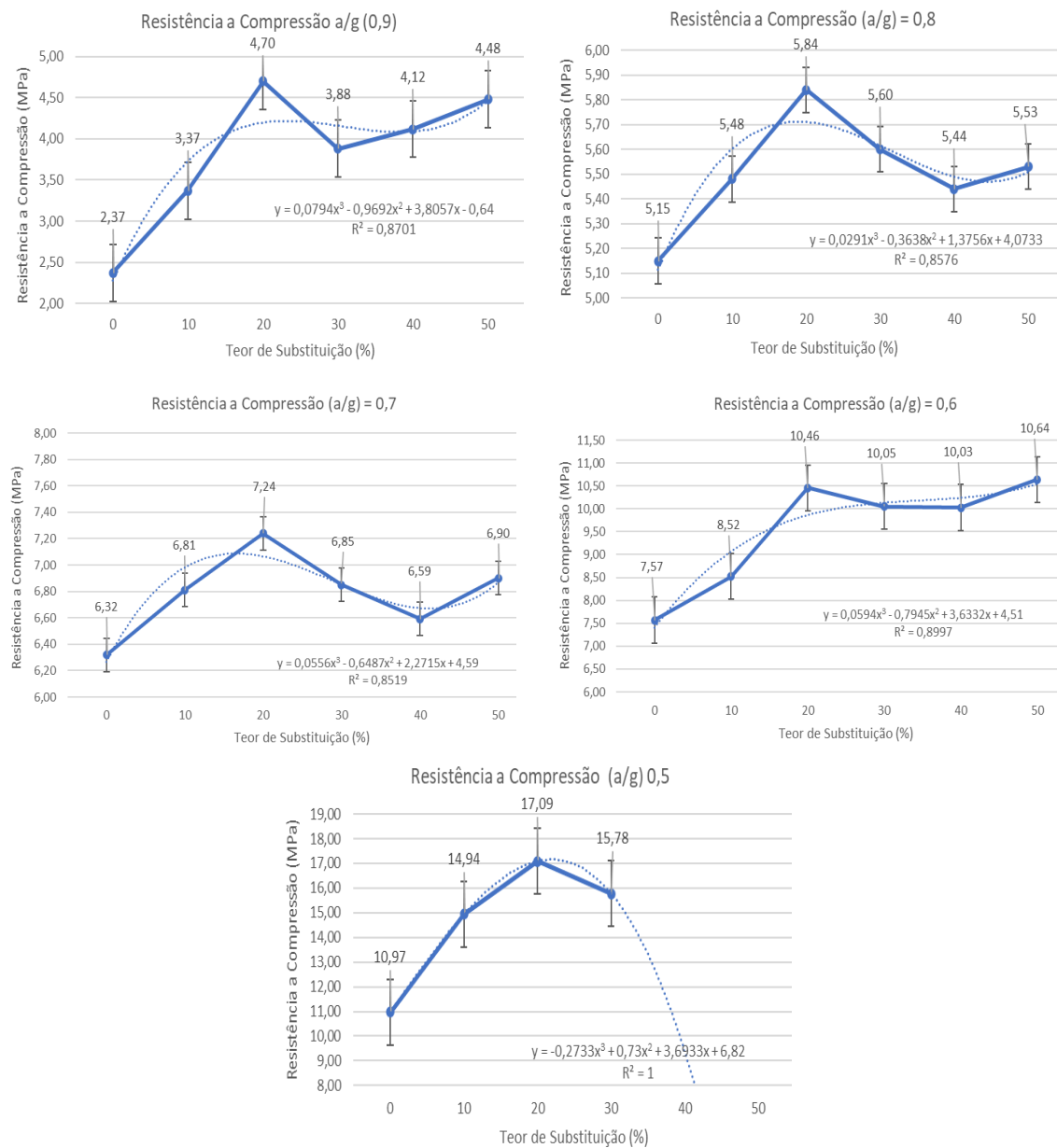
Aqui não houve uma tendência linear na evolução do ganho de resistência com o incremento do teor de pó de pedra. Na Figura 4.38 dá para perceber que a resistência aumenta até 20 %, decrescendo em seguida, muito suavemente em alguns casos e um pouco mais intensamente em outros. Interessante ver que em geral 50% de substituição conduziu a maior resistência que 40%. Levando-se em conta a densidade, vê-se que com 50% tem-se o valor máximo o que indicaria provável maior resistência. Porém a densidade maior não está significando maior compacidade. A quantidade de agregado que é muito mais pesado que a matriz é quem está elevando a densidade. O teor entre 20% e 30 % parece ser o que conduziria a maior resistência, visto que a quantidade de ligante é maior que com teores maiores.

E de se notar a elevada resistência à compressão conseguida com relações a/g = 0,6 e a/g = 0,5, quando com 20% de substituição se chega a 10,5 MPa e 17 MPa. Com a relação a/g = 0,6 consegue-se manter resistência por volta dos 10 MPa com taxas de substituição de até 50%. Isto significa que é possível uma notável economia de ligante.

Ao se escolher o traço com teor de substituição com 0,4 e relação água/gesso de 0,6 temos como principais vantagens: O Alto teor de incorporação de resíduo inerte, a boa resistência tanto a compressão tanto a tração o bom tempo de

início e de fim de pega além da boa trabalhabilidade da massa.

Figura 4.37 - Resistencia a compressão dos compósitos



Fonte: Autor, (2021)

Para a relação $a/g = 0,60$, que foi usada na segunda etapa deste trabalho, a expressão que pode ser usada para prever a resistência em função do teor de substituição é:

$$f_c = 0,0595 ps^3 - 0,7994 ps^2 + 3,6332 ps + 4,51 \quad (R^2 = 0,9)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão em MPa

ps é a percentagem de substituição do gesso por pó de pedra em %

No entanto, note-se que aquela expressão não fornece com precisão a resistência quando o teor de pó de pedra é nulo. Pode-se então pensar em uma equação do segundo grau, passando pelos pontos inicial, final e um intermediário.

Usando equação do segundo grau:

$$f_c = -0,0020 ps^2 + 0,15 ps + 7,57$$

Pode-se organizar a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Correlação entre resistência teórica pela equação do segundo grau e experimental

ps	$f_{c_{teor}}$	$f_{c_{exp}}$	$f_{c_{teor}}/f_{c_{exp}}$
0	7,57	7,57	1,00
10	8,87	8,54	1,00
20	9,77	10,46	0,93
30	10,27	10,05	1,02
40	10,37	10,03	1,03
50	10,07	10,64	0,95

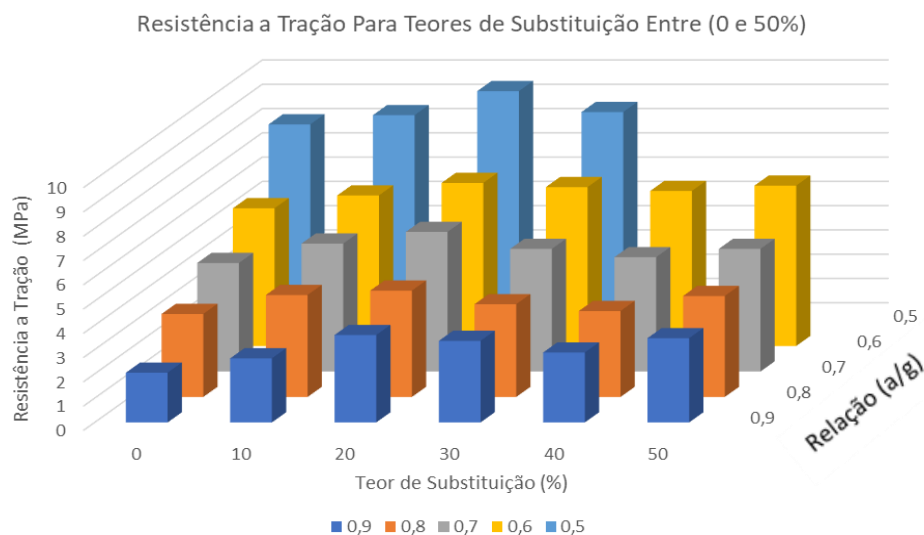
Fonte: Autor, (2021)

Do exposto vê-se que uma equação mais simples pode prever com mais precisão a resistência à compressão que as expressões obtidas em complexos programas computacionais. Isto para o caso em questão que é a relação $a/g = 0,60$.

4.4.8. RESISTENCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO

Na Figura 4.38, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência a tração na flexão dos corpos de prova ensaiados.

Figura 4.38 - Resistência a tração na flexão dos compósitos em função da relação a/g e do teor de substituição do gesso por pó de pedra



Fonte: Autor, (2021)

De fato, os resultados de resistência a tração foram bastante similares aos dados encontrados para o ensaio de resistência a compressão, havendo em todas as series ensaiadas o aumento dessas duas grandezas quando houve a adição do pó de pedra em substituição ao gesso.

Nos corpos de prova da série com relação (a/g) 0,9 verificou-se que ao se comparar os corpos de prova, sem substituição, aqueles com 50% houve um acréscimo na resistência a tração na ordem de 69,53%. Quando comparado esse valor com os dados da mesma serie com relação a resistência a compressão que proporcionou um acréscimo de 89,03% verifica-se que a adição de pó de pedra foi menos efetiva nesse quesito. Isto é devido ao fato de que na compressão está-se reduzindo os vazios, aproximando-se os grãos sólidos entre si, ao passo que na tração ocorre o afastamento deles.

Considerando-se o traço com substituição de 20%, que conservou uma boa trabalhabilidade, verifica-se que o efeito desse percentual de substituição produziu um acréscimo na resistência a tração de 75,78% em relação à referência.

Nos corpos de prova da serie relação (a/g) 0,8 observa-se que o aumento da resistência à tração, quando se utiliza o incremento máximo da substituição, em comparação aos corpos de prova sem qualquer substituição foi de 21,50%.

A faixa mais efetiva dessa serie no aumento da resistência a tração, foi quando se utilizou o teor de substituição de 20% o que produziu um acréscimo relativo de 28,04%.

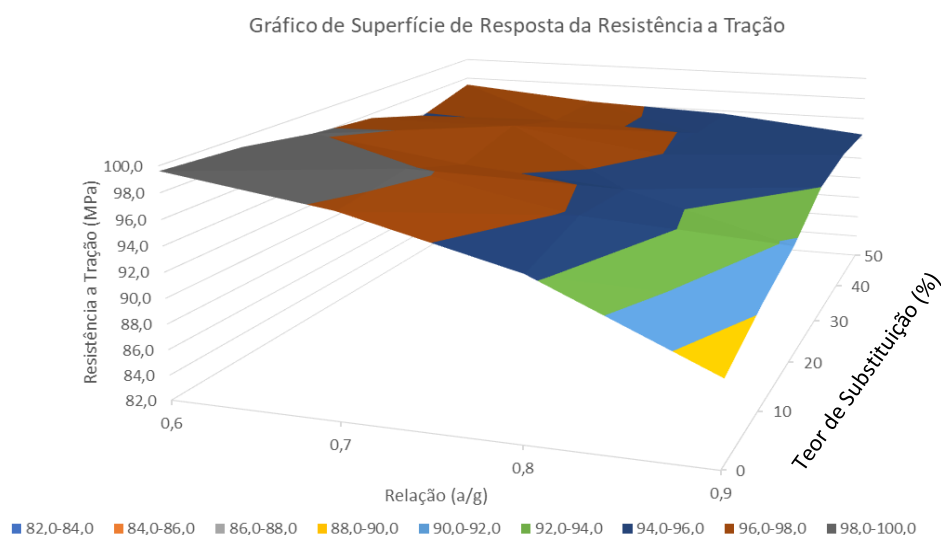
Na série com relação (a/g) 0,7 com o incremento máximo da substituição o aumento da resistência a tração foi de 12,86%. Mostrando a efetividade da substituição do gesso por pó de pedra, com relação a essa grandeza.

No traço com relação (a/g) 0,6 o acréscimo máximo na resistência a tração ocorreu com um teor de substituição de 20% que produziu um acréscimo da resistência em 18,31%.

Nos corpos de prova da série com relação (a/g) 0,5 também se observou que a tendência de aumento na resistência à tração com o aumento do teor da adição do pó de pedra. Quando comparados os corpos de prova dessa série sem substituição aos corpos de prova com 30%, verifica-se um acréscimo na resistência de 6,34%.

Na Figura 4.39, é apresentado o gráfico de superfície de resposta para a resistência a tração dos corpos de prova ensaiados nas diversas series.

Figura 4.39 - Gráfico de superfície de resposta da resistência a tração



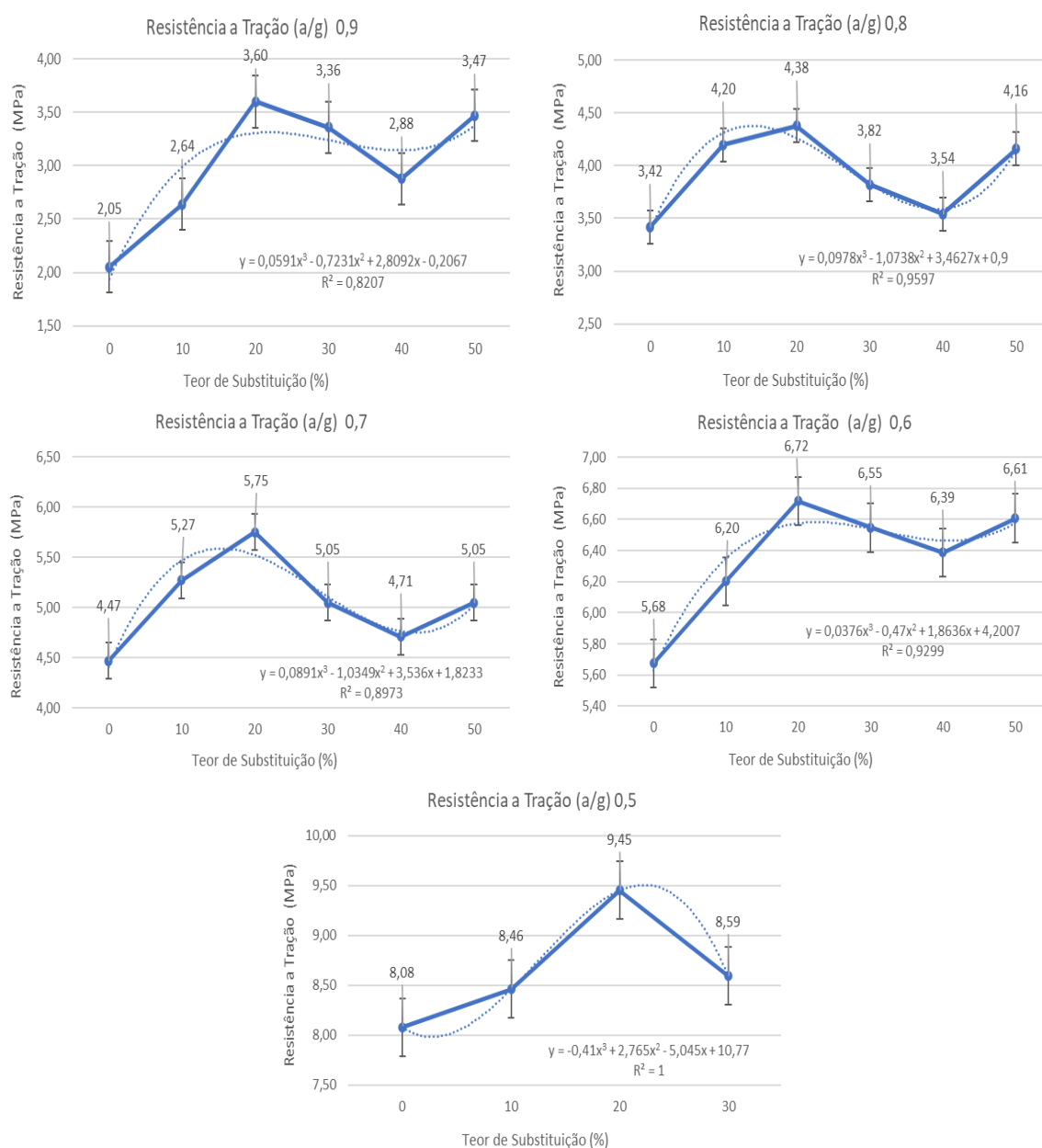
Fonte: Autor, (2021)

Os gráficos de todos os compósitos com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 bem como as equações matemáticas que os definem são apresentados na Figura 4.40.

Da mesma forma como ocorreu com a resistência a compressão, nessa grandeza também não houve uma tendência linear na evolução do ganho de resistência com o incremento do teor de pó de pedra. As misturas com teores de 20% de incorporação levaram a resistência bem superiores quando comparadas as misturas com os demais

teores de substituição. Resultando em valores de R^2 bem inferiores aos encontrados para as demais grandezas estudadas.

Figura 4.40 - Resistência a tração para traços com relação (a/g) de 0,5 a 0,9



Fonte: Autor, (2021)

CAPÍTULO 5

5. METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO

Os ensaios de desempenho da ABNT NBR 15575:2013 realizados no protótipo, para se ter ideia do comportamento do sistema construtivo empregado, foram:

- carga suspensa
- fechamento brusco de porta
- sustentação de rede de dormir
- impacto de corpo duro
- impacto de corpo mole

5.1. ENSAIO DE CARGA SUSPensa

No ensaio de cargas provenientes de peças suspensas em paredes a aparelhagem foi baseada na norma ABNT NBR 11678:2016, e o teste foi realizado em uma parede do protótipo por uma carga vertical excêntrica de até 80 kgf. Para aplicação do carregamento foi fixado na parede do protótipo de uma peça suspensa padrão (mão-francesa), Figura 5.1.

Figura 5.1 - Mão - Francesa utilizada no ensaio de carga suspensa

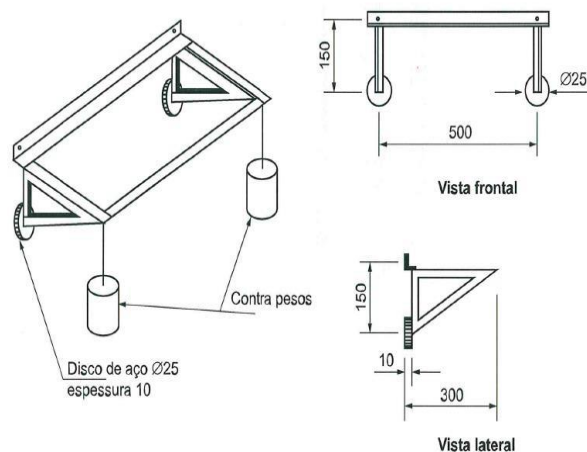


Fonte: Autor (2021)

Após fixar as mãos francesas, conforme esquema ilustrado na Figura 5.2 empregando-se os dispositivos de fixação, colocam-se três relógios comparadores que devem estar situados no lado oposto da parede a ser ensaiada, Figura 5.3. O ensaio é iniciado aplicando-se carga crescente de 50 N em cada apoio, aguardando-se um intervalo de 3 minutos para cada acréscimo de carga, até atingir, no caso, 800 N. A cada intervalo,

faz-se a leitura dos extensômetros. Completado esse carregamento, ele foi mantido constante por um período de 24 horas, quanto então ele foi removido. Após a retirada do carregamento, aguarda-se 15 min e faz-se o registro da deformação horizontal residual nos três extensômetros.

Figura 5.2 – Esquema de mão francesa padrão ABNT NBR 11678:2016



Fonte: ABNT NBR 11678:2016

Figura 5.3 - Relógios comparadores fixados a parede oposta do protótipo



Fonte: Autor, (2021)

Os elementos fixadores da peça padrão e a técnica de fixação utilizados neste ensaio foram bucha plástica comum IV-10, com perfuração da parede usando broca de

referência 10,0, e fixação da peça padrão com uso de parafuso e arruelas, Figura 5.4. Para a transmissão da carga à parede na parte inferior do suporte (mão francesa) foram colocados dois discos de aço (25 mm de diâmetro e 10 mm de espessura). Esse local foi inspecionado visualmente após a retirada total da carga, para verificação de danos à parede.

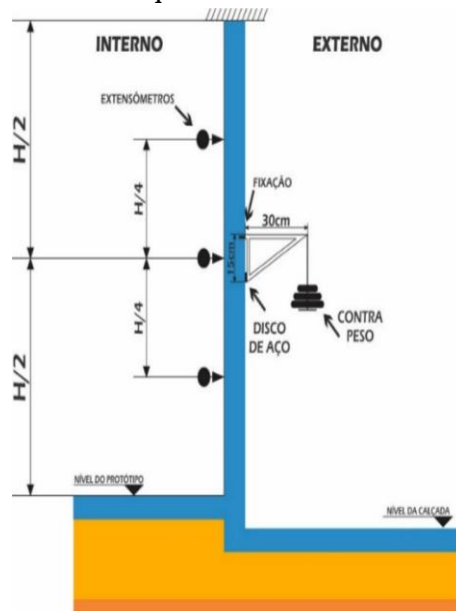
Figura 5.4 – Elementos fixadores da peça padrão



Fonte: Autor, (2021)

O requisito é que as paredes devem apresentar resistência mecânica aos esforços produzidos por cargas provenientes de peças suspensas como armários, prateleiras etc. Como critério de avaliação, as seguintes prescrições não podem ocorrer: deformações horizontais imediatas maiores que $h/500$; deformações horizontais residuais maiores que $h/2.500$, onde h é a altura da parede; arrancamento dos fixadores ou elementos de fixação; rupturas, fissuras, escamações, nos locais de transferência das cargas (região de contato com os discos de aço) ou qualquer tipo de dano fora da região de aplicação da carga. É aceito na região de aplicação da carga o aparecimento de pequenas endentações ou amassamentos, na Figura 5.5 é apresentado a esquematização do ensaio.

Figura 5.5 - Desenho esquemático do ensaio de carga suspensa



Fonte: Autor, adaptado da norma ABNT NBR 15575:2013

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentados os processos de aplicação das cargas, cada incremento era composto pela adição de dois sacos de areia com 5 kgf, cada, após cada ciclo de carga as leitura dos relógios comparadores eram realizadas.

Figura 5.6 - Aplicação das cargas no ensaio de carga suspensa



Fonte: Autor, (2021)

Figura 5.7 - Leitura dos relógios comparadores

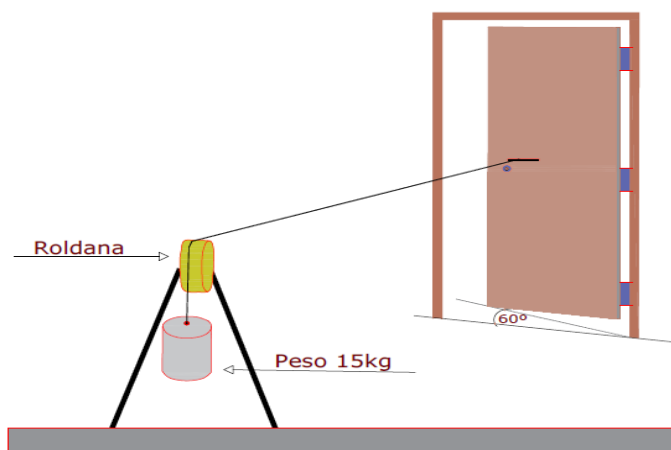


Fonte: Autor, (2021)

5.2. FECHAMENTO BRUSCO DE PORTAS

Neste ensaio verifica-se o comportamento da interface parede/porta devido a solicitações por manobras anormais como, por exemplo, batidas das portas devido à ação do vento. A aparelhagem do ensaio é baseada na norma ABNT NBR 15930-2:2011. O procedimento consistiu em aplicar, perpendicularmente ao plano da porta, uma força de cerca de 15 kgf, para provocar seu fechamento. Na Figura 5.8 é apresentada a esquematização do ensaio. Na Figura 5.9 observa-se a porta do protótipo onde foi realizado o ensaio

Figura 5.8 - Desenho esquemático do ensaio de fechamento brusco de porta



Fonte: Autor, adaptado da norma ABNT NBR 15930-2:2011

Figura 5.9 - Porta do protótipo para a realização do ensaio de fechamento brusco de porta



Fonte: Autor, (2021)

A folha, antes da aplicação da força, foi mantida aberta num ângulo de 60° com o plano do batente, Figura 5.10. Realizaram-se 10 fechamentos bruscos e, após cada um deles, foram inspecionadas a interface porta/parede e a porta isoladamente, para registro das ocorrências. O local de aplicação da força foi na maçaneta da própria porta, atendendo à condição de que deve ser em qualquer ponto situado a 1.000 mm do bordo inferior da folha e a 45 mm de seu bordo vertical.

