



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE LODO
GERADO EM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA
MINERAÇÃO COMO PRODUTO ALTERNATIVO À BASE DE GESSO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Aluna: Cinthia de Souza

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Vieira de Andrade

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira

ITABIRA, MG

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE LODO
GERADO EM PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA
MINERAÇÃO COMO PRODUTO ALTERNATIVO À BASE DE GESSO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais UNIFEI/UNIFAL-MG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aluna: Cinthia de Souza

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Vieira de Andrade

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira

ITABIRA, MG

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, porque Dele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas (Rm 11:36).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter concedido a sabedoria, a persistência e a força necessária para prosseguir nessa jornada e, assim, obter resultados promissores, mesmo com os muitos contratemplos ocorridos.

Aos meus pais, Pedro de Souza e Beniz Imaculada Souza, por todo amor e apoio incondicional em todos os meus sonhos e projetos.

Ao meu noivo Anderson, por toda paciência e sabedoria que tanto me ajudaram a não desanimar, mesmo nos momentos de maiores tribulações, e por sempre acreditar em minha capacidade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – UNIFEI/UNIFAL, por todo empenho em compartilhar conhecimentos e motivação.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Construção Civil, em especial o Sr. Geraldo Gualberto, pelo apoio e amizade durante todo o período de ensaios.

Aos membros do Grupo de Pesquisa em Materiais e Nanociência (GPMN), pelo companheirismo e apoio ao longo dessa jornada.

Ao professor Dr. Ricardo Luiz Perez Teixeira, por toda a insistência para que eu fizesse o processo seletivo do programa de mestrado, e por todo o apoio e incentivo de sempre, graças a isso iniciei na pesquisa em 2011 e não pretendo parar.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira, pela sua disposição em sanar minhas dúvidas e por seus precisos apontamentos e valiosas sugestões, que colaboraram para o aprimoramento desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabrício Vieira de Andrade, por sua disponibilidade, pela confiança em mim depositada e, acima de tudo, pela parceria de sucesso que desenvolvemos nesse período de convívio.

À companhia Nexa Resources, pela oportunidade de participar do programa Mining Lab Beginnings e através dele realizar este trabalho, obrigada por todo apoio e confiança ao longo de seu desenvolvimento.

A todos que fizeram parte da equipe de trabalho do projeto Mining Lab Beginnings em especial, professor Fabrício, Samantha, Túlio e Letícia, pela parceria, apoio e troca de conhecimentos.

À toda equipe do Escalab, por todo suporte disponibilizado para que pudéssemos obter excelentes resultados em nosso trabalho, possibilitando assim que este se tornasse trabalho de maior destaque entre setenta outros do Brasil e do Peru.

À equipe da Nexa Resources no Peru, pela disponibilidade nas reuniões semanais que foram fundamentais para otimização de resultados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Nexa Resources, pelo apoio financeiro.

Não há caminho errado.
O aprendizado e a experiência estão em todos os caminhos.

Zíbia Gasparetto

RESUMO

Com foco na economia circular, neste trabalho utilizou-se como materiais principais, o gesso comercial e o lodo proveniente de tratamento de águas residuais de processos de mineração da Nexa Resoures. Foram avaliadas as viabilidades técnica e econômica de reaproveitar o lodo na forma de *blend* (mistura de lodo e gesso comercial) como revestimento para construção civil. Os estudos desenvolvidos com esse material consistiram em avaliar as propriedades físico-químicas e mecânicas de misturas de lodo e do gesso comercial, com porcentagens em massa de lodo em relação ao gesso comercial (material de controle) puro que variaram 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Com o objetivo de retardar o tempo de pega do blend, utilizou o aditivo Blok gesso e posteriormente Ácido cítrico, que indicou eficiência como retardante de pega, sendo também mais barato que o aditivo. As amostras foram caracterizadas na forma de pó através de análises térmicas, mineralógicas e granulométricas. No estado fresco através das análises dos tempos de pega. E no estado endurecido através dos testes de resistências à compressão e à tração. A análise de viabilidade econômica foi realizada pela empresa júnior FEA Junior da USP - SP, que através de especialistas realizou o estudo de mercado do gesso, considerando o mercado no Peru. Os resultados sugerem que todos os traços ficaram dentro da ASTM C28/C28M para resistência à compressão, e dentro da NBR 13528-2 e da EN 13279-1 para resistência à aderência por tração. Apesar do traço de 30% sem aditivo ter atendido a estas normas, houve dificuldades durante os testes devido ao reduzido tempo de pega. Na aplicação do *blend* na parede, de acordo com as considerações do aplicador contratado, os *blends* apresentaram facilidade de aplicação, porém com secagem aparentemente rápida, que de acordo com profissional é uma vantagem em relação ao gesso comercial. Todos os resultados sugerem ser tecnicamente viável o uso do *blend* como revestimento de paredes na construção civil, porém, para o uso em grandes escalas, é possível que seja necessário ajustes. Já de acordo com a análise de viabilidade econômica realizada pela FEA Junior, os resultados indicam um mercado promissor para direcionar a produção do *blend*, porém de acordo com os estudos, a aplicação do blend como produto alternativo do gesso não deve limitar apenas ao revestimento para paredes, deve - se considerar também as hipóteses de

aplicação na produção de *Drywall* e na indústria de cimento, assim seria agregado valor ao produto produzido.

Palavras-Chave: Gesso; Lodo; Revestimento; Economia Circular; Construção Civil.

ABSTRACT

With a focus on the circular economy, this study used commercial gypsum and sludge from the treatment of wastewater from mining processes at Nexa Resources as the main materials. The technical and economic feasibility of reusing the sludge in the form of a blend (mixture of sludge and commercial gypsum) as a coating for civil construction were evaluated. The studies developed with this material consisted of evaluating the physical-chemical and mechanical properties of mixtures of sludge and commercial gypsum, with mass percentages of sludge in relation to pure commercial gypsum (control material) that varied between 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. In order to delay the setting time of the blend, the additive Blok gypsum was used and subsequently citric acid, which indicated efficiency as a setting retardant, and was also cheaper than the additive. The samples were characterized in powder form through thermal, mineralogical and granulometric analyses. In the fresh state through analysis of the setting times. And in the hardened state through compression and tensile strength tests. The economic feasibility analysis was carried out by the junior company FEA Junior of USP - SP, which, through specialists, carried out the plaster market study, considering the market in Peru. The results suggest that all the mixes were within ASTM C28/C28M for compression strength, and within NBR 13528-2 and EN 13279-1 for tensile adhesion strength. Although the 30% mix without additives met these standards, there were difficulties during the tests due to the short setting time. When applying the blend to the wall, according to the considerations of the hired applicator, the blends were easy to apply, but with apparently fast drying, which according to the professional is an advantage over commercial plaster. All the results suggest that the use of the blend as a wall covering in civil construction is technically feasible, however, for large-scale use, adjustments may be necessary. According to the economic feasibility analysis carried out by FEA Junior, the results indicate a promising market to direct the production of the blend, however, according to the studies, the application of the blend as an alternative product to plaster should not be limited to wall coverings only. The hypotheses of application in the production of Drywall and in the cement industry should also be considered, thus adding value to the product produced.

Keywords: Gypsum; Sludge; Coating; Circular Economy; Civil Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rocha de Gipsita.....	9
Figura 2: Desmonte da Rocha de Gipsita através do uso de explosivos	10
Figura 3: Uso de tratores e caminhões para o transporte da gipsita após extração..	10
Figura 4: Processo de britagem realizado no polo gesseiro de Araripe	11
Figura 5: Forno do tipo rotativo horizontal de queima indireta utilizado no processo de calcinação	12
Figura 6: Aplicações do gesso: revestimento de paredes, placas e acabamento	13
Figura 7: Aplicação do gesso: uso como condicionante do solo para plantações	14
Figura 8: Aplicação do gesso: uso na ortopedia e na odontologia	15
Figura 9: Escultura moldadas em gesso	15
Figura 10: Cristais de di-hidrato formados na hidratação do gesso com predominância morfológica de agulhas prismáticas	21
Figura 11: Etapa de tratamento que resulta na produção do lodo.....	25
Figura 12: Depósito de lodo em Cajamarquilla no Peru	26
Figura 13: Análise granulométrica do lodo	27
Figura 14: Fluxograma dos experimentos realizados e normas seguidas.....	31
Figura 15: Aditivo retardante dos tempos de pega das misturas.....	31
Figura 16: DRX do aditivo Blok Gesso	32
Figura 17: Processo de secagem do lodo na estufa: (a) lodo separado em bandejas, (b) bandejas na estufa para secagem	33
Figura 18: Lodo em forma de torrões após secagem na estufa	34
Figura 19: Destorroamento do lodo com o auxílio de um almofariz	34
Figura 20: Peneiramento do lodo em peneira de 2 mm para retirada de grãos maiores	35
Figura 21: Fluxograma do processo de obtenção do blend, considerando uma produção em grande escala para comercialização	37
Figura 22 - Processo de mistura do gesso com o lodo para preparação do <i>blend</i>	38
Figura 23: Etapas do ensaio para medir o pH do gesso, lodo e combinações de blend. (a) Balança de precisão; (b) Pesagem de 1 grama do pó; (c) Tubo com 10 ml de água; (d) Agitação no vórtex; (e) Tubos na centrifuga; (f) Amostras em repouso.....	40

Figura 24: Teste de início de pega para o blend e para o gesso comercial pelo método da espátula.....	42
Figura 25 - Teste de fim de pega para o gesso comercial e para o blend determinado quando se pressiona o dedo sobre o corpo de prova e não mais deixa impressão sobre a pasta.	42
Figura 26: <i>Blend</i> e água utilizados para preparar a pasta utilizada no teste de pega	44
Figura 27: (a) Polvilhamento do <i>blend</i> sobre a água, (b) mistura durante o preparo da pasta	44
Figura 28 - Cone com a pasta de <i>blend</i> sobre placa de vidro para teste de pega	45
Figura 29: Aparelho Vicat durante execução do teste de pega	46
Figura 30: Acido cítrico P.A. anidro, usado em substituição do aditivo	47
Figura 31 – Moldagem dos corpos de prova: (a) material polvilhado sobre a água para iniciar a moldagem, (b) pasta de gesso colocada no molde.....	48
Figura 32: Corpos de prova retirados do molde e numerados para identificação em posteriores ensaios	49
Figura 33: Corpos de prova moldados com relação água/ <i>blend</i> de 0,68	50
Figura 34: Corpos de prova moldados com relação água/ <i>blend</i> de 0,70 e 0,72	50
Figura 35: Corpos de prova moldados com relação água/ <i>blend</i> de 0,75	51
Figura 36: Monitoramento da perda de água dos corpos de prova através de pesagens periódicas	51
Figura 37: Corpos de prova no dessecador para posterior ensaio de compressão ..	52
Figura 38: Ensaio de resistência à compressão em corpos de prova do blend e em corpos de prova de gesso comercial.....	53
Figura 39: Processo de moldagem de corpos de prova para ensaio de compressão (polvilhamento do blend na água, mistura para produção da aplicação no molde)...	55
Figura 40: Corpos de proa retirados do molde e numerados para identificação em posteriores ensaios	55
Figura 41: Monitoramento da perda de água dos corpos de prova através de pesagens periódicas	56
Figura 42: Corpos de prova no dessecador para posterior ensaio de compressão ..	56

Figura 43: Ensaio de resistência à compressão em corpos de prova do blend e em corpos de prova de gesso comercial	57
Figura 44: Preparo da pasta de <i>blend</i> com aditivo e identificação dos corpos de prova para o ensaio de compressão	58
Figura 45: Corpos de prova no dessecador por 24 horas após estabilizar a perda de água	58
Figura 46: Corpos de prova após 24 horas no dessecador e corpos de prova na prensa durante o ensaio de compressão	59
Figura 47: Amostra de lodo recebida para os ensaios da primeira etapa e amostra do lodo recebido para os ensaios da segunda etapa	60
Figura 48: Corpos de prova preparados com a amostra da primeira etapa e corpos de prova preparados com amostra da segunda etapa	61
Figura 49: (a) Corpos de prova após 24 horas no dessecador, (b) corpos de prova na prensa durante o ensaio de compressão	61
Figura 50: Aplicação de pasta feita com gesso comercial e com <i>blend</i> em tijolos para ensaio de aderência	63
Figura 51: Cortes no revestimento dos substratos com serra copo de 50mm para colagem das pastilhas do teste de aderência.....	64
Figura 52: Colagem das pastilhas com resina epóxi	64
Figura 53: Pastilhas coladas sobre os cortes no substrato	65
Figura 54: Ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato com a utilização de dinamômetro de tração	65
Figura 55: Recipiente com água e recipiente com o <i>blend</i> utilizado na preparação da pasta para o ensaio de aderência	67
Figura 56: (a) Colocação do blend na água, (b) mistura para produção da pasta a ser aplicada nos substratos.....	67
Figura 57: Aplicação da pasta do blend com camada de 1cm de espessura nos substratos para execução do teste de aderência	68
Figura 58: Substratos revestidos com a pasta do blend em processo de cura para continuidade do teste de aderência, todos os substratos foram identificados com a porcentagem de lodo utilizada na pasta.....	68

Figura 59: (a) Marcações nos revestimentos de cada substrato determinando 4cm entre as bordas e 2cm entre as pastilhas; (b) Cortes no revestimento dos substratos com serra copo de 50mm; (c) Substrato com cortes prontos para a colagem das pastilhas	69
Figura 60: Colagem das pastilhas com cola a base de resina epóxi.....	70
Figura 61: Pastilhas coladas sobre os cortes no substrato	70
Figura 62: Ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato com a utilização de dinamômetro de tração	71
Figura 63: Microscópio Eletrônico de Varredura.....	72
Figura 64: Curvas TG do gesso comercial	75
Figura 65: Curvas TG do lodo	76
Figura 66: Curvas TG: comportamento térmico do gesso comercial.....	77
Figura 67: Curvas TG: comportamento térmico do lodo.....	77
Figura 68: Difratoograma do gesso comercial.....	80
Figura 69: Difratoograma do lodo sem tratamento térmico	81
Figura 70: Difratoograma do lodo com tratado termicamente a 150°C	81
Figura 71: Curva de distribuição granulométrica do gesso comercial obtida por medidas de espectroscopia de atenuação acústica	82
Figura 72: Curva de distribuição granulométrica do lodo obtida por medidas de espectroscopia de atenuação acústica	83
Figura 73: Curva de distribuição granulométrica do lodo por peneiramento	84
Figura 74: Curva de distribuição granulométrica do lodo por granulometria a laser..	85
Figura 75: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 1 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro).....	88
Figura 76: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 2 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro).....	89
Figura 77: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 3 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro).....	89

Figura 78: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do gesso e dos blend's com porcentagens de lodo de 10%,20% e 30% (sem aditivo) e porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo), em relação as determinações da norma brasileira para tempo de pega (NBR13207/2017)	91
Figura 79: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do gesso e dos blend's com porcentagens de lodo de 10%,20% e 30% (sem aditivo) e porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo), em relação as determinações da norma peruana que classifica o tempo de pega (NTP 334.188).....	92
Figura 80: Gráfico com resultados comparativos dos testes de tempo de pega do dos blend's com porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo) e blend's com porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com Ácido Cítrico P.A), em relação as determinações da norma da norma brasileira para tempo de pega (NBR13207/2017)	93
Figura 81 - Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega dos blend's com porcentagem de lodo de 10%, utilizando água em temperatura ambiente de 25°C, resfriada a 10°C e a 20°C e aquecida a 35°C	94
Figura 82: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do blend com porcentagens de 10%, 30% e 50% usando o lodo após seis ciclos de lavagem	95
Figura 83: Resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes tratamentos térmicos e diferentes relações água/gesso, as linhas representam as normas utilizadas como parâmetro	96
Figura 84: Resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes após otimizações do tratamento térmico para 130°C e relação água/gesso para 0,70, as linhas contínuas representam as médias dos resultados	98
Figura 85: Gráfico com resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes porcentagens de lodo (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%). A relação de água foi de acordo com a necessidade para se obter a moldagem	99
Figura 86 - Gráfico com resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com blend para porcentagens de lodo 30%, 40% e 50% com aditivo. A linha laranja indica a resistência mínima de acordo com a ASTM C28/28M.....	101

Figura 87: Resultados dos testes de aderência em substratos revestidos com gesso comercial e com blend, as linhas contínuas representam as medias dos resultados e as linhas pontilhadas representam as normas utilizadas como parâmetro	102
Figura 88: Gráfico de resultados com desvio padrão dos testes de aderência em substratos revestidos com gesso comercial e com <i>blend's</i> utilizando porcentagens de lodo de 20% e 30% sem aditivo e porcentagens de 30%, 40% e 50% sem aditivo. As linhas contínuas representam as normas brasileira e americana, utilizadas como parâmetro do teste	103
Figura 89: Aplicação do gesso comercial na parede	104
Figura 90: Aplicação do blend com porcentagem de 20% de lodo sem aditivo.....	105
Figura 91: Aplicação do blend com porcentagem de 50% de lodo com aditivo.....	106
Figura 92: Análise morfológica do gesso.....	107
Figura 93: (a) Análise morfológica do blend com amostra antiga de lodo puro. (b) Análise morfológica do blend com amostra antiga de lodo com aditivo	108
Figura 94: (a) Análise morfológica do blend com amostra nova de lodo puro. (b) Análise morfológica do blend com amostra nova de lodo com aditivo	108
Figura 95: Análise química do Gesso comercial por Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)	110
Figura 96: Análise química do Lodo antigo por Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)	111
Figura 97: Análise química do Lodo novo Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS).....	112
Figura 98: Gráfico da produção em toneladas entre 2013-2022	114
Figura 99: Produção de gesso no Peru em toneladas	115
Figura 100: Gráfico de valores da produção de gesso no Peru	117
Figura 101: Gráfico de custos de produção por tonelada de gesso.	118
Figura 102:Gráfico dos valores totais da oferta de gesso	119
Figura 103:Gráfico da evolução dos custos e preços praticados	120
Figura 104: Gráfico da evolução da mineração e construção civil	121
Figura 105: Gráfico do mercado de gesso e construção civil 2012-2021	122
Figura 106: Gráfico da produção de gesso de cada mineradora.....	123
Figura 107: Demandas projetadas entre os três cenários considerados.....	127

Figura 108: Acréscimo anual de demanda	128
Figura 109: Acréscimos de demanda considerando o CAGR do mercado de construção civil no Peru de 4,30%, para os cenários pessimista e realista, e o crescimento de construção na América Latina, 5,00%, para o cenário otimista.....	129
Figura 110: Margens de custos estruturais no setor de gesso	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das espécies químicas do gesso	8
Tabela 2 - Composição principal do lodo.....	27
Tabela 3 - Traços para moldagem de corpos de prova com lodo com porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.	54
Tabela 4 - Traços para moldagem de corpos de prova com porcentagens de 30%, 40% e 50%, utilizando 0,22 gramas de aditivo retardante de pega.....	57
Tabela 5 - Quantidade de materiais utilizados para porcentagem de 0%, 20%, 30% (sem aditivo); 30%, 40% e 50% (com aditivo) na aplicação para teste de aderência.	66
Tabela 6 - Temperatura dos tratamentos térmicos e tempo necessário para a perda de 10% em massa do lodo	78
Tabela 7 - Resultados das medidas de pH dos gessos, das amostras de Lodo e combinações de blend's.	87
Tabela 8 - Resultados das medidas de pH da amostra de Lodo após ciclos de lavagens com água da torneira. O pH foi medido após cada 2 ciclos de lavagem....	87
Tabela 9 - Resultados dos testes de início e fim de pega do gesso comercial e do <i>blend</i>	90
Tabela 10 - Resultados dos testes de início e fim de pega do gesso, dos <i>blend's</i> com 10%, 20%, 30% (sem aditivo) e 30%, 40% e 50% (com aditivo).....	91

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

H ₂ O	Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
USD/PEN	Câmbio de Dólar para Novo Sol Peruano
CaCO ₃	Carbonato De Cálcio
cm	Centímetros
Pb	Chumbo
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DRX	Difração De Raios X
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
FEA	Faculdade de Economia e Administração
°C	Graus Celsius
Ca (OH) ₂	Hidróxido De Cálcio
h	Hora
MPa	Mega Pascal
µm	Micrômetro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varedura
ml	Mililitro
mm	Milímetro
min.	Minutos
S/	Moeda Peruana Novo Sol
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
EN	Norma Europeia
NTP	Norma Técnica Peruana
CaO	Óxido De Cálcio
P.A	Padrão Analítico

pH	Potencial Hidrogeniônico
Ag	Prata
PIB	Produto Interno Bruto
Kg	Quilograma
rpm	Rotações Por Minuto
SP	São Paulo
CaSO ₄	Sulfato De Cálcio
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
TIR	Taxa Interna de Retorno
TG	Termogravimetria
Ton.	Tonelada
CaWO ₄	Tungstato de Cálcio
USP	Universidade de São Paulo
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xix
1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Justificativa	6
2 OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo Geral	7
2.2 Objetivos Específicos	7
3 REFERENCIAL TEÓRICO	8
3.1 Gesso	8
3.1.1 Gipsita.....	9
3.1.1.1 Beneficiamento da gipsita.....	11
3.1.1.2 Calcinação.....	12
3.1.1.3 Principais aplicabilidades do gesso.....	13
3.1.1.4 O gesso na construção civil.....	16
3.1.1.4.1 Isolante acústico e térmico.....	16
3.1.1.4.2 Melhor aderência, acabamento e trabalhabilidade.....	17
3.1.1.5 Propriedades do gesso de revestimento.....	17
3.1.1.5.1 Propriedades do gesso na forma de pó.....	17
3.1.1.5.1.1 <i>Propriedade térmica</i>	18
3.1.1.5.1.2 <i>Propriedade mineralógica</i>	18
3.1.1.5.1.3 <i>Propriedade granulométrica</i>	18
3.1.1.5.2 Propriedades do gesso no estado fresco.....	19
3.1.1.5.2.1 <i>Início e fim de pega</i>	19
3.1.1.5.2.2 <i>Consistência Normal</i>	19
3.1.1.5.3 Propriedades do gesso no estado endurecido.....	20

3.1.5.3.1 Resistência à compressão	20
3.1.5.3.2 Aderência	20
3.1.5.3.3 Morfologia.....	21
3.1.6 Estudos relacionados a utilização de rejeitos da mineração e de produtos a base de gesso na construção civil	22
3.2 Lodo Gerado em Processos de Tratamento de Águas Residuais da Mineração	25
3.2.3 Características do Lodo.....	26
4 METODOLOGIA	28
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
5.1 Beneficiamento da polpa de lodo	33
5.1.1 Secagem da polpa contendo o lodo	33
5.1.2 Destorroamento e peneiramento do lodo	33
5.2 Caracterização do Lodo e do Gesso na Forma de Pó	35
5.2.1 Caracterização Térmica	35
5.2.2 Tratamentos Térmicos.....	36
5.2.3 Caracterização mineralógica	36
5.2.4 Caracterização granulométrica.....	37
5.3 Preparação do Blend	37
5.4 Caracterização do blend no estado fresco: análise do pH e Início e fim da pega	39
5.4.1 Análise do pH do Gesso e do Lodo	39
5.4.4.1 Estudo do pH do Lodo Lavado	40
5.4.2 Início e fim de pega	41
5.4.2.1 Teste de pega para blend com a utilização de ácido cítrico P.A como aditivo	46
5.4.2.2 Teste do Tempo de Pega com o Uso de Diferentes Temperaturas da Água	47
5.4.2.3 Análise do Tempo de Pega do blend preparado com lodo lavado	47
5.5 Caracterização do blend no estado endurecido	48
5.5.1 Ensaio de resistência à compressão	48
5.5.2 Ensaio de Aderência	62
5.6 Análise da aplicação do blend na parede	71

5.7 Análise da morfologia e avaliação dos elementos presentes nos materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS).....	72
5.8 Viabilidade Econômica	73
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
6.1 Caracterização do lodo e do gesso na forma de pó.....	75
6.1.1 Caracterização térmica.....	75
6.1.2 Tratamento Térmico	78
6.1.3 Caracterização mineralógica.....	79
6.1.4 Caracterização granulométrica.....	82
6.2 Preparação do <i>blend</i>.....	86
6.3 Caracterização do <i>blend</i> no estado fresco: análise do pH e Início e fim da pega.....	86
6.3.1 Análise de pH do Gesso e do Lodo.....	86
6.3.2 Análise do pH do lodo lavado.....	87
6.3.3 Início e fim da pega	90
6.3.4 Teste de pega para <i>blend</i> com a utilização de ácido cítrico P.A como aditivo ..	93
6.3.5 Teste do Tempo de Pega com o Uso de Água em Diferentes Temperaturas ..	94
6.3.6 Análise do tempo de pega do <i>blend</i> preparado com lodo lavado.....	95
6.4 Caracterização do <i>blend</i> no estado endurecido	96
6.4.1 Ensaio de resistência à compressão	96
6.4.2 Ensaio de aderência.....	102
6.5 Análise da aplicação do <i>blend</i> na parede	103
6.6 Análise da morfologia e avaliação dos elementos presentes nos materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/ Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS).....	107
6.7 Análise De Viabilidade Econômica	113
6.7.1 Mercado de Gesso Global.....	113
6.7.2 Mercado de Gesso no Peru.....	114
6.7.3 Preços ofertados para o mercado de gesso.....	118
6.7.4 Cenário da Construção Civil.....	120
6.7.5 Concorrência: Mineradoras	123

6.7.6 Potenciais Clientes	125
6.7.7 Modelo da viabilidade financeira	127
6.7.8 Demanda prevista	127
6.7.9 Custeio e definição de preço	129
7 CONCLUSÃO	131
8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos industriais é crescente e preocupante. *Morais et al* (2017) destaca o levantamento de dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) que informa a geração anual de mais de 500 milhões de toneladas de rejeitos de mineração no Brasil. Segundo a Agência Nacional de Mineração (2022), o estoque de rejeitos em barragens do Brasil passa de 4,2 bilhões de metros cúbicos.

Estudos estão sendo desenvolvidos com foco em reaproveitar os resíduos industriais na cadeia produtiva e impulsionar a economia circular. Nesse contexto, a Nexa, companhia mineiro-metalúrgica com foco na produção de Zinco e Cobre, que tem plantas em operação no Brasil e Peru, produziu no ano de 2021 cerca de 619,0 mil toneladas de zinco e óxido de zinco (Brasil Mineral, 2022) sendo que uma fração dos insumos utilizados no processo não é aproveitada como produtos, gerando o rejeito que é acumulado em depósitos até que se possa identificar alternativas técnica e economicamente viáveis. Esses materiais acumulados são denominados de “Lodos Neutros/Gesso”, um resíduo metalúrgico proveniente da planta de tratamento de efluentes existente na sua unidade de Cajamarquilla, no Peru.

Diversas pesquisas têm demonstrado que os rejeitos da mineração podem ser transformados em substitutos parciais ou totais de materiais convencionais na produção de revestimentos na construção civil, conferindo-lhes propriedades técnicas e estéticas diferenciadas. O estudo desenvolvido por *Martin et al.* (2023) teve como objetivo desenvolver uma argamassa de revestimento termo isolante através da substituição total do agregado natural por Quartzito Friável (FQ) e adição de Pó de Escória de Aciaria (SSP) e os resultados indicaram usos alternativos promissores para os referidos resíduos, nas práticas de construção civil. *Neto et al.* (2016), desenvolveram um estudo cujo objetivo foi analisar a utilização do resíduo de scheelita (CaWO_4) como agregado miúdo em argamassas simples. Os resultados desse estudo sinalizaram a viabilidade de utilização do resíduo, sendo de grande relevância na redução dos impactos ambientais.

As características físicas e químicas do “Lodos Neutros/Gesso” sinalizam um potencial de aplicação desse resíduo metalúrgico como material alternativo na construção civil. Seguindo a ótica de diversas pesquisas, neste trabalho buscou-se

avaliar tecnicamente e economicamente a viabilidade do Lodos Neutros/Gesso para ser aplicado como revestimento a base gesso na construção civil.

1.1 Justificativa

O estudo envolvendo o lodo tem grande relevância tanto do aspecto socioeconômico quanto ambiental. A geração de resíduos gera grande preocupação, pois o rompimento de um depósito de rejeitos coloca em risco a vida humana e o meio ambiente. Além disso, o manejo de depósitos é de elevado custo e ocupa grandes áreas.

A gestão adequada das lamas neutras é essencial para garantir a proteção do ambiente e da saúde pública, e o uso desse passivo ambiental na construção civil poderá contribuir com a minimização da disposição do mesmo em pilhas a partir de seu reaproveitamento.

Diante disso, a pesquisa busca desenvolver um produto que aproveite o máximo possível de lodo, minimize o acúmulo do mesmo em depósitos de rejeitos e reduza o consumo de matéria prima primária (gesso).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver a partir do lodo, um material que seja tecnicamente e economicamente viável para ser aplicado como revestimento a base gesso na construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, a pesquisa buscou:

1. Avaliação do efeito da incorporação de diferentes percentuais lodo neutro, como substituto parcial ao gesso comercial, no comportamento de pastas de gesso por meio de testes de início e fim de pega;
2. Estudos de dosagens das misturas de gesso e análise das propriedades do gesso e das suas misturas nos estados fresco e endurecido;
3. Otimizar o processo de produção do blend para obter melhores resultados com baixo custo;
4. Avaliação da aplicação das misturas em substrato (parede).
5. Avaliação da viabilidade econômica de obtenção e utilização deste material como revestimento de alvenarias.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gesso

A produção de gesso ocorre através da mineração e calcinação da gipsita, mineral natural formado pela evaporação dos mares. O gesso é um mineral amplamente disponível, encontrado em abundância em muitas partes do mundo (ROCHA *et al.*, 2021 *apud* LIBRELOTTO e FERROLI, 2020). De acordo com Ramos (2011), existem registros do seu uso na construção das pirâmides do Egito.