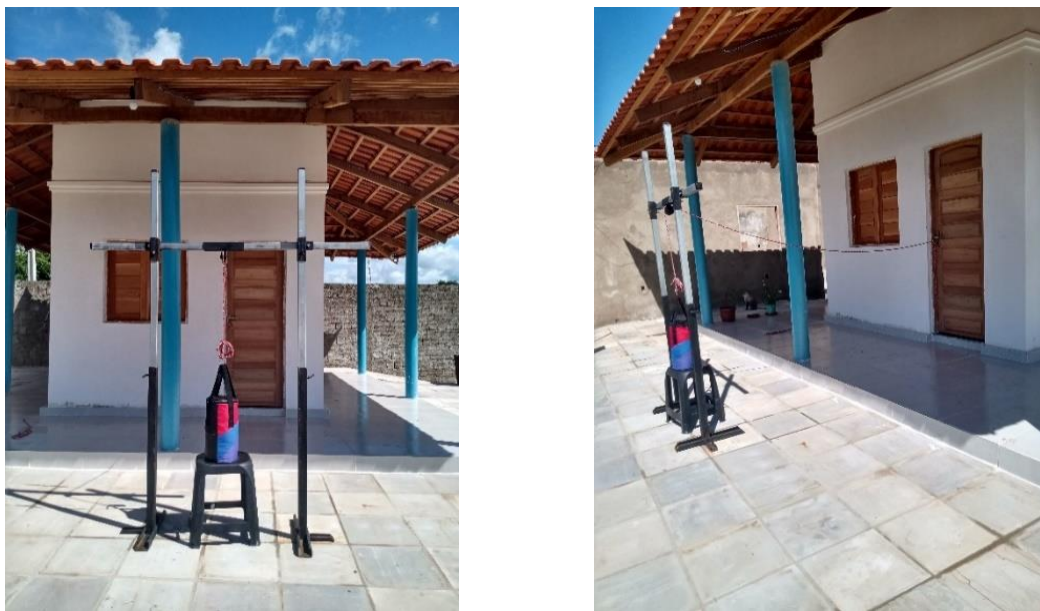
Figura 5.10 – Determinação do ângulo de abertura da porta



Fonte: Autor, (2021)

A aparelhagem para aplicação da força foi constituída por um sistema composto de corda, roldanas e suporte para colocação de um contrapeso, de forma que fosse aplicada a força requerida, Figura 5.11. A corda foi colocada de forma que, quando a porta chegasse a 3 cm de seu fechamento, a força aplicada não estivesse mais atuando.

Figura 5.11 – Aparelhagem para realização do ensaio de fechamento brusco de porta



Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 5.12 apresenta-se o processo de execução do ensaio de fechamento brusco de porta

Figura 5.12 – Execução do ensaio de fechamento brusco de porta



Fonte: Autor, (2021)

5.3. SUSTENTAÇÃO DE REDE DE DORMIR

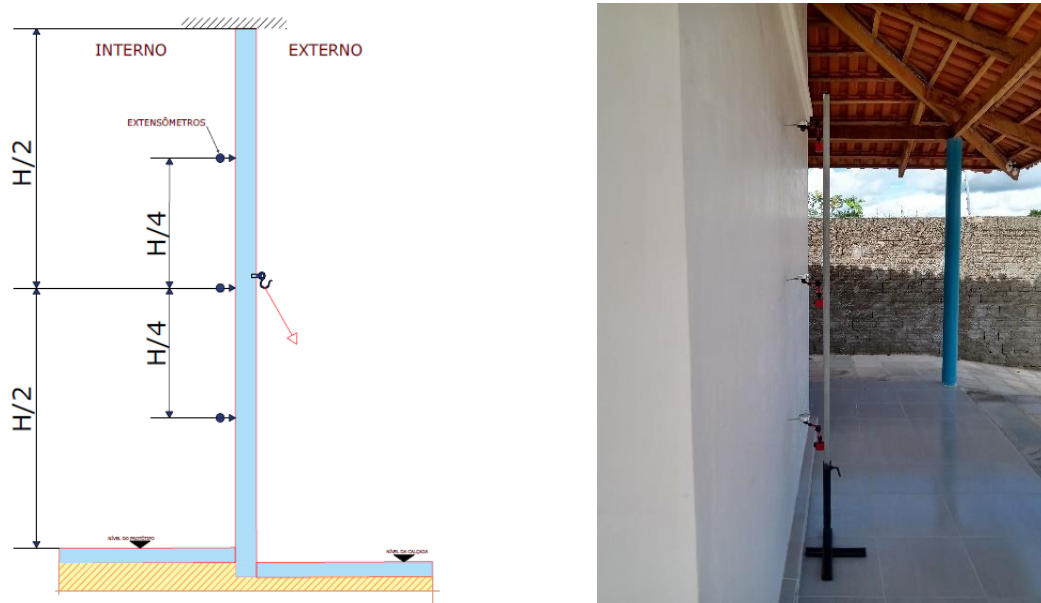
Foi realizado também o ensaio para verificar a capacidade de as paredes receberem esforços devidos à colocação de rede, muito comuns na região Nordeste do Brasil. Instalados os armadores, chumbados diretamente nas paredes, Figura 5.13 coloca-se a rede, e nela peso equivalente 200,0 kgf. Três extensômetros são instalados no lado oposto, como no ensaio de carga suspensa. O esquema está indicado na Figura 5.14.

Figura 5.13 - Ensaio de sustentação de rede de dormir



Fonte: Autor. (2021)

Figura 5.14 – Esquema para realização do ensaio de rede de dormir



Fonte: Autor. (2021)

Para realização do ensaio, foram feitos quatro furos com auxílio de furadeira, nos quais foram chumbados, por meio de parafuso e bucha, os armadores

Em seguida, foi colocada uma rede comum. A inclinação desta no armador com a face da parede é de 60° , gerando carga que pode ser decomposta em componentes vertical e horizontal.

De forma semelhante ao ensaio de carga suspensa, sacolas plásticas com areia com massa agora de 10 kg foram colocadas uma por uma com intervalo de 3 minutos, até se chegar aos 200 kg, Figura 5.15.

Figura 5.15 - Rede com carga de 200 kgf



Fonte: Autor, (2021)

São verificadas as deformações horizontais imediatas nos três extensômetros, à medida que se aumenta o peso na rede.

Após serem completado os 200 kg, esperou-se 24 horas para se verificar se houve aumento de deslocamento horizontal ou algum rompimento ou deslizamento na região dos armadores.

5.4. ENSAIO DE IMPACTO DE CORPO DURO

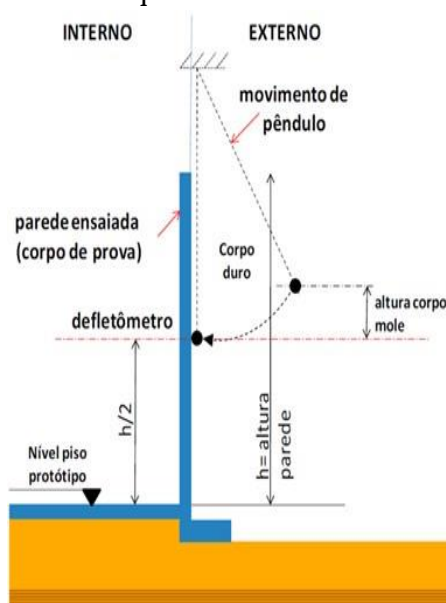
Este ensaio procura reproduzir impactos gerados dentro ou fora da edificação decorrentes ao seu uso, como pancadas de móveis ou acidentes.

Os impactos são produzidos aleatoriamente em uma das faces da parede, de modo que atinja diversos pontos. Após os impactos, inspecionar visualmente o corpo-de-prova, com respeito à existência ou não de fissuras, escamações, destacamentos das capas e

mossas, devendo-se medir a profundidade destas últimas e registrar as distâncias para as quais estes danos são perceptíveis a olho nu.

Diz a ABNT NBR 15575:2013 que a verificação da resistência e endentação provocada pelo impacto de corpo duro, é feita através de ensaios em laboratório, protótipo ou obra, devendo o corpo-de-prova representar fielmente as condições de obra, inclusive tipos de apoio / vinculações. Um corpo impactador (esfera maciça de aço) com massa (m) definida, é suspenso por um cabo e abandonado em movimento pendular de uma altura (h) até atingir a parede. Na Figura 5.16 é apresentado o esquema do ensaio. Devem ser registrados os deslocamentos e as ocorrências (eventuais falhas).

Figura 5.16 - Desenho esquemático do ensaio de corpo duro



Fonte: Autor, adaptado da norma ABNT NBR 15575:2013

Para aplicação dos impactos foram utilizados, como corpos duros, duas esferas de aço com massa aproximada de 500 g e 1000 g. Na Figura 5.17 é apresentada a aparelhagem utilizada para isto.

Figura 5.17 – Aparelhagem utilizada no ensaio de corpo duro



Fonte: Autor, (2021)

De acordo com ABNT NBR 15575:2013, os impactos são aplicados por esferas de aço com diâmetro de 5 cm e massa de 0,5 kg (impactos de utilização) e diâmetro de 6,25 cm e massa de 1,0 kg (impactos de segurança), em movimento pendular, Figura 5.18. Deve-se aplicar 10 impactos (sem repiques) de cada modalidade (utilização e segurança), regularmente distribuídos pela superfície de uma das faces do corpo de prova.

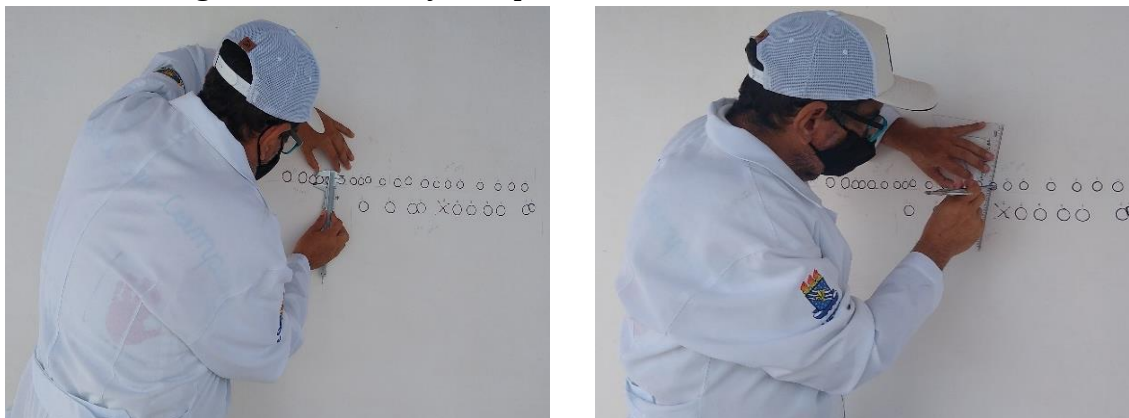
Figura 5.18 – Execução do ensaio de corpo duro



Fonte: Autor, (2021)

Para medição da profundidade das mossas foi utilizado um paquímetro tradicional com resolução de 0,01 mm. Na Figura 5.19, é apresentado o processo de determinação da profundidade das mossas e seus respectivos diâmetros.

Figura 5.19 – Medição da profundidade e diâmetro das mossas

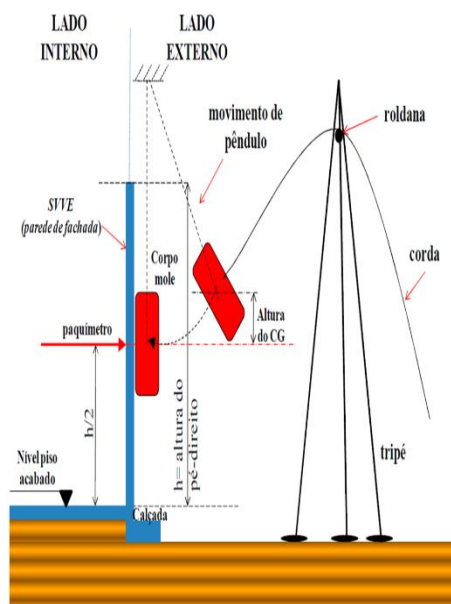


Fonte: Autor, (2021)

5.5. ENSAIO DE IMPACTO DE CORPO MOLE

Este ensaio procura reproduzir impactos de corpo mole decorrentes de choques acidentais provocados pelo próprio uso da edificação ou choques provocados por intrusões intencionais ou não.

A verificação da resistência e deslocamento das paredes é realizada por meio de ensaios de impacto, a serem realizados em laboratório, em protótipo ou obra. O corpo-de-prova deve incluir todos os componentes típicos do sistema. Um corpo impactador com massa (m) definida, é suspenso por um cabo e abandonado em movimento pendular de uma altura (h) até atingir a parede. Devem ser registrados os deslocamentos e as ocorrências (eventuais falhas). Na Figura 5.20 é apresentado o esquema do ensaio.

Figura 5.20 - Desenho esquemático do ensaio de corpo mole

Fonte: Autor, adaptado da norma ABNT NBR 15575:2013

Em um primeiro momento, um saco de areia de 40,0 kg semelhante ao utilizado em treinos de boxe foi posicionado bem próximo a parede. Esse equipamento estava suspenso por cordas e roldana ligada a estrutura do telhado, Figura 5.21, que permitia fazer com que o saco fosse levantado fazendo um pêndulo e solto do repouso.

Figura 5.21 - Saco de areia suspenso por cordas

Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 5.22 observa-se o processo de execução do ensaio de corpo mole.

Figura 5.22 - Realização do ensaio de corpo mole



Fonte: Autor, (2021)

A meia altura da parede, um relógio comparador foi posicionado atrás da face de impacto para medição dos deslocamentos. Para a determinação exata deles foi montado um esquema com um tripe e um aparelho celular, Figura 5.23. para a gravação do deslocamento do ponteiro do relógio comparador, no momento do impacto. Após a gravação foi utilizado um programa de computador que permitiu visualizar o vídeo frame a frame determinando-se com exatidão o maior deslocamento obtido em cada impacto.

Figura 5.23 – Aparentagem para captação dos deslocamentos no ensaio de corpo mole



Fonte: Autor, (2021)

CAPÍTULO 6

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO

6.1. ENSAIO DE CARGA SUSPensa

A norma ABNT NBR 11678:2016 NBR determina que os valores máximos de deslocamentos horizontal imediato (D_{hi}) e residual (D_{hr}) que as paredes devem apresentar no ensaio de carga suspensa de 0,8 kN são obtidos pelas expressões:

$$D_{hi} = \frac{H}{500}; \quad D_{hr} = \frac{H}{2500}$$

Sabendo-se, no caso, que a altura da parede (H) é igual a 270 cm esses valores corresponde a:

$$D_{hi} = 5,40 \text{ mm}$$

$$D_{hr} = 1,08 \text{ mm}$$

Os ensaios foram realizados tomando como referência o nível de desempenho superior, que estabelece as cargas de serviços e os critérios de desempenho estabelecidos para o protótipo em análise. Os resultados são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultado do ensaio de capacidade de suporte de peças suspensas

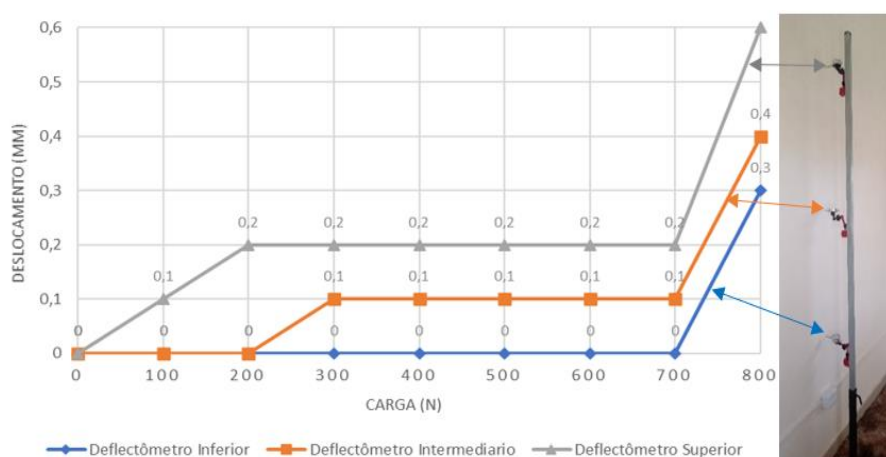
Deslocamentos horizontais imediatos					
Carga (N)	Deflectômetro Inferior (mm)	Deflectômetro Intermediário (mm)	Deflectômetro Superior (mm)	Deslocamento Imediato limite	Falha durante o ensaio
0*50 = 0	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
2*50 = 100	0,0	0,0	0,1	5,40	Nenhuma
4*50 = 200	0,0	0,0	0,2	5,40	Nenhuma
6*50 = 300	0,0	0,1	0,2	5,40	Nenhuma
8*50 = 400	0,0	0,1	0,2	5,40	Nenhuma
10*50 = 500	0,0	0,1	0,2	5,40	Nenhuma
12*50 = 600	0,0	0,1	0,2	5,40	Nenhuma
14*50 = 700	0,0	0,1	0,2	5,40	Nenhuma
16*50 = 800	0,3	0,4	0,6	5,40	Nenhuma
Deslocamentos horizontais residuais					
	Deflectômetro Inferior (mm)	Deflectômetro Intermediário (mm)	Deflectômetro Superior (mm)	Deslocamento Residual limite	Falha durante o ensaio

0,2	0,3	0,5	1,08	Nenhuma
-----	-----	-----	------	---------

Fonte: Autor, (2021)

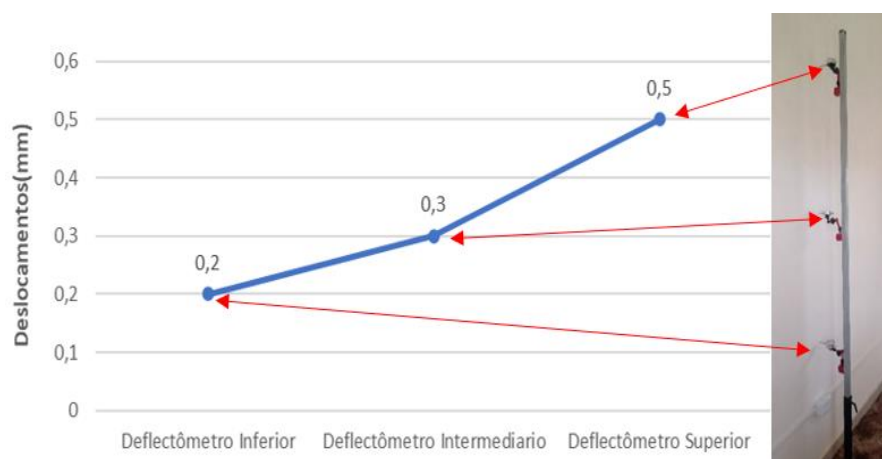
Na Figura 6.1 é apresentado os gráficos dos deslocamentos horizontais imediatos gerados devido ao ensaio de capacidade suporte de peças suspensas realizado no protótipo.

Figura 6.1 – Deslocamentos horizontais imediatos (D_{hi}) em função da carga suspensa



Na Figura 6.2 é apresentado o valor dos deslocamentos horizontais residuais em função do posicionamento dos extensômetros.

Figura 6.2 - Deslocamentos horizontais residuais (D_{hr}) em função do posicionamento dos extensômetros após remoção da carga suspensa de 800 N



O resultado do ensaio com peças suspensas na parede do protótipo com blocos do gesso confirmou o bom desempenho do material e do sistema construtivo, considerando que os valores das deformações registradas D_{hi} e D_{hr} foram muito pequenos e inferiores às indicadas na norma de desempenho. Não ocorreu também arrancamento dos fixadores, nem quaisquer danos na parede ensaiada foram detectados, conforme apresentado na Figura 6.3 em detalhe.

Figura 6.3 - Pontos de fixação da mão francesa ao protótipo sem fissuração



Fonte: Autor, (2021)

6.2. ENSAIO DE FECHAMENTO BRUSCO DE PORTA

O requisito e o critério são os de que as paredes não devem apresentar avarias graves nem rupturas quando submetidas a solicitações transmitidas por portas, como fissurações, destacamento no encontro com o marco, cisalhamento na região de solidarização do marco ou destacamento entre as juntas.

Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de fechamento brusco de porta no protótipo.

Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios de fechamento brusco de porta

Impacto Nº	Carga (N)	Ocorrências Verificadas no Sistema Construtivo	Movimentos de Abertura e Fechamento
1	150	Sem ocorrências	Preservados
2	150	Sem ocorrências	Preservados
3	150	Sem ocorrências	Preservados
4	150	Sem ocorrências	Preservados
5	150	Sem ocorrências	Preservados
6	150	Sem ocorrências	Preservados
7	150	Sem ocorrências	Preservados
8	150	Sem ocorrências	Preservados
9	150	Sem ocorrências	Preservados
10	150	Sem ocorrências	Preservados

Fonte: Autor, (2021)

O resultado desse ensaio foi considerado positivo, já que os 10 impactos produzidos não prejudicaram o funcionamento normal da porta, ou seja, não ocasionaram danos na folha, nem na forra, nem na parede.

Ocorreu apenas pequena fissura que foi registrada na interface porta/parede, com abertura inferior a 1mm, Figura 6.4 o que é aceitável pelo ensaio.

Figura 6.4 - Fissuras entre o marco e a parede após ensaio de fechamento brusco de porta

Fonte: Autor, (2021)

6.3. ENSAIO DE SUSTENTAÇÃO DE REDE DE DORMIR

O limite para o deslocamento horizontal imediato foi considerado o mesmo relativo ao ensaio de cargas suspensas.

$$Dhi = \frac{H}{500}$$

Conforme dados da Tabela 6.3 durante o ensaio não foi registrado qualquer deslocamento dos deflectômetros instalados na parede do protótipo.

Tabela 6.3 - Resultado do ensaio de rede de dormir

Carga (kgf)	Deslocamentos horizontais imediatos				
	Deflectômetro	Deflectômetro	Deflectômetro	Deslocamento	Falha
	Inferior (mm)	Intermediário (mm)	Superior (mm)	Imediato limite	durante o ensaio
0*10 = 0	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
2*10 = 20	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
4*10 = 40	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
6*10 = 60	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
8*10 = 80	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
10*10 = 100	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
12*10 = 120	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
14*10 = 140	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
16*10 = 160	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
18*10 = 180	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma
20*10 = 200	0,0	0,0	0,0	5,40	Nenhuma

Fonte: Autor, (2021)

A medição após 24 h de aplicação da carga de 200 kgf na rede foi nula. Retirado o carregamento, o deslocamento residual também foi nulo.

Não ocorreu também arrancamento dos fixadores, nem quaisquer danos na parede ensaiada, conforme apresentado na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Detalhe dos pontos de fixação do ensaio de rede de dormir após ensaio

Fonte: Autor, (2021)

6.4. ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE

Na Tabelas 6.4 são apresentados os resultados dos ensaios de impacto de corpo mole na parede externa do protótipo. Na referida tabela a primeira leitura corresponde a leitura instantânea, (registrada no momento do impacto) e a segunda à leitura residual efetuada após 3 minutos do impacto.

Tabelas 6.4 - Resultados dos ensaios de impacto de corpo mole na parede do protótipo, impactos externos

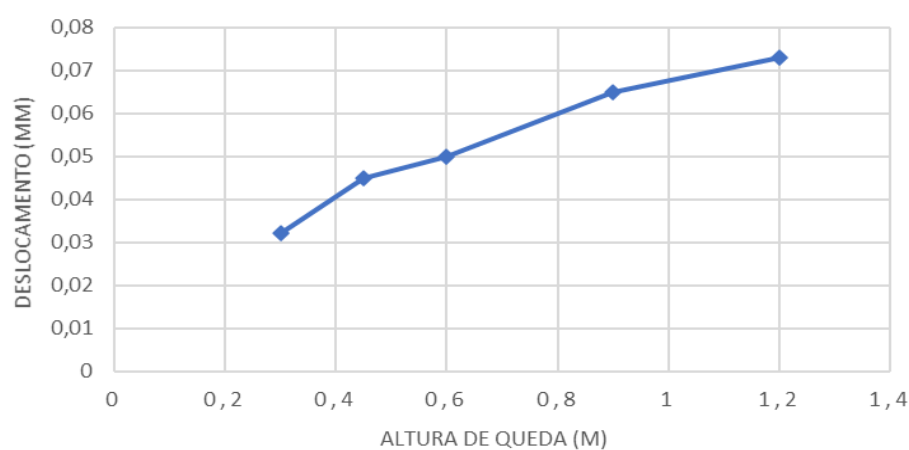
Energia de		Deslocamento		Ocorrências	Requisitos da
Impacto de	Altura	Instantâneo	Residual		
Corpo Mole (J)	(m)	(mm)	(mm)		ABNT
120	0,30	0,032	0,0	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
180	0,45	0,045	0,0	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
240	0,60	0,050	0,0	Nenhuma	Não ocorrência de falhas $D_i \leq h/125$; $D_r \leq h/625$
360	0,90	0,065	0,0	Nenhuma	Não ocorrência de falhas

480	1,20	0,073	0,01	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
-----	------	-------	------	---------	------------------------------------

Fonte: Autor, (2021)

O gráfico da Figura 6.6 representa os deslocamentos instantâneos causados pelos impactos de corpo mole na parede do protótipo para as diferentes energias de impacto utilizadas.