O gesso é amplamente utilizado na construção civil como revestimento, mas também pode ser encontrado em peças decorativas ou na ortopedia dos hospitais.

De acordo com Barbosa, *et al.* (2014), o Polo Gesseiro de Araripe, situado no interior semiárido do Brasil, é responsável por fabricar 97% do gesso utilizado em território nacional. Esse tipo de gesso é considerado o melhor no mundo inteiro graças à alta concentração de puro minério chamado gipsita.

Rocha *et al.* (2021) afirmam que o gesso para construção é um aglomerante aéreo produzido pela calcinação do gesso natural ou residual em fornos industriais sob pressão atmosférica e em temperaturas que variam de 150°C a 200°C. O produto final, gesso para construção, é constituído principalmente por sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), anidritas solúveis e insolúveis (CaSO_4) e sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A Tabela 1 mostra a composição das espécies químicas do gesso.

Tabela 1 - Composição das espécies químicas do gesso

Sulfatos	Fórmula	Massa molecular (g)	Composição (%)			Relação CaO/SO ₃
			H ₂ O	CaO	SO ₃	
Anidrita	CaSO ₄	136,14	0,00	41,19	58,81	0,7
Hemidrato	CaSO ₄ 0,5H ₂ O	145,15	6,20	38,63	55,15	0,7
	CaSO ₄ 0,66H ₂ O	148,02	8,03	37,88	54,08	0,7
Gipsita	CaSO ₄ 2H ₂ O	172,17	20,99	32,57	46,5	0,7

Fonte: Adaptado de ROCHA *et al.*, 2021 *apud* CINCOTTO, 2007.

3.1.1 Gipsita

Oliveira (2020) destaca que a gipsita é um mineral difundido de sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), formado a partir da sedimentação de evaporitos. Possui variedades fibrosas de granulação fina e é gerado através da precipitação de sal em massas de água isoladas em processo de evaporação. Sua ampla gama de utilizações deriva de sua capacidade característica de desidratar e reidratar facilmente, com perda de aproximadamente 75% de H_2O durante a calcinação. A gipsita é encontrada em várias regiões do mundo na forma de rocha, como é mostrado na Figura 1.

Figura 1: Rocha de Gipsita



Fonte: MACHADO. G. B.

De acordo com Baltar et al (2004), a gipsita pode ser utilizada na forma natural em procedimentos agrícolas e na indústria de cimento, ou na forma calcinada em procedimentos da construção civil, como material ortopédico ou odontológico, em obras de arte etc.

A extração da gipsita ocorre através do uso de explosivos (Figura 2), seguido do uso de tratores e caminhões para o transporte, como mostra a Figura 3.

Figura 2: Desmonte da Rocha de Gipsita através do uso de explosivos



Fonte: CETEM (2008).

Figura 3: Uso de tratores e caminhões para o transporte da gipsita após extração



Fonte: CETEM (2008).

3.1.1 Beneficiamento da gipsita

Segundo Baltar *et al* (2005), a gipsita passa por um processo de beneficiamento que envolve britagem, moagem, peneiramento e secagem. Normalmente são utilizados britadores de mandíbula e moinhos de martelo durante o processo. A etapa da britagem também pode ser realizada em duas fases com a ajuda das peneiras vibratórias a seco para formar um circuito fechado. Durante a fase da moagem é importante obter uma distribuição granulométrica homogênea afim evitar desidratação irregular das partículas. Na Figura 4 observa-se um processo de britagem primário realizado no polo gessoiro de Araripe – PE.

Figura 4: Processo de britagem realizado no polo gessoiro de Araripe



Fonte: Conexão Sertão.

De acordo com VELHO *et al* (1998), o processo de secagem ocorre em secadores rotatórios, a uma temperatura de, no máximo 49 °C, e tem como objetivo a remoção do excesso de umidade para facilitar o manuseio da gipsita.

3.1.2 Calcinação

De acordo com Cipriano *et al* (2021), após a gipsita ser triturada e moída é realizada a calcinação, processo que consiste na decomposição a quente da gipsita. No mineral a proporção de água na estrutura é de 1:2 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e após a calcinação a proporção fica 1:0,5, realizando a transformação do sulfato de cálcio di-hidratado em sulfato de cálcio hemidratado (gesso: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$).

O processo de calcinação pode ser realizado em diferentes tipos de fornos, os quais devem assegurar uma distribuição e desidratação regular do material. Os fornos podem ser verticais, forno rotativo horizontal e forno de leito fluidizado, sendo que o forno mais utilizado para o processo é o forno rotativo horizontal (contínuos ou intermitentes), que é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Forno do tipo rotativo horizontal de queima indireta utilizado no processo de calcinação



Fonte: CETEM (2008).

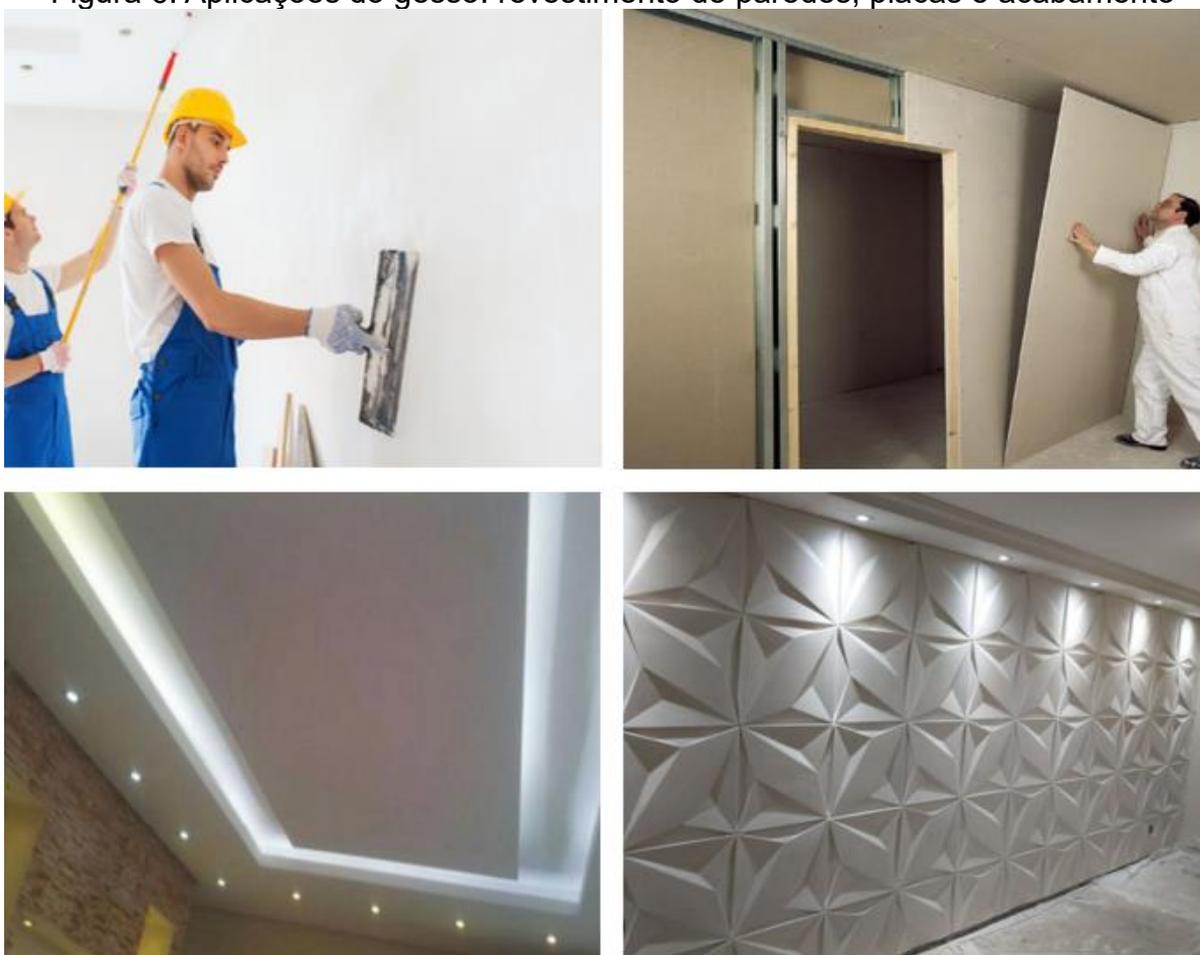
Segundo Baltar *et al* (2004), a calcinação pode ocorrer por processo direto ou indireto. O processo direto ocorre quando a gipsita entra em contato com os gases de

combustão, enquanto o indireto acontece por meio da circulação dos gases quentes no cilindro interno e na gipsita presente no cilindro externo.

3.1.3 Principais aplicabilidades do gesso

Segundo o Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos (2012), a Construção Civil é responsável pela utilização de 85 a 90% do gesso produzido no Brasil, sendo o gesso utilizado em revestimento de paredes, divisórias, acabamentos, blocos, placas e painéis (Figura 6).

Figura 6: Aplicações do gesso: revestimento de paredes, placas e acabamento



Fonte: Minas Gesso (2023).

O gesso também tem aplicabilidade na indústria cimenteira, sendo adicionado ao clínquer, para a fabricação do cimento com o objetivo de controlar o tempo de pega do cimento.

Na agricultura o gesso é aplicado no condicionante de solos, como mostra a Figura 7, com a finalidade de combater a presença de alumínio tóxico e proporcionar melhor perfuração das raízes das plantas.

Figura 7: Aplicação do gesso: uso como condicionante do solo para plantações



Fonte: GAZ (2023).

Quando aplicado na agricultura o gesso não passa pela etapa de calcinação, sendo submetido apenas ao processo de moagem.

Como pode ser visto na Figura 8, a medicina também utiliza o gesso na ortopedia para imobilização de fraturas e na odontologia para moldagens de próteses dentárias.

Figura 8: Aplicação do gesso: uso na ortopedia e na odontologia



Fonte: Adaptado de Zyman e Imagem Cef (2023).

Também há aplicabilidade do gesso como fonte de cálcio e enxofre e para a fabricação de moldes, como modelador de peças, obras de arte (Figura 9) etc. (BARBOSA *et al*, 2011).

Figura 9: Escultura moldadas em gesso



Fonte: Casa e construção (2023).

3.1.4 O gesso na construção civil

De acordo com Rocha (2007), o gesso apresenta excelentes propriedades e características únicas que contribuem fortemente para sua apresentação como um material de grande importância para a construção civil.

Além disso Rocha (2007) destaca que o gesso tem potencial na substituição de outros materiais por serviços similares devido às suas vantagens em fatores como trabalhabilidade que facilita a aplicação, apresenta excelente aderência e boa durabilidade para acabamentos. Outra vantagem do gesso em relação a outros materiais é custo no mercado.

3.1.4.1 *Isolante acústico e térmico*

O gesso é um material que possui propriedades de redução da sensação térmica, uma vez que absorve muita umidade por possuir cristais em sua estrutura, semelhantes a grandes poros. De acordo com Pereira e Pinheiro (2021), essa umidade é liberada conforme o ambiente fica mais seco ou quente. Além disso, essa composição permite ao gesso ter grande resistência ao fogo graças à sua capacidade de retenção de umidade.

O isolamento acústico é caracterizado pela capacidade de um material impedir a transmissão sonora de um ambiente para outro, eliminando ruídos que causam desconforto. Ainda de acordo com Pereira e Pinheiro (2021), quando aplicado em forma de placas o desempenho do gesso supera o das soluções tradicionais de alvenaria proporcionando melhor isolamento e absorção sonora, isso ocorre devido a diferença de impedância do ar e do gesso. De acordo com Júnior (2023) impedância sonora é a resistência que um material oferece à passagem do som.

Segundo Losso e Viveiros (2004), quando ocorre mudança de meio, como de fluido para sólido ou de ar para parede, a capacidade de transmissão de energia sonora diminui conforme a diferença de impedância entre os meios aumenta. Assim, materiais com grande diferença de impedância em relação ao ar terão menor capacidade de conexão acústica e conseqüentemente, menor propagação de energia

sonora, isso resulta em uma maior capacidade de isolamento acústico entre as partes envolvidas.

3.1.4.2 Melhor aderência, acabamento e trabalhabilidade

De acordo com Canut et al. (2006), as pastas de gesso apresentam boa adesão a vários substratos, como tijolos, pedras e ferro, e devido a esta importante característica, é muito utilizado em superfícies verticais e tetos.

Ao escolher o revestimento adequado, a trabalhabilidade é essencial. Pereira e Pinheiro (2021) afirmam que comparando com outras opções convencionais, como argamassa ou cimento, o gesso apresenta vantagens notáveis em sua facilidade de mistura, pois requer apenas água e gesso. Além disso, proporciona um acabamento mais refinado, de fácil modelagem e alta durabilidade.

De acordo com os estudos realizados por Coutinho e Andrade (2023), por se tratar de um material muito fino e maleável, o gesso teve como resultado uma pasta que dá ao executor maior trabalhabilidade, apesar de que esta característica é resultante em um endurecimento rápido, em geral inferior a 20 minutos, após misturado com água, o que demanda uma mão-de-obra qualificada para que não haja perda de material.

3.1.5 Propriedades do gesso de revestimento

Segundo Aragão (2023), o gesso de revestimento apresenta propriedades específicas na forma de pó, no estado fresco e no estado endurecido. Estas propriedades determinam características como o endurecimento lento ou rápido; plasticidade da pasta fresca e lisura da superfície endurecida, resistência mecânica, aderência etc.

3.1.5.1 Propriedades do gesso na forma de pó

Na forma de pó são analisadas as propriedades térmicas, mineralógicas e granulométricas.

3.1.5.1.1 Propriedade térmica

A propriedade térmica é fundamental no processo de calcinação da gipsita e consequente obtenção do gesso. De acordo com Porto (2020) a calcinação do minério de gipsita consiste na desidratação térmica do sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Neste processo, a Gipsita perde 1,5 mols de moléculas de água e se torna hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), o que possibilita a sua utilização na construção civil e outras aplicações do gesso.

As caracterizações térmicas são realizadas através de medidas de termogravimetria (TG), onde a estabilidade térmica dos materiais é avaliada utilizando uma termo balança em atmosfera de ar sintético (atmosfera oxidante).

3.1.5.2 Propriedade mineralógica

O gesso apresenta como característica mineralógica a sua composição básica de sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), composição obtida após a calcinação da gipsita que é composta de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

A investigação mineralógica do gesso comercial é feita através de ensaios de difração de raios-X de policristal.

3.1.5.1.3 Propriedade granulométrica

De acordo com a NBR 13207 (2017) que especifica os parâmetros granulométricos de gessos para revestimento, é necessário que o material tenha no mínimo 90% passante na peneira de abertura de 0,21 mm (210 μm).

Já a Norma americana C28/C28M-10 (2015) determina que no ensaio de granulometria, o gesso para construção para acabamento não deve apresentar material retido na peneira de 1,4 mm (1400 μm) e, pelo menos, 60% do material deve passar na peneira de 0,150 mm (150 μm).

3.1.5.2 Propriedades do gesso no estado fresco

No estado fresco são avaliados o início e fim de pega do gesso na forma de pasta (após ser adicionado em água), esta propriedade é responsável por características como trabalhabilidade e espalhamento do gesso no processo de aplicação.

No estado fresco também se avalia a consistência normal do gesso, que é um valor obtido com o auxílio do aparelho Vicat, que é usado como referência para avaliação do gesso nos estados fresco e endurecido.

3.1.5.2.1 Início e fim de pega

De acordo com a NBR13207(2017) o tempo de início de pega deve ser maior ou igual a 10 minutos e o tempo para o fim de pega deve ser maior ou igual a 35 minutos.

Já a norma Peruana NTP 334.188 faz a classificação dos tempos de pega em rápida, lenta e normal. De acordo com a citada norma, pastas com tempo de pega superior a 20 minutos e inferior a 60 minutos são classificadas como pega rápida, pastas cujo tempo de pega é superior a 60 minutos e inferior a 180 minutos são classificadas como pega normal e pastas cujo tempo de pega é superior ou igual a 180 minutos são classificadas como pega lenta.

Para controlar o tempo de pega e adequá-lo as necessidades de aplicação, podem ser utilizados aditivos para retardar ou acelerar o tempo de pega

3.1.5.2.2 Consistência Normal

De acordo com a NBR 12128 (2019) a consistência é considerada normal quando for obtida penetração da agulha do aparelho Vicat de 30 ± 2 mm. A relação de água/gesso necessária para a obtenção da consistência normal será utilizada na hidratação do gesso para a realização dos demais teste, como tempo de pega, aderência e compressão.

Entretanto neste trabalho a consistência normal foi desconsiderada, com objetivo de obter uma relação de água/gesso menor e alcançar maiores resistências mecânicas.

3.1.5.3 Propriedades do gesso no estado endurecido

No estado endurecido são analisadas as propriedades mecânicas do gesso, sendo avaliadas as resistências à compressão e tração (aderência).

3.1.5.3.1 Resistência à compressão

No Brasil a resistência à compressão não é considerada parâmetro relevante para a qualidade do gesso e o requisito de resistência mínima foi retirado da NBR 12129 (2017). Porém, a NBR 12129 (2019) determina os procedimentos para a realização do ensaio.

Já a ASTM C28/C28M, utilizada em trabalhos acadêmicos realizados no Peru, determina que a resistência à compressão mínima necessária para a utilização do gesso na construção civil é 5,2 MPa.

3.1.5.3.2 Aderência

A aderência do gesso de revestimento é de extrema importância para garantir a durabilidade e resistência do acabamento de uma parede ou superfície. Segundo Diógenes (2016), uma boa aderência do revestimento é fundamental para assegurar a qualidade e a estabilidade do sistema, evitando descolamentos e problemas futuros.

Portanto, a aderência adequada do gesso garante não apenas a eficácia do revestimento, mas também contribui para a segurança e estabilidade das estruturas construídas.

A NBR 13207(2017) determina que a aderência (resistência à tração) mínima para a utilização do gesso na construção civil deve ser maior ou igual a 0,2 MPa.

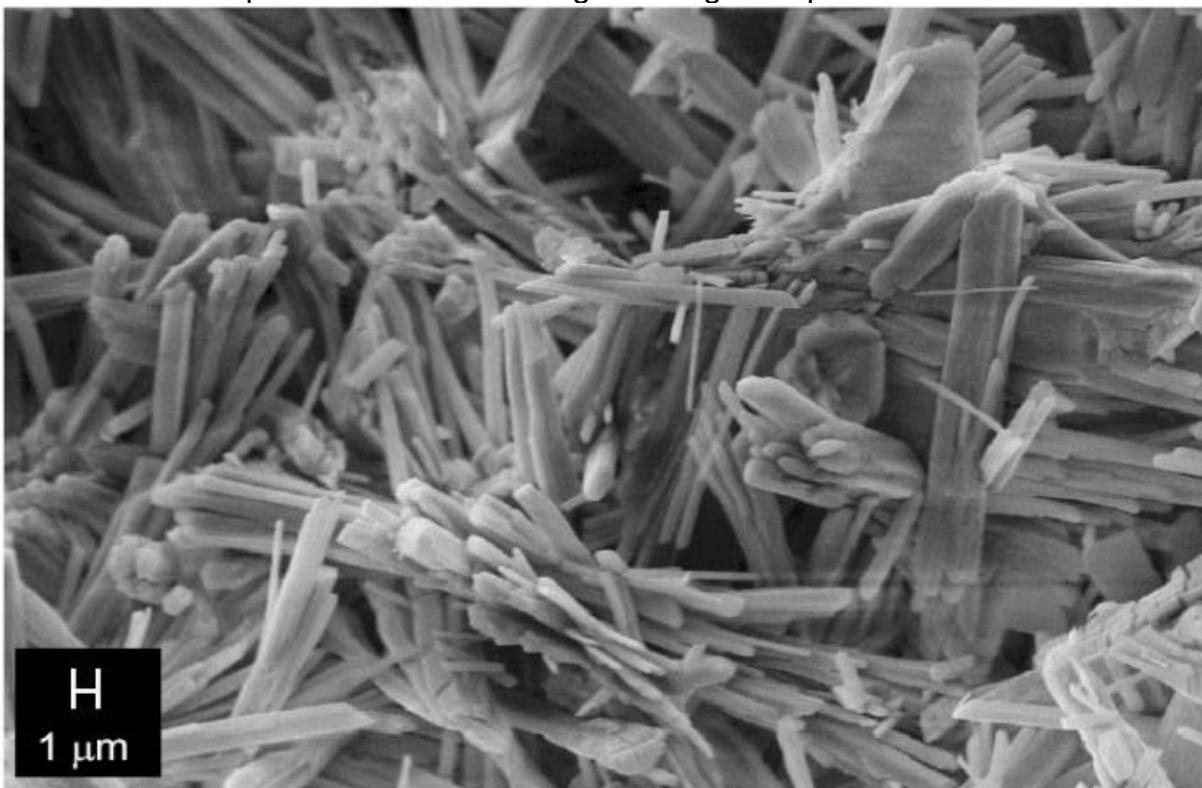
Já a Norma Europeia EN 13279-1 (2008) determina que a aderência (resistência à tração) mínima para a utilização do gesso na construção civil deve ser maior ou igual a 0,1 MPa.

A NBR 13528-2 (2019) determina os procedimentos para a realização do ensaio de aderência, bem como o modelo de relatório do teste de aderência que consiste na anotação dos resultados e fotos de cada pastilha de teste.

3.1.5.3.3 Morfologia

De acordo com Barbosa et al (2014), os cristais de di-hidrato formados na hidratação do gesso têm predominância morfológica de agulhas prismáticas, como mostra Figura 10, e a ocorrência de poros se deve a quantidade de água que não reage com o pó. Nesse processo, a água ocupa o volume entre os cristais, e, após a cura do di-hidrato, evapora, deixando vazios no material.

Figura 10: Cristais de di-hidrato formados na hidratação do gesso com predominância morfológica de agulhas prismáticas



Fonte: Barbosa (2014).

De acordo com Kanno (2009), a presença de aditivos ou impurezas (íons ou moléculas) podem alterar a velocidade de crescimento em determinados planos cristalográficos e é a velocidade de crescimento que determina a formação de agulhas ou placas.

3.1.6 Estudos relacionados a utilização de rejeitos da mineração e de produtos à base de gesso na construção civil

A utilização de rejeitos da mineração na produção de revestimentos na construção civil tem sido objeto de diversos estudos e pesquisas, visando a redução do impacto ambiental causado pela disposição inadequada desses materiais (SILVEIRA, 2015). A incorporação de resíduos da mineração em revestimentos pode contribuir não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para a melhoria das propriedades físicas e químicas dos materiais.

Diversas pesquisas têm demonstrado que os rejeitos da mineração podem ser transformados em substitutos parciais ou totais de materiais convencionais na produção de revestimentos na construção civil, conferindo-lhes propriedades técnicas e estéticas diferenciadas. Além disso, essa prática contribui para a redução da extração de recursos naturais, promovendo o uso racional dos recursos disponíveis (BORGES,2021).

O estudo desenvolvido por Martin *et al.* (2023) teve como objetivo desenvolver uma argamassa de revestimento termo isolante através da substituição total do agregado natural por Quartzito Friável (FQ) e adição de Pó de Escória de Aciaria (SSP). O FQ apresentou características semelhantes às dos agregados naturais, exceto pelos maiores teores de material pulverulento. A argamassa contendo o rejeito não apenas apresentou menor condutividade térmica que a convencional, mas também apresentou alta capacidade calorífica devido ao significativo efeito de matriz de porosidade, indicando usos alternativos promissores para resíduos de FQ e SSP, nas práticas de construção civil.

Neto *et al.* (2016), desenvolveram um estudo cujo objetivo foi analisar a utilização do resíduo de scheelita como agregado miúdo em argamassas simples. O método utilizado consistiu no fracionamento do material, substituindo parcialmente a

areia grossa convencional pelo resíduo fino de scheelita. Os resultados revelaram alterações no comportamento da argamassa, como aumento na distância de abatimento. Porém, o resultado não inviabilizou a utilização do resíduo, esta aplicação mostrou grande relevância na redução dos impactos ambientais.

Lira e Nascimento (2008) avaliaram o potencial de utilização dos resíduos do processamento do caulim produzidos pelas indústrias de mineração da região do Seridó, na Paraíba, juntamente com a vermiculita, para a produção de argamassas com propriedades de isolamento térmico e acústico, e redução do consumo de cimento. Os resultados foram positivos e indicaram que esses resíduos apresentam grande potencial para fins de construção civil.

Já Orlando *et al.* (2021) desenvolveram um estudo com o objetivo de desenvolver uma argamassa decorativa amarela através da adição de um pigmento amarelo obtido através da recuperação hidrometalúrgica do ferro. O pigmento foi produzido pela lixiviação de concentrado de resíduos piríticos da mineração de carvão, resultando em uma solução semelhante à Drenagem Ácida de Minas (AMD). Ao longo deste trabalho de pesquisa, propriedades de estado fresco, como trabalhabilidade e densidade aparente, e propriedades de estado endurecido, incluindo encolhimento, resistência à flexão, resistência à compressão, comportamento de absorção de água capilar causando mudanças de cor foram avaliados. Observou-se que a adição de diferentes quantidades percentuais de pigmentos mostra algum impacto nesses parâmetros testados, embora possa ser concluído que o desenvolvimento potencial do trabalho é promissor.

Portanto, os estudos relacionados à utilização de rejeitos da mineração na produção de revestimentos são relevantes não apenas do ponto de vista econômico, mas também do ambiental e social, uma vez que representam uma alternativa sustentável e inovadora no setor da construção civil.

Existem também diversos estudos que abordam o uso de coprodutos do gesso em diferentes áreas, como na agricultura, construção civil e indústria. Esses estudos têm como objetivo encontrar alternativas sustentáveis e econômicas para a utilização desses materiais.

Um estudo realizado por Pereira *et al.* (2016) investigou o uso do pó de gesso oriundo da indústria de placas de gesso na agricultura. Os resultados mostraram que

esse coproduto pode ser utilizado como fonte de cálcio e enxofre para as plantas, melhorando a disponibilidade desses nutrientes no solo e aumentando a produtividade das culturas.

Outro estudo realizado por Souza et al. (2018) avaliou a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do resíduo de placas de gesso na produção de concreto não estrutural. Os pesquisadores concluíram que é possível substituir parte dos agregados convencionais pelo resíduo de gesso, reduzindo custos e impactos ambientais associados à extração desses materiais.

Canut et al. (2006) teve como objetivo em sua pesquisa, estudar e analisar a viabilidade técnica e econômica, de substituição total ou parcial do gesso natural pelo fosfogesso na fabricação de materiais a serem empregados na construção civil. Foram realizados ensaios de caracterização físico-química do material, e ensaios mecânicos, tanto no fosfogesso quanto no gesso comercial. Os resultados apresentados indicaram uma possível viabilidade para a utilização do resíduo fosfogesso, como material de construção em substituição ao gesso natural.

Além disso, um estudo realizado por Silva et al. (2020) analisou a utilização do resíduo gerado pela reciclagem de drywall na fabricação de tijolos cerâmicos. Os resultados mostraram que é possível utilizar até 20% desse resíduo como substituto parcial da argila na produção dos tijolos, sem comprometer suas propriedades mecânicas.

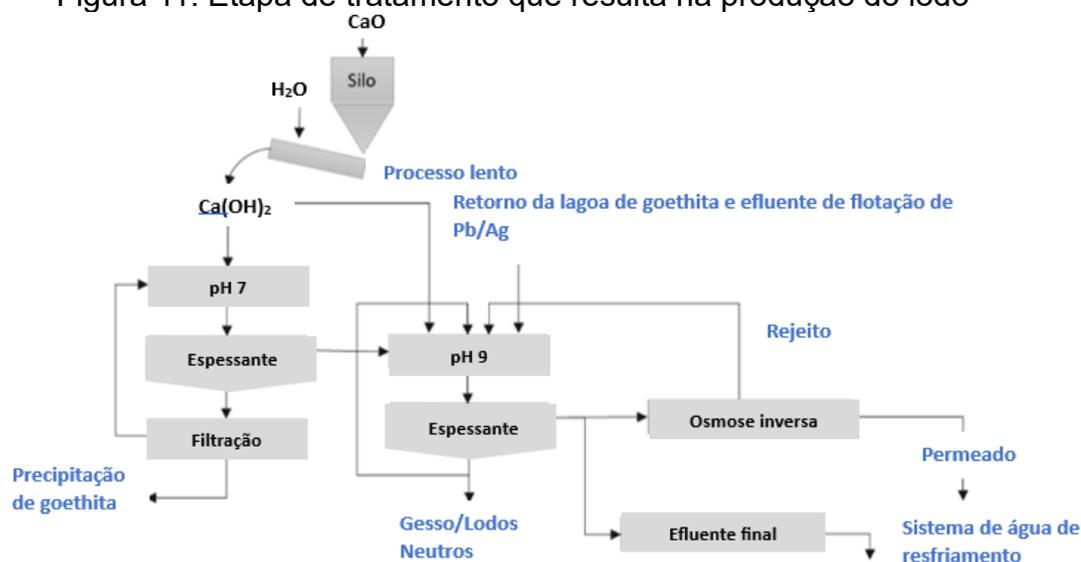
Esses estudos demonstram o potencial dos coprodutos do gesso como uma alternativa sustentável para diversas aplicações. No entanto, é importante ressaltar a importância de realizar estudos específicos para cada tipo de coproduto e aplicação, levando em consideração as características do material e os requisitos técnicos necessários.

A produção de revestimento a base de gesso com reaproveitamento de rejeitos é algo aparentemente inovador, pois não foram encontradas literaturas com estudos semelhantes. A opção de utilização do gesso como produto base partiu do fato de que o rejeito tem em sua composição 81,43 % de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), podendo ser uma opção satisfatória de mistura ao gesso comercial, produzindo um revestimento de menor custo, porém com características próximas ao gesso puro.

3.2 Lodo Gerado em Processos de Tratamento de Águas Residuais da Mineração

O lodo é o produto da etapa de tratamento de efluentes dos processos da refinaria de Cajamarquilla. Este material é obtido na segunda etapa do tratamento de efluentes que apresenta pH igual a 9. Nesta etapa ocorre a alimentação pelos fluxos de efluente, proveniente de eletrometalurgia, que é a fração líquida da poça de armazenamento de resíduos da primeira etapa de tratamento. O fluxograma mostrado na Figura 11 descreve a etapa de tratamento que resulta na produção do lodo.

Figura 11: Etapa de tratamento que resulta na produção do lodo



Fonte: Adaptado de NEXA, 2022

O lodo é precipitado principalmente na adição de cal para elevar o pH, e remover os metais pesados e sulfetos nos efluentes proveniente da operação.

De acordo com NEXA (2022), essa etapa facilita a operação da última etapa de tratamento de águas que é realizada por Osmoses reversa, este processo permite a obtenção de uma água limpa apta para consumo ou descarte na rede pública. Os lodos neutros são usualmente, despejados em aterros apropriados (Figura 12), e regulamentados, porém este processo ocupa grandes áreas, além de ter elevado custo.

Figura 12: Depósito de lodo em Cajamarquilla no Peru



Fonte: NEXA, 2023.

3.2.3 Características do Lodo

De acordo com os dados da NEXA (2022), além do gesso o lodo apresenta bassanita e calcita como composição principal, como mostra os dados da Tabela 2.

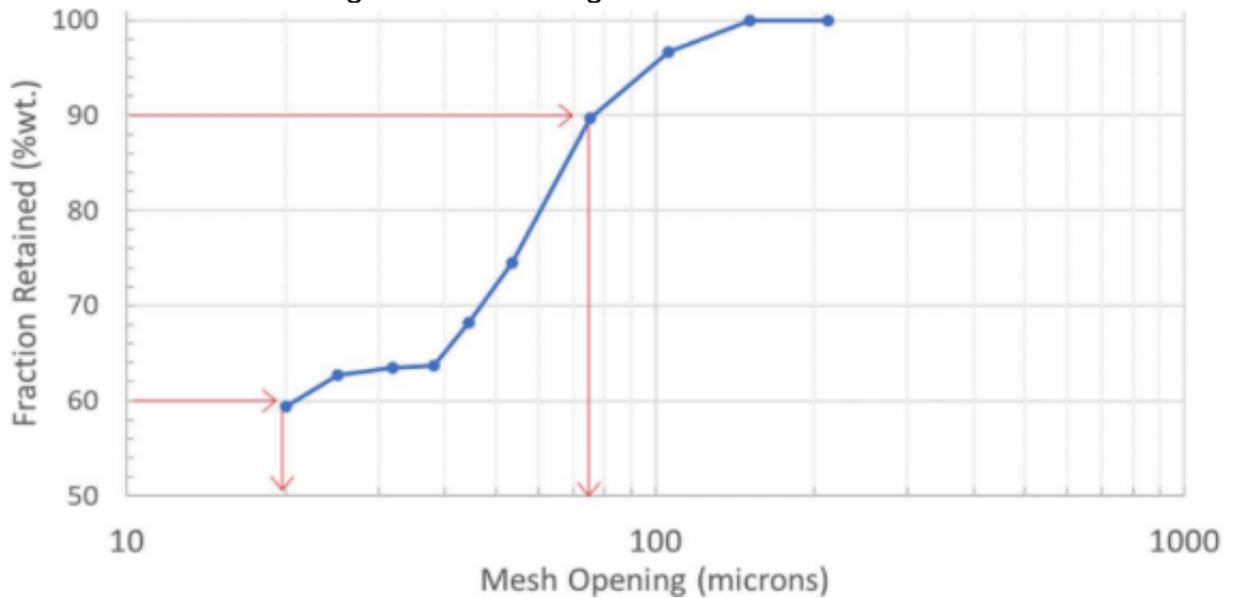
Tabela 2 - Composição principal do lodo

Componentes	Fórmula	Conteúdo (%)
Gesso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	81,43
Bassanita	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5(\text{H}_2\text{O})$	17,23
Calcita	CaCO_3	5,61

Fonte: Adaptado de NEXA, 2022.

Ainda de acordo com NEXA (2022), o lodo é um material que apresenta uma granulometria muito fina como mostra a análise granulométrica apresentada na Figura 13.

Figura 13: Análise granulométrica do lodo



4 METODOLOGIA

Este trabalho iniciou-se em parceria com a Nexa Resources, após aprovação no programa Mining Lab Beginnings, sendo este um programa de inovação aberta promovido anualmente pela Nexa, o programa tem como objetivo buscar soluções tecnológicas para os desafios da companhia. Estas soluções podem ser de baixo nível de maturidade e são desenvolvidas durante o programa.

Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica sobre gesso, sua aplicabilidade na construção civil e as propriedades do gesso de revestimento. Foi feito também um levantamento dos principais estudos sobre o reaproveitamento de rejeitos da mineração na produção de revestimentos na construção civil. Uma revisão bibliográfica e, posteriormente, os procedimentos experimentais. A revisão bibliográfica, de acordo com Tasca (2010), dá início ao processo de pesquisa científica, e permite assim que os pesquisadores procurem informações sobre determinada temática em bases bibliográficas de estudos já realizados. A pesquisa experimental, por sua vez, segundo Rodrigues (2007) objetiva criar condições para interferir no aparecimento ou na modificação dos fatos, para poder explicar o que ocorre com fenômenos correlacionados. No caso deste trabalho investigativo, foram realizados testes de laboratório avaliando os comportamentos do gesso puro e do lodo, na forma de pó, com análises térmicas, mineralógicas e granulométricas. No estado fresco as amostras passaram por análise do tempo de pega. Já no estado endurecido foram avaliadas as resistências à compressão e à tração.

Inicialmente, foi feita a otimização dos parâmetros para os experimentos utilizando 50% de lodo no *blend* (lodo e gesso). A seguir, repetidos os experimentos com maior gama de porcentagem de lodo e ampliou-se as investigações para assegurar a qualidade do material produzido. Isso classifica a pesquisa como qualitativa. De acordo com Goldenberg (1997) a pesquisa qualitativa não se preocupa com representatividade numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização etc.

Em relação à natureza, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois, objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos envolvendo verdades e interesses locais. De

acordo com Barros (2000), a pesquisa aplicada tem como motivação a necessidade de produzir conhecimento para aplicação de seus resultados, com o objetivo de solucionar problemas. Este trabalho busca solução para o problema do acúmulo de lodo em depósitos de rejeitos da mineradora Nexa.

De acordo com os objetivos, esta pesquisa inicia-se com uma pesquisa exploratória pois, segundo Gil (2002) a pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. A hipótese apresentada para este projeto de pesquisa é resolver o problema do acúmulo de lodo através da utilização do mesmo para produção de revestimento a base de gesso na construção civil.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

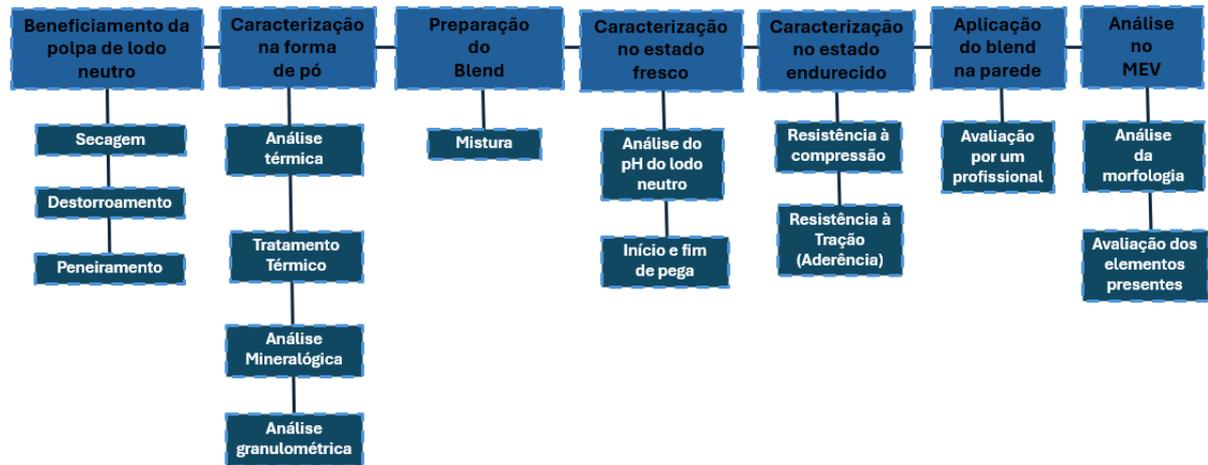
O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foram recebidos 40Kg da polpa do lodo neutro proveniente dos depósitos de Cajamarquilla – Peru. Esse material precisou ser-seco, destorroado e peneirado para iniciar os experimentos. Foram -A seguir foram realizados testes iniciais utilizando blend com 50% gesso e 50% lodo neutro e, os resultados obtidos foram comparados aos do gesso comercial puro. Através destes primeiros testes obteve-se a otimização de parâmetros utilizados nos experimentos, tais como; como temperatura adequada para o tratamento térmico do lodo neutro e a porcentagem de água mínima para a relação água/gesso. Também se observou-se a necessidade de se avaliar a utilização de outras porcentagens de lodo neutro no blend, assim como o uso de aditivo para otimização dos resultados. Uma análise de toxicidade da amostra de lodo foi realizada e não foram encontrados nenhum agente tóxico com porcentagens acima do limite, ou seja, os resultados indicaram que o lodo não é prejudicial à saúde.

Já na segunda fase, foram recebidos 40Kg do lodo neutro seco, destorroado e peneirado, pronto para a realização dos experimentos. Nesta etapa, foram preparados blends com porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de lodo neutro. Os resultados obtidos também foram comparados aos do gesso comercial puro.

Os experimentos foram realizados de acordo com as normas brasileiras, porém para a análise dos resultados, foram utilizadas normas peruanas e outras normas que são utilizadas em estudos no Peru, pois o reaproveitamento do lodo ocorrerá em um primeiro momento no referido país.

O procedimento experimental e as normas utilizadas são apresentados no fluxograma apresentado na Figura 14.

Figura 14: Fluxograma dos experimentos realizados e normas seguidas



Fonte: Autoria própria.

Para reestabelecer a padronização da relação água/blend e com isto otimizar os resultados das amostras com porcentagens de 30%, 40% e 50% de lodo neutro, utilizou-se o aditivo retardante de pega da marca Blok Gesso (Figura 15).

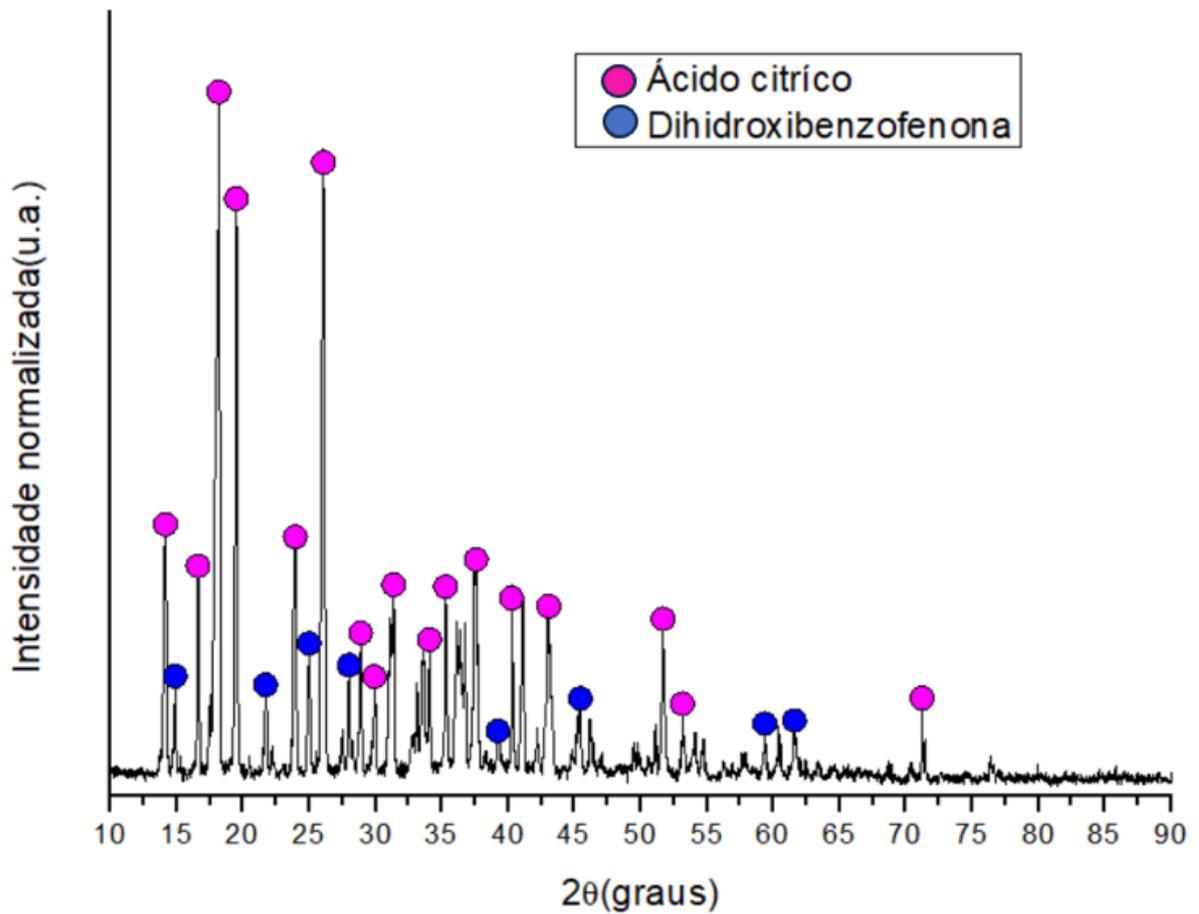
Figura 15: Aditivo retardante dos tempos de pega das misturas



Fonte: Autoria própria.

Este aditivo tem como composição predominante o ácido cítrico como mostra o DRX apresentado na Figura 16, e de acordo com as recomendações do fabricante devem ser utilizadas de 6 gramas a 22 gramas de aditivo para cada 40 Kg de gesso.

Figura 16: DRX do aditivo Blok Gesso



Fonte: Autoria própria.

As esferas magentas observadas na figura representam a presença de ácido cítrico na composição mineralógica do aditivo blok, enquanto as esferas azuis representam a presença de Dihidroxibenzofenona.

5.1 Beneficiamento da polpa de lodo

O beneficiamento da polpa de lodo neutro consistiu em secar em estufa a amostra de lodo recebida, realizar o destorroamento e o peneiramento do lodo, obtendo-se assim um pó com granulometria próxima a do gesso comercial.

5.1.1 Secagem da polpa contendo o lodo

A secagem da polpa contendo o lodo foi feita em estufa. Para tanto, foram colocados 40 Kg de lodo, separado em bandejas (Figura 17 a) e levados à estufa a 70°C por 24 horas (Figura 17 b). A temperatura de 70°C foi escolhida de forma arbitrária, porém, com a consciência de que a parte mineral que interessava ao estudo não sofreria modificações nessa temperatura.

Figura 17: Processo de secagem do lodo na estufa: (a) lodo separado em bandejas, (b) bandejas na estufa para secagem



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Destorroamento e peneiramento do lodo

Após a secagem o lodo ficou em forma de torrões (Figura 18) e foi desaglomerado em almofariz (Figura 19), Logo esse procedimento o material foi passado em peneira de abertura de 2mm com a finalidade de retirar grãos maiores que esse tamanho, Figura 20.

Figura 18: Lodo em forma de torrões após secagem na estufa



Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Destorroamento do lodo com o auxílio de um almofariz



Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Peneiramento do lodo em peneira de 2 mm para retirada de grãos maiores



Fonte: Autoria própria.

5.2 Caracterização do Lodo e do Gesso na Forma de Pó

Nas duas etapas de experimentos foi realizada a caracterização térmica do lodo em forma de pó, assim como a do gesso comercial puro para efeito comparativo. Esta caracterização ocorreu antes da preparação dos blends, pois o gesso comercial já passa por tratamento térmico em sua produção, portanto foi realizado apenas com o lodo neutro. Feito isso, procedeu-se as misturas, ou seja, as substituições parciais propostas nessa pesquisa.

5.2.1 Caracterização Térmica

O lodo recebido para os ensaios passou por caracterizações térmicas através de medidas de termogravimetria (TG). O gesso comercial também foi caracterizado por essa técnica. O objetivo desse ensaio foi verificar a estabilidade térmica de ambos os materiais, quando aquecidos em atmosfera de ar em uma faixa de temperatura programada.

A estabilidade térmica dos materiais foi avaliada utilizando uma termo balança da marca *Shimadzu Instruments* modelo DTG-60, usando atmosfera de ar sintético

(atmosfera oxidante), com fluxo de 50 mL min^{-1} , sob uma faixa de temperatura de 35°C - 900°C e razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Nestas análises foi utilizado cerca de 3,0 mg de amostra em cadinhos de alumínio.

5.2.2 Tratamentos Térmicos

Após investigar o comportamento térmico dos materiais, foi possível fazer uma otimização do tratamento térmico necessário para transformar o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$)

De acordo com Porto (2020), a calcinação do minério de gipsita consiste na desidratação térmica do sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Nesse processo a Gipsita perde 1,5 moléculas de água em sua estrutura, aproximadamente 10% em massa, e se torna hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), o que possibilita a sua utilização na Construção Civil.

Para se obter a temperatura ideal para a calcinação do lodo neutro foram realizados tratamentos térmicos em estufa nas temperaturas de 110°C , 130°C e 150°C . A escolha dessas temperaturas foi com base nos resultados de análise térmica do lodo neutro. Para isso, foram realizadas pesagens em intervalos de 30 minutos para determinar o tempo necessário em cada temperatura para a obtenção da perda de 10% em massa.

5.2.3 Caracterização mineralógica

A investigação mineralógica do lodo e do gesso comercial foram feitas através de ensaios de difração de raios-X de policristal.

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente em um difratômetro Siemens D5000, usando radiação $\text{Cu K}\alpha$ ($154,06 \text{ pm}$). A faixa de varredura de 2θ foi de 10 a 80° , e velocidade de $0,5^{\circ}/\text{min}$.

5.2.4 Caracterização granulométrica

Na primeira etapa de experimentos as medidas de distribuição granulométricas foram feitas por meio de medidas de espectroscopia de atenuação acústica em um equipamento DT 1202 da Dispersion Technology INC.

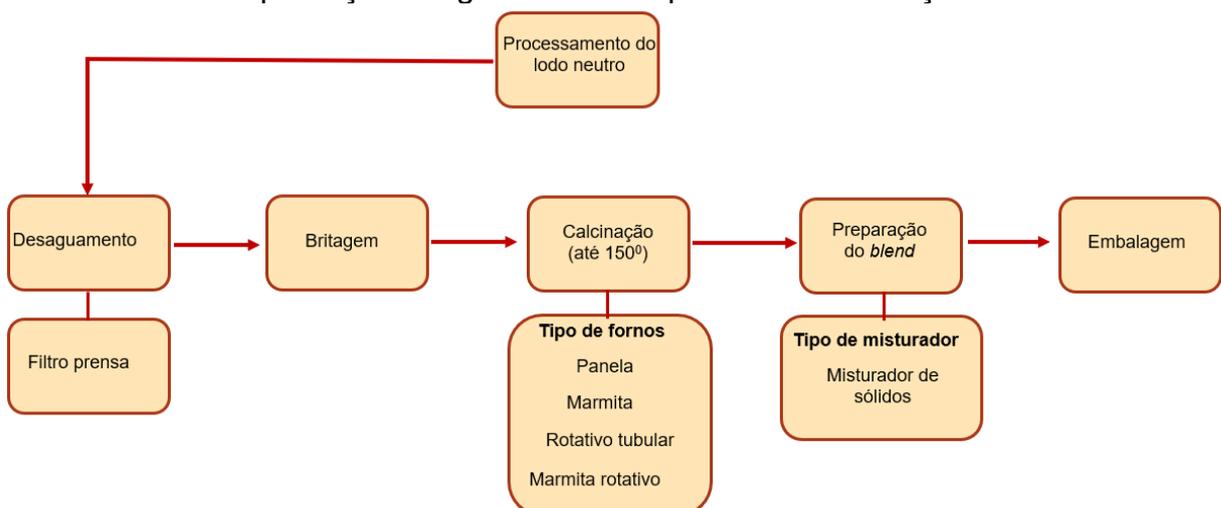
Para os ensaios as amostras de lodo e gesso foram dispersas em água com concentração de 5% m/m.

Já na segunda etapa as medidas de distribuição granulométricas foram realizadas pela Nexa por peneiramento, e por granulometria a laser.

5.3 Preparação do *Blend*

As misturas estudadas neste trabalho consistiram em blends de gesso e lodo neutro. Na primeira etapa do trabalho utilizou-se a porcentagem de 50% de lodo neutro e na segunda etapa utilizou-se as porcentagens de 10%, 20% e 30% de lodo neutro sem aditivo e de 30%, 40% e 50% de lodo neutro com aditivo. O fluxograma apresentado na Figura 21 mostra o processo de obtenção do *blend*, considerando uma produção em grande escala para comercialização.

Figura 21: Fluxograma do processo de obtenção do *blend*, considerando uma produção em grande escala para comercialização



Fonte: Autoria própria.

Para analisar a viabilidade técnica dos produtos a ser desenvolvidos, foram realizados processos experimentais, por meio de com caracterizações físicas, químicas, térmicas, mineralógicas e mecânicas e ensaios, tanto do gesso quanto do lodo neutro e do blend produzido. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as normas aplicadas para o gesso de construção civil, em forma de pó, no estado fresco e no estado endurecido.

Para melhor análise de uma efetiva possibilidade de desenvolvimento e comercialização do produto, foi proposto também a realização de um estudo da viabilidade econômica da produção, através do estudo de mercado do gesso no Peru.

Na primeira etapa após a caracterização do lodo na forma de pó, o *blend* foi preparado através da mistura de 50% em massa de lodo e 50% de gesso comercial. Os dois materiais foram misturados manualmente como mostra a sequência de imagens da Figura 22.

Figura 22 - Processo de mistura do gesso com o lodo para preparação do *blend*



Fonte: Autoria própria.

Já na segunda etapa foram preparados *blend's* nas porcentagens de lodo de 10%, 20% e 30% sem aditivo e nas porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% com aditivo. A mistura do aditivo Blok Gesso foi realizada diretamente junto ao gesso e ao lodo.

Em função dos resultados da primeira etapa do projeto, onde foi constatado que o principal parâmetro que precisava ser ajustado para aplicação do blend como revestimento de alvenarias era os tempos de início e fim da pega, na etapa segunda

etapa do projeto procurou-se aprofundar em fatores que podem modificar de forma considerável a pega do blend. Dentre os fatores destacam-se o pH do meio, temperatura da água durante o preparo da pasta e presença de elementos químicos que aceleram a pega.

Em princípio foi testado o aditivo retardante do tempo de pega da marca Blok Gesso, com objetivo de otimizar essa propriedade, e colocar os *blend's* preparados em condições de serem utilizados como revestimento de alvenarias.

Após concluir-se que o aditivo Blok Gesso é composto basicamente de ácido cítrico, foram realizados testes de pega com a utilização de ácido cítrico P.A.

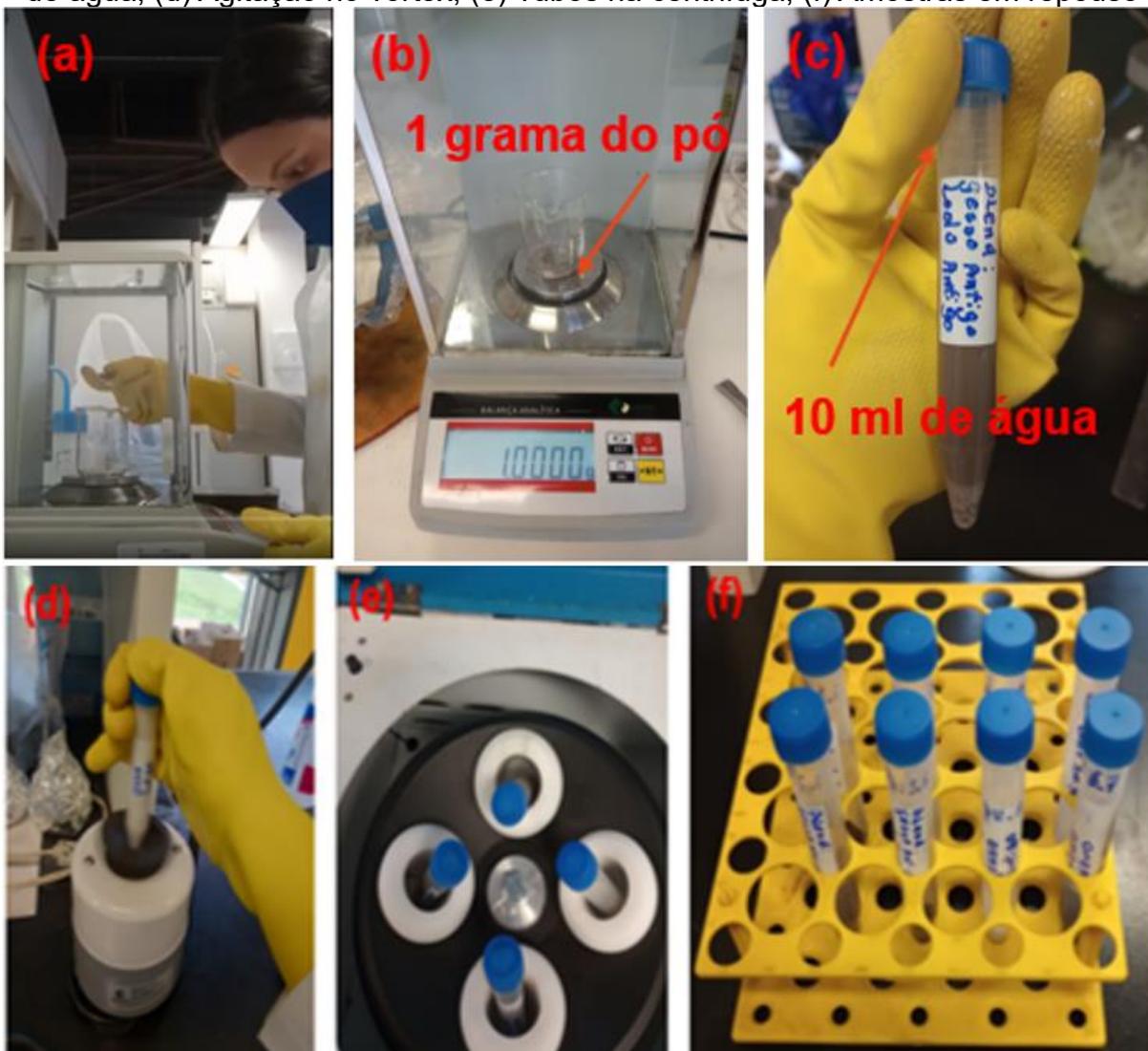
5.4 Caracterização do *blend* no estado fresco: análise do pH e Início e fim da pega

5.4.1 Análise do pH do Gesso e do Lodo

O pH de uma suspensão de gesso comercial, assim como dos blends preparados foram analisados. Além disto, foram analisadas combinações de blend utilizando o gesso comercial e o lodo neutro usado na primeira etapa de testes. Nessa fase experimental usou-se para identificação das amostras os termos lodo novo, lodo antigo, gesso novo e gesso antigo. As amostras e combinações de blend analisadas foram: gesso antigo, gesso novo, lodo neutro antigo, lodo neutro novo, blend lodo antigo – gesso antigo, blend lodo antigo – gesso novo, blend lodo novo – gesso antigo, blend lodo novo – gesso novo.

Para realização do ensaio foi utilizada balança de precisão para pesar 1 grama do pó como mostram as Figura 23(a) e (b). Em seguida colocou-se a amostra analisada na forma de pó em um tubo com 10 ml de água (Figura 23 c) e agitou-se por 1 minuto no vórtex (Figura 23 d). Colocou-se os tubos com as amostras na centrífuga, como mostra a Figura 23 (e) por 15 minutos em rotação de 3000 rpm, em seguida as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas (Figura 23 f) e posteriormente mediu-se o pH.

Figura 23: Etapas do ensaio para medir o pH do gesso, lodo e combinações de blend. (a) Balança de precisão; (b) Pesagem de 1 grama do pó; (c) Tubo com 10 ml de água; (d) Agitação no vórtex; (e) Tubos na centrífuga; (f) Amostras em repouso



Fonte: Autoria própria.

5.4.4.1 Estudo do pH do Lodo Lavado

Em tubos falcon de 50 ml foram adicionadas quantidades de lodo neutro até a faixa de 32,5 ml. A; a massa de lodo neutro analisada em cada tubos foi de aproximadamente 20 gramas. Após colocar a amostras completou-se o tubo com, em seguida colocou-se água nos tubos até a marca de 45 ml do recipiente.

Os tubos contendo lodo neutro e água foram agitados com auxílio de um vórtex até lavagem completa do material por aproximadamente 2 minutos cada tubo. Em

seguida os tubos foram colocados na centrifugação por 10 minutos a 3000 rpm de rotação.

Utilizou-se para o ensaio, 240 gramas do lodo neutro. Essa massa, esse foi dividido em 12 tubos falcon de 50ml e devido a limitação da centrifuga, que comporta apenas 4 tubos por ciclo, esses foram separados em 3 grupos de 4 tubos cada, sendo todos os tubos foram enumerados para fins de identificação.

Os ciclos de agitação e lavagem foram repetidos 6 vezes no total, para cada um dos grupos. Após cada centrifugação, adotou-se o procedimento de medira-se o pH, e descartava-se a água do tubo e, por fim, colocava-se água novamente no tubo até a faixa de 45 ml e repetia-se os ciclos.