Figura 6.6 - Deslocamento horizontal instantâneo D_{hi} causados pelos impactos de corpo mole na parede do protótipo



Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 6.7 vê-se a parede onde foram executados os ensaios de corpo mole sem a presença de qualquer anomalia.

Figura 6.7 - Detalhe da parede onde foram executados os ensaios de corpo mole



Fonte: Autor, (2021)

6.5 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO

Nas Tabelas de 6.5 a 6.8 são apresentados os resultados relativos aos valores de profundidade e diâmetro das mossas medidos após ensaio de impacto de corpo duro.

Tabela 6.5 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 0,5kg e altura 0,5m

Massa da Esfera (kg) = 0,5					
ΔH (m) = 0,5					
Sequencia	Energia Impacto (J)	Profundidade mossa (mm)	Diâmetro da mossa (mm)	Ocorrências	Requisitos
1	2,5	0,30	1,40	Apenas mossas	Não ocorrência de falhas. Mossa $p \leq$ 2,0 mm (Nível S)
2		0,30	1,40	Apenas mossas	
3		0,40	1,45	Apenas mossas	
4		0,40	1,45	Apenas mossas	
5		0,40	1,50	Apenas mossas	
6		0,40	1,40	Apenas mossas	
7		0,40	1,40	Apenas mossas	
8		0,40	1,40	Apenas mossas	
9		0,40	1,45	Apenas mossas	
10		0,40	1,45	Apenas mossas	

Fonte: Autor, (2021)

Tabela 6.6 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 0,5kg e altura 1,0m

Massa da Esfera (kg) = 0,5					
ΔH (m) = 1,0					
Sequencia	Energia Impacto (J)	Profundidade mossa (mm)	Diâmetro da mossa (mm)	Ocorrências	Requisitos
1	5,0	0,40	1,80	Apenas mossas	Não ocorrência de falhas.
2		0,40	1,80	Apenas mossas	
3		0,40	1,85	Apenas mossas	
4		0,35	1,65	Apenas mossas	
5		0,35	1,65	Apenas mossas	

6	0,40	1,65	Apenas mossas	Mossa p ≤
7	0,40	1,70	Apenas mossas	2,0 mm
8	0,40	1,70	Apenas mossas	(Nível S)
9	0,40	1,80	Apenas mossas	
10	0,40	1,80	Apenas mossas	

Fonte: Autor, (2021)

Tabela 6.7 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 1,0kg e altura 1,0m

Massa da Esfera (kg) = 1,0					
ΔH (m) = 1,0					
Sequencia	Energia Impacto (J)	Profundidade mossa (mm)	Diâmetro da mossa (mm)	Ocorrências	Requisitos
1	10	0,40	2,30	Apenas mossas	
2		0,45	2,30	Apenas mossas	
3		0,45	2,35	Apenas mossas	Não
4		0,45	2,35	Apenas mossas	ocorrência
5		0,45	2,30	Apenas mossas	de falhas.
6		0,45	2,35	Apenas mossas	Mossa p ≤
7		0,45	2,35	Apenas mossas	2,0 mm
8		0,45	2,35	Apenas mossas	(Nível S)
9		0,45	2,40	Apenas mossas	
10		0,40	2,35	Apenas mossas	

Fonte: Autor, (2021)

Tabela 6.8 - Dados do ensaio de impacto de corpo duro esfera de 1,0kg e altura 2,0m

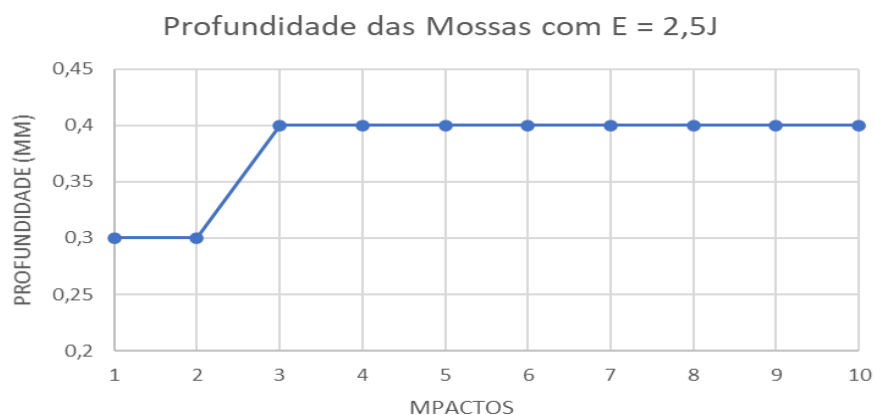
Massa da Esfera (kg) = 1,0					
ΔH (m) = 2,0					
Sequencia	Energia Impacto (J)	Profundidade mossa (mm)	Diâmetro da mossa (mm)	Ocorrências	Requisitos
1		0,45	2,35	Apenas mossas	
2		0,45	2,35	Apenas mossas	
3		0,45	2,40	Apenas mossas	
4		0,50	2,40	Apenas mossas	

5	20	0,50	2,40	Apenas mossas	Não
6		0,50	2,40	Apenas mossas	ocorrência
7		0,50	2,45	Apenas mossas	de falhas.
8		0,50	2,45	Apenas mossas	Mossa p ≤
9		0,45	2,45	Apenas mossas	2,0 mm
10		0,45	2,50	Apenas mossas	(Nível S)

Fonte: Autor, (2021)

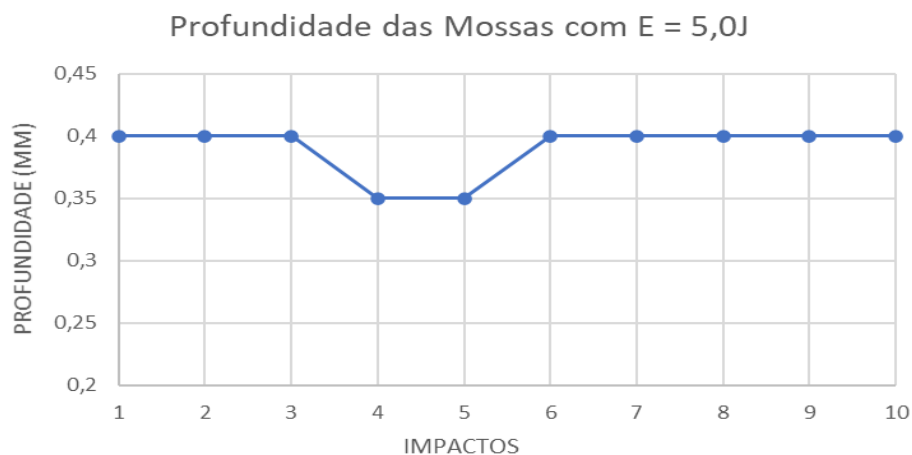
Os resultados de profundidade das mossas encontradas no ensaio de impacto de corpo duro, realizado conforme procedimentos descritos anteriormente, foram representados por meio de gráficos, conforme Figuras 6.8 a 6.11.

Figura 6.8 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 2,5J

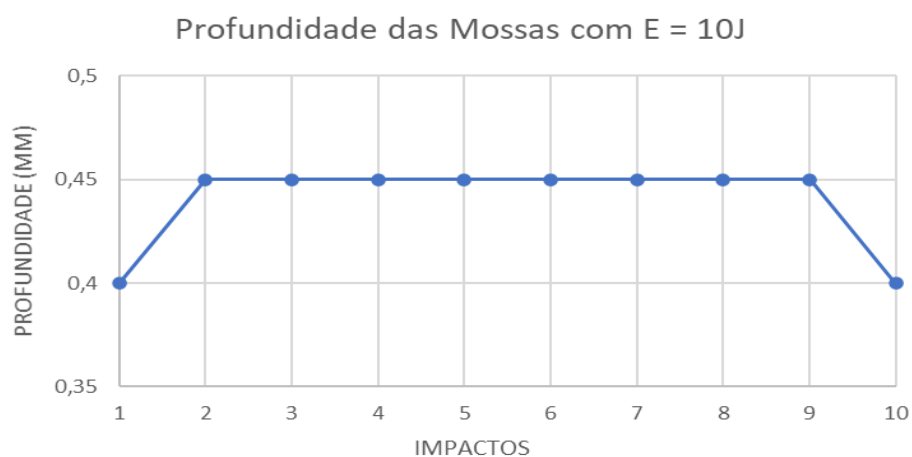


Fonte: Autor, (2021)

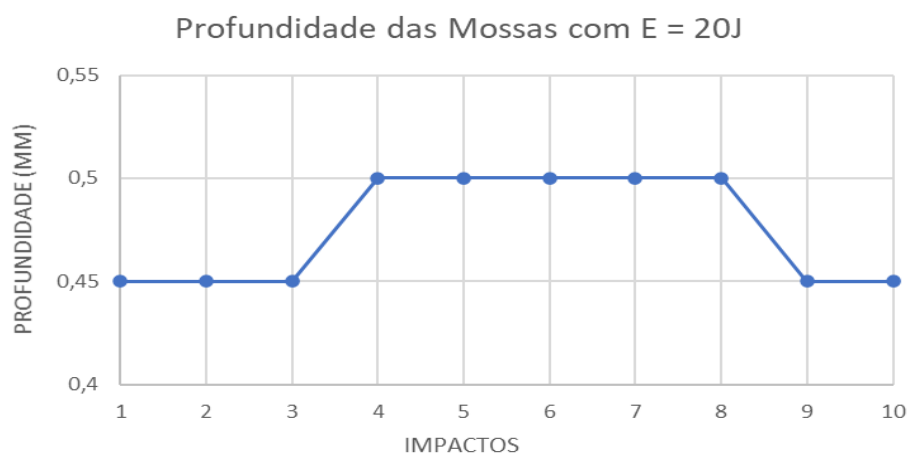
Figura 6.9 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 5,0J



Fonte: Autor, (2021)

Figura 6.10 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 10J

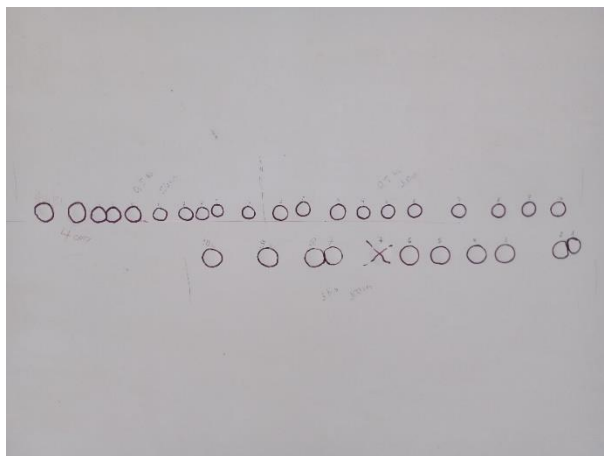
Fonte: Autor, (2021)

Figura 6.11 - Profundidade das mossas para uma energia de impacto de 20J

Fonte: Autor, (2021)

Na Figura 7.12 é apresentado a parede onde foram executados os ensaios de corpo duro apenas com a presença de mossas.

Figura 7.12 - Detalhe da parede onde foram executados os ensaios de corpo duro



Fonte: Autor, (2021)

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho trouxe uma série de conhecimentos a respeito do compósito de gesso - pó de pedra e do desempenho de alvenaria de blocos edificadas com esse material. Como foram muitos os aspectos estudados, prefere-se tratar pontualmente os mais importantes deles.

7.1. PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS NO ESTADO FRESCO

7.1.1. TEMPO DE INICIO DE PEGA

Em todas as misturas com o resíduo, observou-se que a presença do resíduo de pó de pedra acelera a hidratação do gesso (hemi-hidratado), indicando que as partículas adicionadas à solução constituem núcleos de cristalização;

A presença do pó de pedra na diminuição do tempo de início de pega é particularmente relevante nas misturas com maiores relações água/gesso particularmente naquela com $a/g=0,9$.

A quantidade de água de amassamento também influencia no tempo de pega que cresce à medida que aumenta a relação a/g .

As pastas com $a/g = 0,5$ com percentuais de substituição superiores a 30% apresentaram uma grande aceleração no processo de hidratação inviabilizando seu uso prático.

7.1.2. TEMPO DE FIM DE PEGA

No tempo de fim de pega, a presença do pó de pedra produz nas pastas o mesmo efeito que os observados no início de pega. Quanto à relação a/g , também quanto maior ela, maior o tempo de fim de pega.

7.1.3. CONSISTÊNCIA DA PASTA

A consistência da pasta de gesso diminui com o aumento da adição do pó de pedra, visto que é mantida constante a relação água/gesso, dificultando sua trabalhabilidade, porém, para substituições de até 30% essa diminuição de consistência não é tão significativa.

7.1.4. TERMODINÂMICA DAS REAÇÕES

Nos resultados da calorimetria, identificou-se um comportamento típico de curvas temperatura x tempo, compatíveis com as vistas na literatura.

Percebe-se uma redução do período de indução nas pastas com incorporação do pó de pedra, quando em comparação com as pastas de referência, indicando um aumento na velocidade da reação de hidratação, comprovado pelo tempo de início de pega.

Nota-se que no estágio 2 das curvas (estágio de aceleração e início da pega) as curvas se mostram com menor ângulo de inclinação nas misturas com resíduo, além de haver uma diminuição no pico da temperatura máxima.

Para a utilização do pó de pedra em pastas de gesso, deve-se considerar que a cinética de reação libera uma menor quantidade de calor do que as pastas de gesso comercial, e o tempo necessário para o processo de endurecimento também é menor.

7.2. PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS NO ESTADO ENDURECIDO

7.2.1. ENSAIO DE ULTRASSOM

A velocidade de pulso ultrassônico foi medida nos compósitos com a/g = 0,6. Ela variou com o aumento do teor de pó de pedra, de 2547 m/s (0%) a 2815 m/s (50%). A resistência à compressão aumenta com a velocidade de propagação de onda, embora não haja uma correlação perfeita.

7.2.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

Nota-se que com 0% e 10 % de pó de pedra não há grandes diferenças na estrutura do material que se apresenta bem poroso. Nos maiores teores de incorporação, a porosidade da matriz aparenta ser menor.

Na ligação da pasta de gesso com os grãos maiores de pó de pedra há intensa porosidade, aparentemente superior à da matriz, formando como se fosse uma zona de transição.

A alta porosidade verificada nas micro-fotografias é proveniente da evaporação de parte da água não consumida pela reação química.

Na matriz sem adição, aparecem alguns cristais aciculares, difíceis de se ver nos demais casos. Com 10% de pó de pedra, a morfologia parece ser bem granular. Com maiores teores de agregado, há uma grande diversidade na forma dos cristais.

7.2.3. ABSORÇÃO POR IMERSÃO TOTAL

Nota-se o efeito benéfico da adição do pó de pedra na diminuição da absorção por imersão total.

Em todas as outras relações (a/g) foi observado uma diminuição na absorção por imersão total com o aumento do teor de substituição.

Também se verificou que a variação da relação (a/g) produz efeitos na diminuição da absorção, fato já indicado na literatura. Ao se comparar corpos de provas que foram moldados com relação (a/g) de 0,5 e 0,9, para o mesmo teor de substituição pode-se verificar uma diminuição de até 50,5% na absorção.

7.2.4. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os resultados de absorção por capilaridade foram bastante similares àqueles encontrados para o ensaio de absorção total, havendo em todas as series ensaiadas a diminuição da absorção com o incremento do teor de substituição.

7.2.5. DENSIDADE

Para todas as séries há uma tendência no aumento da densidade dos corpos de prova com o incremento do teor da substituição do gesso por pó de pedra. Casos há em que esse aumento chega a mais de 70%.

Obteve-se uma correlação exponencial entre o teor de substituição e o ganho de densidade dos corpos de prova.

7.2.6. DUREZA SHORE (C)

Há tendência no aumento na dureza Shore (c) nos corpos de prova com o incremento do teor da substituição. Já quando se aumenta a relação a/g, a dureza diminui.

7.2.7. RESISTENCIA A COMPRESSÃO

A presença do pó de pedra é benéfica no que diz respeito à resistência à compressão. Há casos em que o teor de 20% chega quase a dobrar a resistência à compressão do gesso puro com a mesma relação a/g, como por exemplo, a/g = 0,9.

O teor de 20% a 30% parece ser o ótimo no que diz respeito à resistência à compressão.

Como ocorreu com a dureza Shore (c), a tendência de crescimento da resistência a compressão com o incremento da substituição se inverte, quando se aumenta a relação (a/g) para o mesmo teor de substituição, o que já era de se esperar.

A maior resistência à compressão ocorreu com relação a/g = 0,5 e 20% de pó de pedra, chegando a 17 MPa.

7.2.8. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados dos ensaios de tração na flexão apresentaram as mesmas tendências daqueles de compressão: o pó de pedra aumenta a resistência; o máximo está entre 20 e 30 % de substituição; a resistência decresce com a relação água/gesso.

7.2.9 TESTES ESTATÍSTICOS

Foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação às propriedades estudadas.

7.3. BLOCOS E PROCESSO CONSTRUTIVO

Foi construído um protótipo

Para fabricação dos blocos foi escolhido o compósito com relação a/g = 0,6 e 40% de pó de pedra, cujas propriedades constam na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Propriedades do compósito escolhido para fabricação dos blocos

Relação a/g	Substituição (%)	Início de pega (min)	Absorção (%)	Densi dade	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)
0,6	40	8:24	21,56	1,58	10,03	6,39

Fonte: Autor, (2021)

O tempo de pega foi suficiente para moldagens dos blocos, de forma semi-artesanal, utilizando-se o mesmo processo das indústrias de artefatos de gesso, mesa e misturador.

Com apenas três tipos de blocos, M40, M10 e MC, o sistema atende às necessidades da variedade de dimensões para se construir uma edificação.

O sistema proposto apresenta pé-direito de 2.90 m, proporcionando maior conforto aos usuários. Ele possibilita que se gere um alpendre com o prolongamento do beiral, que além de proteger as paredes da incidência direta de chuva, proporciona conforto térmico aos moradores.

O bloco principal M40 tem dimensões e peso que possibilitam sua colocação na alvenaria por dois operários. A flexibilidade é garantida pela praticidade no corte dos blocos em sub blocos.

Caso necessária ampliação, a ligação das novas paredes com as alvenarias já existentes pode ser feita pela cinta superior. Outra opção seria o uso de grampos de aço galvanizado.

As paredes de gesso podem dispensar revestimento que é um item que além de gerar resíduos ao meio ambiente, impacta no orçamento de casas de alvenaria de blocos cerâmicos ou blocos de concreto. No caso do protótipo, para melhorar ainda mais o aspecto estético, preferiu-se fazer um fino revestimento com o próprio gesso.

O sistema proposto é bastante prático, porém, como na alvenaria estrutural de blocos de concreto ou cerâmicos, exige um planejamento e projeto prévios com desenho do posicionamento dos blocos e sub-blocos de cada parede, de forma a facilitar o trabalho construtivo e evitarem-se as perdas.

7.4. ENSAIOS DE DESEMPENHO

7.4.1. ENSAIO DE CARGA PROVENIENTE DE PEÇAS SUSPENSAS

A partir dos ensaios realizados no protótipo, destaca-se o bom desempenho das paredes submetidas às cargas provenientes de peças suspensas, considerando as deformações muito inferiores aos valores-limite, e a ausência de arrancamento dos fixadores e quaisquer danos na parede.

7.4.2. ENSAIO DE FECHAMENTOS BRUSCOS

A ausência de danos na interface parede-porta devido às solicitações de fechamentos bruscos por manobras anormais também significa resultado positivo na avaliação realizada.

7.4.3. ENSAIO DE CORPO DURO

Com respeito aos impactos de corpo duro, destaca-se o bom desempenho ante os choques decorrentes de impactos das esferas metálicas de pequena e grande dimensão. As mossas formadas estiveram abaixo dos requisitos normativos e nenhum dano à parede ocorreu.

7.4.4. ENSAIO DE CORPO MOLE

As deformações horizontais inicial e residual da parede testada no protótipo foram praticamente nulas, o que atesta o bom desempenho delas quando submetidas a impactos de corpo mole.

7.4.5. ENSAIO DE REDE DE DORMIR

Quando submetidas a cargas oriundas de rede de dormir, os deslocamentos medidos foram negligenciáveis, estando dentro dos limites aceitáveis e houve ausência de danos na região dos armadores.

7.4.6 AVALIAÇÃO GERAL

Pode-se afirmar que o sistema construtivo apresentado, com blocos de gesso incorporando pó de pedra, no que diz respeito aos ensaios de cargas suspensas, fechamento brusco de porta, impacto de corpo duro, impacto de corpo mole e ensaio de rede de dormir pode ser considerado conforme a NBR15.575 (ABNT, 2013).

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostrou a viabilidade do emprego de um resíduo de pedreira em matrizes de gesso. Conforme o uso desejado, diferentes compósitos podem ser escolhidos entre os aqui estudados.

O uso do pó de pedra aqui apresentado é benéfico duplamente ao ambiente, visto que:

- 1- Reduz a quantidade de ligante industrial, poupando matéria prima e energia;
- 2- Ajuda a livrar a Natureza de um resíduo que lhe é danoso.

Tem-se, pois, uma alternativa válida a ser difundida para aplicação na produção de habitações em geral e de construções rurais.

7.6. TRABALHOS FUTUROS

Com base no aqui apresentado, sugere-se:

- ✓ Adequação do sistema desenvolvido no que diz respeito às instalações hidráulicas e elétricas embutidas;
- ✓ Estudo de proteção à água tanto pela incorporação de produtos na matriz de gesso quanto por tratamentos superficiais;
- ✓ Estudo em laboratório do comportamento estrutural com carga no topo de paredes com os blocos desenvolvidos.
- ✓ Os protótipos poderão ser analisados para os outros requisitos de desempenho da NBR15.575 (ABNT, 2013), como por exemplo ensaios de:
 - Estanqueidade;
 - Durabilidade;
 - Desempenho térmico;
 - Desempenho acústico.

APÊNDICE A
MEMORIAL DESCRITIVO DA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO MODULAR
PORTANTE COM BLOCOS DE GESSO-PÓ DE PEDRA

A.1. FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE GESSO E PÓ DE PEDRA

O processo de fabricação desses blocos é o mesmo empregado para produção de blocos convencionais de gesso. Utilizaram-se as mesas, as réguas e um misturador. Os blocos foram fabricados em escala semi-industrial, e os equipamentos foram perfeitamente adaptados para a produção de cada componente. Foram utilizadas duas formas, confeccionadas em aço, Figura A.1.

Figura A.1 - Fôrma do bloco M40



Fonte: Autor (2021).

As formas eram encaixadas e posicionadas na mesa de moldagem e em seguida era aplicado o desmoldante no seu interior como apresentado na Figura A.2.

Figura A.2 - Fôrma M40 recebendo o desmoldante



Fonte: Autor (2021).

Após o processo de pincelamento das formas era feito a pesagem do material, anteriormente determinado para que fossem minimizadas ao máximo as possíveis perdas, Figura A.3.

Figura A.3 - Pesagem do material utilizado no traço



Fonte: Autor (2021).

Após essa etapa eram misturados, em recipiente de tamanho adequado, manualmente a água, o gesso e o pó de pedra, nessa ordem. Após essa mistura inicial a pasta era homogeneizada com um misturador mecânico, conforme etapas apresentadas nas Figuras A.4 e A.5).

Figura A.4 - Adição do gesso e do pó de pedra ao traço



Fonte: Autor (2021).

Figura A.5 - Homogeneização com misturador mecânico



Fonte: Autor (2021).

Após a homogeneização, a pasta era transferida para o interior da fôrma e espalhada para preencher todas as faces, evitando a formação de vazios e defeitos nos encaixes. Posteriormente, logo após o início do processo de endurecimento da pasta, fazia-se a remoção do excesso, conforme se vê na Figura A.6.

Figura A.6 - Moldagem seguida de remoção do excesso de gesso após início de pega



Fonte: Autor (2021).

Com o intuito de melhorar o acabamento da peça devido à aspereza deixada pelos grãos de pó de pedra presentes na pasta, era dado um acabamento com uma fina camada de pasta de gesso com espátula metálica, Figura A.7.

Figura A.7 - Acabamento da peça



Fonte: Autor (2021).

Após a conclusão dessa etapa o bloco de gesso permanecia na forma por cerca de 15 minutos e então era feita a desmoldagem das peças, Figura A.8.

Figura A.8 - Desmoldagem das peças



Fonte: Autor (2021).

Nas Figuras de A.9 e A.10 são apresentadas imagens dos blocos confeccionados.