Após finalização dos ciclos de lavagem, o sobrenadante foi descartado e os tubos foram submetidos à secagem na estufa a 80 °C por cerca de 24h.

5.4.2 Início e fim de pega

O teste de pega realizados na primeira etapa foi realizado no gesso comercial e no blend, utilizando-se o método da espátula, conforme mostrado na Figura 24, teste prescrito na norma alemã DIN 1168.

Foi feita a moldagem de um corpo de prova com 5,0 mm de espessura e 100 mm de diâmetro. Para o início de pega foram feitos cortes com a espátula imediatamente após a moldagem.

De acordo com Barbosa *et al* (2014), o início de pega ocorre quando o corte aberto pela espátula não mais se fecha (Figura 24), já o final de pega é determinado quando se pressiona o dedo sobre o corpo de prova e não mais deixa impressão sobre a pasta, como mostra a Figura 25.

Para este ensaio utilizou-se a relação água/gesso de 0,70 porque esta foi a relação otimizada para melhor resistência à compressão.

Figura 24: Teste de início de pega para o blend e para o gesso comercial pelo método da espátula



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Teste de fim de pega para o gesso comercial e para o blend determinado quando se pressiona o dedo sobre o corpo de prova e não mais deixa impressão sobre a pasta.



Fonte: Autoria própria.

Já o teste de pega da segunda etapa foi realizado de acordo com NBR 12128/2019 com a utilização de um aparelho Vicat automático. De acordo com a NBR13207/2017 o tempo de início de pega deve ser maior ou igual a 10 minutos e o tempo para o fim de pega deve ser maior ou igual a 35 minutos.

Já a norma Peruana NTP 334.188 faz a classificação dos tempos de pega em rápida, lenta e normal. De acordo com a norma, pastas com tempo de pega superior a 20 minutos e inferior a 60 minutos são classificadas como pega rápida, pastas cujo tempo de pega é superior a 60 minutos e inferior a 180 minutos são classificadas como pega normal e pastas cujo tempo de pega é superior ou igual a 180 minutos são classificadas como pega lenta.

Foram preparadas pastas com 100% gesso comerciais, 10%, 20% e 30% lodo sem aditivo e pastas com 30%, 40% e 50% com aditivo Blok Gesso. Em cada teste utilizou-se 250 gramas de pó (gesso ou *blend*), relação de água 0,70; ou seja, 175 gramas de água e para os testes com aditivo acrescentou-se 0,125 gramas do mesmo.

No processo de preparação das pastas colocou-se a água em um recipiente e em outro pesou-se o pó (gesso ou *blend*), como é mostrado na Figura 26. O pó foi polvilhado por aproximadamente 1 minuto sobre a água, como mostra a Figura 27 (a). Após este processo deixou-se a pasta descansar por 2 minutos, depois misturou-se por 1 minuto (Figura 27 b) e colocou-se no cone de ensaio como mostra a

Figura 28, Previamente ao início desse teste passou-se óleo desmoldante no cone de ensaio. Durante os testes o cone ficou apoiado sobre uma placa de vidro. Por fim, colocou-se o conjunto placa e tronco de cone sobre o equipamento e iniciou-se o ensaio, como mostra a Figura 39.

Figura 26: *Blend* e água utilizados para preparar a pasta utilizada no teste de pega



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: (a) Polvilhamento do *blend* sobre a água, (b) mistura durante o preparo da pasta



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Cone com a pasta de *blend* sobre placa de vidro para teste de pega



Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Aparelho Vicat durante execução do teste de pega



Fonte: Autoria própria.

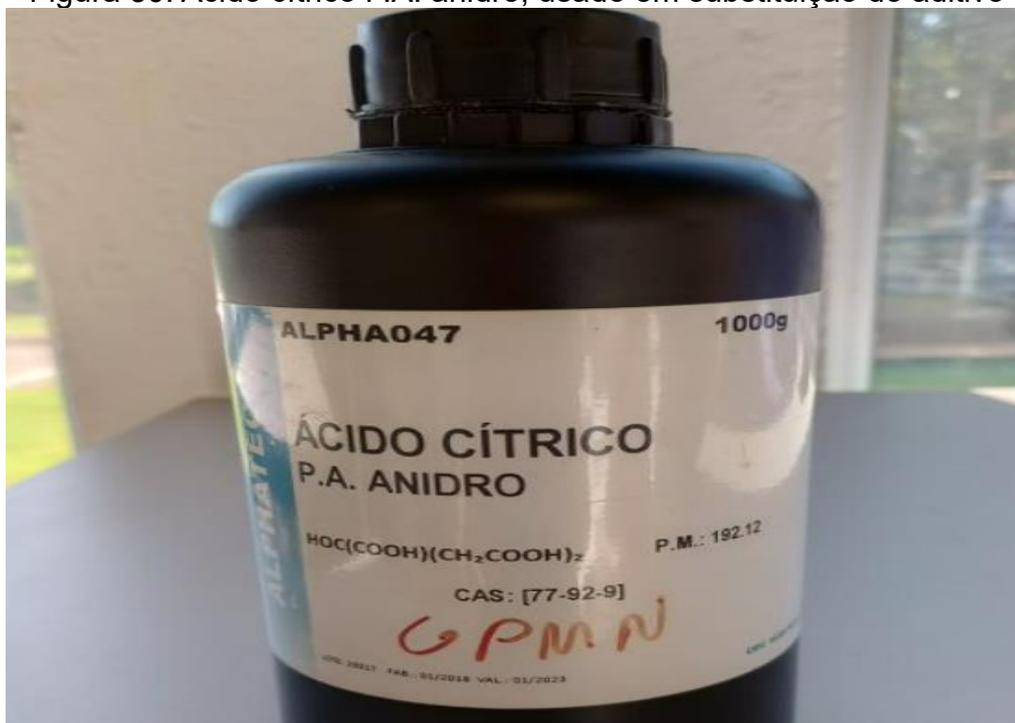
O aparelho Vicat foi previamente configurado e, após início do teste o cone foi posicionado automaticamente efetuando um distanciamento para que a penetração da agulha ocorresse com uma distância de 10 mm das bordas. A agulha penetrou lentamente na pasta e permaneceu por 15 segundos. Após isso, a agulha voltou a posição inicial, o equipamento girou para efetuar um distanciamento de 5mm e após 15 segundos a agulha realizou uma nova penetração. Em cada teste, o processo de penetração da agulha repetiu-se por 26 vezes, caso ainda ocorresse a penetração, reiniciava-se o ensaio novamente. O aparelho Vicat foi utilizado em condições ambiente para todos os ensaios, sem a utilização de câmaras para condicionamento do ambiente.

5.4.2.1 Teste de pega para blend com a utilização de ácido cítrico P.A como aditivo

Devido ao aditivo utilizado nos testes ser composto principalmente de ácido cítrico, foram realizados testes de pega com o uso de ácido cítrico P.A mostrado na Figura 30, misturado ao *blend*. Este ensaio teve como objetivo avaliar se a eficiência

técnica do ácido cítrico P.A em comparação com a eficiência técnica do ácido cítrico presente no aditivo da marca Blok Gesso.

Figura 30: Acido cítrico P.A. anidro, usado em substituição do aditivo



Fonte: Autoria própria.

5.4.2.2 Teste do Tempo de Pega com o Uso de Diferentes Temperaturas da Água

Considerando-se que a temperatura da água, é uma variável que influencia no tempo de pega devido a velocidade da reação de hidratação do sulfato de cálcio ser dependente da temperatura e tendo em vista que o material será aplicado no Peru, procurou-se investigar a influência que a variação da temperatura pode ter no tempo de pega devido a amplitude térmica que normalmente é encontrada nesse país.

Para a avaliação do tempo de pega foi utilizado *blend* com porcentagem de lodo de 10% e utilizou-se água nas temperaturas de 10°C, 20°C e 35°C. Foram preparadas pastas com cada temperatura de água e todas foram submetidas ao teste de tempo de pega no aparelho Vicat automático.

5.4.2.3 Análise do Tempo de Pega do blend preparado com lodo lavado

Após a secagem dos tubos falcon em estufa a 80°C o material contido em todos os tubos foi colocado em uma bandeja e levado novamente a estufa para o tratamento térmico a 150°C, até a perda de 10% em massa.

Após tratamento térmico o lodo foi misturado ao gesso comercial nas porcentagens de 10%, 30% e 50% e logo depois foi realizado o teste de pega com a utilização do aparelho Vicat automático. O ensaio foi feito com esses percentuais para representar as variações estudadas, adotando-se os valores extremos e um intermediário.

5.5 Caracterização do *blend* no estado endurecido

5.5.1 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo a ASTM C28/C28M devido a mesma ser utilizada em trabalhos acadêmicos realizados no Peru. No Brasil a resistência à compressão não é considerada parâmetro relevante para a qualidade do gesso e o requisito de resistência mínima foi retirado dos normativos (NBR 12129:2017).

Na primeira etapa o ensaio iniciou-se com a confecção de três corpos de prova referência com 100% de gesso comercial e três corpos de prova *blend* com 50% gesso e 50% lodo.

Tanto para a moldagem do gesso comercial quanto para o *blend*, o material foi polvilhado na água por um minuto (Figura 31 a), logo após aguardou-se dois minutos e misturou-se o material com a água, em seguida a mistura foi colocada no molde como mostra a Figura 31 (b). Após endurecimento os corpos de prova foram retirados dos moldes e numerados na ordem de moldagem para identificação no ensaio de compressão (Figura 32).

Figura 31 – Moldagem dos corpos de prova: (a) material polvilhado sobre a água para iniciar a moldagem, (b) pasta de gesso colocada no molde



Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Corpos de prova retirados do molde e numerados para identificação em posteriores ensaios



Fonte: Autoria própria.

A relação água/gesso foi otimizada através da moldagem e ensaios de compressão, para isto utilizou-se as relações de 0,68; 0,70; 0,72 e 0,75 como mostra a Figura 33, a Figura 34 e a Figura 35.

Figura 33: Corpos de prova moldados com relação água/blend de 0,68



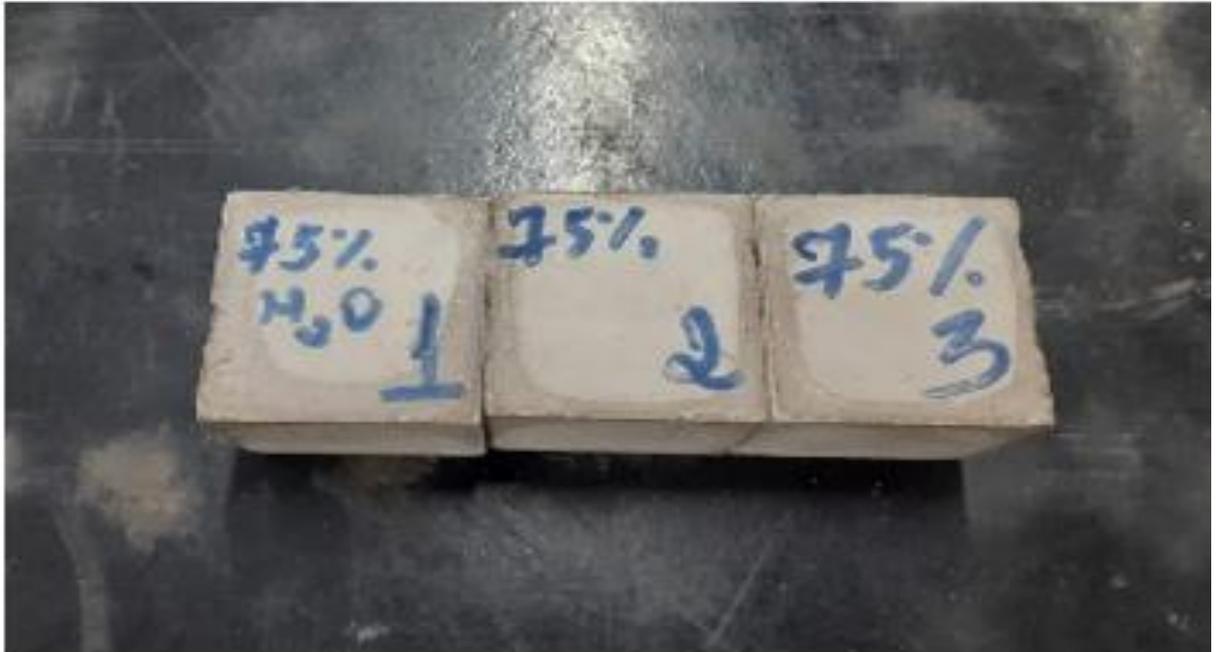
Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Corpos de prova moldados com relação água/blend de 0,70 e 0,72



Fonte: Autoria própria.

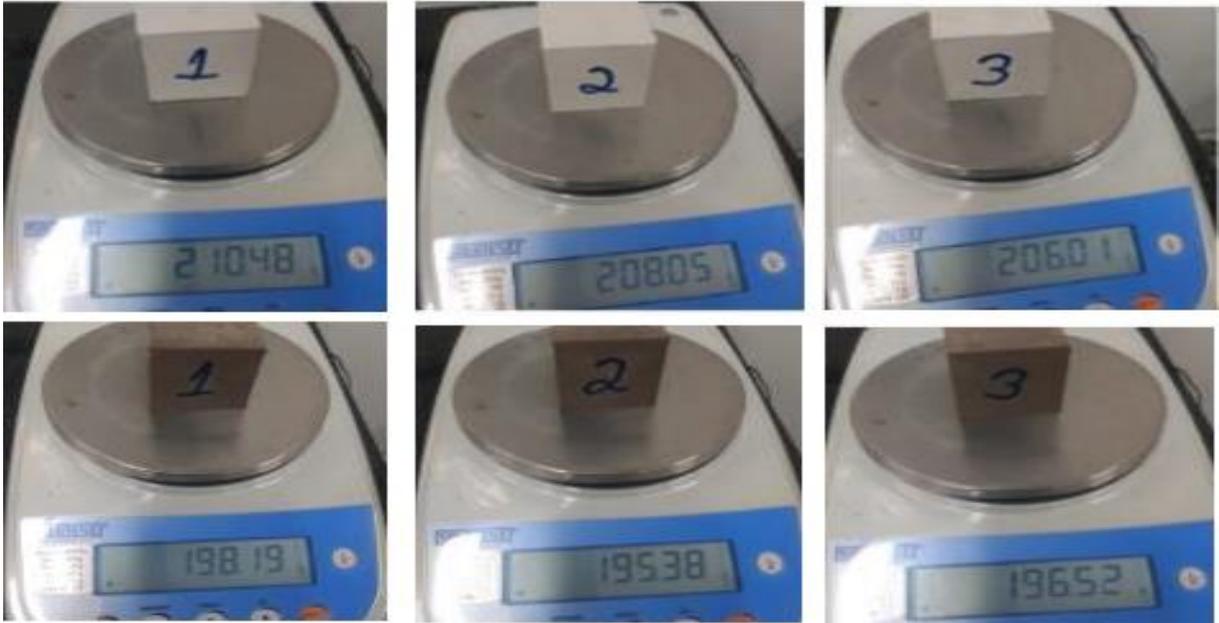
Figura 35: Corpos de prova moldados com relação água/*blend* de 0,75



Fonte: Autoria própria.

Após serem retirados do molde os corpos de prova foram deixados em local arejado para secagem e foram pesados periodicamente como mostra a Figura 36, até a estabilização da massa, ou seja, quando os corpos de prova não perderam mais água.

Figura 36: Monitoramento da perda de água dos corpos de prova através de pesagens periódicas



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova estabilizados foram colocados em dessecador por 24 horas como mostrado na Figura 37. Após este período foi realizado o ensaio de resistência à compressão em uma máquina universal de ensaios da marca prensa Emic, com célula de carga superior a 2000 N (Figura 38).

Figura 37: Corpos de prova no dessecador para posterior ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria.

Figura 38: Ensaio de resistência à compressão em corpos de prova do blend e em corpos de prova de gesso comercial



Fonte: Autoria própria.

Após as otimizações da primeira etapa, os testes foram refeitos a partir da confecção de três corpos de prova referência com 100% de gesso comercial e três corpos de prova de cada porcentagem de *blend* usada.

As porcentagens de lodo foram de: 10%, 20%, 30%, 40% e 50% e os traços utilizados para cada porcentagem encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Traços para moldagem de corpos de prova com lodo com porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%

Porcentagem de lodo / água	Quantidade de gesso	Quantidade de lodo	Quantidade de água
0%/ 0,70	444,44 gramas	-----	311,11 gramas
10%/ 0,70	400,00 gramas	44,44 gramas	311,11 gramas
20%/ 0,70	355,55 gramas	88,89 gramas	311,11 gramas
30%/ 0,70	311,11 gramas	133,33 gramas	311,11 gramas
30%/ 0,75	311,11 gramas	133,33 gramas	333,33 gramas
40%/ 0,80	266,66 gramas	177,77 gramas	355,55 gramas
50%/ 0,80	222,22 gramas	222,22 gramas	355,55 gramas

FONTE: Autoria própria.

Na primeira etapa do projeto a relação de água foi otimizada e padronizada para 0,70; porém a nova amostra de lodo recebida apresentou um tempo de pega menor e com isto a moldagem das porcentagens de 30%, 40% e 50% foi dificultada e precisou-se aumentar a relação de água para executar o processo.

Tanto para a moldagem do gesso comercial quanto para o *blend*, o material foi polvilhado na água pelo tempo de um minuto, logo após aguardou-se dois minutos e misturou-se o material com a água, e, assim, a mistura foi colocada no molde como mostra a sequência da Figura 39.

Figura 39: Processo de moldagem de corpos de prova para ensaio de compressão (polvilhamento do blend na água, mistura para produção da aplicação no molde)



Fonte: Autoria própria.

Após a secagem parcial os corpos de prova foram retirados dos moldes e numerados na ordem de moldagem e identificados como mostra a Figura 40, para a sequência dos procedimentos necessários para a execução do ensaio.

Figura 40: Corpos de prova retirados do molde e numerados para identificação em posteriores ensaios



Fonte: Autoria própria.

Após serem retirados do molde, os corpos de prova foram deixados em local arejado para secagem, eles foram pesados periodicamente como mostra a

Figura 41, até apresentarem estabilidade da massa, isto é, quando os corpos de prova não perderam mais água.

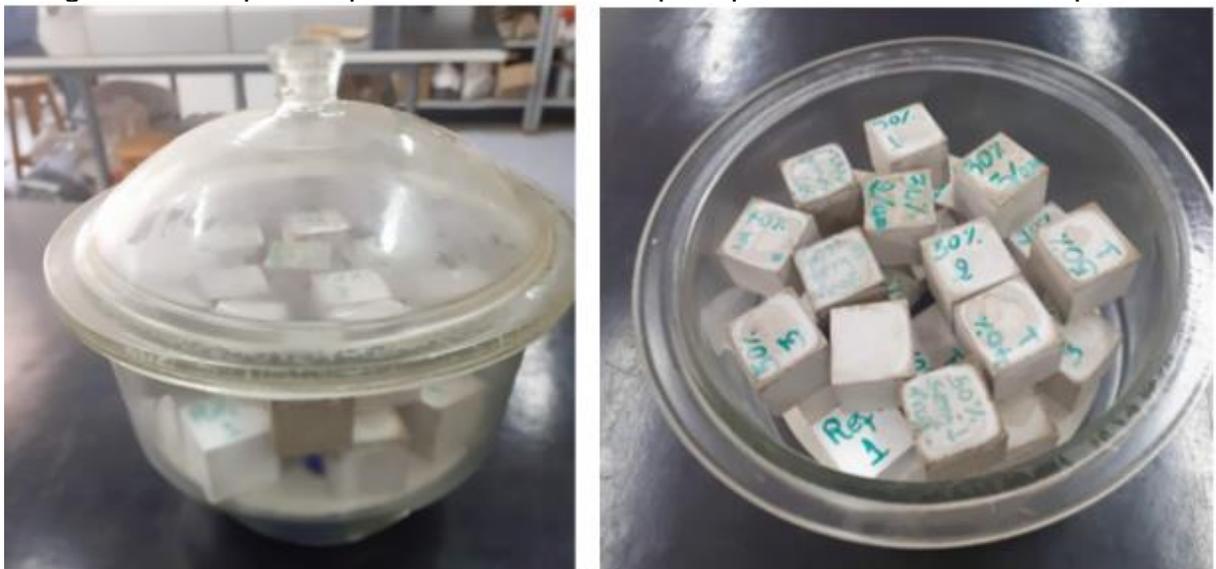
Figura 41: Monitoramento da perda de água dos corpos de prova através de pesagens periódicas



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova estabilizados foram colocados em dessecador por 24 horas como mostrado na Figura 42, após este período foi realizado o ensaio de compressão em prensa Emic com capacidade de carga superior a 2000 N como mostrado na Figura 43.

Figura 42: Corpos de prova no dessecador para posterior ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria.

Figura 43: Ensaio de resistência à compressão em corpos de prova do blend e em corpos de prova de gesso comercial



Fonte: Autoria própria.

Para reestabelecer a padronização da relação água/blend, e com isso melhorar a resistência à compressão das amostras com porcentagens de 30%, 40% e 50%, utilizou-se aditivo retardante de pega da marca Blok Gesso.

Utilizando-se as recomendações do fabricante de que deve ser utilizada de 6 gramas a 22 gramas de aditivo para cada 40 quilos de gesso. Proporcionalmente, utilizou-se 0,22 gramas de ácido cítrico para as 400 gramas de blend utilizadas na moldagem de cada três corpos de prova. Para as moldagens utilizou-se os traços apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Traços para moldagem de corpos de prova com porcentagens de 30%, 40% e 50%, utilizando 0,22 gramas de aditivo retardante de pega

Porcentagem de lodo / água	Quantidade de gesso	Quantidade de lodo	Quantidade de Água
30%/ 0,70	311,11 gramas	133,33 gramas	311,11 gramas
40%/ 0,70	266,66 gramas	177,77 gramas	311,11 gramas
50%/ 0,70	222,22 gramas	222,22 gramas	311,11 gramas

Fonte: Autoria própria.

Em cada moldagem o aditivo foi adicionado na água e em seguida foi feita a moldagem seguindo-se a NBR 13207/2023. Os corpos de prova moldados foram numerados e identificados, como mostra a Figura 44.

Figura 44: Preparo da pasta de *blend* com aditivo e identificação dos corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria.

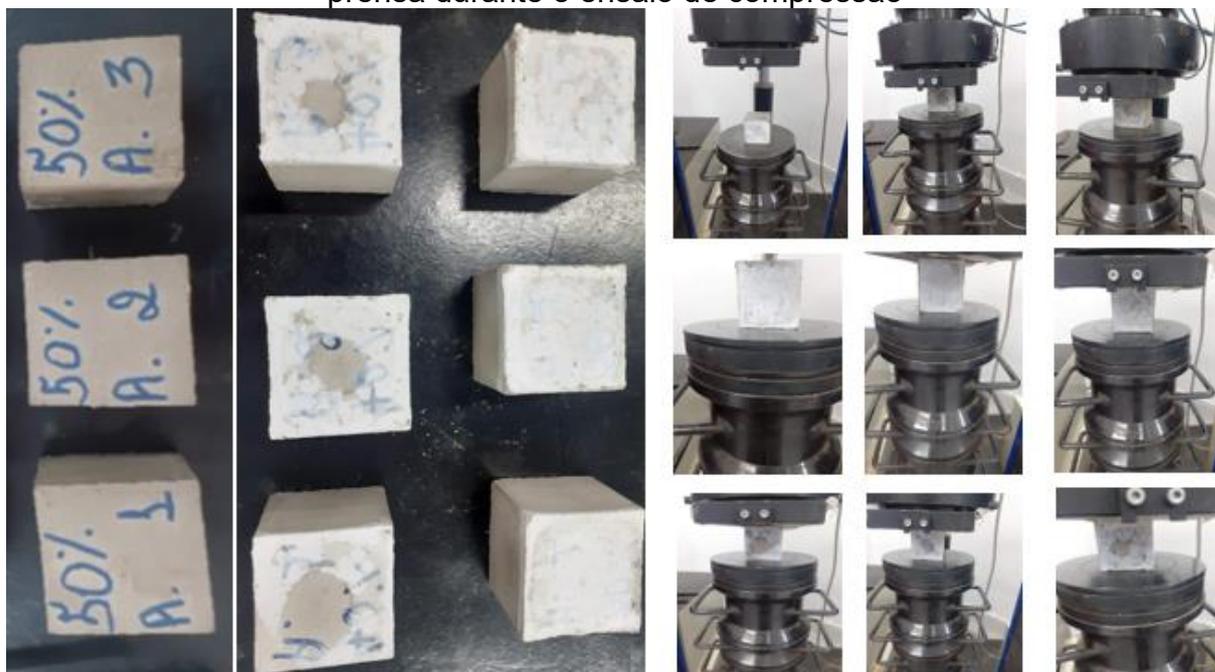
Após estabilizar a perda de massa, e passar 24 horas no dessecador (Figura 45), todos os corpos de prova foram submetidos ao teste de compressão, como mostra a Figura 46.

Figura 45: Corpos de prova no dessecador por 24 horas após estabilizar a perda de água



Fonte: Autoria própria.

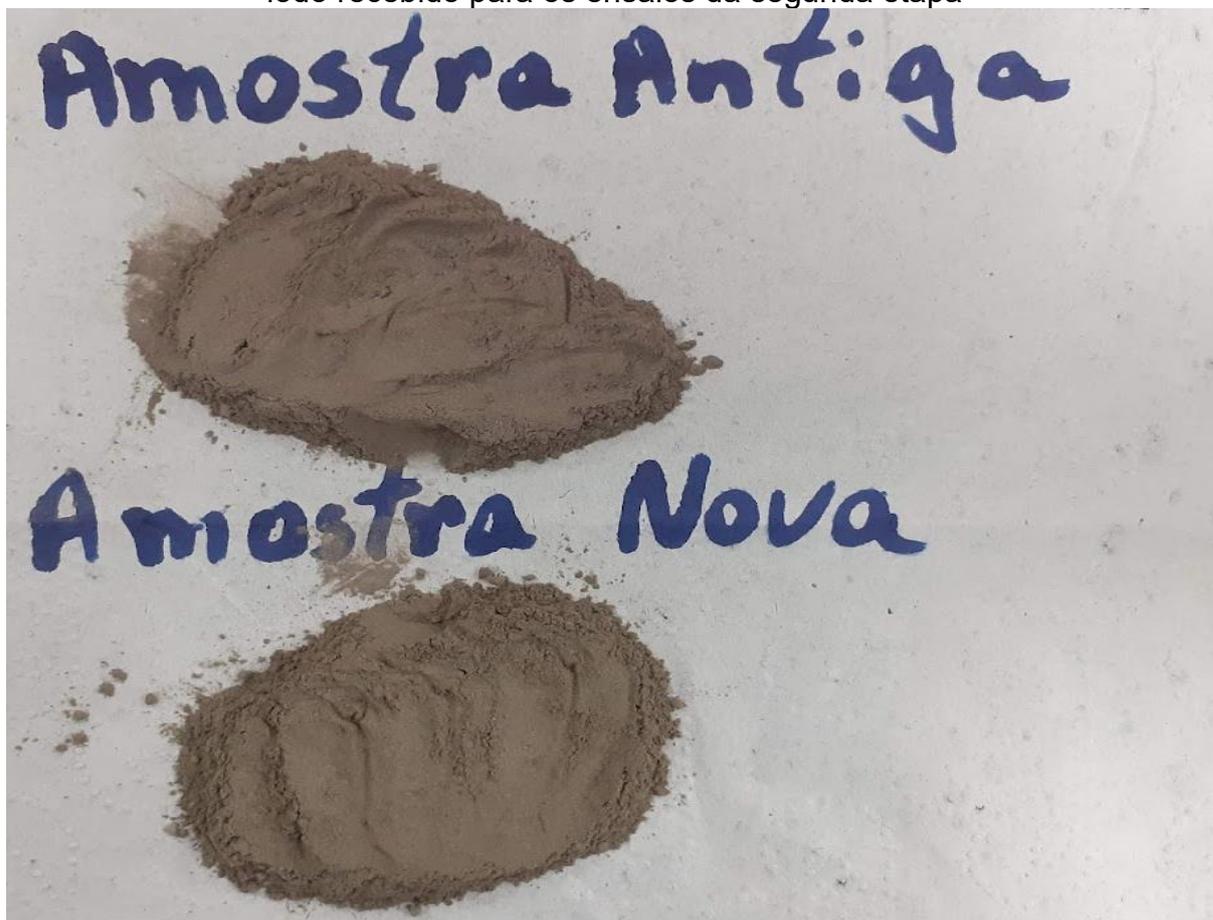
Figura 46: Corpos de prova após 24 horas no dessecador e corpos de prova na prensa durante o ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria.

Durante a realização dos ensaios observou-se a necessidade de se avaliar uma possível diferença entre a amostra de lodo utilizadas na primeira etapa do projeto e a amostra utilizada na segunda etapa. Assim, as amostras foram identificadas como amostra antiga e amostra nova como mostra a Figura 47.

Figura 47: Amostra de lodo recebida para os ensaios da primeira etapa e amostra do lodo recebido para os ensaios da segunda etapa



Fonte: Autoria própria.

Para efeitos avaliativos das duas amostras, foram moldados corpos de prova para *blend's* das duas amostras (Figura 48) com relação de água de 0,70 e 0,1 gramas de aditivo, esta quantidade, corresponde ao teor mínimo recomendado pelo fabricante do aditivo. As moldagens tiveram como objetivo a comparação dos resultados de testes de resistência à compressão das duas amostras, e, assim, observar as possíveis variações.