Figura A.9 - Bloco de canto (BC) e Bloco M10



Fonte: Autor (2021).

Figura A.10 - Blocos M40



Fonte: Autor (2021).

A.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

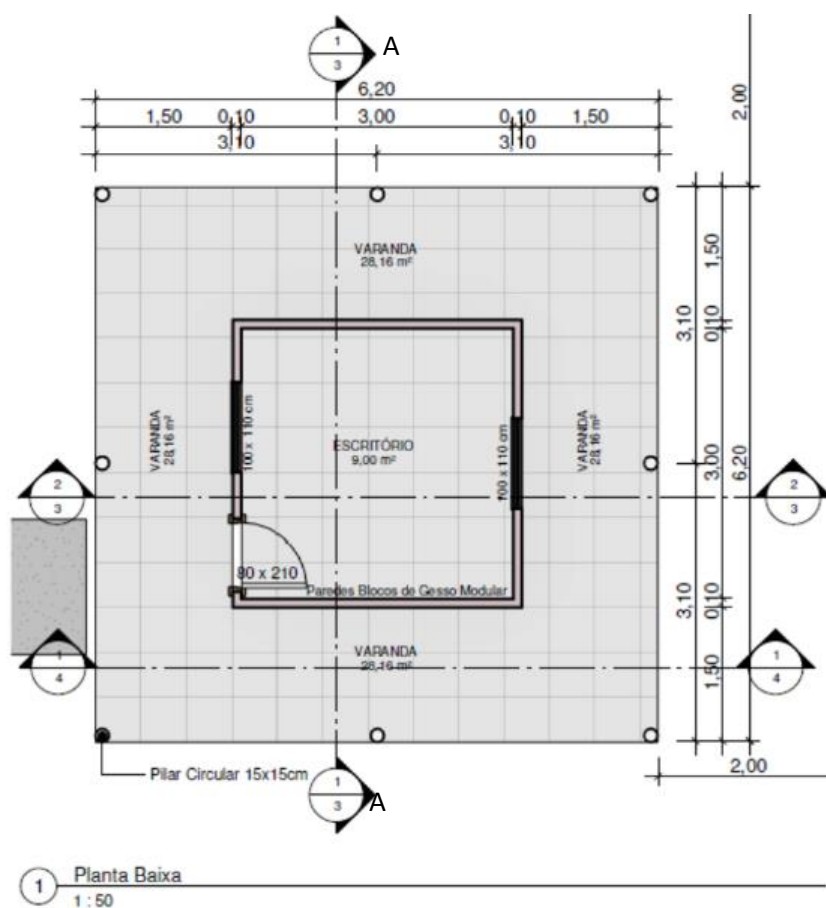
A.2.1. PROJETO DO PROTÓTIPO

Para a execução do protótipo onde foram realizados os ensaios de desempenho nas alvenarias, pensou-se em um modelo que representasse um ambiente de uma edificação com as paredes definidas para um padrão usual de espaço com pequenas dimensões. Assim, foi estabelecido um módulo, procurando compatibilizar as dimensões do protótipo com as amarrações entre os elementos, evitando desperdício de material durante a sua execução.

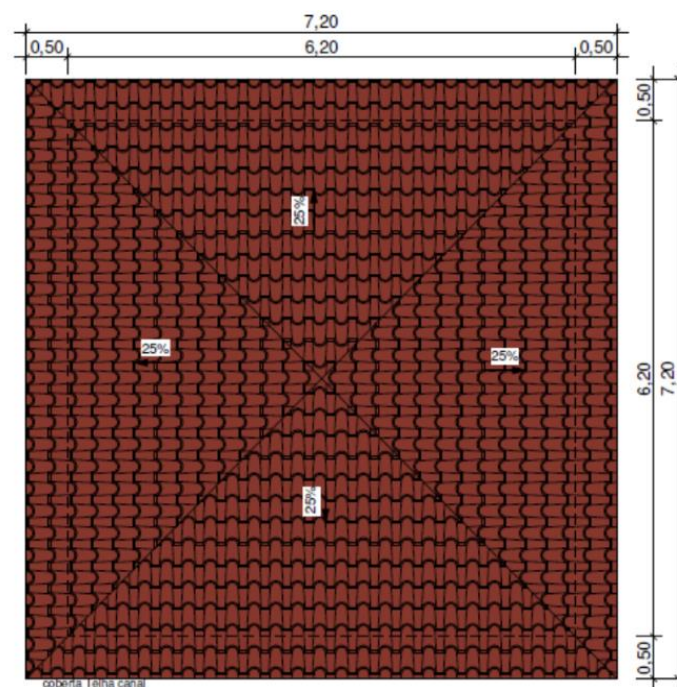
As características do protótipo construído que foi objeto de avaliação dos ensaios de desempenho são apresentadas nas Figuras de A.11 a A.14. Note-se que em volta da

construção prevê-se um alpendre, prática usada no passado, e esquecida nos dias de hoje. Em clima quente como o do Nordeste do Brasil, a varanda melhora muito o conforto térmico da habitação, reduzindo a insolação nas paredes. Além disso protege-as das intempéries, causadoras de muitas patologias vistas nas casas populares da região.

Figura A.11 - Planta baixa

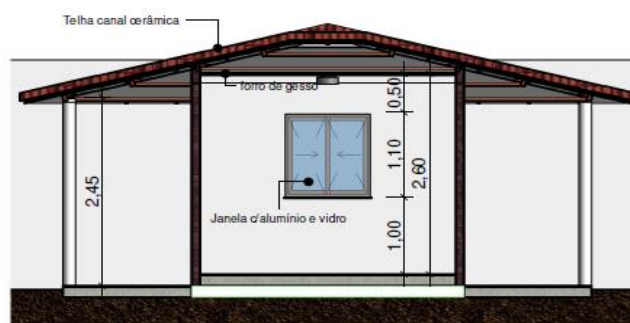


Fonte: Autor (2021).

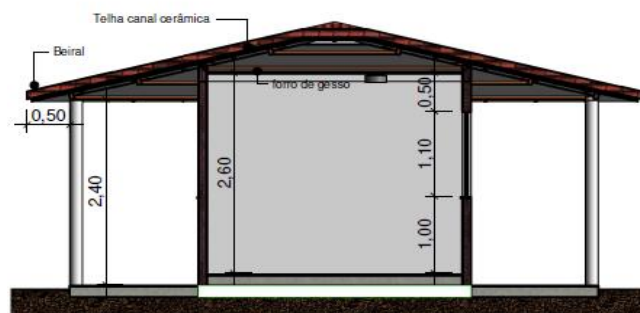
Figura A.12 - Planta de cobertura

1 Planta de Coberta
1 : 50

Fonte: Autor (2021).

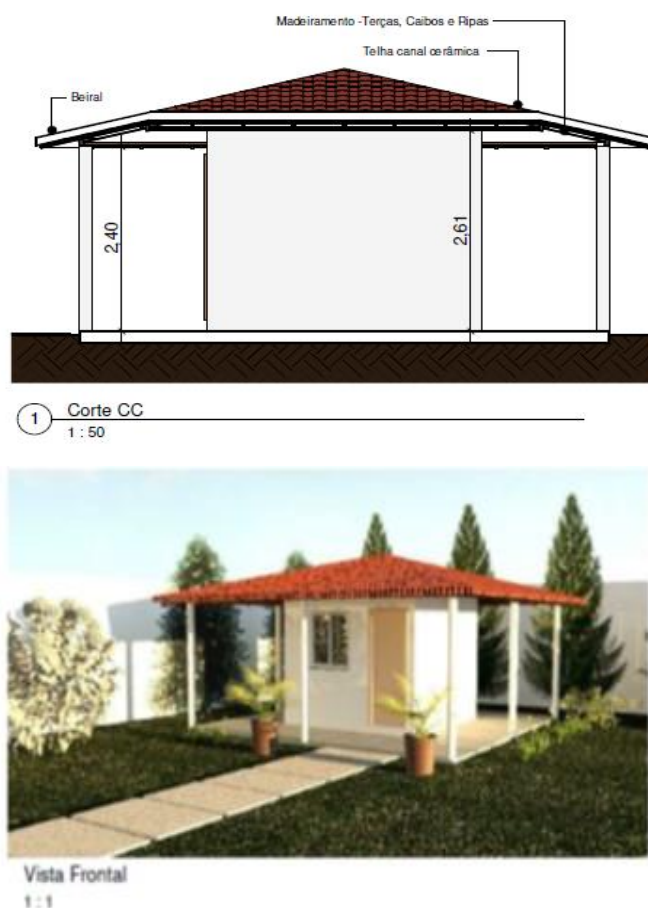
Figura A.13 - Cortes

1 Corte AA
1 : 50



2 Corte BB
1 : 50

Fonte: Autor (2021).

Figura A.14 - Corte e vista frontal

Fonte: Autor (2021).

A.2.2. LOCAÇÃO DAS FUNDAÇÕES

Locação é o processo de transferência dos elementos da planta baixa de uma edificação para o terreno em que será realizada a obra.

A locação é uma das etapas mais importantes para a garantia da funcionalidade e da qualidade de toda a construção. Uma locação com erros de esquadro ou de medida fará com que a construção fique com medidas diferentes das especificadas em projeto, gerando retrabalho de mão de obra e desperdício de materiais.

As fundações devem ser locadas precisamente de acordo com a modulação e sem desvio em relação ao alinhamento das paredes, para as quais servirão de suporte, Figura A.15.

Nesse trabalho a transferência dos elementos da planta baixa do protótipo para o terreno foi realizada com o auxílio de pontaletes, linhas de nylon, esquadro metálico e pó de gesso para as marcações no solo.

Figura A.15 - Locação das fundações



Fonte: Autor (2021).

A.2.3. ESCAVAÇÃO DAS FUNDAÇÕES

A escavação é o processo de execução de furos ou valas no terreno e serve para que a fundação fique abaixo do solo, protegida. Esse processo é feito através de picaretas, pás, enxadas, escavadeiras e outras máquinas.

Nesse trabalho optou-se pela escavação manual. Na Figura A.16 apresenta-se a escavação das fundações do protótipo.

Figura A.16 - Escavação das fundações



Fonte: Autor (2021).

A.2.4. FUNDAÇÃO DE ALVENARIA DE PEDRA ARGAMASSADA

Alvenaria de pedra argamassada é o sistema construtivo que utiliza grandes pedras ligadas por argamassa. Esse tipo de fundação é muito usada na Região Nordeste do Brasil. Nessa etapa é necessário ter especial atenção ao umedecimento das pedras para prevenir

a perda de água do concreto/argamassa para elas. Nesse projeto a alvenaria de pedra foi levantada, de forma que ficasse bem apoiadas. As pedras foram molhadas, assentadas e comprimidas até refluir a argamassa pelos lados e juntas, tomando posição firme. O traço da argamassa utilizado no assentamento foi de cimento: areia 1:4.

A alvenaria de pedra foi executada até atingir-se o nível da alvenaria de embasamento, Figura A.17.

Figura A.17 - Fundação em alvenaria argamassada



Fonte: Autor, (2020)

A.2.5. ALVENARIA DE EMBASAMENTO

Alvenaria de embasamento é alvenaria que nasce sobre a fundação corrida com a principal finalidade de regularizar o nível para o início da alvenaria de elevação, sendo muito usada principalmente quando o terreno é com aclive ou declive.

Nesse caso optou-se por fazer a alvenaria de embasamento porque o local onde foi edificado o protótipo encontra-se na cota mais baixa do terreno, estando susceptível a alagamentos o que poderia trazer problemas ao bom desempenho do mesmo. Na Figura A.18 vê-se a alvenaria de embasamento executada nesse projeto.

Figura A.18 - Alvenaria de embasamento



Fonte: Autor (2021).

A.2.6. ATERRO DO CAIXÃO

O material usado no aterro foi um solo conhecido localmente como piçarra, muito usada para essa finalidade na região, de ótima qualidade, proveniente das proximidades de Cajazeiras-PB, Figura A.19.

Figura A.19 - Piçarra utilizada como material de aterro



Fonte: Autor, (2020)

O material do aterro foi espalhado no interior das fundações de forma manual, em camadas de 30 cm, utilizando-se para tanto, carrinho de mão, Figura A.20.

Figura A.20 - Aterro das fundações



Fonte: Autor (2021).

A.2.7. COMPACTAÇÃO DO ATERRO DA FUNDAÇÃO

A compactação é um método de estabilização de solos, que se dá por aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Pode ser definida como o processo de aumentar mecanicamente a densidade do solo, tornando-o mais estável, reduzindo variações volumétrica e garantindo baixos índices de erosão, além de aumentar a resistência mecânica.

A execução da compactação do aterro do protótipo, foi realizado de forma manual, utilizando um malho confeccionado na própria obra, processo muito utilizado em pequenas construções. Para tanto o material do aterro foi espalhado em camadas de 30 cm que posteriormente eram umedecidas para só então serem compactadas, Figura A.21.

Figura A.21 - Compactação do aterro



Fonte: Autor (2021).

A.2.8. EXECUÇÃO DO CONTRAPISO

O contra-piso é uma camada de regularização da superfície superior do aterro, de espessura entre 3cm e 5cm, para receber o acabamento final (cerâmica ou outro material).

A argamassa utilizada no contra-piso do protótipo foi uma argamassa mais seca, do que as normalmente utilizadas para alvenaria, tendo que ser polvilhada, com traço 1:3. (cimento:areia). A areia utilizada foi a média que foi peneirada para tirar os excessos de pedra.

Foram aplicados os primeiros traços de argamassa ao longo das mestras para ir se fazendo a operação conhecida como mestrar o contra-piso.

Depois aplicou-se a argamassa espalhando-a entre as mestras. Em seguida o material foi adensado com soquete de madeira. É necessário fazer essa compactação porque o traço da argamassa é bem seco.

Por fim com o auxílio de uma régua de alumínio foi feito o desempeno acompanhando as mestras formando os panos prontos de contra-piso, Figura A.22.

Figura A.22 - Contrapiso

Fonte: Autor (2021).

A.2.9. CINTA DE CONCRETO

Após a execução do contra-piso, faz-se uma cinta de concreto, 10 cm x 10 cm de largura e altura. Essa cinta serve de rodapé e de proteção à base da parede de gesso.

Sobre essa cinta, aplica-se uma pintura impermeabilizante que pode ser, a exemplo, manta asfáltica, para impedir que o gesso tenha contato direto com o concreto, Figura A.23.

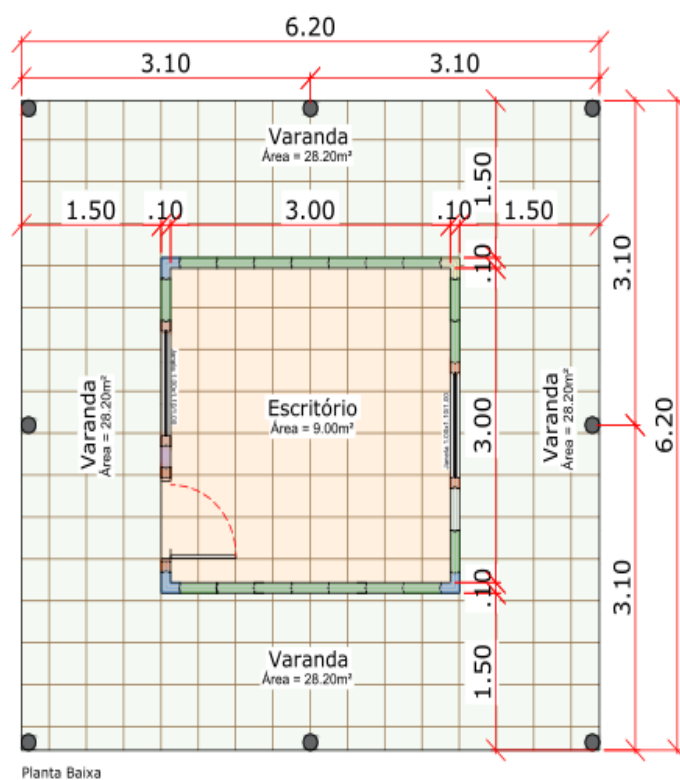
Figura A.23 - Cinta de concreto impermeabilizada

Fonte: Autor (2021).

A.2.10. EXECUÇÃO DAS ALVENARIAS

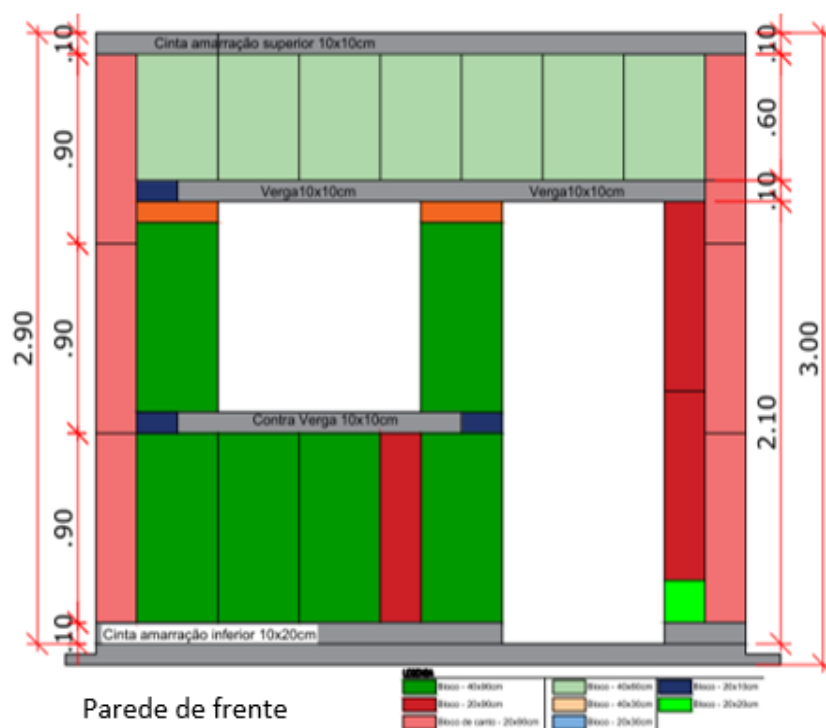
Para execução da alvenaria deve-se previamente desenhar o posicionamento dos blocos e sub-blocos, o que facilita seu assentamento. Nas Figuras A.24 a A.27 pode-se ver como eles são dispostos.

Figura A.24 - Posicionamento dos blocos na primeira fiada



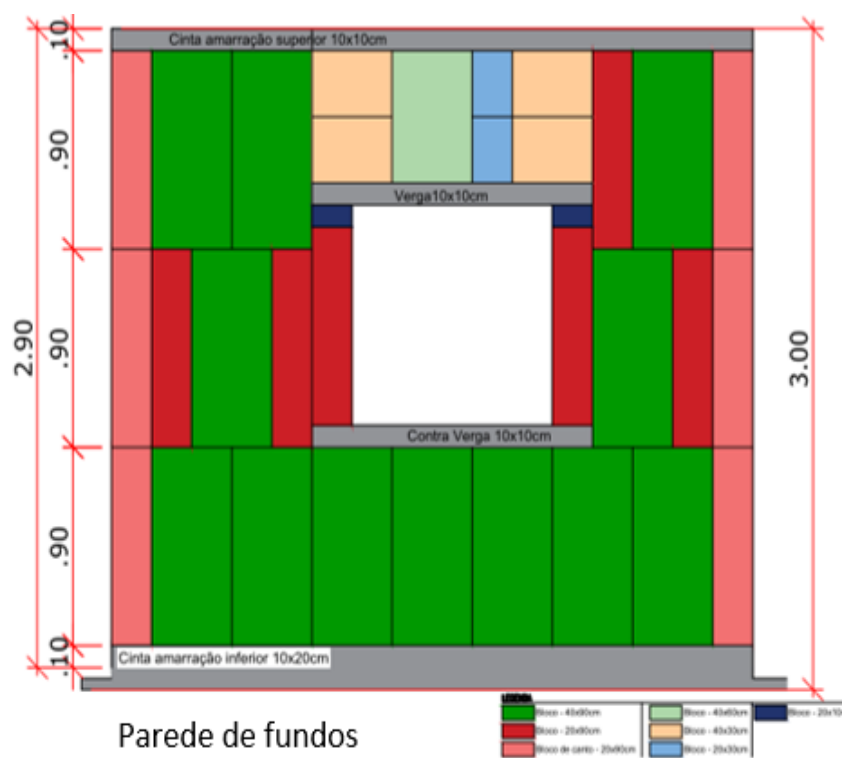
Fonte: Autor (2021).

Figura A.25 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos na parede de frente



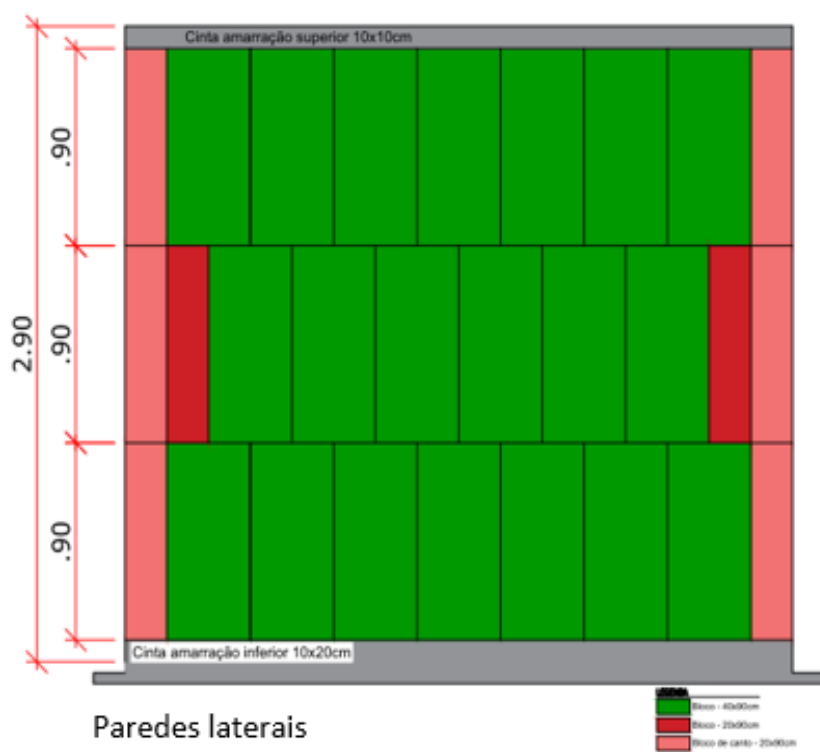
Fonte: Autor (2021).

Figura A.26 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos na parede de fundo



Fonte: Autor (2021).

Figura A.27 - Posicionamento dos blocos e sub-blocos nas paredes laterais



Fonte: Autor (2021).

Pode-se gerar a Tabela A.1 e a partir dela quantificar quantidade dos três blocos básicos a serem fabricados.

Tabela A.1 - Quantitativo de blocos e sub blocos

Bloco ou sub-bloco	Quantidade
BC	12
M40 (40 x 90)	58
SB 20 x 90	13
SB 40 x 30	4
SB 40 x 60	8
SB 20 x 30	2
SB10 x 20	2
SB 40 x 10	2
SB 20 x 10	3
SB 20 x 20	1

Fonte: Autor (2021).

Para gerar tudo isso basta fabricar os blocos indicados na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Quantitativo de blocos para serem empregados e gerarem os sub-blocos

Bloco	Quantidade
BC	12
M40	73
M10	1

Fonte: Autor (2021).

As perdas são insignificantes, menos que o correspondente a um bloco M40.

O processo de execução das alvenarias inicia-se pela locação dos blocos de canto Figura A.28, pois são eles que definem o alinhamento da construção.

Em seguida, a primeira fiada deve ser executada observando-se o desenho das paredes.

Na segunda e terceira fiada, o posicionamento dos blocos e sub-blocos, quando possível, deve ser defasado da fiada inferior, de forma a evitar que as juntas verticais fiquem contínuas.

No processo construtivo, a argamassa de assentamento foi o gesso-cola, que é o gesso aditivado, usado para a colagem de elementos pré-moldados. A espessura da junta não deve ultrapassar dois milímetros, para que não venham a ser detectados durante o posicionamento dos blocos problemas quanto a modulação.

Figura A.28 - Locação dos blocos de canto



Fonte: Autor (2021).

A.2.11. VÃOS DAS ESQUADRIAS

A locação dos vãos de esquadrias deve estar representada, detalhadamente, na elevação das paredes do projeto modular.

As aberturas, no caso de janelas, terão origem na segunda fiada com a colocação das contra-vergas, indicando que ali haverá uma janela. Em seguida, procede-se a colocação dos demais blocos especificados em projeto. Na terceira fiada, assentam-se primeiramente os blocos que delimitam os vãos e que servirão de encaixe para a verga. Acima da verga, complementa-se com os blocos especificados, concluindo a terceira fiada. Para vencer a altura de 6M (60 cm) acima da verga, sendo recomendado usar dois sub-blocos de 3M (SM 40x30) para evitar que cada bloco M40 gere uma sobra de um sub-bloco SM 40x30.