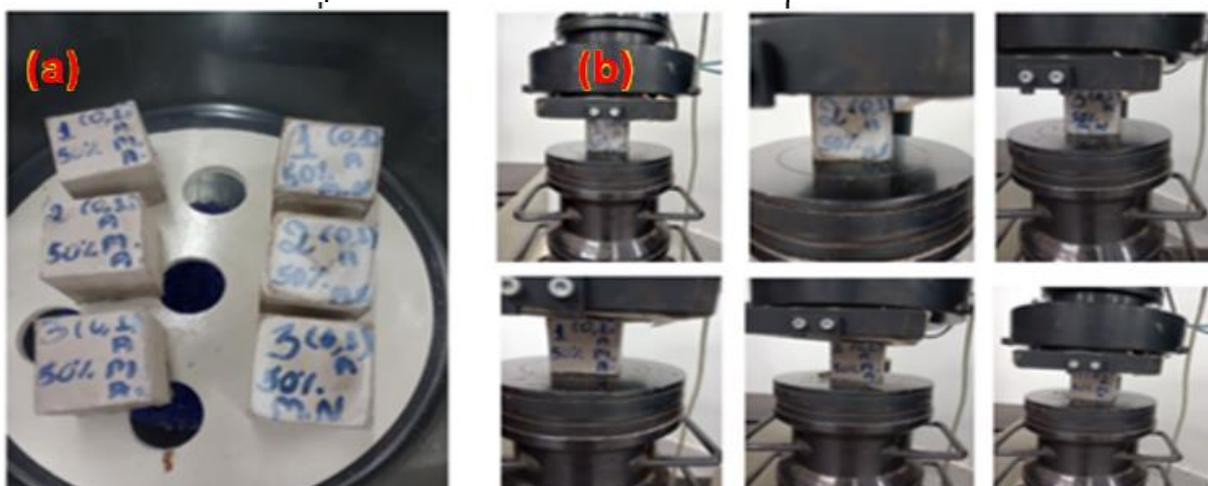
Figura 48: Corpos de prova preparados com a amostra da primeira etapa e corpos de prova preparados com amostra da segunda etapa



Fonte: Autoria própria.

Após estabilizar a perda de massa e passar 24 horas no dessecador (Figura 49 a), todos os corpos de prova foram submetidos ao teste de compressão, como mostra a Figura 49 (b).

Figura 49: (a) Corpos de prova após 24 horas no dessecador, (b) corpos de prova na prensa durante o ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria.

5.5.2 Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência foi realizado de acordo com a NBR 13528-2, considerando-se que o material será utilizado no Peru. Nessas análises foram utilizadas também a Norma Europeia EN 13279-1 para efeitos comparativos, pois, a norma peruana para aderência faz a avaliação apenas de placas de gesso. Outro ponto a destacar que foi observada a utilização da Norma Europeia EN 13279-1 em trabalhos acadêmicos no Peru.

Para realização dos ensaios, quatro substratos de blocos cerâmicos de vedação (dimensões) foram revestidos na horizontal para cada percentual dos blends preparados. De acordo com as determinações da norma é necessário a colagem de doze pastilhas para cada traço, portanto, utilizou-se para o processo 4 substratos com cada traço e colou-se 3 pastilhas em cada.

Para o revestimento na primeira etapa, foram preparadas pastas com gesso comercial e com o *blend* 50% gesso e 50% lodo, ambas com proporção de água de 0,70; porém a pasta secou rapidamente impossibilitando a aplicação. O processo foi feito para a máxima relação de água recomendada pelo fabricante de gesso 0,80. A Figura 50 mostra a aplicação das pastas nos tijolos.

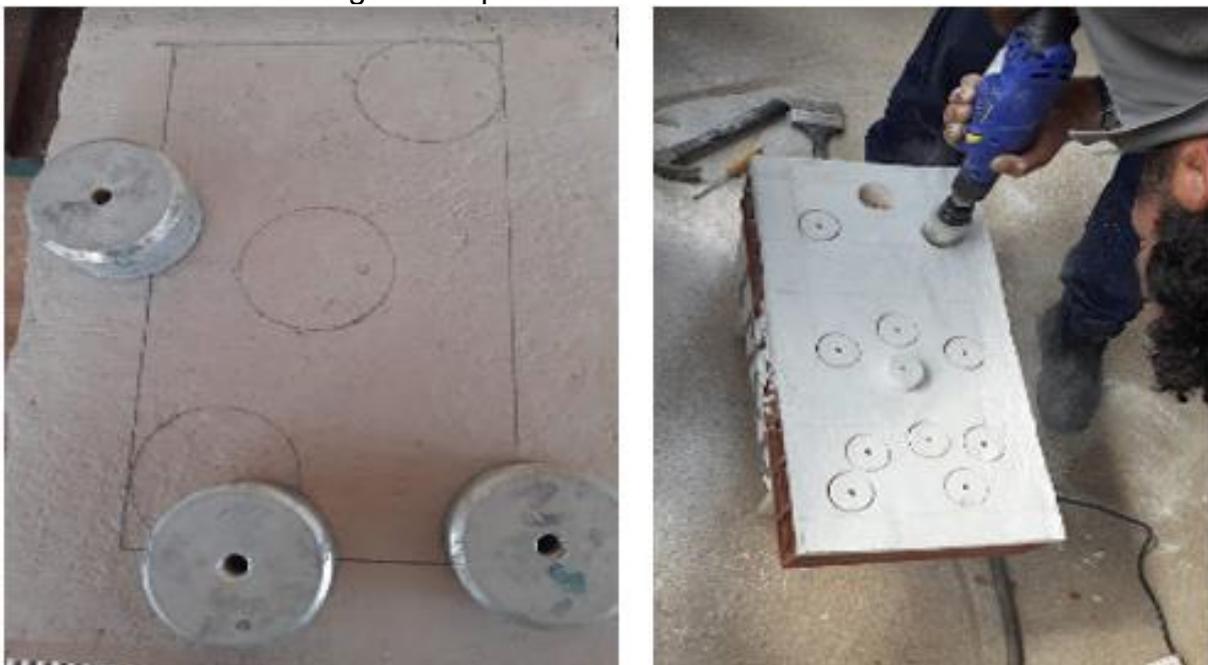
Figura 50: Aplicação de pasta feita com gesso comercial e com *blend* em tijolos para ensaio de aderência



Fonte: Autoria própria.

Após vinte e oito dias de cura os revestimentos foram cortados com serra copo de 50mm como mostra a Figura 51 para colagem das pastilhas do teste. Os cortes foram feitos com espaçamento de 4cm das bordas e com espaçamento entre eles de 2cm.

Figura 51: Cortes no revestimento dos substratos com serra copo de 50mm para colagem das pastilhas do teste de aderência



Fonte: Autoria própria.

Logo após os cortes as pastilhas foram coladas como mostra a Figura 52 e Figura 53. Para colagem foi utilizada cola a base de resina epóxi.

Figura 52: Colagem das pastilhas com resina epóxi



Fonte: Autoria própria.

Figura 53: Pastilhas coladas sobre os cortes no substrato



Fonte: Autoria própria.

Após 48 horas da colagem das pastilhas foi realizado o ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato cerâmico. Para este ensaio foi utilizado o dinamômetro de tração como mostra a Figura 54. No ensaio a pastilha é acoplada ao dinamômetro, e através do giro de uma manivela traciona a pastilha e provoca seu arrancamento. A carga máxima de tração suportada pela pastilha é mostrada no visor do dinamômetro e para a obtenção da aderência é dividido pela área do corpo de prova em mm^2 .

Figura 54: Ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato com a utilização de dinamômetro de tração



Fonte: Autoria própria.

Já na segunda etapa o ensaio iniciou-se com a preparação das pastas com gesso e com *blend*. Foram preparadas pastas com gesso comercial, com *blend* de 20% e 30% sem aditivo e com *blend* de 30%,40% e 50% com aditivo, ambas com proporção de água de 0,70. Foram revestidos quatro tijolos para cada um dos traços. As quantidades de materiais utilizados para cada porcentagem estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade de materiais utilizados para porcentagem de 0%, 20%, 30% (sem aditivo); 30%, 40% e 50% (com aditivo) na aplicação para teste de aderência

Porcentagem de lodo	Gesso	Lodo	Água	Aditivo
0%	6000 gramas	-----	4200 gramas	-----
20%	4800 gramas	1200 gramas	4200 gramas	-----
30%	4200 gramas	1800 gramas	4200 gramas	-----
30%	4200 gramas	1800 gramas	4200 gramas	3 gramas
40%	3600 gramas	2400 gramas	4200 gramas	3 gramas
50%	3000 gramas	3000 gramas	4200 gramas	3 gramas

Fonte: Autoria própria.

Seguindo as determinações da norma, em um recipiente pesou-se a água e em outro o material sólido como mostra a Figura 55.

Figura 55: Recipiente com água e recipiente com o *blend* utilizado na preparação da pasta para o ensaio de aderência



Fonte: Autoria própria.

Em seguida o material sólido foi colocado aos poucos na água, como mostra a Figura 56 (a), em um tempo de um minuto. O material foi deixado em repouso por um período de dois minutos, e na sequência foi misturado como mostra a Figura 56 (b), por um minuto.

Figura 56: (a) Colocação do blend na água, (b) mistura para produção da pasta a ser aplicada nos substratos



Fonte: Autoria própria.

Após o processo de mistura os materiais foram aplicados nos substratos de modo a gerar revestimentos uniformes (Figura 57), e com espessura de 1 centímetro, como determina a norma.

Figura 57: Aplicação da pasta do blend com camada de 1cm de espessura nos substratos para execução do teste de aderência



Fonte: Autoria própria.

Todos os substratos foram deixados em local seco e arejado (Figura 58) para o processo de cura e posterior ensaio de aderência.

Figura 58: Substratos revestidos com a pasta do blend em processo de cura para continuidade do teste de aderência, todos os substratos foram identificados com a porcentagem de lodo utilizada na pasta.



Fonte: Autoria própria.

Após 28 dias de cura foram feitas marcações nos revestimentos de cada substrato como mostra a Figura 59 (a). De acordo com a norma NBR 13528-2, para determinar o posicionamento das pastilhas de teste, devem ser deixados espaçamento de 4cm das bordas e 2cm entre as pastilhas. Após a marcação foram realizados cortes com a utilização de uma serra copo de 5cm, como mostra a Figura 59 (b). A Figura 59 (c) mostra o substrato com cortes prontos para a colagem das pastilhas.

Figura 59: (a) Marcações nos revestimentos de cada substrato determinando 4cm entre as bordas e 2cm entre as pastilhas; (b) Cortes no revestimento dos substratos com serra copo de 50mm; (c) Substrato com cortes prontos para a colagem das pastilhas



Fonte: Autoria própria.

Logo após os cortes as pastilhas foram coladas com cola a base de resina epóxi, como mostram a Figura 60. A Figura 61 mostra as pastilhas coladas para a realização do teste. Foram coladas doze pastilhas para cada um dos traços.

Figura 60: Colagem das pastilhas com cola a base de resina epóxi



Fonte: Autoria própria.

Figura 61: Pastilhas coladas sobre os cortes no substrato



Fonte: Autoria própria.

Após 24 horas da colagem das pastilhas, foi realizado o ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato cerâmico. Para este ensaio, foi utilizado o dinamômetro de tração como mostra a Figura 62. No ensaio a pastilha é acoplada ao dinamômetro, e através do giro de uma manivela traciona a pastilha e provoca seu arrancamento. A carga máxima de tração suportada pela pastilha é mostrada no visor do dinamômetro, e para a obtenção da aderência, a carga em Newtons é dividida pela área do corpo de prova em mm^2 .

Figura 62: Ensaio de aderência através do arrancamento da camada de revestimento do substrato com a utilização de dinamômetro de tração



Fonte: Autoria própria.

5.6 Análise da aplicação do blend na parede

Com o objetivo de avaliar a eficiência e aplicabilidade do *blend* produzido, um aplicador profissional foi contratado para a realização da aplicação do produto em paredes localizadas nas dependências da UNIFEI – campus Itabira.

Foram utilizados no teste o gesso puro, *blend* de 20 % sem aditivo e *blend* de 50% com aditivo.

5.7 Análise da morfologia e avaliação dos elementos presentes nos materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)

Com o objetivo de investigar a morfologia e os elementos presentes nas amostras do gesso, do lodo e dos *blend's*, foram realizadas análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostrado na Figura 63.

Figura 63: Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autoria própria.

De acordo com Dedavid; Gomes e Machado (2007), o MEV é utilizado para a caracterização e análise da microestrutura de amostras e além de gerar imagens com aspecto tridimensional e com alta resolução, fornece informações sobre a natureza química do material, permite a identificação da estrutura, da morfologia, dos elementos químicos e da topografia da superfície.

Para a análise da morfologia foram utilizados fragmentos de corpos de prova do gesso do comercial puro e das combinações de *blend* com amostra antiga e amostra nova de gesso sem aditivo e com aditivo Blok Gesso.

Já para a análise dos elementos presentes nos materiais, foram utilizadas amostras em forma de pó do gesso puro, do lodo recebido na primeira etapa e do lodo recebido na segunda (lodo antigo e lodo novo).

5.8 Viabilidade Econômica

Segundo a FGV Jr (2024), a viabilidade econômica refere-se à capacidade de um projeto, empreendimento ou investimento gerar lucro ou retorno financeiro. É uma avaliação abrangente que considera diversos aspectos como custos operacionais, receitas projetadas, fluxo de caixa, riscos e retornos esperados.

De acordo com Finotti (2023) a análise econômica permite aos empresários, gestores e investidores tomar decisões informadas sobre a alocação de recursos e identificar possíveis obstáculos ou oportunidades antes do início do projeto. Além disso, ajuda na definição das estratégias adequadas para maximizar o potencial econômico.

Existem diversas ferramentas utilizadas para realizar a análise de viabilidade econômica, incluindo o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Period. Essas métricas proporcionam informações valiosas sobre o retorno financeiro esperado ao longo do tempo e auxiliam na tomada de decisões com base nos resultados obtidos (ECONSULT, 2024).

No entanto ainda de acordo com Econsult (2024), é importante ressaltar que a viabilidade econômica por si só não é suficiente para garantir o sucesso de um projeto. Outros fatores como demanda de mercado, concorrência, aspectos jurídicos e regulatórios também devem ser considerados para uma avaliação completa.

Tavares (2024) ressalta que, a análise de viabilidade econômica desempenha um papel fundamental na tomada de decisões estratégicas e no planejamento financeiro de projetos, negócios ou investimentos. Ela oferece *insights* valiosos sobre a sustentabilidade econômica de uma oportunidade e ajuda a minimizar riscos financeiros.

Para realização desta análise foi contratada a empresa FEA Junior da USP - SP, que através de especialistas realizou o estudo de mercado do gesso no Peru e elaborou uma estimativa para a produção e comercialização do produto alternativo proveniente do lodo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

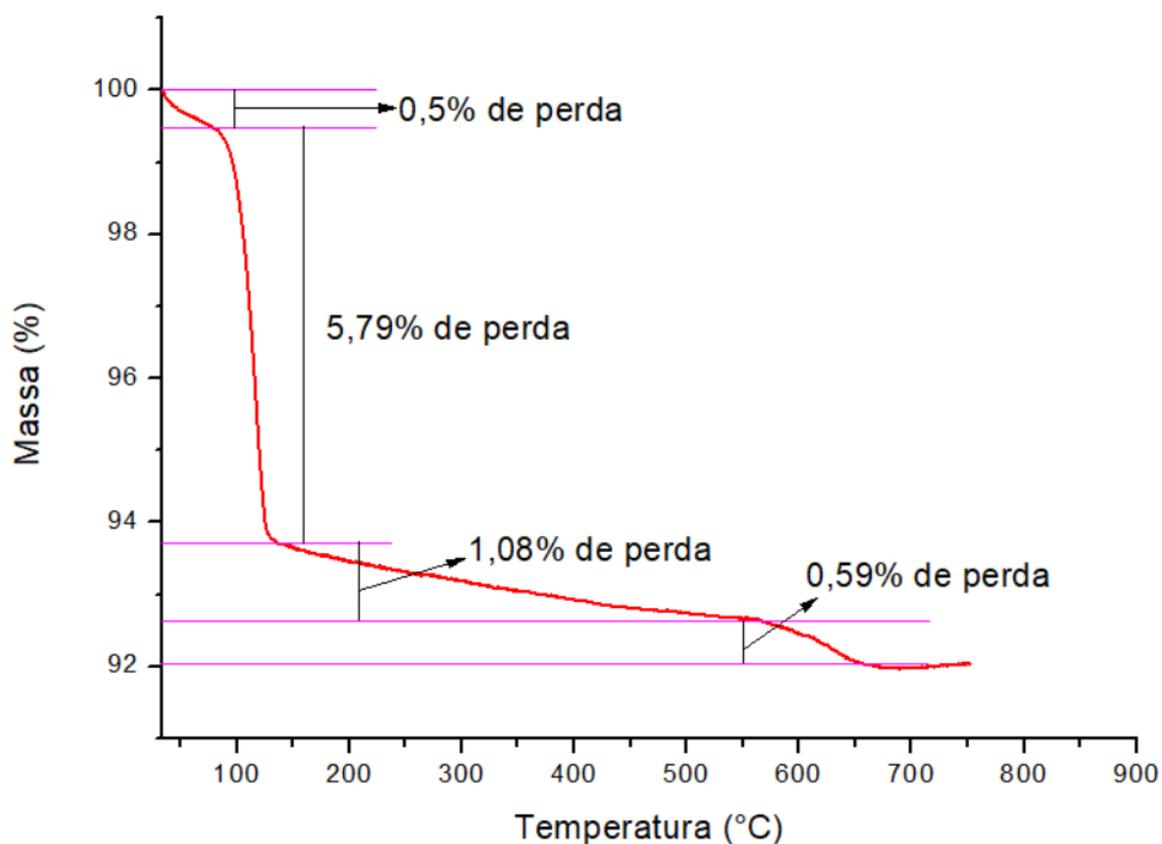
6.1 Caracterização do lodo e do gesso na forma de pó

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização do lodo do neutro na forma de pó.

6.1.1 Caracterização térmica

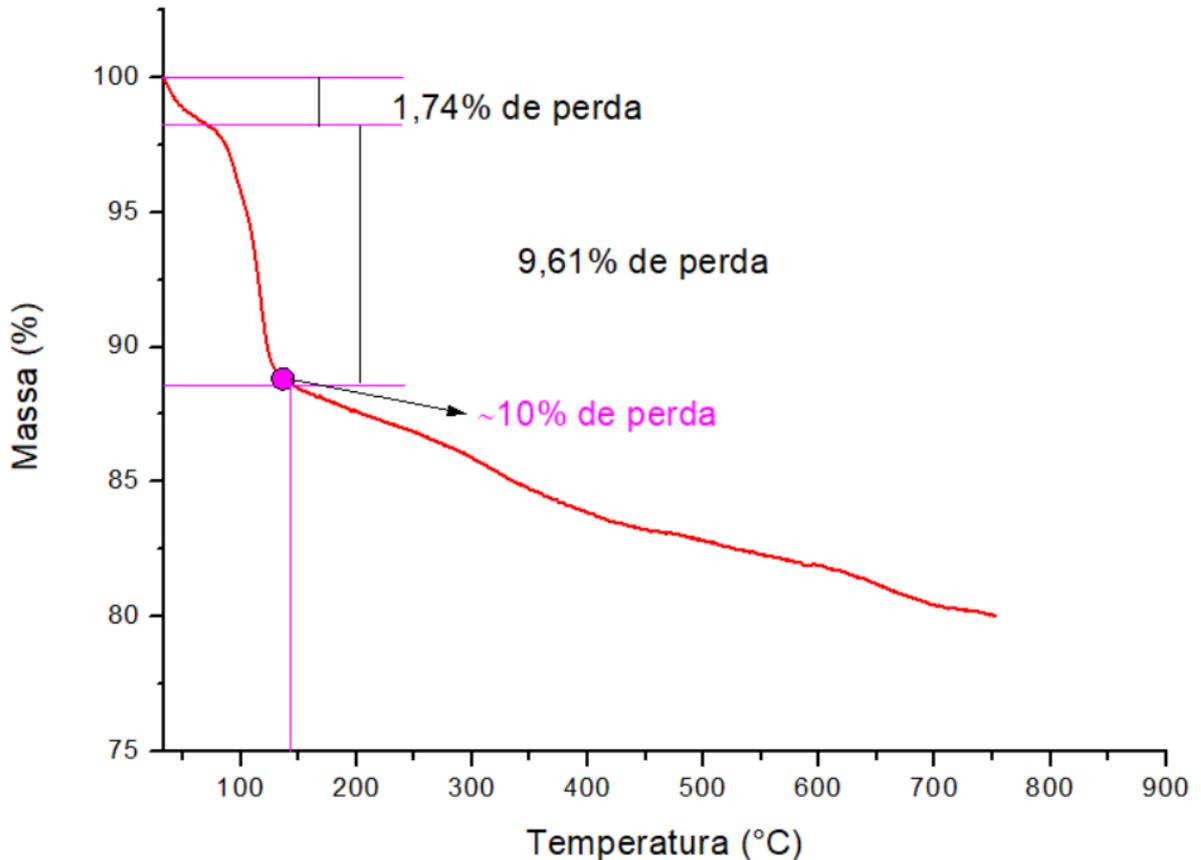
A Figura 64 e a Figura 65 mostram as curvas TG encontradas em testes do gesso comercial e do lodo respectivamente.

Figura 64: Curvas TG do gesso comercial



Fonte: Autoria própria.

Figura 65: Curvas TG do lodo



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o perfil de perda de massa apresentado nos gráficos, é possível observar que, após 200°C, o lodo neutro e o gesso comercial, têm comportamento a forma da curva de comportamento térmico parecido. De acordo com Baltar et al. (2005), entre 100 e 200°C ocorre a perda de água de cristalização, ou seja, ocorre a saída de água da estrutura cristalina do sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a gipsita se transforma em hemidratado de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

Nota-se que a diferença entre os dois materiais, consiste no percentual de água que ambos possuem em suas respectivas estruturas. Enquanto o gesso comercial apresenta aproximadamente 5,79% em massa, o lodo apresenta aproximadamente 9,61%. Nota-se ainda que em aproximadamente 150°C, o lodo perde cerca de 10% em massa. Portanto a melhor temperatura de residência no forno que o lodo precisa para ficar com comportamento térmico similar ao gesso comercial é 150°C.

A Figura 66 mostra as curvas TG feitas para o lodo e a Figura 67 as curvas TG feitas para o gesso comercial.

Figura 66: Curvas TG: comportamento térmico do gesso comercial

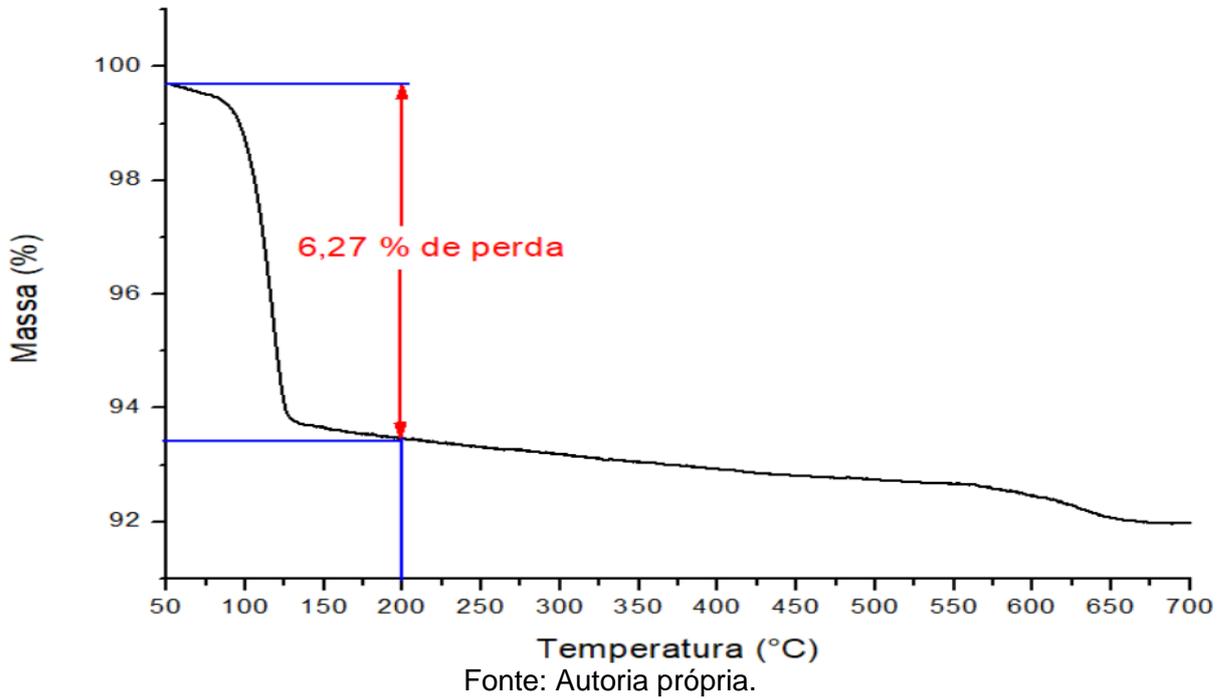
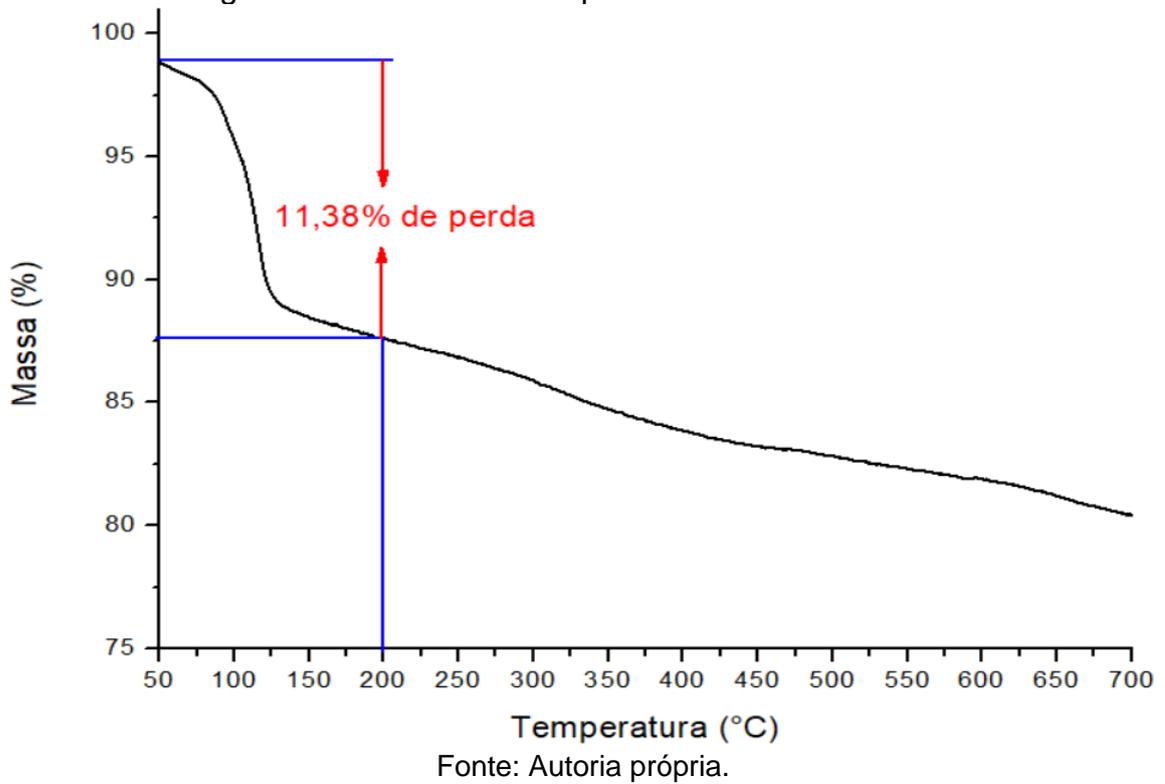


Figura 67: Curvas TG: comportamento térmico do lodo



Como pode ser visto, após 200°C, o lodo neutro e o gesso comercial têm a forma da curva de comportamento térmico semelhante. Entre 100°C e 200°C ocorre a perda de água de cristalização do material, ou seja, ocorre a saída parcial de água da estrutura cristalina do sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO₄.2H₂O). De acordo com um estudo realizado por Baltar et al. (2005), a perda de água de cristalização do gesso ocorreu gradualmente entre 105°C e 200°C.

Outro estudo conduzido por Pereira (2019) também confirmou que a perda de água de cristalização do gesso ocorreu entre 100°C e 200°C. Os pesquisadores observaram uma diminuição significativa na massa do gesso durante o processo de aquecimento, indicando a liberação da água de cristalização.

Observa-se que a diferença entre os dois materiais, consiste no percentual de água que ambos possuem em suas respectivas estruturas, enquanto o gesso comercial possui aproximadamente 6% em massa, o lodo possui aproximadamente 11% em massa (considerando a mesma faixa de temperatura). Portanto, o tratamento térmico do lodo foi feito para que ele perdesse 10% em massa, e desse modo tendesse ao ficar com comportamento térmico similar do gesso comercial.

6.1.2 Tratamento Térmico

De acordo com as pesagens realizadas durante os tratamentos térmicos, para que o lodo perdesse 10% em massa, ele precisou ficar em estufa por 2 horas e 10 minutos na temperatura de 110°C, 1 hora e 30 minutos na temperatura de 130°C e 60 minutos na temperatura de 150°C (Tabela 6).

Tabela 6 - Temperatura dos tratamentos térmicos e tempo necessário para a perda de 10% em massa do lodo

Temperatura da Estufa	Tempo necessário para perda de 10% em massa
110°C	2 horas e 10 minutos
130°C	1 hora e 30 minutos
150°C	60 minutos

Fonte: A autoria própria.

Após testes de otimização com base na caracterização térmica e posteriores testes observou-se melhora na trabalhabilidade a medida em que a temperatura do tratamento térmico aumentava. Portanto, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do material, utilizou-se a temperatura de tratamento de 150°C nas amostras utilizadas nos testes de pega e nos testes de aderência.

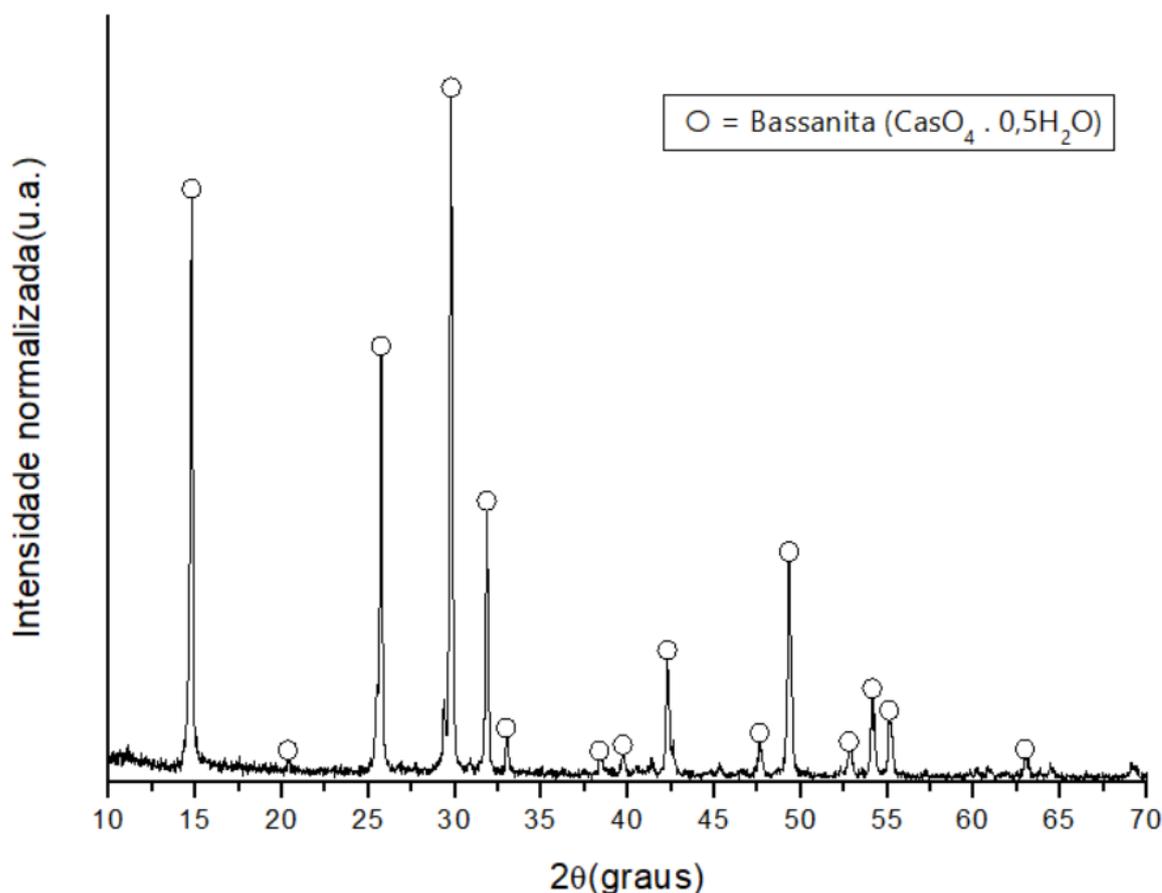
Entretanto para as amostras utilizadas nos ensaios de resistência à compressão realizou-se o tratamento térmico na temperatura de 130°C, pois os ensaios de otimização mostraram maiores resistências a esta temperatura de tratamento.

O tratamento térmico utilizado no produto final foi realizado a temperatura de 150°C.

6.1.3 Caracterização mineralógica

Através da caracterização mineralógica, foi possível mostrar, assim como na etapa anterior, que o gesso comercial (Figura 68) é composto basicamente de sulfato de cálcio hemi-hidratado (Bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$)).

Figura 68: Difratoograma do gesso comercial

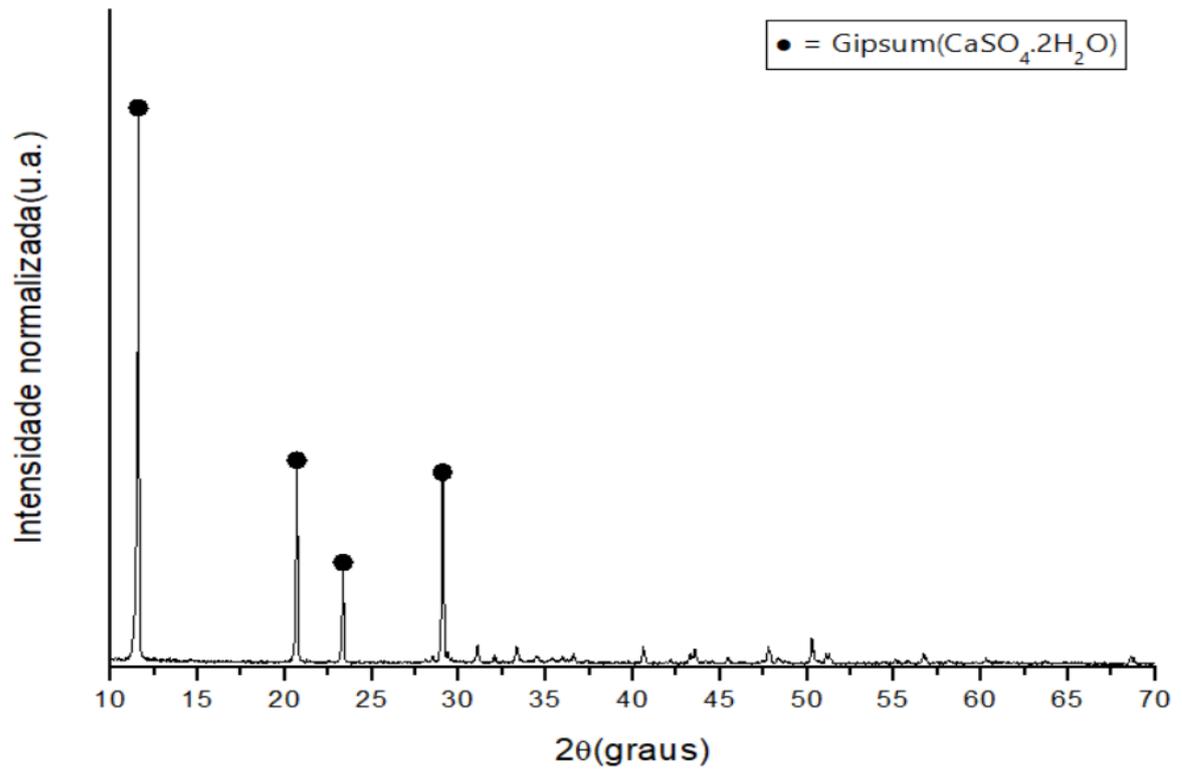


Fonte: Autoria própria.

Também de modo similar a etapa passada, a difração de raios-X de policristal mostrou que o lodo, como observado na Figura 69 contém majoritariamente gipsita, ou seja, sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

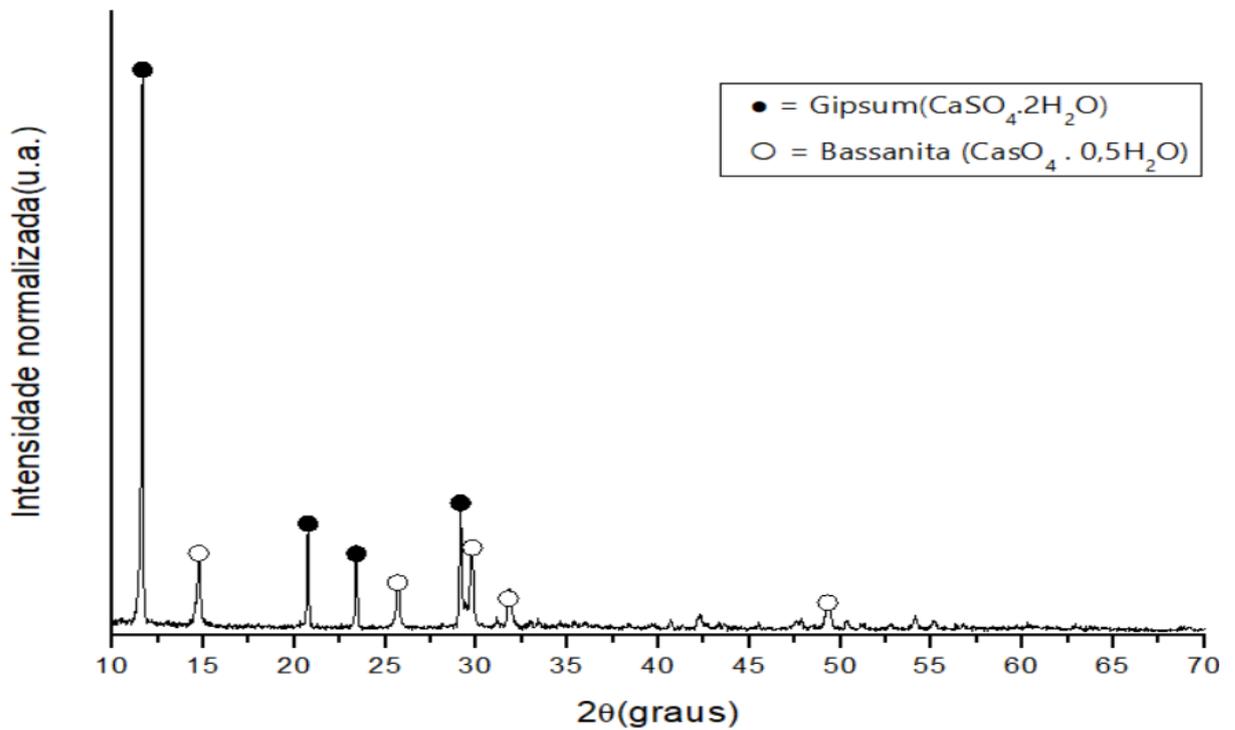
A Figura 70 mostra o difratograma do lodo após o tratamento térmico, feito à 150°C. Como é possível perceber, o difratograma do lodo neutro tratado termicamente demonstra a eficiência do tratamento térmico realizado, evidenciando que o resíduo tratado possui majoritariamente mineral típico do gesso comercial, ou seja, apresenta a fase de sulfato de cálcio hemi-hidratado. Diferente da etapa passada, o difratograma do lodo neutro tratado termicamente, apresentou ainda a fase gipsita, provavelmente em função da análise ter sido feita dias depois, o que foi suficiente para o material reidratar em contato com a água presente na atmosfera. Esse resultado mostra a elevada reatividade do lodo neutro na reação de hidratação, que refletiu no baixo tempo de pega observado para esse material.

Figura 69: Difratoograma do lodo sem tratamento térmico



Fonte: Autoria própria.

Figura 70: Difratoograma do lodo com tratado termicamente a 150°C

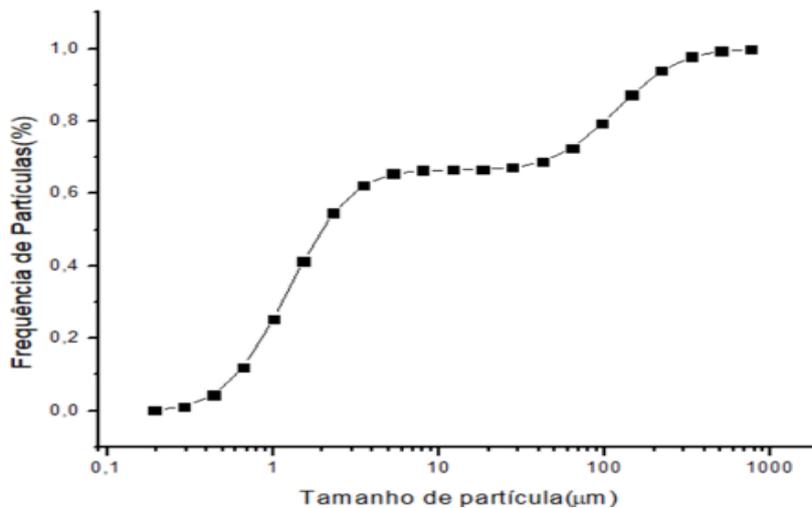
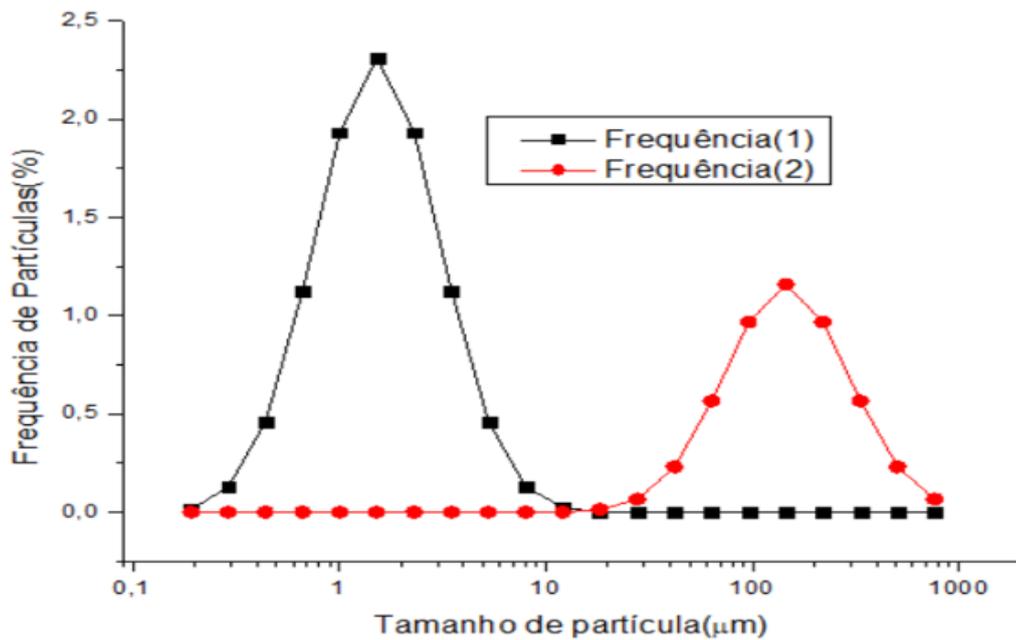


Fonte: Autoria própria.

6.1.4 Caracterização granulométrica

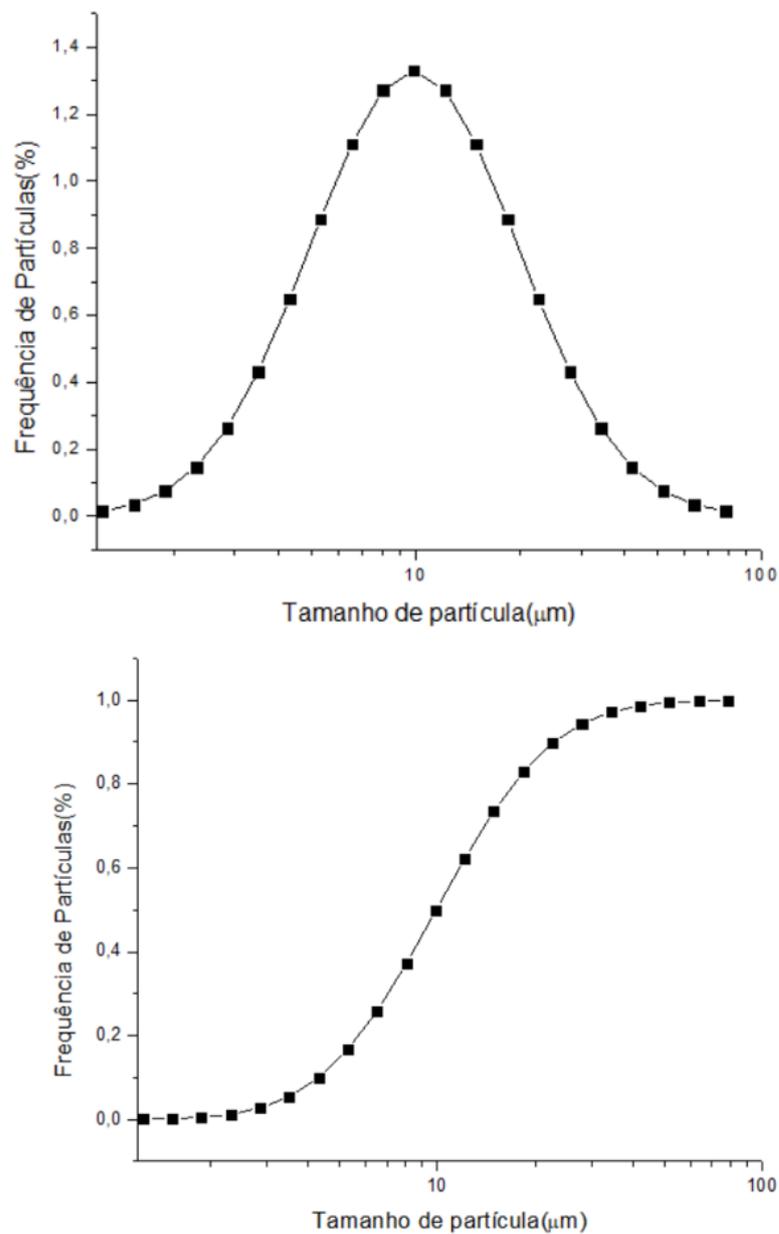
A Figura 71 e a Figura 72 mostram as curvas de distribuição granulométrica do gesso comercial e do lodo respectivamente.

Figura 71: Curva de distribuição granulométrica do gesso comercial obtida por medidas de espectroscopia de atenuação acústica



Fonte: Autoria própria.

Figura 72: Curva de distribuição granulométrica do lodo obtida por medidas de espectroscopia de atenuação acústica



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto nas figuras acima, as curvas de distribuição granulométrica do lodo neutro seco, e do gesso comercial apresentam certa semelhança no que diz respeito ao tamanho das partículas que forma esses materiais.

Em Ambas as amostras, apresentam há a predominância de partículas em torno 10 μm. Esse resultado lavou a conclusão, de que não foi necessário fazer nenhum tipo de etapa de moagem para que o lodo neutro fique com tamanho de

partícula similar na ordem dão gesso comercial. Portanto, somente a mistura mecânica dos dois materiais é suficiente para que se obtenha um blend homogêneo do ponto de visto de tamanho das partículas. Além disso, essa característica do resíduo torna o processamento do lodo neutro menos dispendioso.

De acordo com a análise granulométrica realizado pela empresa Nexa, as curvas granulométricas do lodo utilizado na segunda fase de teste podem ser observadas na Figura 73 e na Figura 74.

A Figura 75 mostra a curva de distribuição granulométrica do lodo feita por peneiramento, e a Figura 76 mostra a curva de distribuição granulométrica do lodo feita por granulometria a laser.

Figura 73: Curva de distribuição granulométrica do lodo por peneiramento

Análisis Granulométrico por Mallas						
Malla		Peso	Ret.	Ac. (+)	Ac. (-)	80 % Pass
ASTM	Abertura (µm)	(g)	(%)	(%)	(%)	(µ)
50	300	10.20	2.04	2.04	97.96	0
100	150	8.40	1.68	3.72	96.28	0
140	106	8.00	1.60	5.32	94.68	0
200	75	14.60	2.92	8.24	91.76	0
325	44	43.80	8.76	17.00	83.00	41
400	38	29.10	5.82	22.82	77.18	0
500	25	47.00	9.40	32.22	67.78	0
635	20	32.00	6.40	38.62	61.38	0
-635	-20	306.90	61.38	100.00	0.00	0
TOTAL		500.00	100.00	P80(µm)		41



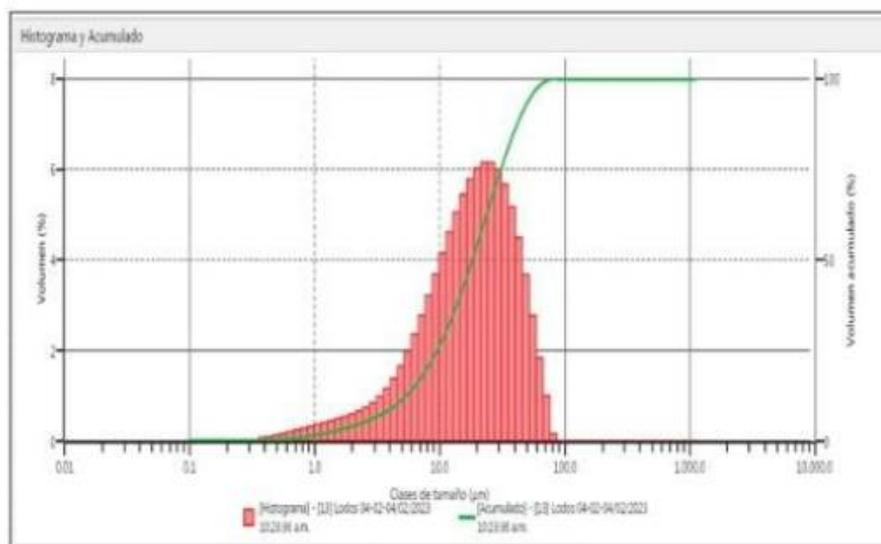
Fonte: Nexa, 2023

Figura 74: Curva de distribuição granulométrica do lodo por granulometria a laser

Análisis Granulométrico por Laser

50 % Pass	80 % Pass	98 % Pass
(μ)	(μ)	(μ)
18	35	63

Gravedad Específica
2.34



Fonte: Nexa, 2023

Embora os ensaios tenham sido feitos por métodos diferentes, eles foram similares entre si, e apresentam resultados próximos aos obtidos na primeira fase dos testes, conclui-se, portanto, que o lodo não precisa passar por uma etapa de moagem para ajuste de granulometria para ser aplicado como material para revestimento de alvenaria.

De acordo com a NBR 13207 (2017) que especifica os parâmetros granulométricos de gessos para revestimento, é necessário que o material tenha no mínimo 90% passante na peneira de abertura de 0,21 mm (210 μ m). Observando os resultados do ensaio de peneiramento, nota-se que o material atende a esse requisito.

Além disso, a ASTM C28/C28M-10 (AMERICAN, 2015) estabelece que no ensaio de granulometria, o gesso para construção e acabamento não deve apresentar material retido na peneira de 1,4 mm (1400 μ m) e, pelo menos, 60% do material deve

passar na peneira de 0,150 mm (150 μ m). A amostra de lodo também atende as especificações granulométricas da ASTM.

Portanto, somente a mistura mecânica dos dois materiais é suficiente para que se obtenha um *blend* homogêneo de acordo com o tamanho das partículas.

6.2 Preparação do *blend*

Todas as misturas de gesso com percentuais de lodo puro ou com uso de aditivo resultaram em um *blend* visualmente homogêneo.

6.3 Caracterização do *blend* no estado fresco: análise do pH e Início e fim da pega

6.3.1 Análise de pH do Gesso e do Lodo

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 7, tanto o gesso novo quanto o antigo apresentaram pH alcalino, porém próximo da neutralidade. O lodo antigo e todas as suas combinações de *blend*, apresentaram pH mais alcalino que o lodo novo e suas combinações de *blend*.

Portanto, pode-se notar que de um modo geral, as suspensões obtidas a partir dos lodos neutros, deixam o meio alcalino, esse pode ser um dos fatores que influenciam no tempo de pega dos *blends*, pois, segundo Canut et al. (2006), o tempo de pega tem a sua velocidade aumentada em pHs maiores.

Tabela 7 - Resultados das medidas de pH dos gessos, das amostras de Lodo e combinações de blend's

Material	pH
Gesso antigo	7,3
Gesso novo	7,3
Lodo antigo	9,0
Lodo novo	8,3
<i>Blend</i> lodo antigo – gesso antigo	8,9
<i>Blend</i> lodo antigo – gesso novo	9,0
<i>Blend</i> lodo novo – gesso antigo	8,3
<i>Blend</i> lodo novo – gesso novo	8,7

Fonte: Autoria própria.

6.3.2 Análise do pH do lodo lavado

O objetivo principal da lavagem do lodo foi diminuir o pH a cada 2 ciclos de lavagem, porém pode-se observar pelos resultados apresentados na Tabela 8 que o pH aumentou após cada ciclo.

Tabela 8 - Resultados das medidas de pH da amostra de Lodo após ciclos de lavagens com água da torneira. O pH foi medido após cada 2 ciclos de lavagem

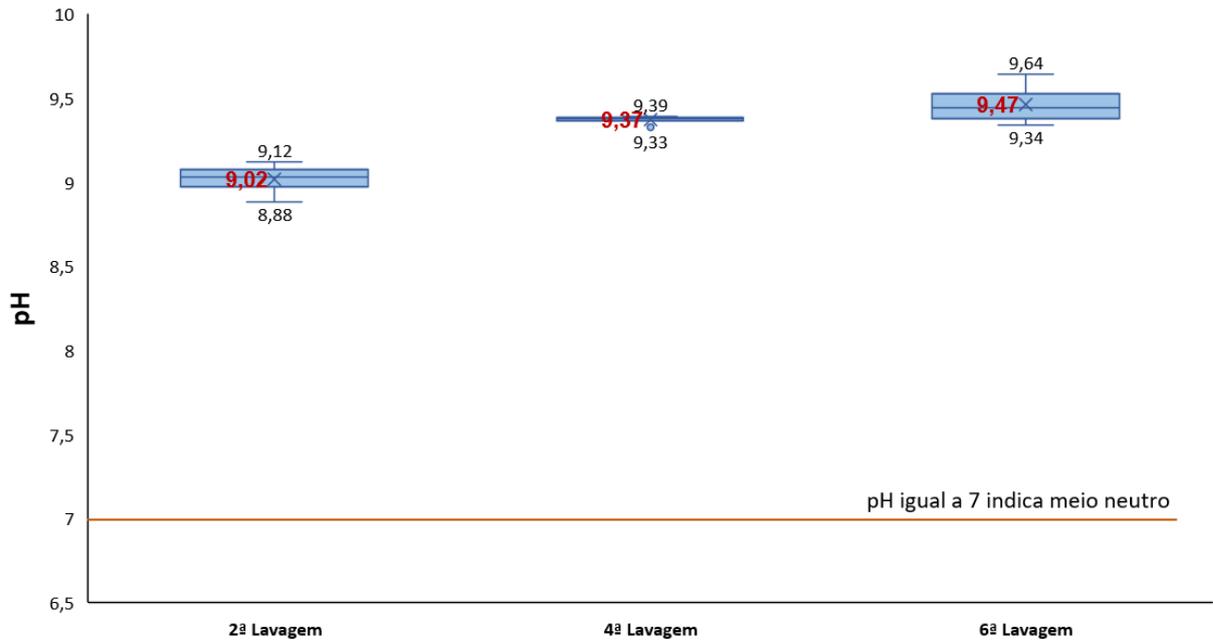
Lodo		2ª Lavagem	4ª Lavagem	6ª Lavagem
GRUPO 1	1	8,88	9,38	9,49
	2	9,00	9,38	9,64
	3	9,06	9,33	9,39
	4	9,12	9,34	9,34
GRUPO 2	1	9,16	9,28	9,64
	2	9,20	9,48	9,45
	3	9,17	9,40	9,47
	4	9,16	9,34	9,42
GRUPO 3	1	9,22	9,46	9,48
	2	9,11	9,42	9,66
	3	9,15	9,20	9,52
	4	9,10	9,12	9,47

Fonte: Autoria própria.

Após a segunda, quarta e sexta lavagem, os valores de pH do sobrenadante foram medidos com o auxílio de um pHmetro de bancada. Os gráficos das Figura 75,

Figura 76 e Figura 77 mostram os resultados do pH após cada ciclo de lavagem para os 3 grupos de tubos falcon.

Figura 75: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 1 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro)



Ciclo de Lavagem do Lodo Neutro

Fonte: Autoria própria.