A verga e a contra-verga, que possuem a função de distribuir as cargas que seriam resistidas pelos blocos que supostamente preencheriam os vãos, são dimensionadas de

acordo com as medidas estabelecidas no projeto modular em função do tamanho de esquadria. Seu comprimento se projeta 3M (30 cm) além do vão de abertura, de ambos os lados. Elas podem ser de madeira ou pré-fabricadas de gesso com fibras ou podem ser confeccionadas no canteiro de obras. No caso, foram feitas em concreto armado.

A.2.12. CINTA DE AMARRAÇÃO

Sobre todas as paredes deve ser colocada uma cinta de amarração com a função de solidarizá-las entre si, pelo seu topo, de forma que os esforços horizontais e verticais provenientes do telhado e forro sejam bem distribuídos ao longo das paredes. Essa cinta, em concreto armado, com seção transversal de 10 cm x 10 cm, deve ser moldada no local. Para casa popular, um ferro de 8 mm posicionado no centro da cinta já serve como reforço, mais como se dispunha de armação de vigas remanescentes de outras obras e que estavam sem uso, optou-se por utilizar a ferragem indicada na Figura A.29.

Figura A.29 - Armação da cinta



Fonte: Autor (2021).

Como o gesso não deve entrar em contato direto com o concreto, é necessário que a mesma pintura isolante aplicada na cinta inferior seja também aplicada no topo da parede Figura A.30. Esta fica solidarizada mecanicamente com a cinta por conta da saliência do encaixe, como apresentado na Figura A.31.

Figura A.30 - Pintura isolante para recebimento da cinta



Fonte: Autor (2021).

Figura A.31 - Cinta concretada



Fonte: Autor (2021).

A.2.13. ALTURA DO PISO AO TETO

. Um dos princípios que nortearam essa proposta foi a preocupação com a proteção das paredes a ação da água. Assim sendo, no sistema construtivo proposto, a altura de piso a teto foi de 2,90 m o que permite o apropriado prolongamento do beiral para exercer a proteção contra a chuva Figura A.32.

Figura A.32 -Prolongamento do beiral para a proteção da alvenaria de gesso



Fonte: Autor (2021).

Essa altura de piso-teto dá aos usuários um melhor conforto melhora a habitabilidade, diminuindo a sensação de confinamento comumente encontrada nas tipologias de casas populares.

A.2.14. COBERTURA

A estrutura de madeira da cobertura e o telhamento foram executados logo após a concretagem da cinta de amarração com inclinação exigida pelo tipo de telha, no caso, telhas cerâmicas.

A estrutura de madeira para o recebimento das telhas foi constituída de linhas e caibros de Massaranduba. As linhas foram assentadas diretamente nas colunas externas de concreto armado, como pode ser observado na Figura A.33. A estrutura foi fixada usando-se pregos de caibro 17 x 27.

Figura A.33 - Madeiramento do telhado



Fonte: Autor (2021).

O tipo de telha usada para cobertura das casas foi a telha américa disponível no mercado de Cajazeiras com dimensões: Comprimento 44,9 cm; Largura 26,4 cm; LP 41,7 cm. Na Figura A.34 observa-se o detalhe do telhado após sua execução.

Figura A.34 - Telhado após conclusão



Fonte: Autor (2021).

A.2.15. PORTAS E JANELAS

As esquadrias foram instaladas por meio de elementos adequados, rigidamente fixados à alvenaria, por processo adequado a cada caso particular, de modo a assegurar a rigidez e estabilidade do conjunto.

A instalação das esquadrias obedeceu ao alinhamento, prumo e nivelamento adequados. Na colocação, não foram forçadas a se acomodarem em vãos fora de esquadro ou dimensões diferentes das indicadas no projeto. As esquadrias foram instaladas através de contramarco, rigidamente fixados na alvenaria, de modo a assegurar a rigidez e estabilidade do conjunto, na Figura A.35, apresenta-se o detalhe das portas e janelas utilizadas no protótipo.

Figura A.35 - Porta e janelas do protótipo



Fonte: Autor (2021).

A.2.16. REVESTIMENTO

Após a elevação das paredes foi executado reboco com argamassa de gesso preparada manualmente, além de aumentar a rigidez da parede, o revestimento proporciona maior estabilidade, fazendo com que a mesma tenha um melhor acabamento cobrindo e regularizando as imperfeições Figura A.36.

Figura A.36 - Parede rebocada



Fonte: Autor, (2020)

A.2.17. PINTURA E ACABAMENTO

O protótipo foi pintado com tinta acrílica tendo sido a pintura aplicada diretamente sobre o reboco. Nesta mesma etapa instalam-se as luminárias, interruptores e tomadas. Na Figura A.37 apresenta-se uma foto do protótipo concluído.

Figura A.37 - Protótipo concluído



Fonte: Autor, (2020)

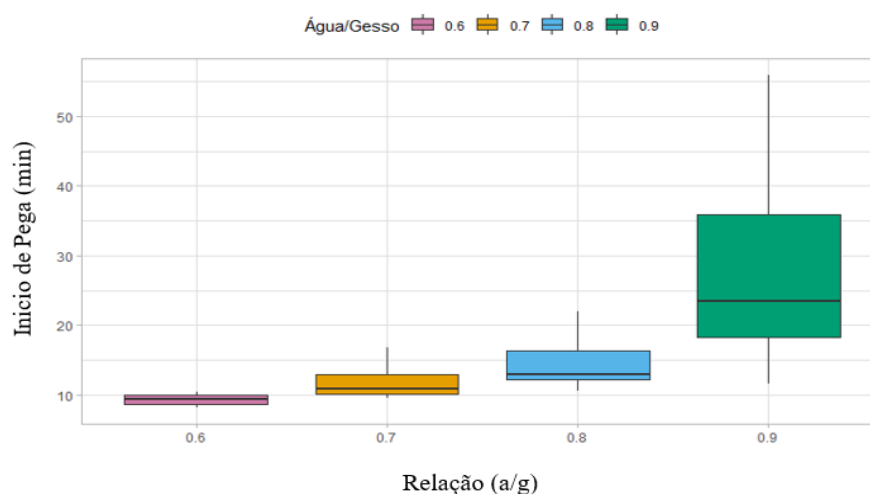
APÊNDICE B

B.1. TESTES ESTATÍSTICOS

B.1.1. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE INICIO DE PEGA

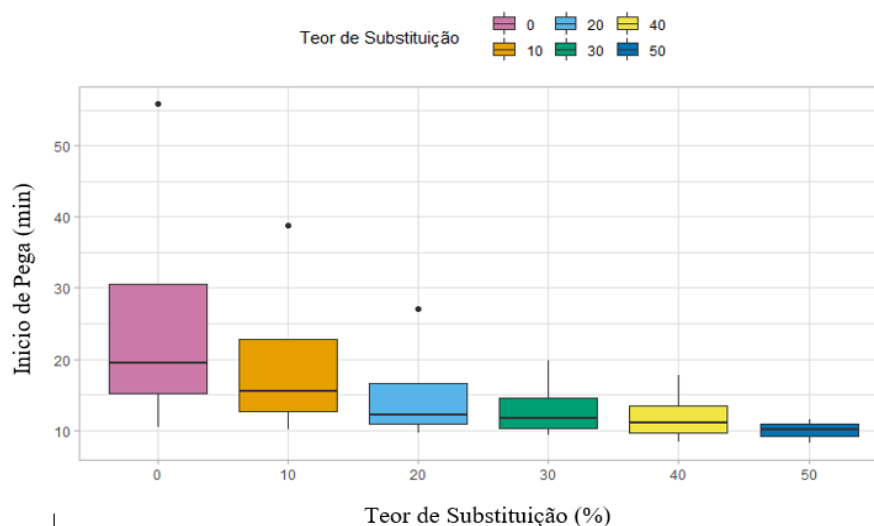
Nos gráficos Boxplot Figura B.1 para o início de pega verifica-se uma tendência de crescimento das medianas à medida que as relações (a/g) crescem. Observa-se também, que a variabilidade dos dados para as relações (a/g) 0,6, 0,7 e 0,8 são pequenas, mas com uma tendência clara de crescimento. Para a relação (a/g) 0,9 essa variabilidade aumenta substancialmente.

Figura B.1 - Boxplot da influência das relações (a/g) nos tempos de início de pega



Fonte: Autor, (2021)

Quando se trata do teor de substituição para esta mesma variável, verifica-se que os teores de 0%, 10% e 20% apresentaram *outliers*. Além disso, tanto a medida quanto a variabilidade dos dados tendem a diminuir com o incremento da substituição, Figura B.2.

Figura B.2 - Boxplot da influência do teor de substituição nos tempos de início de pega

Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.1 tem-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência da relação (a/g) e do teor de substituição nos tempos de início de pega dos traços estudados.

Tabela B.1 - Análise da variância (anova duas vias) para o tempo de início de pega

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	1311,3	437,1	8,813	0,0013
Substituição	5	731,2	146,2	2,949	0,0475
Resíduos	15	743,9	49,6		

Fonte: Autor, (2021)

Para o Tempo de Início de Pega o resultado mostra que ambos os fatores, relação a/g e teor de substituição, foram significativos (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Nas Tabelas B.2 e B.3 verifica-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teor de substituição.

Tabela B.2 - Teste de Tukey das relações (a/g) para o tempo de início de pega

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.7-0.6	2,6111	-9,1075	14,3297	0,9166
0.8-0.6	5,3500	-6,3686	17,0686	0,5675
0.9-0.6	19,1556	7,4369	30,8742	0,0014
0.8-0.7	2,7389	-8,9797	14,4575	0,9054
0.9-0.7	16,5444	4,8258	28,2631	0,0050
0.9-0.8	13,8056	2,0869	25,5242	0,0187

Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.2 e B.3, são apresentadas também as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teor de substituição com relação ao tempo de início de pega. Para as relações (a/g) os valores p do Teste de Tukey os níveis 0.9 - 0.8, 0.9 - 0.7 e 0.9 - 0.6 foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Para esses casos, os intervalos de confiança não contiveram o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças do tempo de pega nessas relações (a/g) são diferentes. Para o teor de substituição, apenas a diferença entre os níveis 50 - 0, foi significativa para o teste de Tukey (valor $p < 0.05$). Verifica-se ainda que nesse caso, o intervalo não contém o valor zero, isto é, existindo diferença entre as médias do tempo de início de pega.

Tabela B.3 - Teste de Tukey dos teores da substituição para o tempo de início de pega

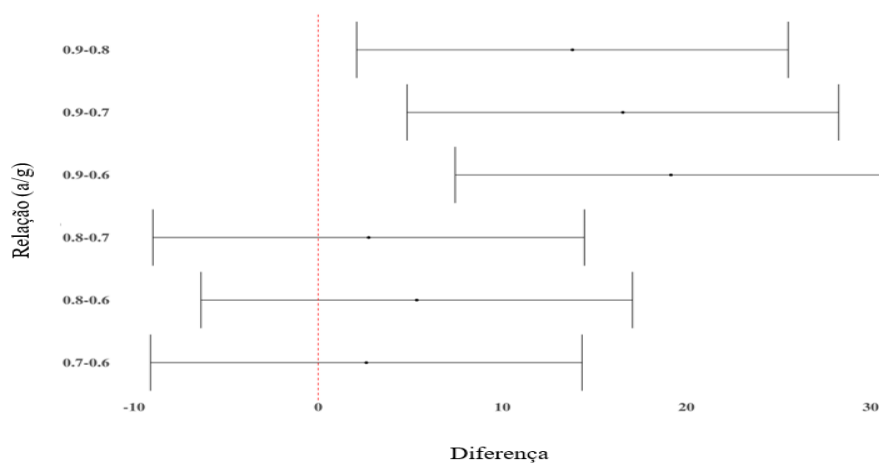
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
40 - 50	2,0750	-14,1040	18,2540	0,9980
30 - 50	3,1292	-13,0498	19,3082	0,9870
20 - 50	5,3333	-10,8457	21,5123	0,8853
10 - 50	10,0292	-6,1498	26,2082	0,3792
0 - 50	16,3250	0,1460	32,5040	0,0474
30 - 40	1,0542	-15,1248	17,2332	0,9999
20 - 40	3,2583	-12,9207	19,4373	0,9844
10 - 40	7,9542	-8,2248	24,1332	0,6123
0 - 40	14,2500	-1,9290	30,4290	0,1006

20 - 30	2,2042	-13,9748	18,3832	0,9974
10 - 30	6,9000	-9,2790	23,0790	0,7346
0 - 30	13,1958	-2,9832	29,3748	0,1447
10 - 20	4,6958	-11,4832	20,8748	0,9287
0 - 20	10,9917	-5,1873	27,1707	0,2901
0 - 10	6,2958	-9,8832	22,4748	0,7990

Fonte: Autor, (2021)

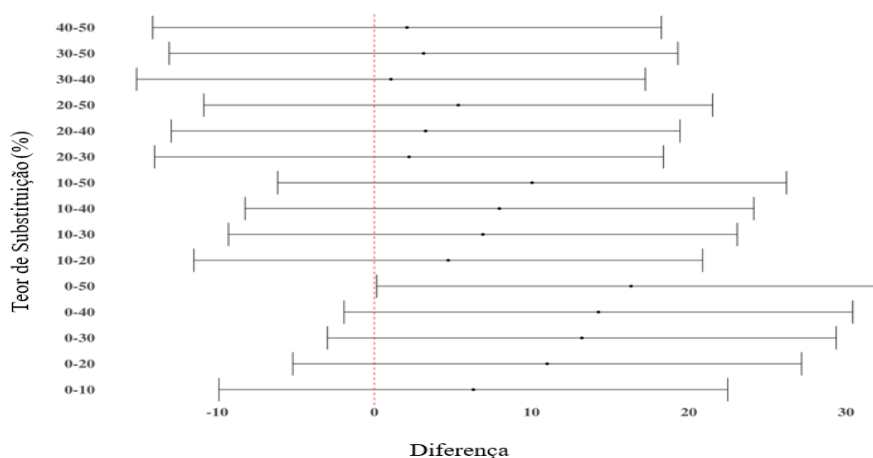
Pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%) para os tempos de início de pega nas Figuras B.3 e B.4.

Figura B.3 - Diferença na média das relações (a/g) para o tempo de início de pega



Fonte: Autor, (2021)

Figura B.4 - Diferença na média dos teores de substituição para o tempo de início de pega



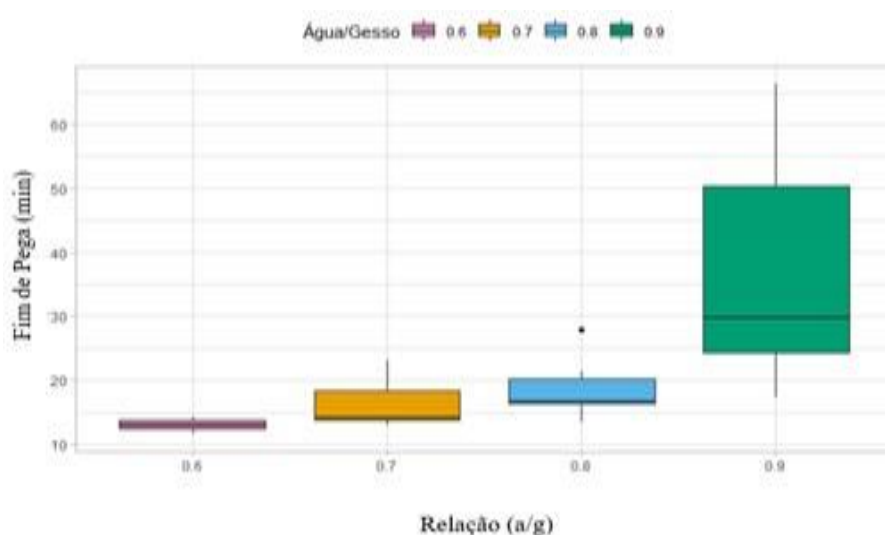
Fonte: Autor, (2021)

Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação ao início de pega. Isto porque em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação ao início de pega, enquanto o incremento do teor de substituição acelera, o aumento da relação água/gesso tende a desacelerar o início do tempo de pega das pastas.

B.1.2. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE FIM DE PEGA

No gráfico da Figura B.5, de fim de pega verifica-se um comportamento similar ao encontrado para o início de pega onde também se vê uma clara tendência de aumento tanto da mediana quanto da variabilidade dos dados quando a relação (a/g) também é aumentada.

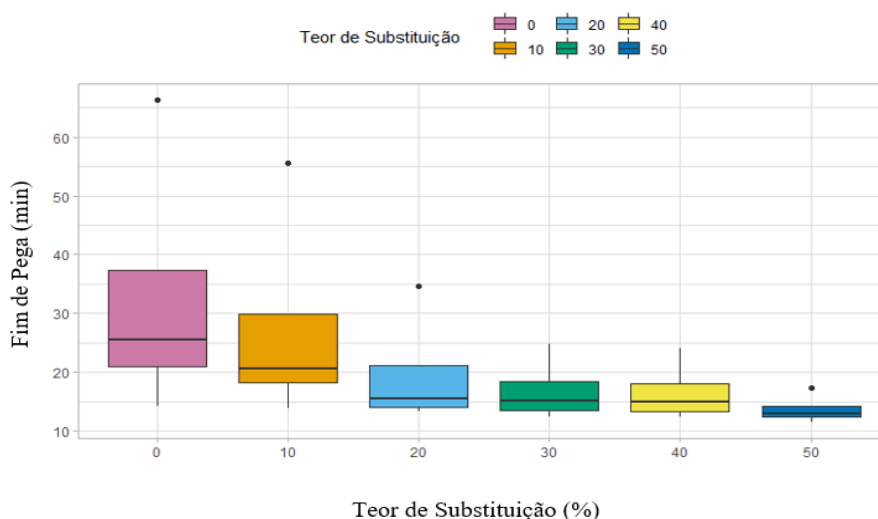
Verifica-se uma baixa variabilidade no tempo de fim de pega para as relações (a/g) de 0.6, 0.7 e 0.8. Porém ao com a relação (a/g) de 0.9 essa variabilidade se acentua. Vale ressaltar que para o nível 0.8, há um *outlier* (valor discrepante).

Figura B.5 - Boxplot da influência das relações (a/g) nos tempos de fim de pega

Fonte: Autor, (2021)

Na Figura B.6 os teores de substituição de 0, 10, 20 e 50% apresentaram *outliers*.

Verifica-se uma tendência de diminuição tanto na mediana quanto da variabilidade dos dados quando o percentual de substituição também aumenta.

Figura B.6 - Boxplot da influência do teor de substituição nos tempos de fim de pega

Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.4, tem-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e dos diferentes teores de substituição no tempo de fim de pega nos compósitos estudados.

Tabela B.4 - Análise da variância (anova duas vias) para o tempo de fim de pega

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	2111	703,7	10,211	0,0006
Teor de substituição	5	1099	219,9	3,191	0,0369
Resíduos	15	1034	68,9		

Fonte: Autor, (2021)

Para o Tempo de Fim de Pega o resultado mostra que ambos os fatores foram significativos (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Nas Tabelas B.5 e B.6 verifica-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para a relação (a/g) e teor de substituição.

Tabela B.5 - Teste de Tukey relação (a/g) para o tempo de fim de pega

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.7 - 0.6	3,2722	-10,5417	17,0861	0,9021
0.8 - 0.6	5,6250	-8,1889	19,4389	0,6518
0.9 - 0.6	24,1278	10,3139	37,9417	0,0008
0.8 - 0.7	2,3528	-11,4611	16,1667	0,9599
0.9 - 0.7	20,8556	7,0417	34,6695	0,0029
0.9 - 0.8	18,5028	4,6889	32,3167	0,0075

Fonte: Autor, (2021)

Tabela B.6 - Teste de Tukey do teor da substituição para o fim de pega

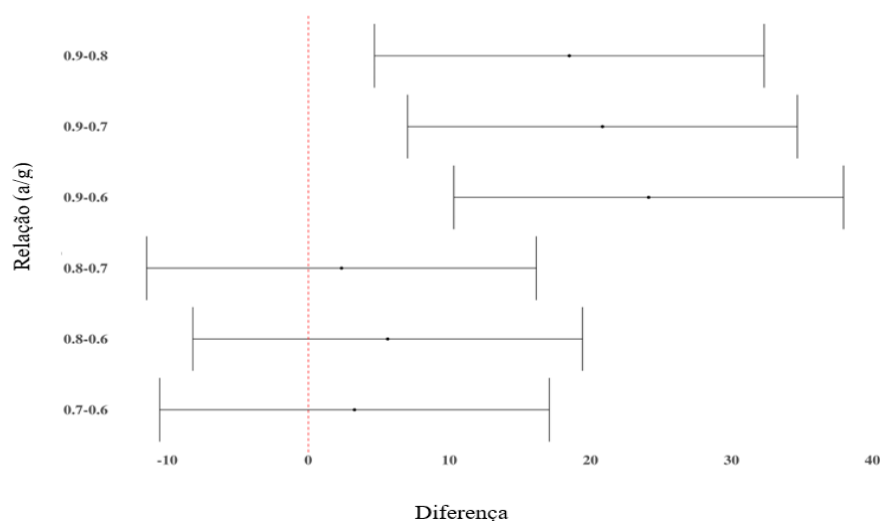
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
40 - 50	2,8583	-16,2134	21,9301	0,9959
30 - 50	3,1792	-15,8926	22,2509	0,9934
20 - 50	6,0208	-13,0509	25,0926	0,9020
10 - 50	13,9000	-5,1718	32,9718	0,2280
0 - 50	19,1292	0,0574	38,2009	0,0491
30 - 40	0,3208	-18,7509	19,3926	1,0000

20 - 40	3,1625	-15,9093	22,2343	0,9935
10 - 40	11,0417	-8,0301	30,1134	0,4489
0 - 40	16,2708	-2,8009	35,3426	0,1176
20 - 30	2,8417	-16,2301	21,9134	0,9960
10 - 30	10,7208	-8,3509	29,7926	0,4792
0 - 30	15,9500	-3,1218	35,0218	0,1291
10 - 20	7,8792	-11,1926	26,9509	0,7583
0 - 20	13,1083	-5,9634	32,1801	0,2794
0 - 10	5,2292	-13,8426	24,3009	0,9429

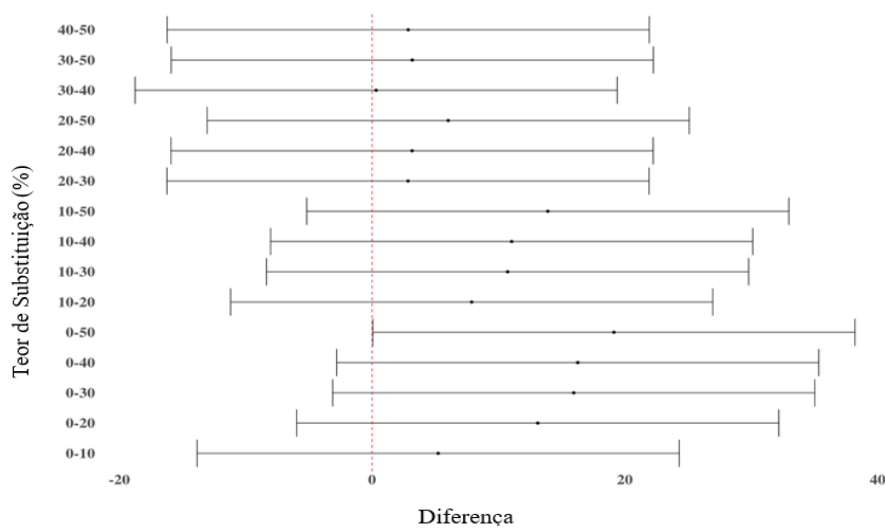
Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.5 e B.6 também são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teor de substituição para o fim de pega. Para as relações (a/g) os valores p do Teste de Tukey os níveis 0.9 - 0.8, 0.9 - 0.7 e 0.9 - 0.6 foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Para esses casos, os intervalos de confiança não contiveram o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças do tempo de pega das relações (a/g) são diferentes. Para o teor de substituição, apenas a diferença entre os níveis 50 - 0, foi significativa para o teste de Tukey (valor $p < 0.05$). Note ainda que nesse caso, o intervalo não contém o valor zero, isto é, existe diferença entre as médias do tempo de fim de pega.

Pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%) para o tempo de fim de pega nas Figuras B.7 e B.8.

Figura B.7 - Diferença na média das relações (a/g) para o tempo de fim de pega

Fonte: Autor, (2021)

Figura B.8 - Diferença na média dos teores de substituição para o tempo de início de pega

Fonte: Autor, (2021)

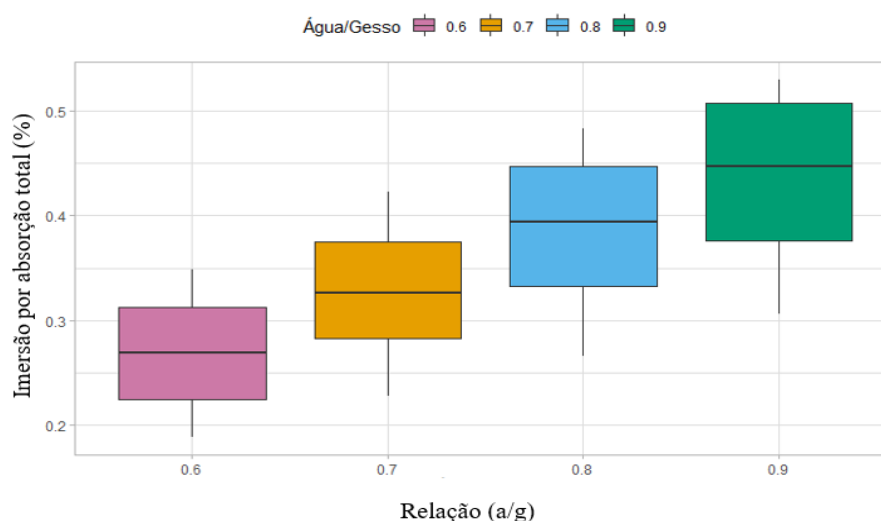
Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação ao fim de pega. Em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação ao fim de pega, enquanto o incremento do teor de substituição acelera o fim de

pega o aumento da relação água/gesso tende a desacelerar o fim do tempo de pega das pastas. Comportamento idêntico ao verificado para o início de pega.

B.1.3. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO TOTAL

Na Figura B.9 verifica-se uma tendência crescente das medianas do valor da absorção por Imersão Total, quando se aumentam as relações (a/g). Vale salientar que para a relação (a/g) 0.9 obteve-se a maior mediana, próxima a 0.45 e para a relação (a/g) 0.6 obteve a menor mediana, abaixo de 0.3. Com isso, tem-se indícios de que as relações (a/g) impactam na absorção por imersão total dos corpos de prova estudados.

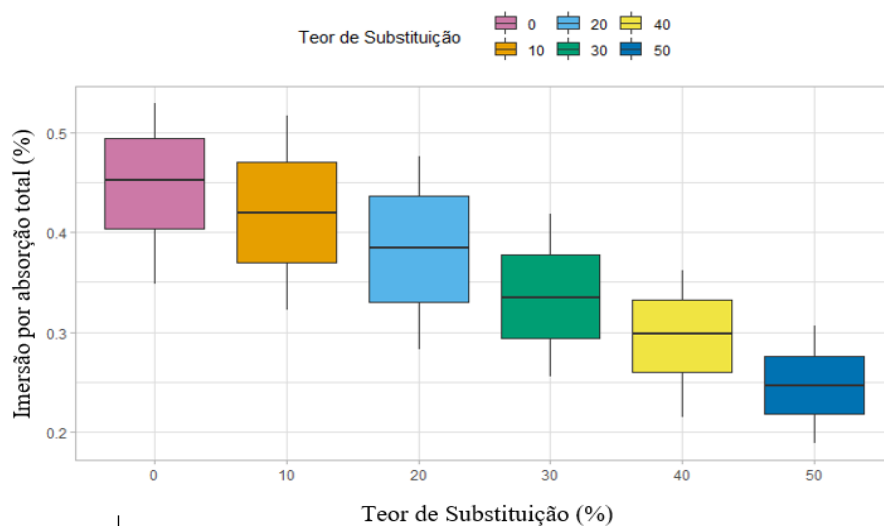
Figura B.9 - Boxplot da influência das relações (a/g) na absorção por imersão total



Fonte: Autor, (2021)

Na Figura B.10 constata-se um cenário decrescente das medianas na medida que o teor de substituição aumenta. Cabe destacar que os corpos de prova sem substituição obtiveram a maior mediana, próxima a 0.45 e o teor de substituição de 50% obteve a menor mediana, abaixo de 0.25. Com isso, tem-se indícios de que os teores de substituição impactam na absorção por imersão total. Outro fator verificado é que para o teor de substituição de 50% houve a menor variabilidade dos dados.

Figura B.10 - Boxplot da influência dos teores de substituição na absorção por imersão total



Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.7 apresenta-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e dos teores de substituição no grau de absorção por imersão total.

Tabela B.7 - Análise da variância (anova duas vias) para a absorção por imersão total

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	0,0929	0,031	154,4	1.69e-11
Substituição	5	0,1154	0,0231	115,2	2.04e-11
Resíduos	15	0,0030	0,0002		

Fonte: Autor, (2021)

Para a Absorção por Imersão Total (%) o resultado evidencia que ambos os fatores foram significativos (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Nas Tabelas B.8 e B.9, analisa-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teores de substituição.

Tabela B.8 - Teste de Tukey relação (a/g) para a absorção por imersão total

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.7 - 0.6	0,0582	0,0346	0,0817	0
0.8 - 0.6	0,1167	0,0931	0,1402	0
0.9 - 0.6	0,1658	0,1423	0,1894	0
0.8 - 0.7	0,0585	0,0349	0,0821	0
0.9 - 0.7	0,1077	0,0841	0,1312	0
0.9 - 0.8	0,0492	0,0256	0,0727	0,0001

Fonte: Autor, (2021)

Tabela B.9 - Teste de Tukey do teor da substituição para a absorção por imersão total

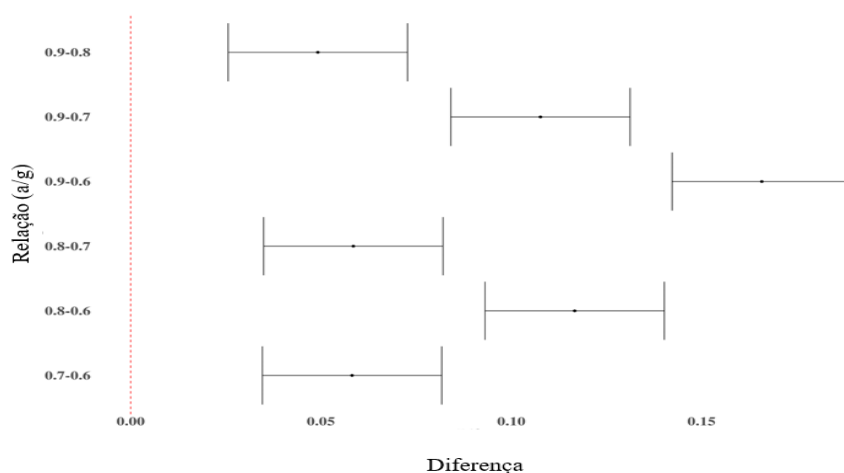
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
40 - 50	0,0463	0,0137	0,0788	0,0037
30 - 50	0,0888	0,0562	0,1213	0,0000
20 - 50	0,1348	0,1022	0,1673	0,0000
10 - 50	0,1725	0,1400	0,2050	0,0000
0 - 50	0,1983	0,1657	0,2308	0,0000
30 - 40	0,0425	0,0100	0,0750	0,0075
20 - 40	0,0885	0,0560	0,1210	0,0000
10 - 40	0,1263	0,0937	0,1588	0,0000
0 - 40	0,1520	0,1195	0,1845	0,0000
20 - 30	0,0460	0,0135	0,0785	0,0039
10 - 30	0,0838	0,0512	0,1163	0,0000
0 - 30	0,1095	0,0770	0,1420	0,0000
10 - 20	0,0378	0,0052	0,0703	0,0187
0 - 20	0,0635	0,0310	0,0960	0,0002
0 - 10	0,0258	-0,0068	0,0583	0,1647

Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.18 e B.9 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição para a absorção por imersão total (%). Para a relação (a/g) os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Além de nenhum intervalo

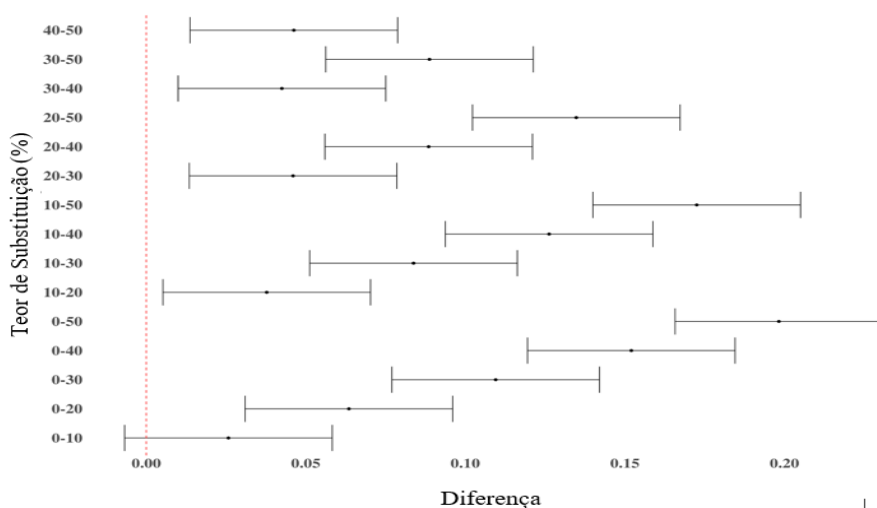
conter o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da absorção por imersão total em todos os níveis de relação (a/g) são diferentes. Para o teor de substituição, apenas os níveis 0 - 10 não foram significativos para o teste de Tukey (valor $p > 0.05$), ou seja, não existe uma diferença significativa no teor de substituição entre 0 e 10%. Adicionalmente, também foi verificado que para estes níveis, o intervalo contém o valor zero. Portanto, nesses casos existe diferença entre as médias de absorção por imersão total (%). Pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%) nas Figuras B.11 e B.12.

Figura B.11 - Diferença na média das relações (a/g) para a absorção por imersão total



Fonte: Autor, (2021)

Figura B.12 - Diferença na média dos teores de substituição para a absorção por imersão total



Fonte: Autor, (2021)

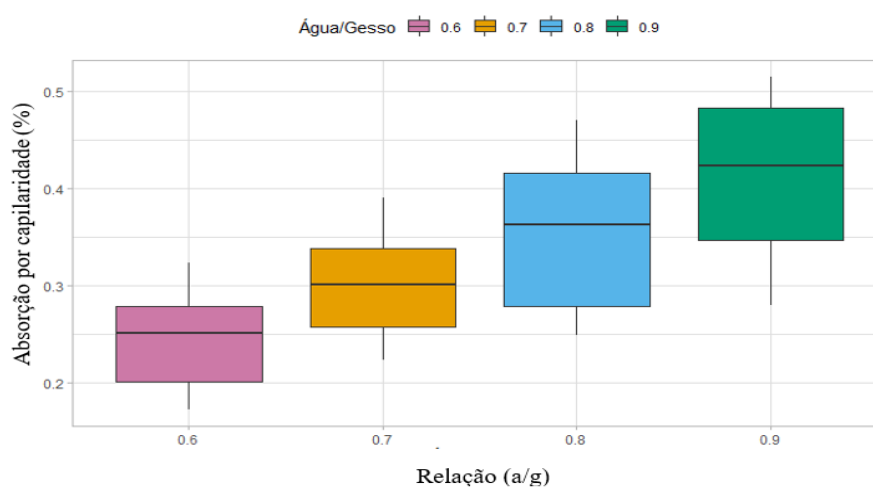
Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação a absorção por imersão total. Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a absorção por imersão total, enquanto o incremento do teor de substituição diminui a absorção por imersão total o aumento da relação água/gesso tende a aumentar a absorção por imersão total

B.1.4. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

De acordo com a Figura B.13 pode-se observar que quando a relação (a/g) a mediana dos dados também aumenta, isto significa que maiores valores da absorção por capilaridade são observados. A relação (a/g) 0.6 obteve a menor mediana na absorção por capilaridade enquanto que a relação (a/g) 0.9 resultou na maior mediana.

Quando se verifica a relação (a/g), observa-se que seu aumento resulta no acréscimo da variabilidade dos dados (tamanho do corpo do boxplot aumenta).

Figura B.13 - Boxplot da influência das relações (a/g) na absorção por capilaridade

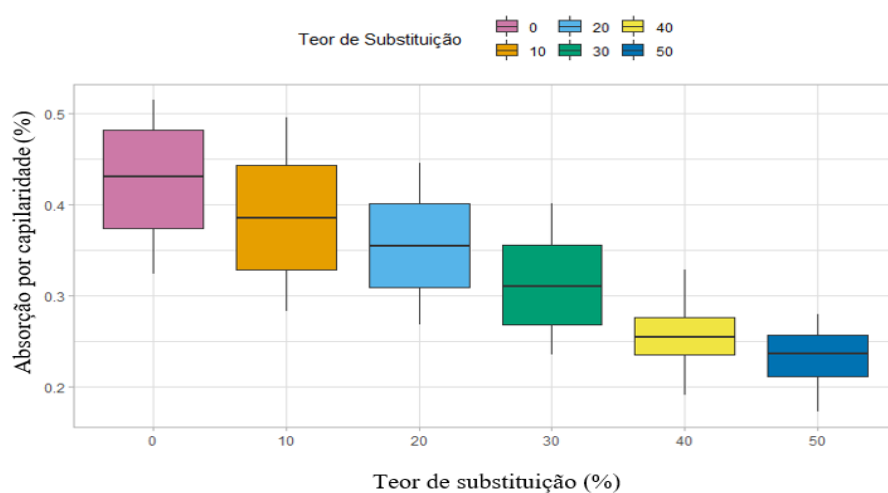


Fonte: Autor, (2021)

Quando se analisa a Figura B.14, observa-se que os corpos de prova sem substituição obtiveram a maior mediana para o grau de absorção por capilaridade,

enquanto que para o teor de substituição de 50% conduziu à menor mediana. Também é observado que, o comprimento do corpo do boxplot diminui à medida que o percentual de mistura aumenta (ou seja, existe uma menor variabilidade nos dados quando se aumenta o percentual de mistura, tamanho do corpo do boxplot diminui). Portanto, a partir dessas análises temos indícios de que ambos os fatores impactam o valor do grau de absorção por capilaridade. Desta forma, aplica-se o teste da ANOVA para comprovar estatisticamente esta hipótese.

Figura B.14 - Boxplot da influência dos teores de substituição na absorção por capilaridade



Na Tabela B.10 apresenta-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e dos teores de substituição no grau de absorção por capilaridade.

Tabela B.10 - Análise da variância (anova duas vias) para a absorção por capilaridade

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	0,0909	0,0303	73,16	0,000
Substituição	5	0,1130	0,0226	54,60	0,000
Resíduos	15	0,0062	0,0004		

Fonte: Autor, (2021)

Nesse caso, os resultados evidenciam que ambos os fatores foram significativos (valor $p < 0,05$) para a absorção por capilaridade, ou seja, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais, mas não indica entre quais grupos essa diferença é significativa. Assim, se faz necessário utilizar o Teste de Tukey, Tabelas B.11 e B.12 que quantifica estatisticamente a diferença entre as médias de níveis dois a dois.

Tabela B.11 - Teste de Tukey relação (a/g) para a absorção por capilaridade

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.7 - 0.6	0,0563	0,0225	0,0902	0,0012
0.8 - 0.6	0,1097	0,0758	0,1435	0,0000
0.9 - 0.6	0,1657	0,1318	0,1995	0,0000
0.8 - 0.7	0,0533	0,0195	0,0871	0,0020
0.9 - 0.7	0,1093	0,0755	0,1432	0,0000
0.9 - 0.8	0,0560	0,0221	0,0899	0,0013

Fonte: Autor, (2021)

Tabela B.12 - Teste de Tukey do teor da substituição para a absorção por capilaridade

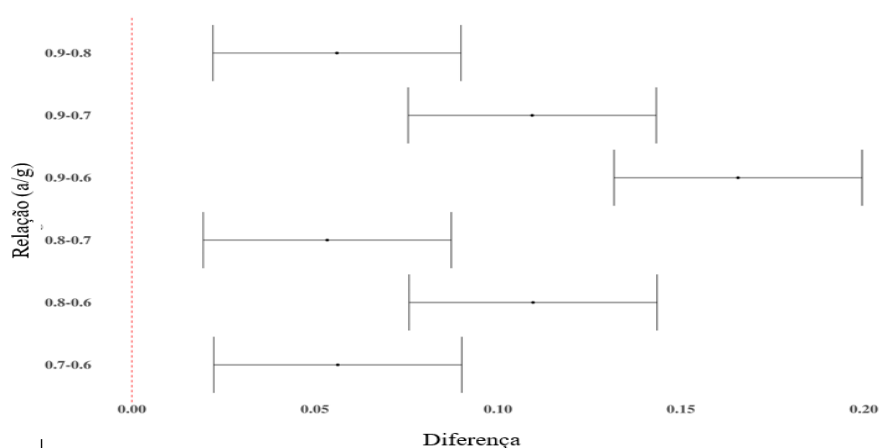
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
40 - 50	0,0258	-0,0210	0,0725	0,4999
30 - 50	0,0828	0,0360	0,1295	0,0004
20 - 50	0,1245	0,0778	0,1712	0,0000
10 - 50	0,1558	0,1090	0,2025	0,0000
0 - 50	0,1938	0,1470	0,2405	0,0000
30 - 40	0,0570	0,0103	0,1037	0,0129
20 - 40	0,0988	0,0520	0,1455	0,0000
10 - 40	0,1300	0,0833	0,1767	0,0000
0 - 40	0,1680	0,1213	0,2147	0,0000
20 - 30	0,0418	-0,0050	0,0885	0,0937
10 - 30	0,0730	0,0263	0,1197	0,0016
0 - 30	0,1110	0,0643	0,1577	0,0000
10 - 20	0,0313	-0,0155	0,0779	0,3052
0 - 20	0,0693	0,0225	0,1159	0,0026

0 - 10	0,0380	-0,0087	0,0847	0,1467
--------	--------	---------	--------	--------

Fonte: Autor, (2021)

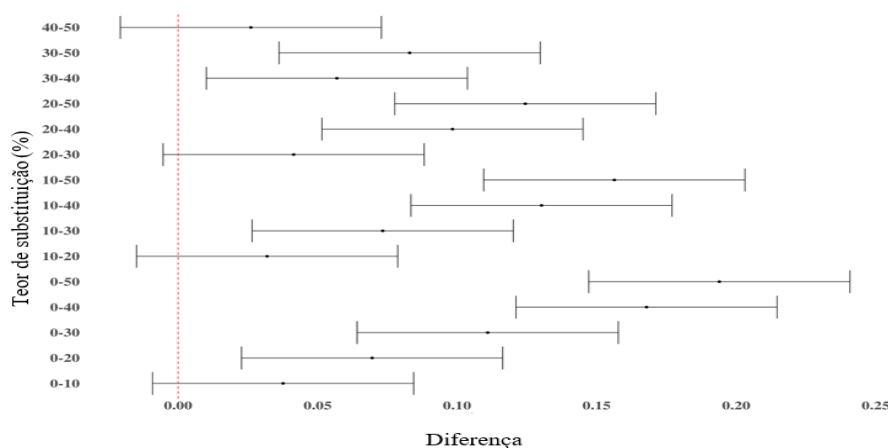
Nas Tabelas B.11 e B.12 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição. Para relação (a/g) os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Além de nenhum intervalo conter o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da absorção da capilaridade em todos os níveis das relações (a/g) são diferentes. Para o fator de teor de substituição, apenas os níveis 40 - 50, 20 - 30, 10 - 20 e 0 - 10 não foram significativos para o teste de Tukey (valor $p > 0.05$). Adicionalmente, também foi verificado que para estes níveis, o intervalo contém o valor zero. Portanto, nesses casos existe diferença entre as médias de absorção por capilaridade. Nas Figuras B.15 e B.16, pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%).

Figura B.15 - Diferença na média das relações (a/g) para a absorção por capilaridade



Fonte: Autor, (2021)

Figura B.16 - Diferença na média dos teores de substituição para a absorção por capilaridade

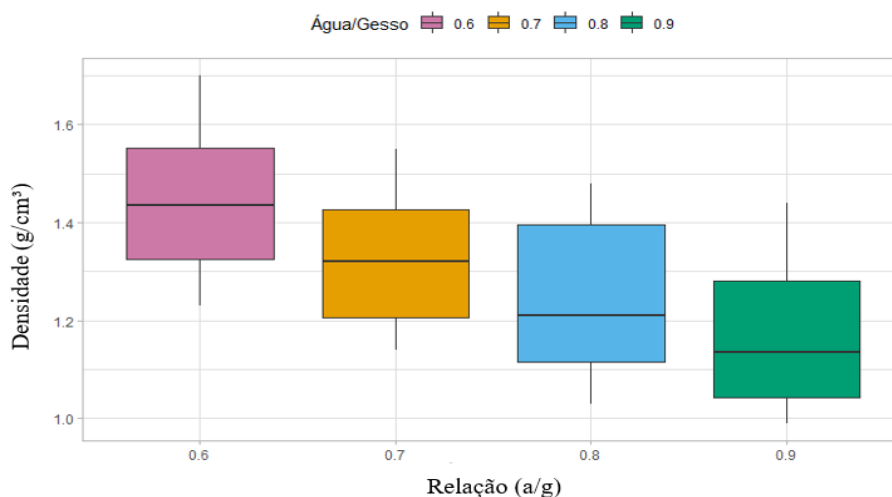


Fonte: Autor, (2021)

Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação a absorção por capilaridade. Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a absorção por capilaridade, enquanto o incremento do teor de substituição diminui a absorção por capilaridade o aumento da relação água/gesso tende a aumentar a absorção por capilaridade. Comportamento idêntico ao verificado para a absorção por imersão total.

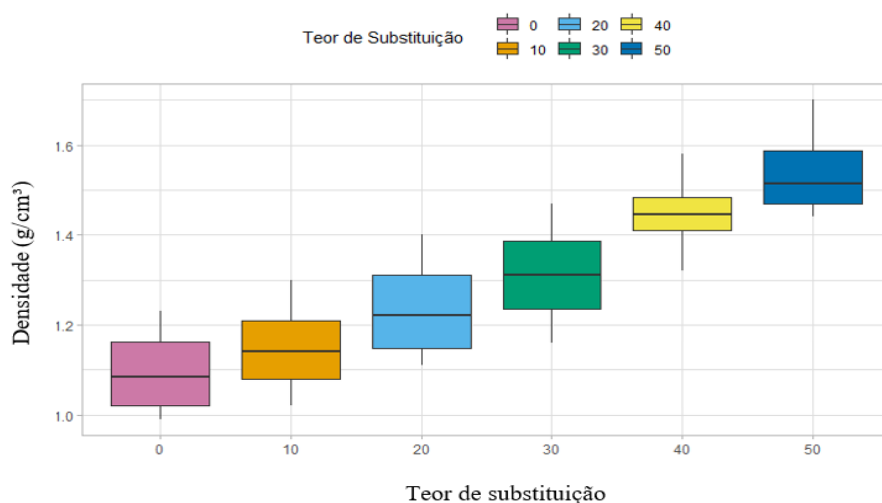
B.1.5. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE DENSIDADE

Na Figura B.17 verifica-se que a mediana da densidade decresce à medida que as relações (a/g) aumentam. A relação (a/g) 0.6 apresentou a maior mediana, acima de 1.4 enquanto que a relação (a/g) 0.9 resultou na menor mediana, um pouco acima de 1.1.

Figura B.17 - Boxplot da influência das relações (a/g) na densidade

Fonte: Autor, (2021)

Em relação ao teor de substituição, Figura B.18, há uma tendência crescente em relação à mediana da densidade, ou seja, com o crescimento dos teores de substituição, as medianas dessa variável também crescem. Portanto, tem-se indícios de que a densidade é impactada pela relação (a/g) e pelo teor de substituição.

Figura B.18 - Boxplot da influência dos teores de substituição na densidade

Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.13 apresentamos o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e teores de substituição na densidade.

Tabela B.13 - Análise da variância (anova duas vias) para a densidade

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	0,2476	0,0826	168,9	0,0000
Teor de substituição	5	0,5924	0,1185	242,5	0,0000
Resíduos	15	0,0073	0,0005		

Fonte: Autor, (2021)

Para a densidade o resultado evidencia que ambos os fatores foram significativos (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Nas Tabelas B.14 e B.15, verifica-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teores de substituição.