Figura 76: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 2 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro)

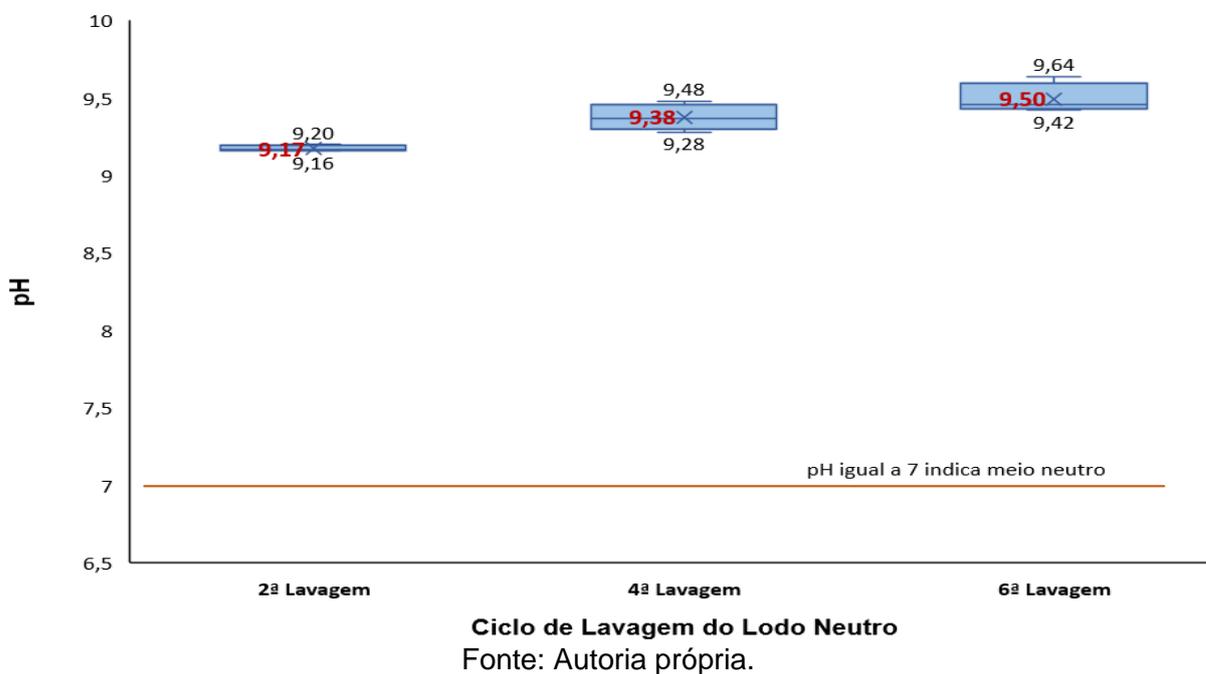
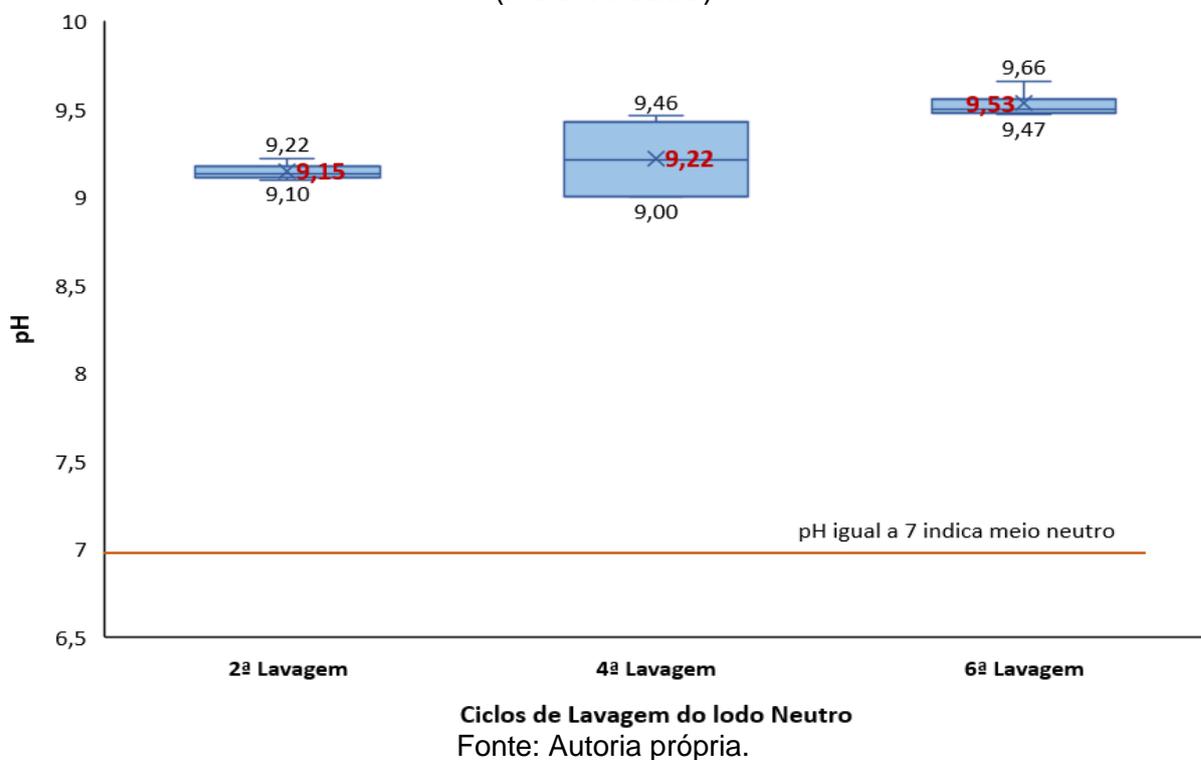


Figura 77: Gráfico com resultados das medidas de pH do Grupo 3 de amostra de lodo após cada 2 ciclos de lavagem. A linha marrom do gráfico indica pH igual a 7 (meio é neutro)



De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a lavagem do lodo é ineficiente para a redução do seu pH, observou-se aumento do pH após cada ciclo de lavagem e após o sexto ciclo encerrou-se os testes lavagem do lodo.

6.3.3 Início e fim da pega

De acordo com os resultados obtidos na primeira etapa, observou-se uma elevada variação entre os tempos de pega do gesso comercial e o *blend*. Como mostrado na Tabela 9, o gesso comercial teve início de pega no tempo de 6 minutos e 27 segundos e fim de pega no tempo de 16 minutos e 36 segundos. Já o *blend* não foi possível observar a diferença entre os tempos de início e fim de pega, pois a pega iniciou ainda na mistura do material com a água, o fim de pega ocorreu no tempo de 1 minuto e 22 segundos.

Em função dos resultados obtidos neste ensaio, o tempo de pega do *blend* precisou ser ajustado na segunda etapa. Esse ajuste foi feito com a utilização de aditivo retardador de tempo de pega, e foram avaliados blends com porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de lodo.

Tabela 9 - Resultados dos testes de início e fim de pega do gesso comercial e do *blend*

	Início de pega	Fim de pega
Gesso comercial	6min e 27seg	16min e 36 seg
<i>Blend</i>	Zero (inicia ainda na mistura)	1 min e 22 seg

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos na segunda etapa podem ser observados na Tabela 10, o tempo de pega do gesso comercial apresenta-se próximo aos tempos de pega dos *blend's* de 10% e 20% de lodo. O *blend* de 30% sem aditivo apresentou uma variação maior em relação ao gesso comercial. Já os *blend's* de 30%, 40% e 50% com aditivo Blok Gesso obtiveram tempos de pega semelhantes ao gesso comercial.

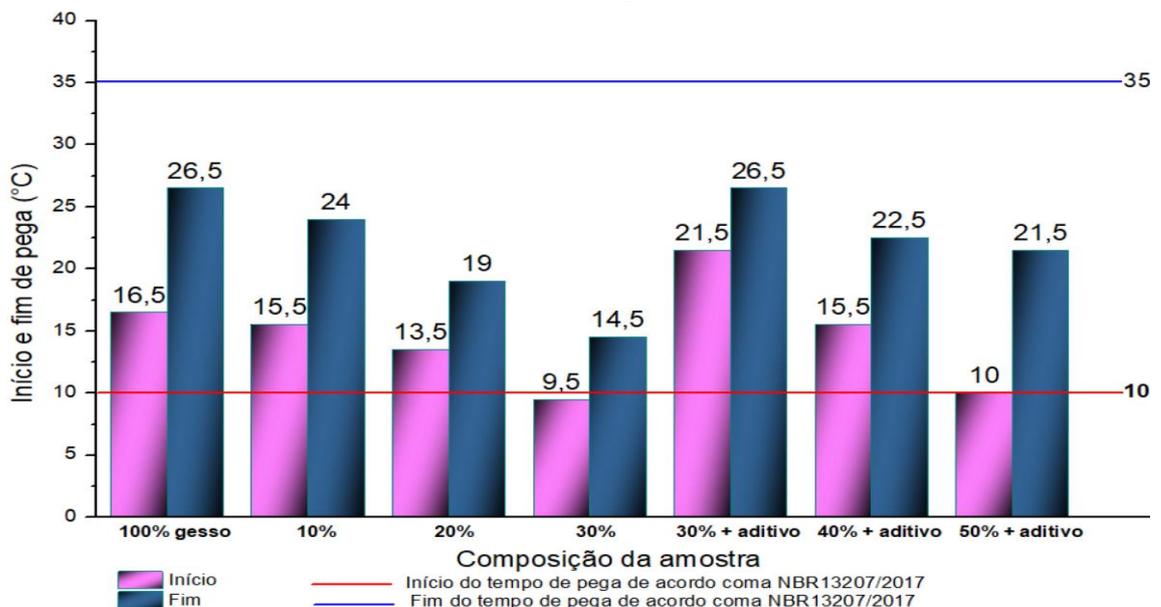
Tabela 10 - Resultados dos testes de início e fim de pega do gesso, dos *blend's* com 10%, 20%, 30% (sem aditivo) e 30%, 40% e 50% (com aditivo)

Composição	Início da pega	Fim da pega
100% Gesso	16,5 minutos	26,5 minutos
10% /sem aditivo	15,5 minutos	24 minutos
20% /sem aditivo	13,5 minutos	19 minutos
30% /sem aditivo	9,5 minutos	14,5 minutos
30% /0,125	21,5 minutos	26,5 minutos
40% /0,125	15,5 minutos	22,5 minutos
50% /0,125	10 minutos	21,5 minutos

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 78 apresenta os resultados dos testes de pega em relação as determinações da norma brasileira para tempo de pega (NBR13207/2017).

Figura 78: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do gesso e dos *blend's* com porcentagens de lodo de 10%,20% e 30% (sem aditivo) e porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo), em relação as determinações da norma brasileira para tempo de pega (NBR13207/2017)

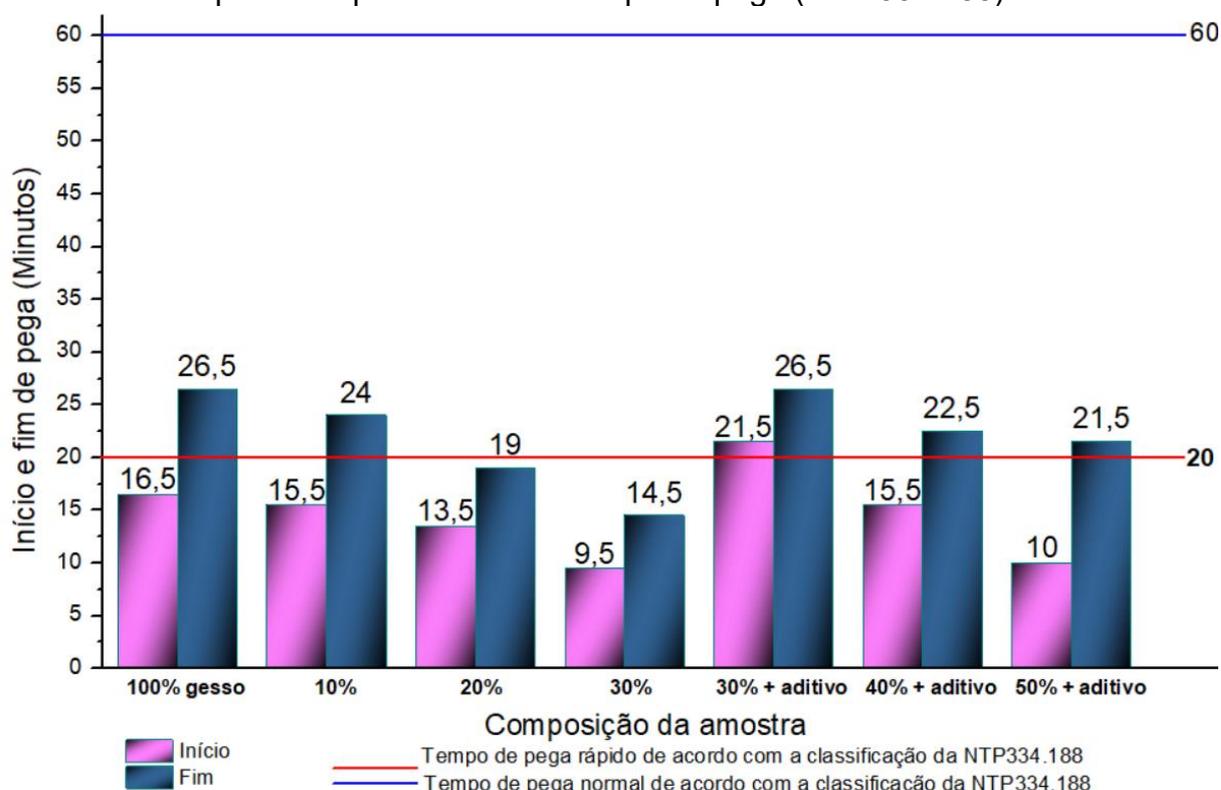


Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados observa-se que as porcentagens de 10% e 20% sem aditivo e as porcentagens de 30%, 40% e 50% com aditivo atendem a norma brasileira para o início do tempo de pega. Já para o fim do tempo de pega nenhuma das porcentagens de *blend* e nem o gesso comercial atendem a norma brasileira.

O gráfico da Figura 79 apresenta os resultados em relação as classificações de tempo de pega determinadas pela norma peruana NTP 334.188.

Figura 79: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do gesso e dos *blend's* com porcentagens de lodo de 10%,20% e 30% (sem aditivo) e porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo), em relação as determinações da norma peruana que classifica o tempo de pega (NTP 334.188)



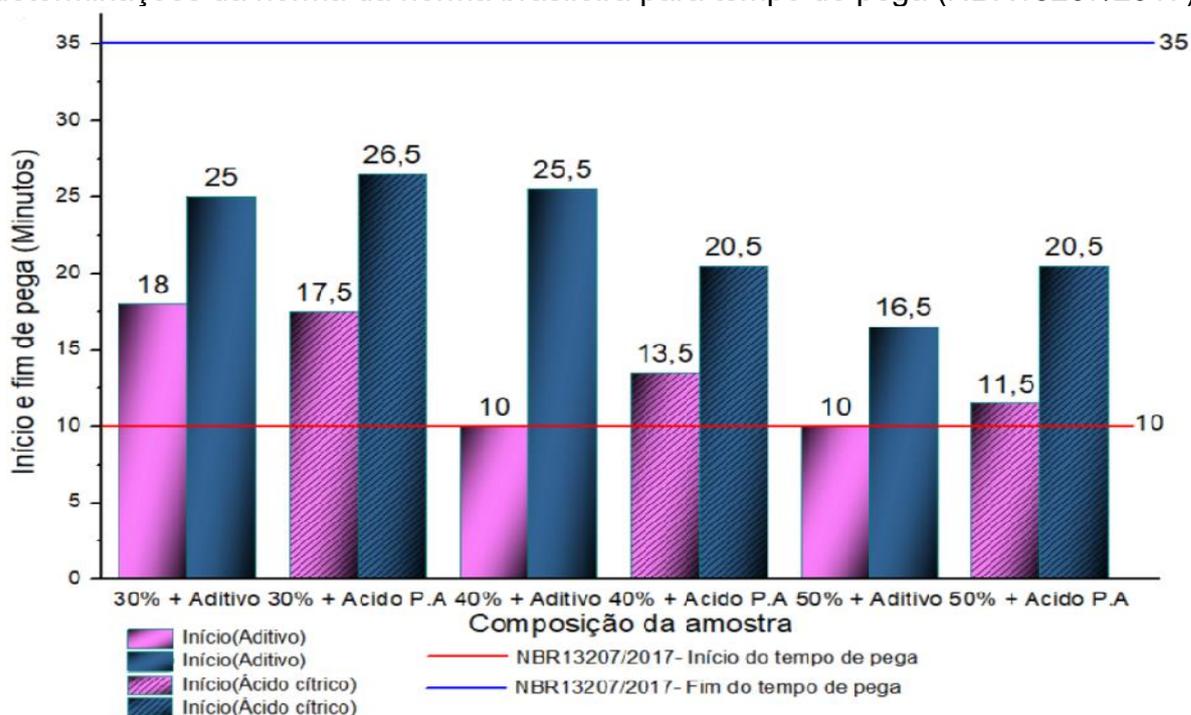
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados observa-se que todas as porcentagens de *blend* submetidas ao ensaio, assim como o gesso comercial, são classificados como gesso de pega rápida de acordo com a norma peruana NTP 334.188.

6.3.4 Teste de pega para *blend* com a utilização de ácido cítrico P.A como aditivo

O gráfico da Figura 80 apresenta o comparativo entre os testes de pega dos *blend's* de 30%, 40% e 50% de lodo com aditivo da marca Blok Gesso e Ácido Cítrico P.A.

Figura 80: Gráfico com resultados comparativos dos testes de tempo de pega do dos *blend's* com porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com aditivo) e *blend's* com porcentagens de lodo de 30%, 40% e 50% (com Ácido Cítrico P.A), em relação as determinações da norma da norma brasileira para tempo de pega (NBR13207/2017)



De acordo com os resultados, observa-se que os tempos de pega nos *blend's* com Ácido cítrico P.A são próximos aos tempos de pega dos *blend's* com aditivo e atendem a norma brasileira para o início do tempo de pega.

Conclui-se, portanto, que o ácido cítrico P.A pode ser utilizado no *blend* como aditivo obtendo-se resultados similares para o tempo de pega em relação ao aditivo Blok Gesso.

Koslowski e Ludwig (1983) afirma que o ácido cítrico se junta com as substâncias indesejadas do gesso, originando citrato, o citrato atrasa o processo de

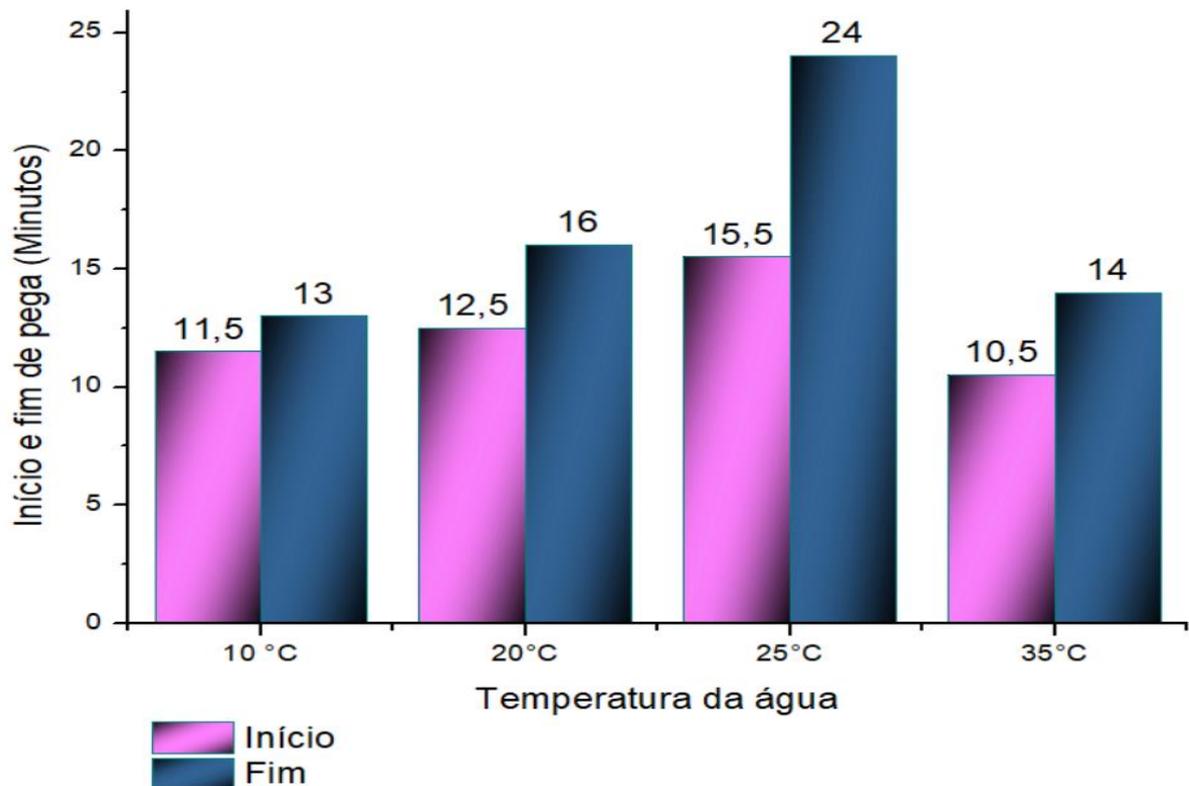
solidificação, sendo absorvido pela superfície do hemi-hidrato, prejudicando assim a formação dos núcleos de cristalização.

6.3.5 Teste do Tempo de Pega com o Uso de Água em Diferentes Temperaturas

De acordo com os resultados mostrados no gráfico da Figura 81, o *blend* em que se utilizou água em temperatura ambiente, apresentou melhor tempo de início e fim de pega do que os *blend's* em que se utilizou água aquecida ou resfriada.

Observou-se também que a variação do tempo de pega com a utilização de água aquecida ou resfriada foi pequena.

Figura 81 - Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega dos blend's com porcentagem de lodo de 10%, utilizando água em temperatura ambiente de 25°C, resfriada a 10°C e a 20°C e aquecida a 35°C



Fonte: Autoria própria.

Conclui-se com os resultados observados que a água em temperatura ambiente apresenta melhor resultado nos tempos de pega, porém a utilização do *blend* no Peru pode sofrer pequenas alterações devido a variação da temperatura

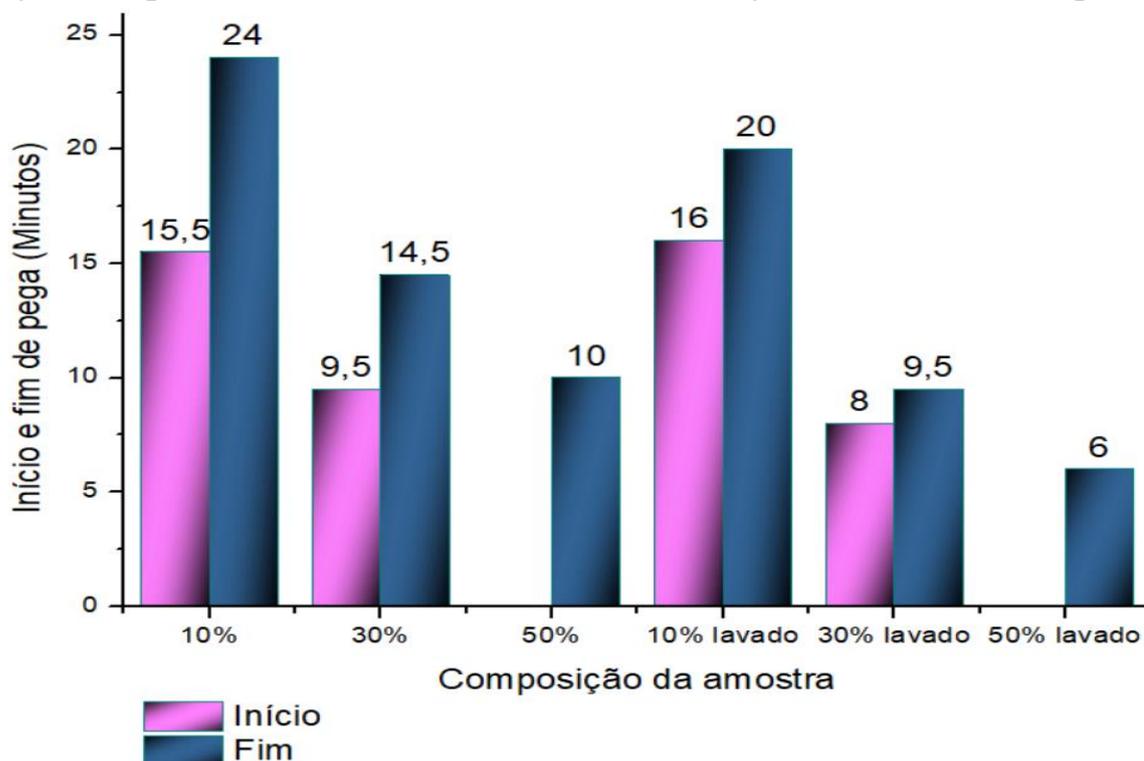
ambiente local, entretanto, as variações locais de temperatura não devem influenciar significativamente no tempo de pega, de acordo com o que foi observado experimentalmente.

6.3.6 Análise do tempo de pega do *blend* preparado com lodo lavado

O gráfico da Figura 82 mostra os resultados do teste de pega do *blend* com porcentagens de 10%, 30% e 50% (porcentagens mínima, máxima e uma intermediária) usando o lodo após seis ciclos de lavagem e tratamento térmico comparados com os testes de pega do lodo apenas com tratamento térmico.

Outra observação importante, é que de fato o aumento do pH torna a reação de hidratação do sulfato cálcio mais rápida. Portanto, esse é mais um indício de que esse é um dos fatores que diminuem o tempo de pega dos materiais contendo lodo.

Figura 82: Gráfico com resultados dos testes de tempo de pega do blend com porcentagens de 10%, 30% e 50% usando o lodo após seis ciclos de lavagem



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados observa-se que com a lavagem o tempo de pega ficou mais rápido, conclui-se que com a lavagem e o aumento do pH observado

durante os ciclos, acelera o processo da pega. Portanto o processo de lavagem do lodo neutro influencia negativamente na pega.

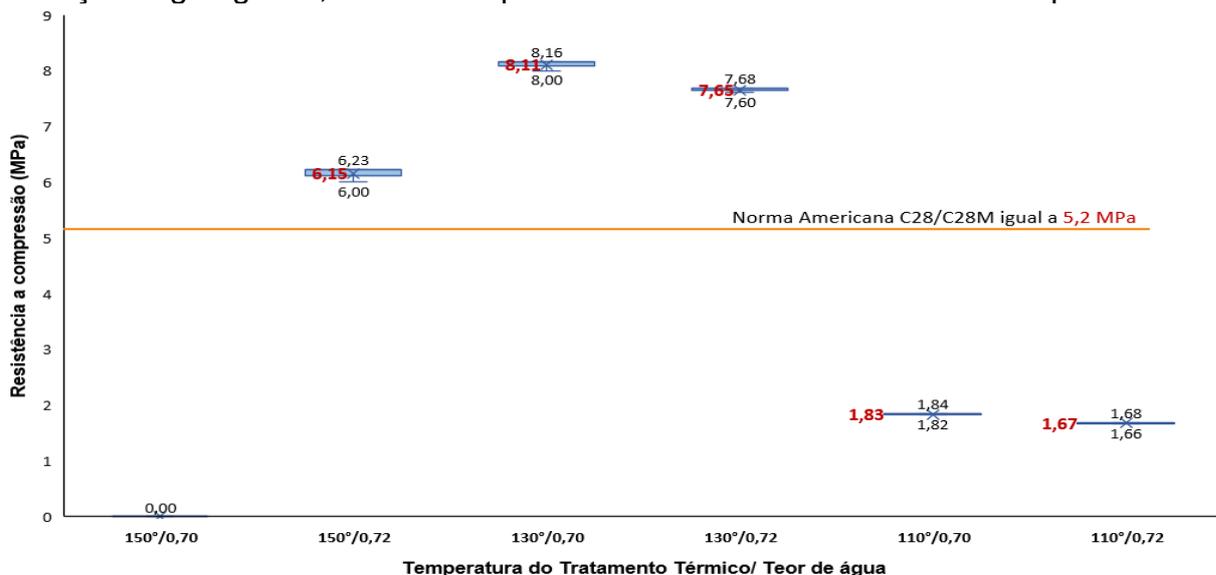
Não há estudos anteriores sobre a mistura de gesso e lodo, porém em seu estudo sobre gesso reciclado Ferreira et al. (2018) destacou que adicionar materiais auxiliares ou modificadores ao gesso pode afetar significativamente o tempo de pega e destaca que a composição exata e as proporções dos ingredientes utilizados na mistura determinarão o comportamento final do material e seu tempo de pega específico.

6.4 Caracterização do *blend* no estado endurecido

6.4.1 Ensaio de resistência à compressão

O gráfico da Figura 83 apresenta os resultados dos testes realizados na primeira fase de testes para resistência à compressão no corpo de prova referência e em corpos de prova do blend 50% submetido a diferentes temperaturas de tratamento térmico e a diferentes relações água/gesso.

Figura 83: Resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes tratamentos térmicos e diferentes relações água/gesso, as linhas representam as normas utilizadas como parâmetro



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova moldados com blend submetidos a tratamento térmico de 150°C e com relação água/ gesso de 0,68 não foram submetidos a ensaio de resistência à compressão, motivado pela baixa relação água/gesso que provocou um rápido início e fim de pega, assim, não foi possível moldar corpos de prova com adensamento adequado para o ensaio.

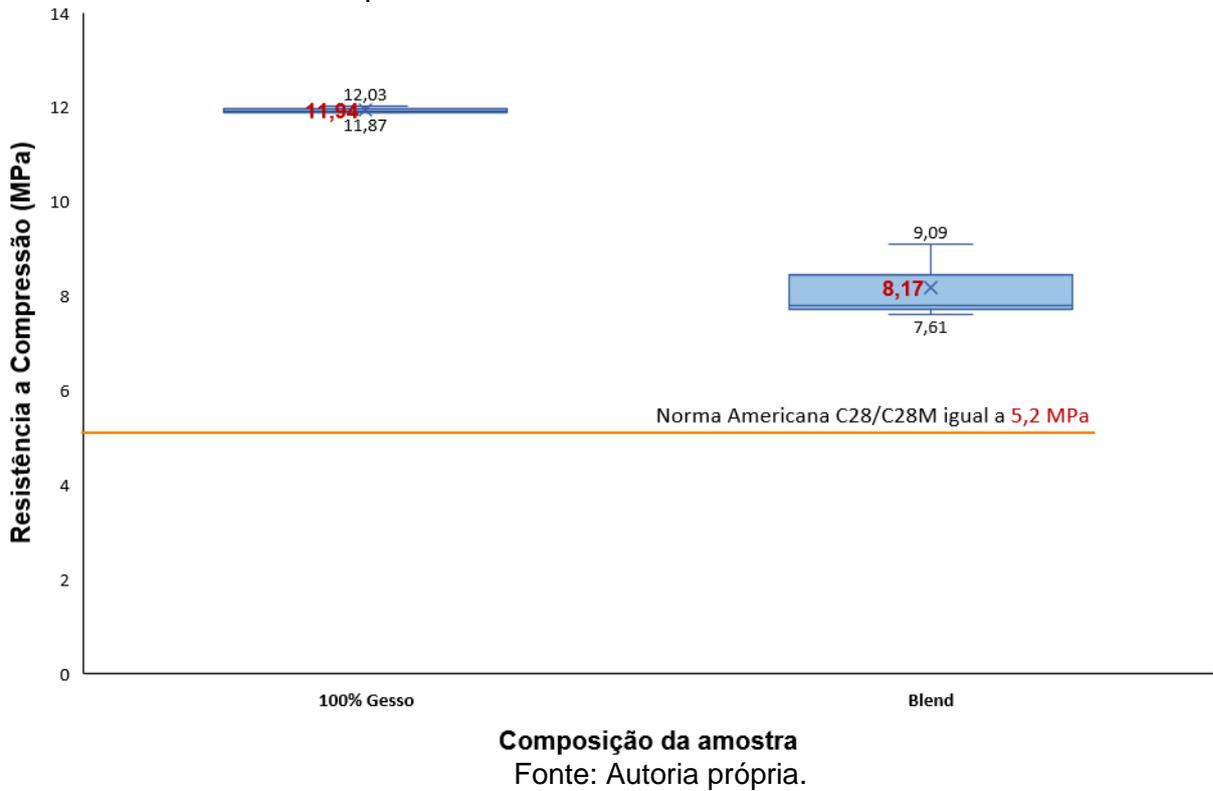
Com objetivo de otimizar o tratamento térmico e ao mesmo tempo aumentar a resistência à compressão, novos ensaios foram realizados. Foi utilizado blend com tratamentos térmicos de 110 °C e 130°C e usou-se relação água/gesso de 0,70 e 0,72.