Tabela B.14 - Teste de Tukey relação (a/g) para a densidade

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0,8 - 0,9	0,0717	0,0349	0,1084	0,0003
0,7 - 0,9	0,1533	0,1166	0,1901	0,0000
0,6 - 0,9	0,2733	0,2366	0,3101	0,0000
0,7 - 0,8	0,0817	0,0449	0,1184	0,0001
0,6 - 0,8	0,2017	0,1649	0,2384	0,0000
0,6 - 0,7	0,1200	0,0832	0,1568	0,0000

Fonte: Autor, (2021)

Tabela B.15 - Teste de Tukey do teor da substituição para a densidade

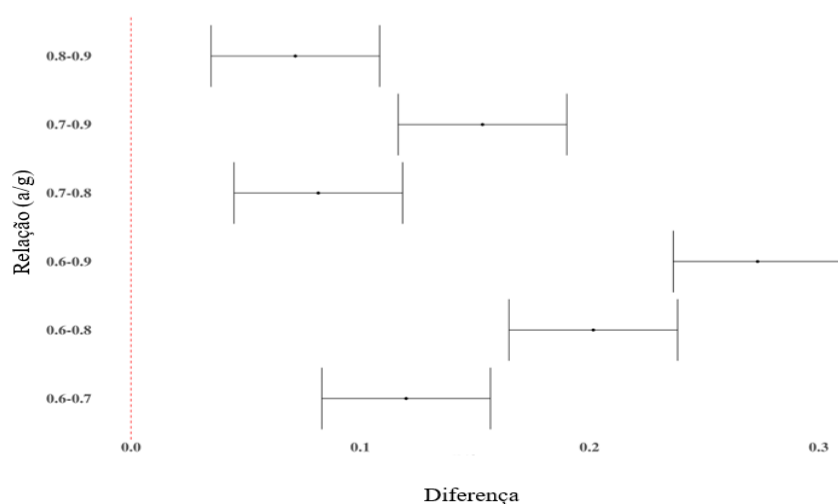
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
10 - 0	0,0525	0,0017	0,1033	0,0408
20 - 0	0,1400	0,0892	0,1908	0,0000
30 - 0	0,2150	0,1642	0,2658	0,0000
40 - 0	0,3500	0,2992	0,4008	0,0000
50 - 0	0,4450	0,3942	0,4958	0,0000
20 - 10	0,0875	0,0367	0,1383	0,0006
30 - 10	0,1625	0,1117	0,2133	0,0000

40 - 10	0,2975	0,2467	0,3483	0,0000
50 - 10	0,3925	0,3417	0,4433	0,0000
30 - 20	0,0750	0,0242	0,1258	0,0026
40 - 20	0,2100	0,1592	0,2608	0,0000
50 - 20	0,3050	0,2542	0,3558	0,0000
40 - 30	0,1350	0,0842	0,1858	0,0000
50 - 30	0,2300	0,1792	0,2808	0,0000
50 - 40	0,0950	0,0442	0,1458	0,0003

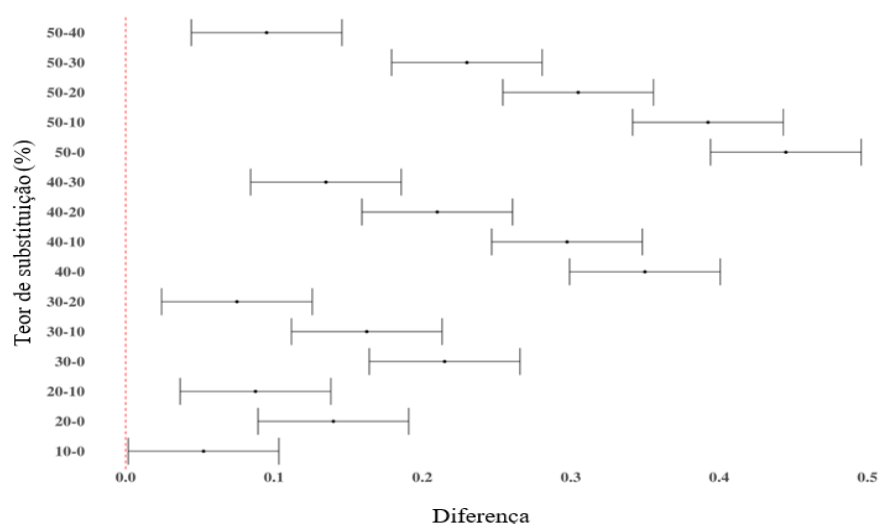
Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.14 e B.15 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição para a densidade. Para ambos os fatores relação (a/g) e teor de substituição, os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Isto é, ao nível de significância de 0,05, afirma-se que existe diferença nas médias das densidades entre qualquer comparação de níveis das relações (a/g) e teores de substituição. Verifica-se ainda que, nenhum intervalo conteve o zero, então, podemos afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da densidade em todos os níveis da relação (a/g) são diferentes. Nas Figuras B.19 e B.20, pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos intervalos de confiança (95%) para a densidade.

Figura B.19 - Diferença na média das relações (a/g) para a densidade



Fonte: Autor, (2021)

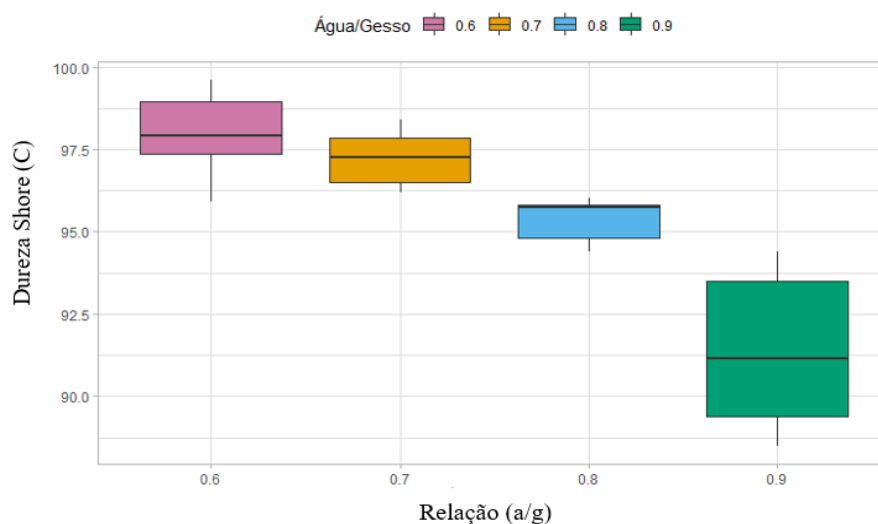
Figura B.20 - Diferença na média dos teores de substituição para a densidade

Fonte: Autor, (2021)

Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação a densidade. Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a densidade, enquanto o incremento do teor de substituição aumenta a densidade o aumento da relação água/gesso tende a diminuir a densidade.

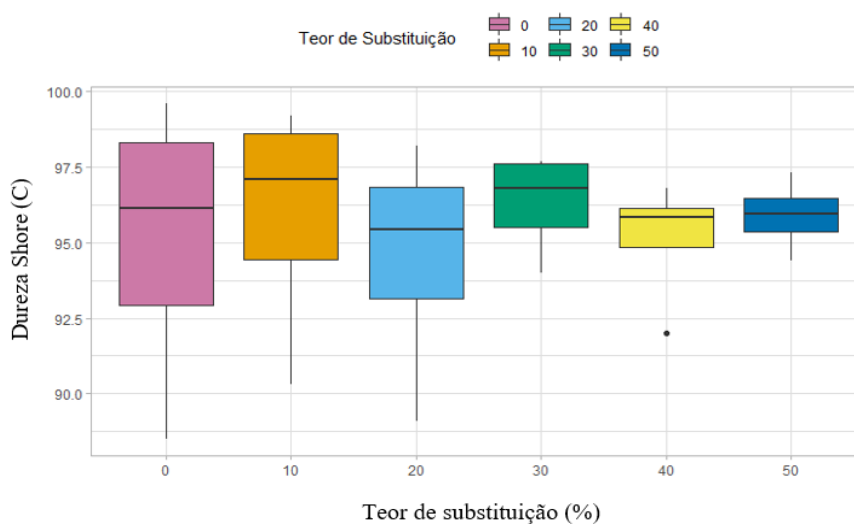
B.1.6. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE DUREZA SHORE (C)

Em relação à Dureza Shore (C), à medida que se aumenta a relação (a/g), a mediana da Dureza Shore decresce. Vale destacar que para relação (a/g) 0.8, há uma grande concentração de valores muito próximos, fazendo com que a mediana fique próxima ao 1ª quartil, já que o *boxplot* possui baixa amplitude. O nível com maior variabilidade é a relação (a/g) 0.9, em que também possui a menor mediana de Dureza Shore, Figura B.21. Através dessas informações, temos indícios que a relação (a/g) influencia nessa variável.

Figura B.21 - Boxplot da influência das relações (a/g) na dureza Shore (C)

Fonte: Autor, (2021)

Quanto ao fator teor de substituição, não há um padrão específico crescente ou decrescente, Figura B.22. Porém, vale destacar que os corpos de prova sem substituição obtiveram a maior variabilidade nos dados obtidos e teor de substituição de 40% possuiu um *outlier*.

Figura B.22 - Boxplot da influência dos teores de substituição na dureza Shore (C)

Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.16 apresentamos o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e teores de Substituição na dureza Shore (C).

Tabela B.16 - Análise da variância (anova duas vias) para a dureza Shore (C)

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	156,32	52,11	20,691	1,38E-05
Substituição	5	8,89	1,78	0,706	0,628
Resíduos	15	37,77	2,52		

Fonte: Autor, (2021)

Para a dureza Shore (C) o resultado evidencia que apenas a relação (a/g) foi significativa (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Entretanto, para teor de substituição, não foi significativo para a diferença de médias da Dureza Shore, ou seja, nenhuma diferença entre os níveis de teor de substituição foi identificada. Nas Tabelas B.17 e B.18 verifica-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teores de substituição.

Tabela B.17 - Teste de Tukey relação (a/g) para a dureza Shore (C)

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.8 - 0.9	3,9833	1,3427	6,6240	0,0029
0.7 - 0.9	5,8500	3,2094	8,4906	0,0001
0.6 - 0.9	6,5833	3,9427	9,2240	0,0000
0.7 - 0.8	1,8667	-0,7740	4,5073	0,2183
0.6 - 0.8	2,6000	-0,0406	5,2406	0,0543
0.6 - 0.7	0,7333	-1,9073	3,3740	0,8532

Fonte: Autor, (2021)

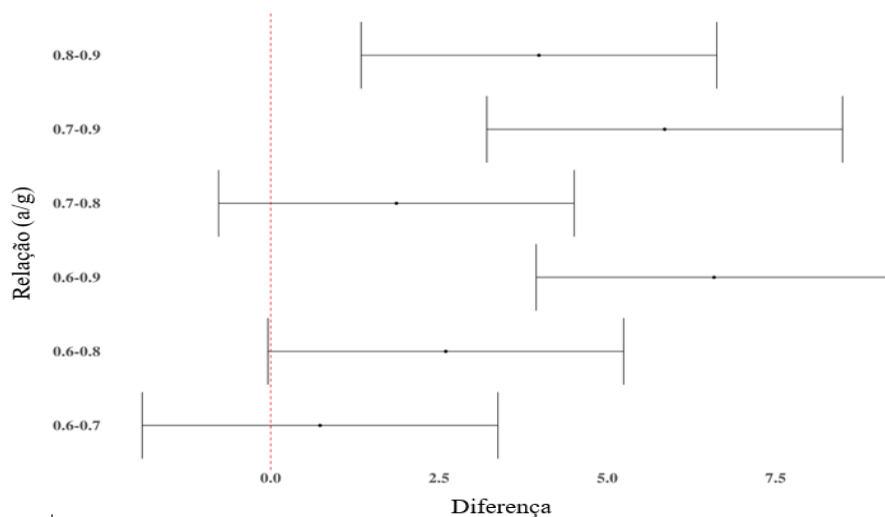
Tabela B.18 - Teste de Tukey do teor da substituição para a dureza Shore (C)

Teor Substituição	Diff,	Inferior	Superior	P-valor
0 - 20	550	-3,0957	4,1957	0,9958
40 - 20	575	-3,0707	4,2207	0,9949
50 - 20	1350	-2,2957	4,9957	0,8288
10 - 20	1375	-2,2707	5,0207	0,8182
30 - 20	1775	-1,8707	5,4207	0,6214

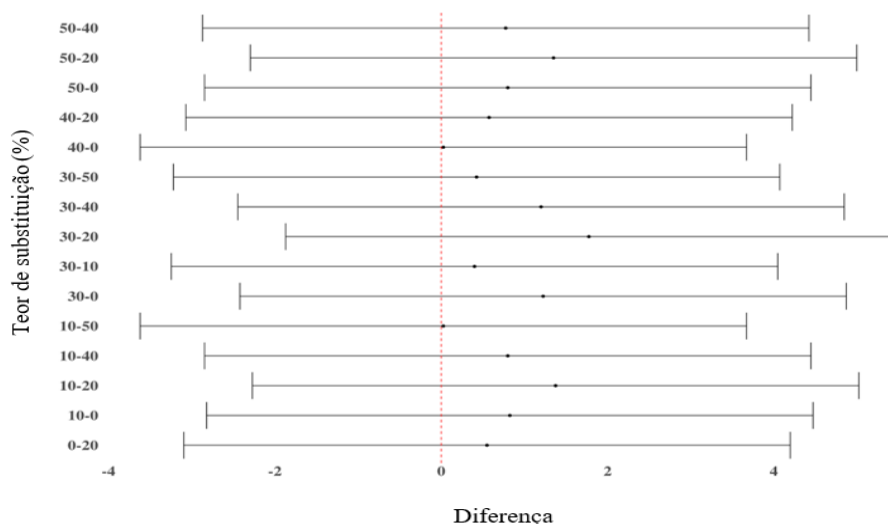
40 - 0	25	-3,6207	3,6707	1,0000
50 - 0	800	-2,8457	4,4457	0,9774
10 - 0	825	-2,8207	4,4707	0,9742
30 - 0	1225	-2,4207	4,8707	0,8773
50 - 40	775	-2,8707	4,4207	0,9803
10 - 40	800	-2,8457	4,4457	0,9774
30 - 40	1200	-2,4457	4,8457	0,8860
10 - 50	25	-3,6207	3,6707	1,0000
30 - 50	425	-3,2207	4,0707	0,9988
30 - 10	400	-3,2457	4,0457	0,9991

Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.17 e B.18 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição para a dureza Shore. Para o fator teor de substituição os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis não foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$, isto é, todos os valores p foram maiores que 0,05. Também é visto que, todos os intervalos contiveram o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da dureza Shore em todos os níveis do fator teor de substituição não são diferentes. Para a relação (a/g), os níveis que apresentaram uma diferença significativa para o teste de Tukey (valor $p < 0.05$) foram 0.8 - 0.9, 0.7 - 0.9 e 0.6 - 0.9. Foi verificado ainda que nesses casos, os intervalos contêm o valor zero, isto é, existe diferença entre as médias da dureza Shore. Pode-se visualizar a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%) para a dureza Shore nas Figuras B.23 e B.24.

Figura B.23 - Diferença na média das relações (a/g) para a dureza Shore (C)

Fonte: Autor, (2021)

Figura B.24 - Diferença na média dos teores de substituição para a dureza Shore (C)

Fonte: Autor, (2021)

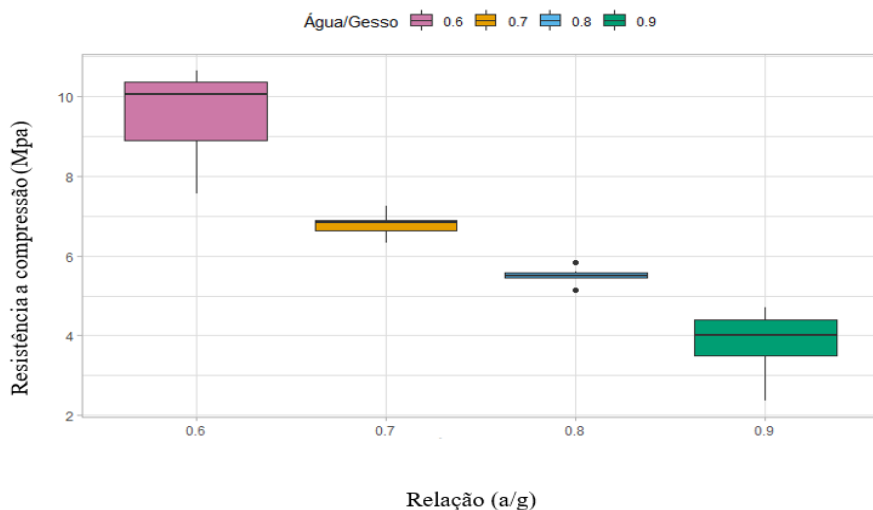
Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação a dureza Shore (C). Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a dureza Shore (C), enquanto o incremento do teor de

substituição aumenta a dureza Shore (C) o aumento da relação água/gesso tende a diminuir a dureza Shore (C).

B.1.7. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE RESISTENCIA A COMPRESSÃO

Na Figura B.25 é apresentado o gráfico de *boxplot* da relação (a/g) com relação a resistência à compressão. Ao se analisarem os dados experimentais da relação (a/g) 0.6 observa-se a maior variabilidade na resistência a compressão, além dos maiores valores para esta variável com mediana próxima a 10. Para as relações (a/g) 0.7 e 0.8, a variabilidade dos valores dos dados observados no experimento é considerada baixa, para a relação (a/g) 0.8 encontram-se dois *outliers* (dados discrepantes). A relação (a/g) 0.9 possui a segunda maior variabilidade dos dados, cabe ressaltar que para esta variável, foram encontrados os menores valores da mediana. Isso indica que as relações (a/g) impactam na resistência a compressão.

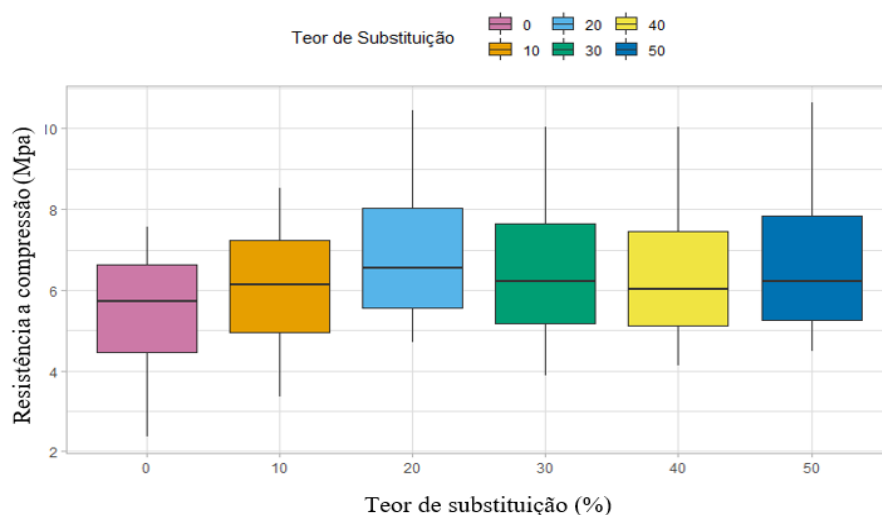
Figura B.25 - Boxplot da influência das relações (a/g) na resistência a compressão



Fonte: Autor, (2021)

Analisando-se os dados referentes ao teor de substituição com relação a resistência à compressão, não há um grande distanciamento das medianas com relação aos teores de pó de pedra utilizados, Figura B.26, com uma leve vantagem para o teor de substituição de 20%, perante as demais. As variabilidades dos níveis também possuem perfis semelhantes, sem apresentarem *outliers*.

Figura B.26 - Boxplot da influência dos (%) de substituição na resistência a compressão



Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.19 apresentam-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e teores de substituição na resistência à compressão.

Tabela B.19 - Análise da variância (anova duas vias) para a resistência à compressão

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	104,96	34,99	131,167	5,50E-11
Substituição	5	7,82	1,56	5,862	0,0034
Resíduos	15	4,00	0,27		

Fonte: Autor, (2021)

Para a resistência à compressão o resultado evidencia que ambos os fatores foram significativos nas Tabelas B.20 e B.21 analisa-se pelo Teste de Tukey quais as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teores de substituição.

Tabela B.20 - Teste de Tukey relação (a/g) para a resistência à compressão

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.8 - 0.9	1,6867	0,8273	2,5461	0,0002
0.7 - 0.9	2,9650	2,1056	3,8244	0,0000
0.6 - 0.9	5,7250	4,8656	6,5844	0,0000
0.7 - 0.8	1,2783	0,4189	2,1377	0,0032
0.6 - 0.8	4,0383	3,1789	4,8977	0,0000
0.6 - 0.7	2,7600	1,9006	3,6194	0,0000

Fonte: Autor, (2021)

Tabela B.21 - Teste de Tukey do teor da substituição para a resistência à compressão

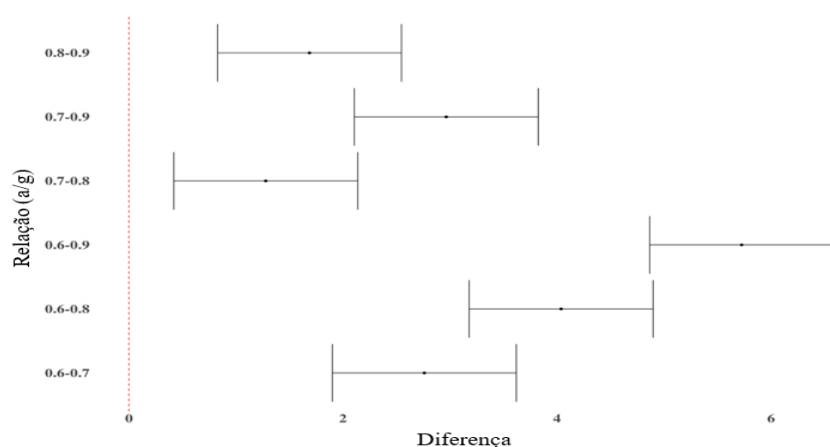
Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
10 - 0	0,6925	-0,4940	1,8790	0,4406
40 - 0	1,1925	0,0060	2,3790	0,0485
30 - 0	1,2425	0,0560	2,4290	0,0376
50 - 0	1,5350	0,3485	2,7215	0,0082
20 - 0	1,7075	0,5210	2,8940	0,0033
40 - 10	0,5000	-0,6865	1,6865	0,7437
30 - 10	0,5500	-0,6365	1,7365	0,6659
50 - 10	0,8425	-0,3440	2,0290	0,2503
20 - 10	1,0150	-0,1715	2,2015	0,1161
30 - 40	0,0500	-1,1365	1,2365	1,0000
50 - 40	0,3425	-0,8440	1,5290	0,9302
20 - 40	0,5150	-0,6715	1,7015	0,7209
50 - 30	0,2925	-0,8940	1,4790	0,9630
20 - 30	0,4650	-0,7215	1,6515	0,7944
20 - 50	0,1725	-1,0140	1,3590	0,9965

Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.20 e B.21 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição para a resistência à compressão. Para as relações (a/g) os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Nenhum intervalo

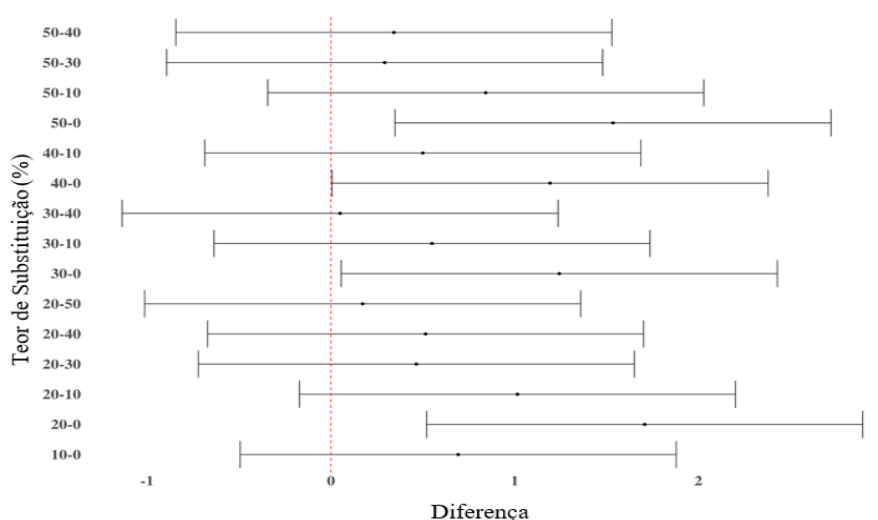
contém o zero, então, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da resistência à compressão em todos os níveis das relações (a/g) são diferentes. Para o fator de teor de substituição, apenas os níveis 0 - 20, 0 - 30, 0 - 40 e 0 - 50 foram significativos para o teste de Tukey (valor $p < 0.05$), ou seja, existe uma diferença significativa no teor de substituição entre 0% e 20%, 0% e 30%, 0% e 40% e 0% e 50%. Adicionalmente, também foi verificado que para estes níveis, o intervalo não contém o valor zero. Portanto, nesses casos existe diferença entre as médias da resistência à compressão. Nas Figuras B.27 e B.28 visualiza-se a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos intervalos de confiança.

Figura B.27 - Diferença na média das relações (a/g) para a resistência à compressão



Fonte: Autor, (2021)

Figura B.28 - Diferença na média dos (%) de substituição na resistência à compressão



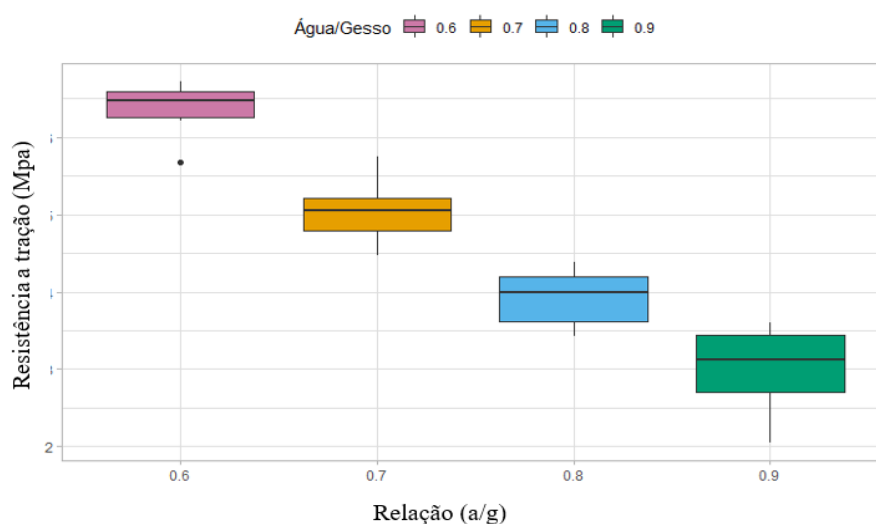
Fonte: Autor, (2021)

Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/gesso e teor de substituição são significativos com relação a resistência a compressão. Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a resistência a compressão, enquanto o incremento do teor de substituição aumenta a resistência a compressão o aumento da relação água/gesso tende a diminuir a resistência a compressão.

B.1.8. TESTES ESTATÍSTICOS DO ENSAIO DE RESISTENCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO

Em relação à variável Resistência à Tração, Figura B.29, consegue-se observar claramente uma tendência de crescimento em relação à resistência a tração para todas as relações (a/g). Para a relações (a/g) 0.6 foi verificada a existência de um *outlier* além de apresentar a maior mediana, acima de 6. A relações (a/g) 0.9 obteve a menor mediana, um pouco acima de 3 e também foi o nível que possuiu a maior variabilidade dos dados, gerando indícios de que as relações (a/g) impactam na resistência da tração.

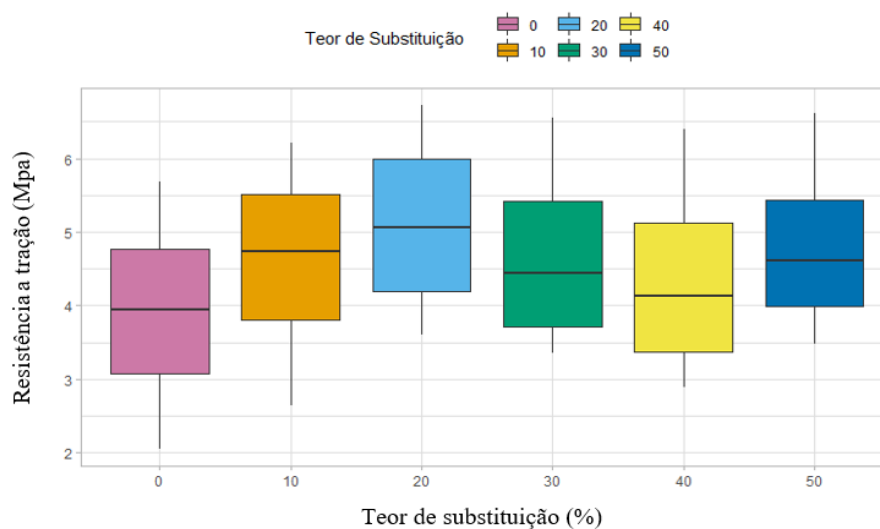
Figura B.29 - Boxplot da influência das relações (a/g) na resistência a tração



Fonte: Autor, (2021)

Na Figura B.30 que trata sobre o teor de substituição de gesso por pó de pedra não há um padrão específico seja ele crescente ou decrescente. Porém, vale destacar que os dados possuem variabilidades próximas e o teor de substituição de 20% obteve a maior mediana (acima de 5). Os corpos de prova sem substituição apresentaram a menor mediana (abaixo de 4).

Figura B.30 - Boxplot da influência dos teores de substituição na resistência a tração



Fonte: Autor, (2021)

Na Tabela B.22, apresenta-se o resultado da ANOVA para avaliar a influência das relações (a/g) e dos teores de substituição na resistência à tração.

Tabela B.22 - Análise da variância (anova duas vias) para a resistência à tração

	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Estatística f	Valor p
Água/Gesso	3	37,85	12,615	233,78	0,0000
Teor de substituição	5	3,41	0,681	12,63	0,0001
Resíduos	15	0,81	0,054		

Fonte: Autor, (2021)

Para a resistência à tração o resultado evidencia que ambos os fatores foram significativos (valor $p < 0,05$), isto é, a distribuição de pelo menos um dos grupos é diferente das demais. Nas Tabelas B.23 e B.24 determinam-se pelo Teste de Tukey quais

as diferenças significativas entre as médias de níveis dois a dois, respectivamente para as relações (a/g) e teores de substituição.

Tabela B.23 - Teste de Tukey relação (a/g) para a resistência à tração

Água/Gesso	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
0.8 - 0.9	0,9200	0,5335	1,3065	0,0000
0.7 - 0.9	2,0500	1,6635	2,4365	0,0000
0.6 - 0.9	3,3562	2,9696	3,7427	0,0000
0.7 - 0.8	1,1300	0,7435	1,5165	0,0000
0.6 - 0.8	2,4362	2,0496	2,8227	0,0000
0.6 - 0.7	1,3062	0,9196	1,6927	0,0000

Fonte: Autor, (2021)

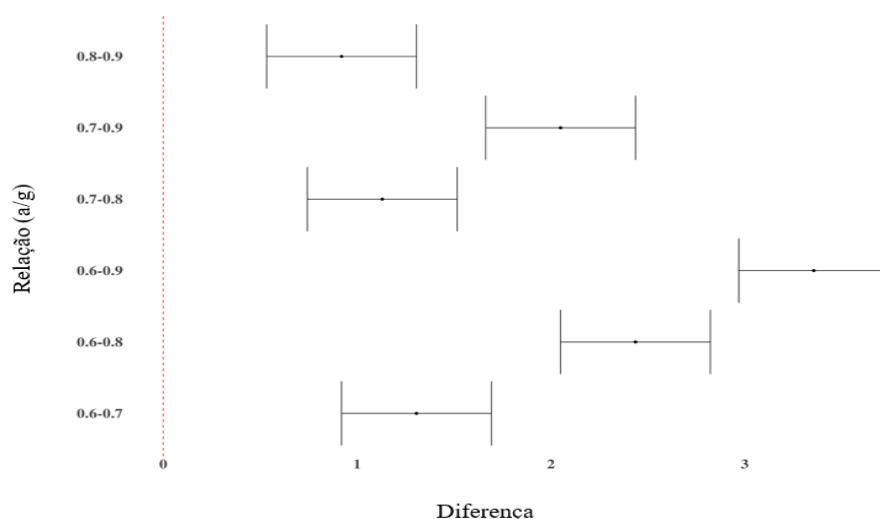
Tabela B.24 - Teste de Tukey do teor da substituição para a resistência à tração

Teor Substituição	Diff.	Inferior	Superior	P-valor
40 - 0	0,4753	-0,0584	1,0089	0,0951
10 - 0	0,6743	0,1406	1,2080	0,0099
30 - 0	0,7901	0,2564	1,3238	0,0026
50 - 0	0,9179	0,3842	1,4516	0,0006
20 - 0	1,2080	0,6743	1,7417	0,0000
10 - 40	0,1990	-0,3346	0,7327	0,8247
30 - 40	0,3148	-0,2188	0,8485	0,4296
50 - 40	0,4427	-0,0910	0,9763	0,1341
20 - 40	0,7327	0,1991	1,2664	0,0050
30 - 10	0,1158	-0,4179	0,6495	0,9784
50 - 10	0,2436	-0,2900	0,7773	0,6792
20 - 10	0,5337	0,0000	1,0674	0,0500
50 - 30	0,1278	-0,4059	0,6615	0,9672
20 - 30	0,4179	-0,1158	0,9516	0,1723
20 - 50	0,2901	-0,2436	0,8238	0,5135

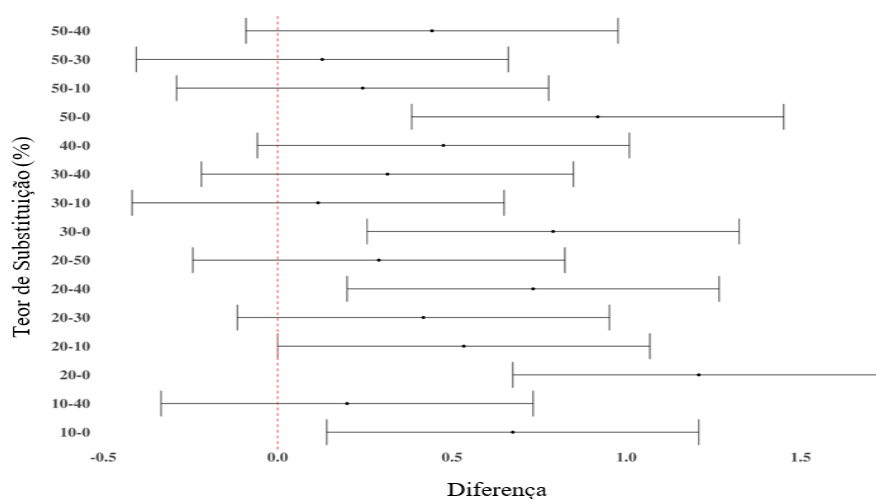
Fonte: Autor, (2021)

Nas Tabelas B.23 e B.24 são apresentadas as médias, intervalo de confiança (IC) e valor-p do teste de Tukey, respectivamente, para as relações (a/g) e teores de substituição para a resistência à tração. Para as relações (a/g) os valores p do Teste de Tukey para todos os níveis foram significantes ao nível $\alpha = 0.05$. Além de nenhum intervalo conter o zero, diante disto, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que as médias das diferenças da resistência à tração em todos os níveis das relações (a/g) são diferentes. Para o teor de substituição, apenas os níveis 10 - 0, 20 - 0, 30 - 0, 50 - 0, 20 - 10 e 20 - 40, foram significativos para o teste de Tukey (valor $p < 0.05$), ou seja, existe uma diferença significativa no teor de substituição entre 0% e 10%, 0% e 20%, 0% e 30%, 0% e 50%, 20% e 10% e 20% e 40%. Determinou-se também que nesses casos, o intervalo não contém o valor zero, isto é, existe diferença entre as médias de resistência à tração. Nas Figuras B.31 e B.32, visualiza-se a média das diferenças dos níveis e os seus respectivos Intervalos de confiança (95%) para a resistência à tração

Figura B.31 - Diferença na média das relações (a/g) para a resistência à tração



Fonte: Autor, (2021)

Figura B.32 - Diferença na média dos teores de substituição para a resistência à tração

Fonte: Autor, (2021)

Diante dos dados estudados foi possível comprovar estatisticamente através da análise de variância realizada e pelo Teste de Tukey, que ambos os fatores água/cimento e teor de substituição são significativos com relação a resistência a tração. Visto que em ao menos um dos níveis estudados verificou-se diferença significativa para essas variáveis. Além de se ter verificado que para cada variável testada, os pares de níveis apresentaram diferenças nas médias. Determinou-se também que os fatores estudados agem de maneiras opostas com relação a resistência a tração, enquanto o incremento do teor de substituição aumenta a resistência a tração o aumento da relação água/cimento tende a diminuir a resistência a tração. Comportamento idêntico ao verificado para a resistência a compressão.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12130: **Gesso para construção: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13207: **Gesso para construção civil - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 8802: 2019. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**, Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11678, **Divisórias Leves Internas Moduladas – Verificação do Comportamento sob ação de cargas**; Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12127: **Gesso para Construção - Determinação das Propriedades Físicas do Pó**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12129: **Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: **Concreto - Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos de Prova Prismáticos**, Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13207: **Gesso para construção civil: requisitos**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14715-2:2010 - **Chapas de gesso para drywall - Parte 2: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais –Desempenho. Partes 1-6.** Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15930-2: **Portas de madeira para edificações - Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16072: **Argamassa impermeável.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega, utilizando o aparelho utilizando o aparelho de Vicat.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificações.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM - ISO 2395: **Peneira de Ensaio e Ensaio de Peneiramento.** Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica,** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12128: **Gesso Para Construção – Determinação das Propriedades Físicas da Pasta.** Rio de Janeiro, 2019.

ALVES V, C. **Análise Comparativa dos Custos Unitários Entre Argamassa de Cimento e Gesso em Revestimento de Alvenaria de Bloco Cerâmico: Estudo de Caso**

em Obra Habitacional na Cidade de Feira de Santana.TCC (Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana/BA, 2010. 44p

ALVES, MARY M. S., ROCHA, MARCUS V. O., BORJA, EDILBERTO V. **Processo Produtivo de Revestimento de Gesso: Análise e Estimativa de Geração de Resíduos.** I Congresso de Pesquisas e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (CONNEPI 2006). Natal, 2006.

ANASTASIIA, G.; YURY, T.; GRIGORY, Y.; JADVYGA, K.; STANISLAV, S.; ALI, E. S. M. **Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders** 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.

ANDRIOLO, F. R. **Uso e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto.** In: seminário: o uso da fração fina da britagem, 2., 2005, São Paulo. Anais. São Paulo: EPUSP, 2005.

ANJO, A; GIOLO, S. R.; CAMARINHA F., J. A.; MATUDA, N. S.; WINTER, E. M. W. **Notas de Aulas de Estatística II.** Departamento de Estatística da UFPR. Curitiba, 2009.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. CEN/TC 241 123 F: **Carreaux de Plâtre: Définitions – Spécifications – Méthodes d’essais.** Paris 1994.

BADENS E., VEESLER S., BOISTELLE R., CHATAIN D. - **Relation Between Young’s Modulus of Set Plaster and Complete Wetting of Grain Boundaries by Water.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 156, Issues 1-3, 15, p.373-379 - October 1999.

BAUER, C. **Gypsum Recycling in PlaNYC 2030: Spaces for Government Intervention.** 2012. 72 f. Tese. Faculty of Architecture & Planning Columbia University, 2012.

CARDOSO, F. A.; AGOPYAN, A. K.; CARBONE, C.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Squeeze Flow as a Tool for Developing Optimized Gypsum Plasters**. Construction & Building Materials, v.23, p.1349-1353, 2009.

CARVALHO, M. A.; CALIL J. C.; HOLMER S. J.; TUBINO, R.; CARVALHO, M. T. **Microstructure and mechanical properties of gypsum composites reinforced with recycled cellulose pulp**. Materials Research, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 391-397, 2008.

CINCOTTO, M. A. **Argamassas de revestimentos: Características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. – (Publicação IPT 2378).

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. **O gesso como material de construção – composição química (1ª parte)**. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Tecnologia das Edificações. São Paulo, 1985b. p. 23-26.

COQUARD, P.; BOISTELLE, R. – **Water and Solvent Effects on The Strength of set Plaster** - Int. J. Rock Mech. Min. Science, 31, p.517-524, (1991).

DE MILITO, J.A. **Avaliação do desempenho de aglomerante à base de gesso com cimento portland de alto forno e sílica ativa**. 2007. Tese de doutorado – FEC UNICAMP, Campinas - SP, 2007. 339 p.

DEGANI, C. M. **Sistema de gestão ambiental em empresas construtoras de edifícios**. 2003. 263 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

DNPN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – **Gipsita Sumário Mineral**, p54-55. junho, 2010.

ERBS, A. **Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Gesso Reciclado Proveniente de Chapas de Gesso Acartonado e Gesso Comum ao Longo dos Ciclos**

de Reciclagem. 2016. 127 f. Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

EVE, S., GOMINA, M., OZOUF, J.-C., ORANGE, G. **Microstructure of Látex-Filled Plaster Composites.** Journal European Ceramic Society, v. 27, p. 3517- 3522, 2007.

FERREIRA, F. C.; SOUSA, J. G. G.; CARNEIRO, A. M. P. **Caracterização mecânica do gesso para revestimento produzido no Polo Gesseiro do Araripe.** Ambiente Construído 19(4):207-221, 2018.

GABROVŠEK, R.; VUK, T.; KAUČIČ, V. **Evaluation of the hydration of Portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis.** Acta Chimica Slovenica, v. 53, n. 2, p. 159–165, 2006.

GMOUH, A. et al. **Development and Validation of a Dimensional Variation Measurement Set: Application to the Plaster Setting.** Materials Science and Engineering A, EUA, n. 372, p.123-127, 2004.

GOURDIN, W. H.; KINGERY, W. D. **The Beginnings of Phytotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster.** Journal of Field Archaeology, Boston, v. 2, n. 1, p.133-150, 1975.

HAMOUDA, J.; JEAN, K.; JEAN, N. E.; VINCENT M.; JEAN, P. G. **Probing Microstructure Evolution during the Hardening of Gypsum by Proton NMR Relaxometry** The Journal of Physical Chemistry B 2006 110 (14), 7385-7391 DOI: 10.1021/jp058276m.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. **Non-Destructive testing of concrete: A review of methods.** Electronic Journal of Structural Engineering, v. 14(1), p. 97-105, 2015.

JITKA, K.; MAGDALENA, D.; RADKA, P.; PETR, S.; ALENA, V. **The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars.** Cement and Concrete Composites 92 (2018) 188 – 19.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000.113p. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M. A. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Gesso de Construção Civil. 2007. p 727-760.

KANTRO, D. L. **Influence of water reducing admixtures on properties of cementpaste. A miniature slump test**. Cement, concrete and aggregate, vol. 2, n.2,1980.

KARNI, J.; KARNI, E. **Gypsum in Construction: Origin and Properties**. Materials and Structures, v. 28, n. 176, p.92-100, 1 mar. 1995.

KHALIL, A. A. A.; TAWFIK, A. A. **Hegazy Plaster composites modified morphology with enhanced compressive strength and water resistance characteristics**. Construction and Building Materials 167 (2018) 55–64.

KHALIL, A. A. A.; TAWFIK, A. A. **Hegazy Plaster composites modified morphology with enhanced compressive strength and water resistance characteristics**. Construction and Building Materials 167 (2018) 55–64.

KHALIL, A. A.; KADER, A.H. A. **Preparation and physicomechanical properties of Gypsum plaster-agro fiber wastes Composites**, J. Interceram. Int. Refractories Manual (Special Technologies) 21 (2010) 62–67.

KIJANAPANICH, P.; ANNACHHATRE, A. P.; ESPOSITO, G.; VAN HULLEBUSCH, E. D.; LENS, P. N. L. **Biological Sulfate Removal From Gypsum Contaminated Construction and Demolition Debris**. Journal of Environmental Management n.131, p.82-91, 2013.

KURESKI, R. et al. **O macro setor da construção civil na economia brasileira em 2004**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p.7-19, jan./mar. 2008.

L. MIRANDA, L. CANTINI, J. GUEDES, AND A. COSTA, **Assessment of mechanical properties of full-scale masonry panels through sonic methods. Comparison with mechanical destructive tests**, Struct. Control Heal. Monit., no. May 2011, p. n/a–n/a, 2015.

Lanzóna, M.; Ruiz, P. A. G. **Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters**. Construction and Building Materials Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 506-511.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. **The Setting of Gypsum Plaster: Part II The Development of Microstructure and Strength**. Journal of Materials Science, n. 29, p.5524-5528, 1994 b.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. **The Setting Of Gypsum Plaster: Part III The Effect Of Additives And Impurities**. Journal of Materials Science, EUA, n. 29, p.6085-6090, 1994c.

LI, G.; LI, J.; GUAN,R. **Investigation of the water resistance of gypsum materials**, ZKG Int. 56 (8,9) (2003) 87–93.

LI, G.; YU, Y.; ZHAO, Z.; LI, J.; LI, C. **Properties study of cotton stalk fiber/gypsum composites**, Cem. Concr. Res. 33 (1) (2003) 43–46.

LI, J.; LI, G.; YU, Y. **The influences of gypsum water-proofing additive on gypsum crystal growth**, Mater. Lett. 61 (2007) 872–876.

LI, J.Q.; GONG, M.Z.; LI, G.Z. **Research on Hydration of Waterproof-Typed Semi-Hydrated Gypsum**, Adv. Mater. Res. 306–307 (2011) 909–912, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.306-307.909>.

MAEDA, FANNY M.; SOUZA, UBIRACI E. L. **Produtividade da Mão de Obra e Materiais na Execução de Revestimento em Pasta de Gesso Aplicado Sobre Paredes Internas de Edificações**. VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC, 2000). Salvador.

MAGALHÃES, A. C. T. V.; ALMEIDA, J. G. **O uso da mucilagem de cacto em pastas de gesso: efeitos na absorção de água e na resistência à flexão estática**. Ambiente construído 10 Mar 2010.

MARK, H. E. **Process of Producing Gypsum wood fiber product having improved water resistance**. US Patent no. 5817262, Oct. 6, 1998.

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

MONTEIRO, J.H. P. et al. **Manual Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro. IBAM, 2001.

MUNHOZ, F. C.; RENÓFIO, A. **Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para a P+L**. In: Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP. Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de novembro de 2006.

MUNHOZ, FABIANA COSTA; RENOFIO, ADILSON. **Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para a P+L – XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP 2007)**. Foz do Iguaçu: de 09 a 12 de outubro de 2007.

MURAT, M.; JEANDOT, G. **Méthodes de Mésures et Interprétation des Effets Thermiques Associés à l'Hydratation des Sulfates de Calcium et des Plâtres Industriels**. Rêvue de Matériaux de Construction. v. 680, p. 14-23, 1973.

NITA, C.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO M. A.; JOHN, V. M. **Estudo da Reciclagem do Gesso de Construção**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, julho/2004.

OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. **Desenvolvimento de um Painel de Gesso Reforçado com Fibra de Vidro Para Vedação Interna**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/164. 1996.

PERVYSHIN, G. N.; YAKOVLEV, G. I.; GORDINA, A. F.; KERIENE, J.; POLYANSKIKHI, S.; FISCHER, H. B.; RACHIMOVA, N. R.; BURYANOV, A. F. **Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers**, Proc. Eng. 172 (2017) 867–874.

PINHEIRO, S. M. de M. **Gesso Reciclado: Avaliação de Propriedades para Uso em Componentes**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 352p. Tese (Doutorado). Departamento de Arquitetura e Construção, UNICAMP, 2011.

ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. **Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 2: gesso-madeira**. Ambiente construído 19 (4) Oct-Dec 2019.

RODRIGUES, C. C. **Desenvolvimento de um sistema construtivo modular com blocos de ADDISON, J., Vermiculite: A Review of the Mineralogy and Health Effects of Vermiculite Exploitation Regulatory Toxicology and Pharmacology**, Volume 21, Issue 3, June 1995, Pages 397-405.

RODRIGUES, C. C. **Desenvolvimento de um sistema construtivo modular com blocos de gesso** / Dissertação - Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental- Universidade Federal da Paraíba- João Pessoa, 2008.

SANTOS, P. G. de; ESTREMER, J.; GARCIA, E.; ARMADA, M. **Power assist devices for installing plaster panels in construction**. Automation in construction, Elsevier, 2007.

SAVI, O. **Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso**. 2012. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2012.

SILVA, M. G. S. **Desenvolvimento de compósito a base de gesso e pó de fibra de coco**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Sergipe (UFSE), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Cristóvão, 2010. 73f.

SINGH, M.; GARG, M. **Relationship between mechanical properties and porosity of water-resistant gypsum binder**, Cem. Concr. Res. 26 (3) (1996) 449–456.

SINGH, M.; MRIDUL, G. **Glass fiber reinforced water-resistant gypsum-based composites**, Cem. Concr. Res. 14 (1) (1992) 23–32.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Calcium Sulphate Hemihydrate Hydration Leading to Gypsum Crystallization**. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, n. 53, p. 57 e 77, 2007.

T. A. Urzulina, J. L. Akasakia, N. A. Pintoa, C. F. Fioritib. **Acerca del estudio de compuestos de yeso con incorporación de caucho de neumáticos**. Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos. vol 2, nº 3, pág. 49-55. 2016.

YE, Q. et al. **Effect of Particle Size Distribution on the Hydration and Compressive Strength Development of Calcium Sulfate Hemihydrate Paste**. Powder Technology, v. 207, p. 208-214, 2011.