Observou-se que a 110°C no tempo de 2 horas e 10 minutos o *blend* apresentou uma baixa resistência à compressão, não sendo, portanto, viável a utilização desta temperatura de tratamento térmico.

Já os corpos de prova moldados com o material tratado a 130°C apresentou uma maior resistência à compressão com a relação água/gesso de 0,70 e ficou mais próximo de atender a norma.

Todo o processo de ensaio foi refeito moldando-se três corpos de prova e utilizou-se o blend tratado a 130°C e relação água/gesso de 0,70. Foram moldados também novos corpos de prova referência utilizando-se 100% de gesso comercial e relação água/gesso de 0,70. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 84.

Figura 84: Resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes após otimizações do tratamento térmico para 130°C e relação água/gesso para 0,70, as linhas contínuas representam as médias dos resultados



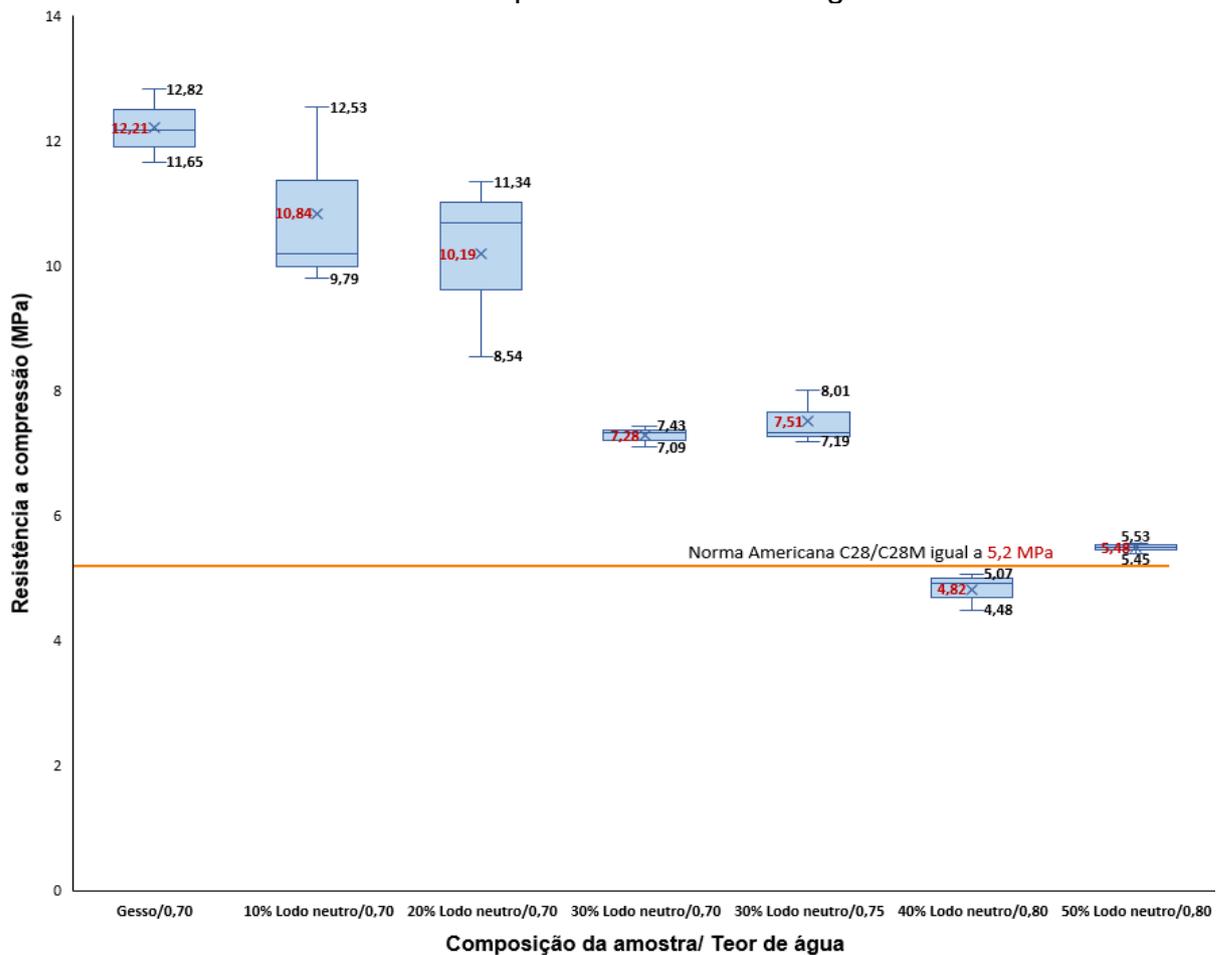
Observou-se através dos resultados que quanto maior a relação água/gesso menor a resistência à compressão o material apresenta, pois, o gesso comercial apresentou maior resistência com a relação 0,68. Já o blend com a relação 0,70 apresentou a média igual a observada nos testes de otimização, porém ao observar os resultados individuais dos corpos de prova, observou-se um declínio de resistência de acordo com a ordem de moldagem.

Concluiu-se que o tempo de pega acelerado influencia no adensamento durante a moldagem. O corpo de prova moldado primeiro apresentou maior resistência por ter melhor espalhamento no molde durante o processo, já o último apresentou menor resistência pois o material já se encontrava no processo de início de pega e não adensou corretamente no molde. A falta de adensamento gera poros nos corpos de prova e conseqüentemente reduz as suas propriedades mecânicas.

Segundo estudo realizado por Carvalho (2015), a falta de compactação ou adensamento em corpos de prova de gesso pode levar à formação de poros, o que posteriormente reduz sua resistência mecânica.

O gráfico da Figura 85 apresenta os resultados dos testes realizados na segunda fase de testes, após a otimização para resistência à compressão, no corpo de prova referência e em corpos de prova de *blend's* em porcentagens de 10%, 20%, 30% com relação de água 0,70; porcentagem de 30% com relação de água 0,75 e porcentagens de 40% e 50% com relação de água 0,80. A linha de cor laranja apresentada no gráfico indica se os resultados atendem ou não a ASTM C28/C28M com o mínimo de 5,2 MPa.

Figura 85: Gráfico com resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com gesso comercial e com blend para diferentes porcentagens de lodo (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%). A relação de água foi de acordo com a necessidade para se obter a moldagem



De acordo com os resultados observados no gráfico os corpos de prova com *blend's* em porcentagens de 10% e 20% apresentaram uma resistência à compressão mais próximas ao corpo de prova referência (100% gesso comercial).

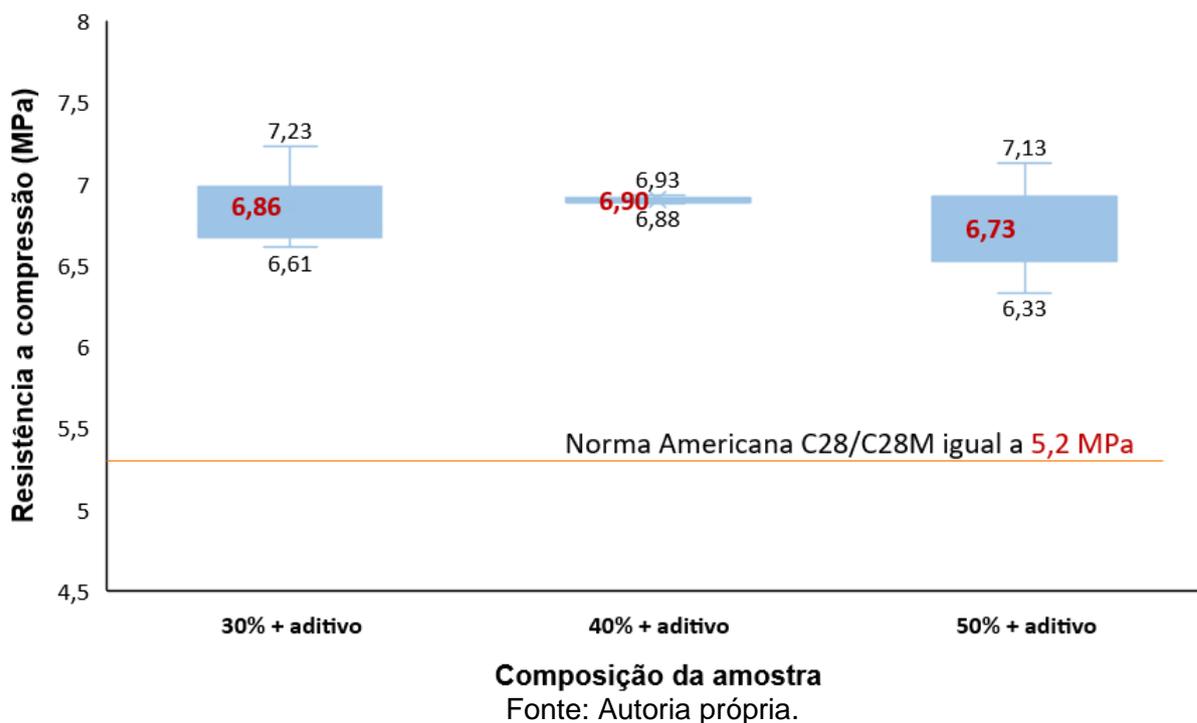
Os corpos de prova com *blend* 30% e relação de água 0,70 apresentou uma resistência menor e observou-se defeitos nos corpos de prova devido ao tempo de pega acelerado que dificultou a moldagem das amostras.

Os corpos de prova com *blend* de 30% e relação de água 0,75 apresentou um pequeno aumento em relação ao anterior, porém ainda inferior à referência pois, apesar da melhora na trabalhabilidade e maior facilidade para moldagem, com o aumento da relação de água ocorre maior formação de poros nos corpos de prova e com isso reduz a resistência.

Os corpos de prova com *blend's* em porcentagens de 40% e 50% com relação de água 0,80 apresentaram resultados ainda menores, pois com o aumento da água comprometeu a resistência. Apesar da porcentagem de 50% apresentar um resultado maior, isso se deve a alguma possível variação na operação ou na cura dos corpos de prova.

O gráfico da Figura 86 apresenta os resultados dos testes de resistência à compressão em corpos de prova de *blend's* com porcentagens de 30%, 40% e 50% com uso de 0,22 gramas de aditivo relação de água 0,70. A linha de cor laranja apresentada indica se os resultados atendem ou não a ASTM C28/C28M com o mínimo de 5,2 MPa.

Figura 86 - Gráfico com resultados dos testes de compressão dos corpos de prova moldados com blend para porcentagens de lodo 30%, 40% e 50% com aditivo. A linha laranja indica a resistência mínima de acordo com a ASTM C28/28M



De acordo com os resultados observados no gráfico os corpos de prova com *blend's* em porcentagens de 30%, 40% e 50% apresentaram uma resistência à compressão mais elevada após a adição do aditivo da marca Blok Gesso.

Através da utilização do aditivo foi possível reduzir a relação de água, pois o *blend* apresenta melhor trabalhabilidade e conseqüentemente torna-se mais moldável usando a relação de água de 0,70. Com a redução da relação de água aumentou-se o tempo de pega, reduziu-se a formação de poros, conseguiu-se melhor espalhamento durante o processo de moldagem e assim, obteve-se melhores resultados de resistência à compressão do que os corpos de prova moldados com relação de água de 0,75 e de 0,80.

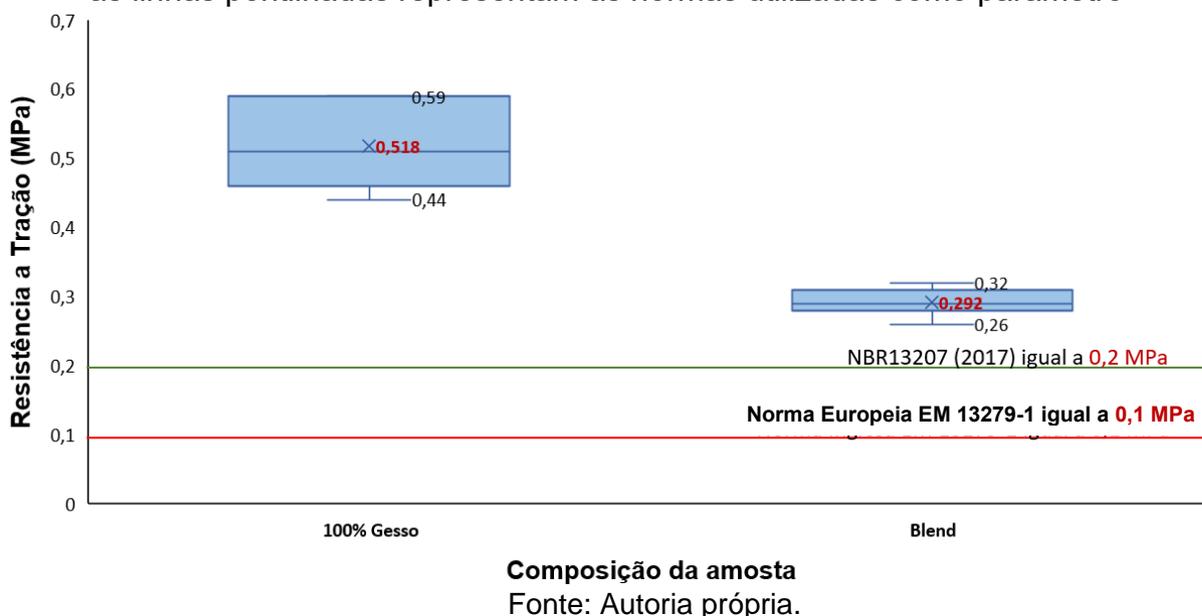
Resultados de estudos realizados por Silva (2018) mostraram que o aumento do teor de água levou a uma diminuição na resistência à compressão e à flexão dos corpos de prova de gesso. Isto foi atribuído ao excesso de água, enfraquecendo as ligações interpartículas e reduzindo a densidade geral do material.

Ferreira et al. (2018), enfatiza que a adição excessiva de água durante a mistura do gesso pode levar ao aumento da porosidade e à redução da densificação durante a cura, resultando em produtos finais mais fracos.

6.4.2 Ensaio de aderência

Como pode ser observado no gráfico da Figura 87, tanto o gesso comercial quanto o blend apresentaram aderências que atendem a NBR13207 assim como a norma Europeia EN 13279-1. O gesso comercial apresentou média de aderência de 0,518 e o blend apresentou média de 0,292.

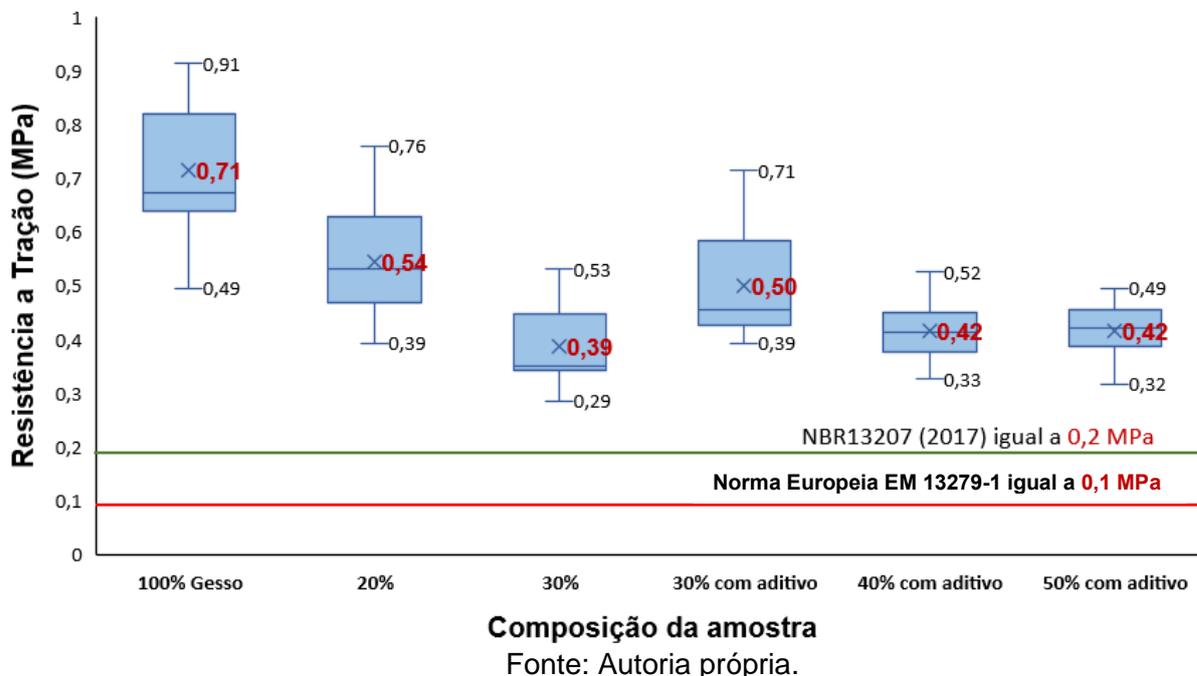
Figura 87: Resultados dos testes de aderência em substratos revestidos com gesso comercial e com blend, as linhas contínuas representam as medias dos resultados e as linhas pontilhadas representam as normas utilizadas como parâmetro



Concluiu-se com os resultados obtidos que o blend produzido a partir do lodo apresenta aderência adequada para a utilização como revestimento na construção civil.

De acordo com os resultados mostrados no gráfico da Figura 88, tanto o gesso comercial quanto os *blend's* com porcentagens de lodo de 20% e 30% sem aditivos e com porcentagens de 30%, 40% e 50% com aditivo Blok Gesso, apresentaram aderências que atendem a NBR13207 assim como a norma Europeia EN 13279-1.

Figura 88: Gráfico de resultados com desvio padrão dos testes de aderência em substratos revestidos com gesso comercial e com *blend's* utilizando porcentagens de lodo de 20% e 30% sem aditivo e porcentagens de 30%, 40% e 50% sem aditivo. As linhas contínuas representam as normas brasileira e americana, utilizadas como parâmetro do teste



Concluiu-se com os resultados obtidos que os *blend's* produzido com gesso e porcentagens de lodo com ou sem aditivo, apresentam aderências adequadas para a utilização como revestimentos de parede na construção civil.

6.5 Análise da aplicação do *blend* na parede

Foram aplicados gesso comercial, o traço de 20% de lodo sem aditivo e 50% com aditivo na parede como mostram as Figura 89, Figura 90 e Figura 91.

Figura 89: Aplicação do gesso comercial na parede



Fonte: Autoria própria.

Figura 90: Aplicação do blend com porcentagem de 20% de lodo sem aditivo



Fonte: Autoria própria.

Figura 91: Aplicação do blend com porcentagem de 50% de lodo com aditivo



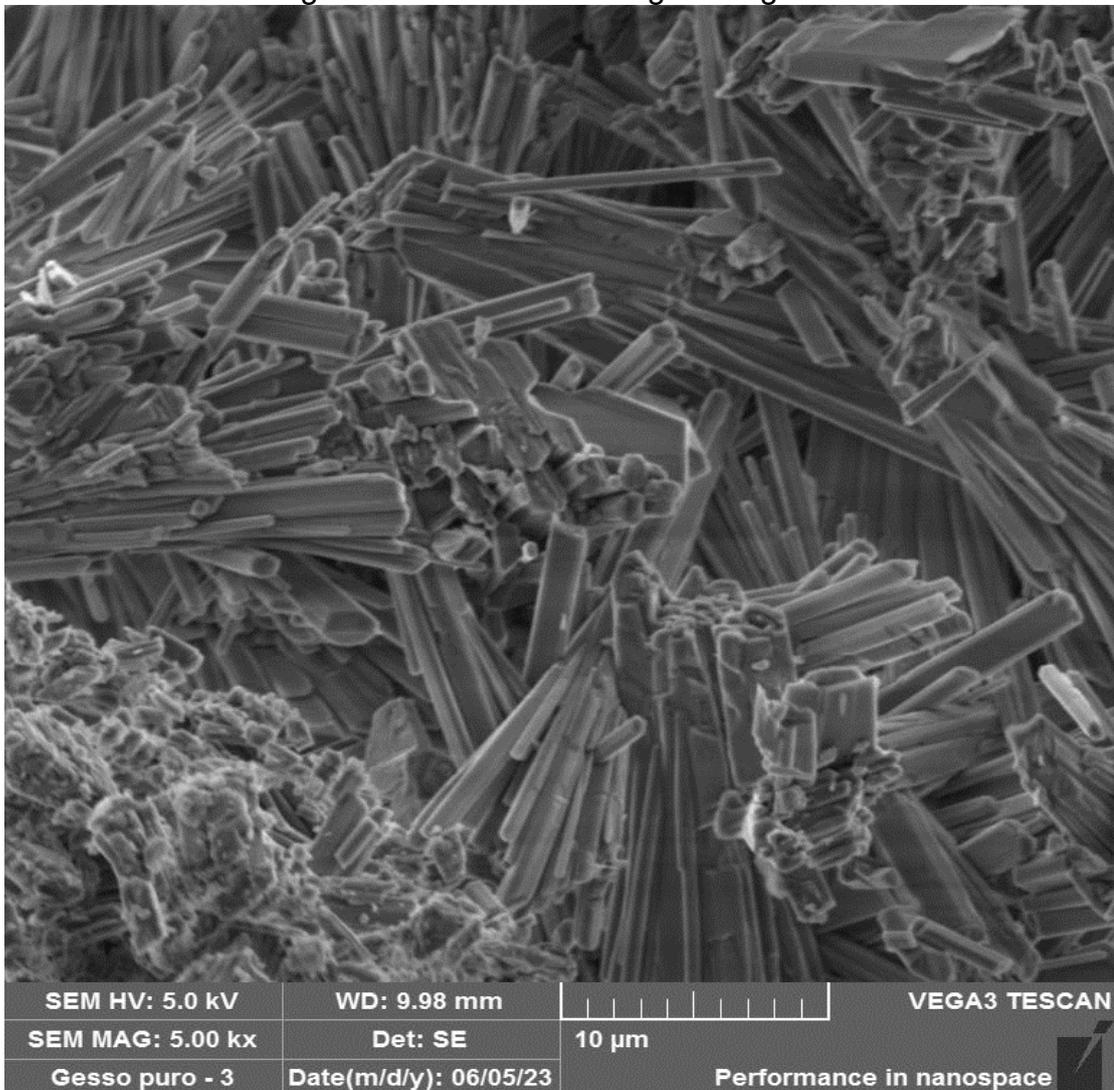
Fonte: Autoria própria.

Para realizar a aplicação foi contratado um aplicador profissional, e de acordo com as suas considerações, o blend apresenta tempo de pega rápido, mesmo com a porcentagem de 50% com aditivo, porém, o rendimento é superior ao gesso comercial, apresenta maior facilidade de aplicação e boa estética na parede.

6.6 Análise da morfologia e avaliação dos elementos presentes nos materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/ Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)

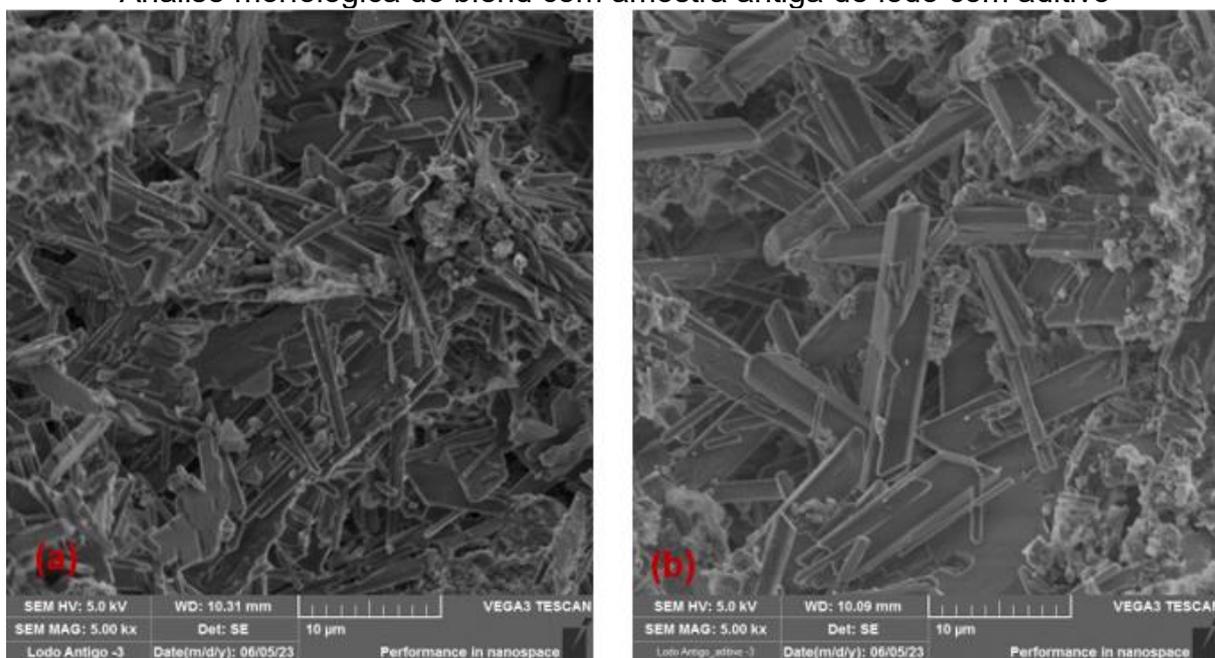
A morfologia do gesso comercial, de *blend's* da amostra antiga do lodo, e da amostra nova são observadas na Figura 92, Figura 93 (a) e Figura 94 (a). A Figura 93 (b) e a Figura 94 (b) mostram a morfologia dos *blend's* das respectivas amostras com a utilização de aditivo.

Figura 92: Análise morfológica do gesso



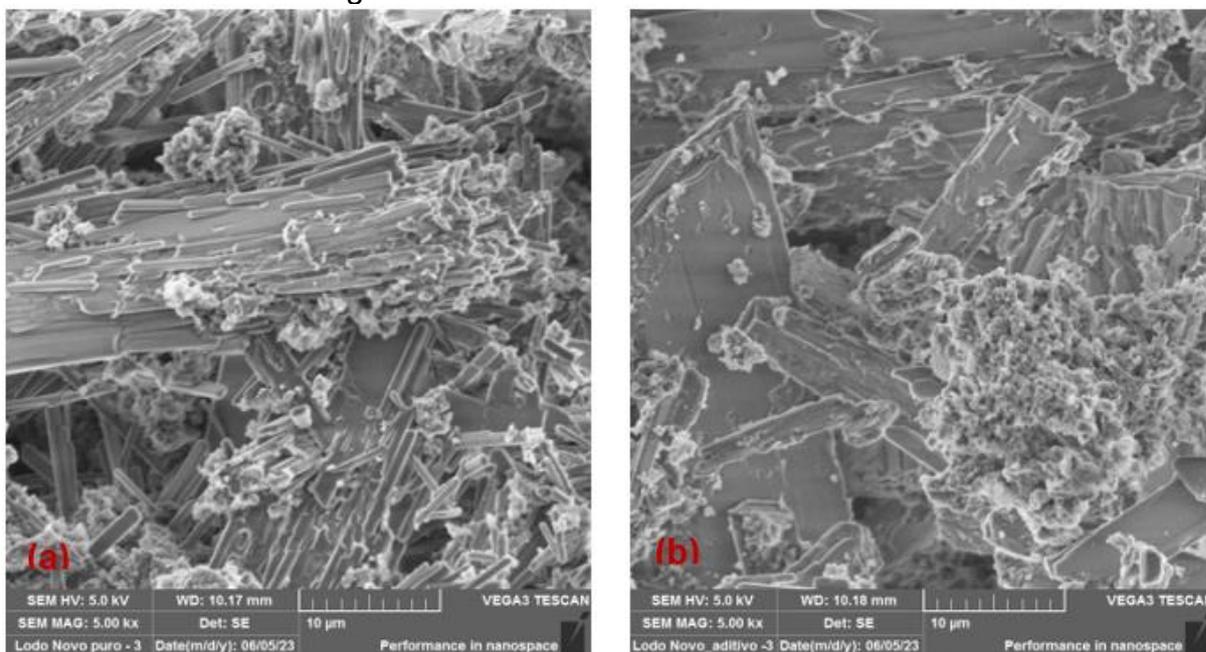
Fonte: Autoria própria.

Figura 93: (a) Análise morfológica do blend com amostra antiga de lodo puro. (b) Análise morfológica do blend com amostra antiga de lodo com aditivo



Fonte: Autoria própria.

Figura 94: (a) Análise morfológica do blend com amostra nova de lodo puro. (b) Análise morfológica do blend com amostra nova de lodo com aditivo



Fonte: Autoria própria.

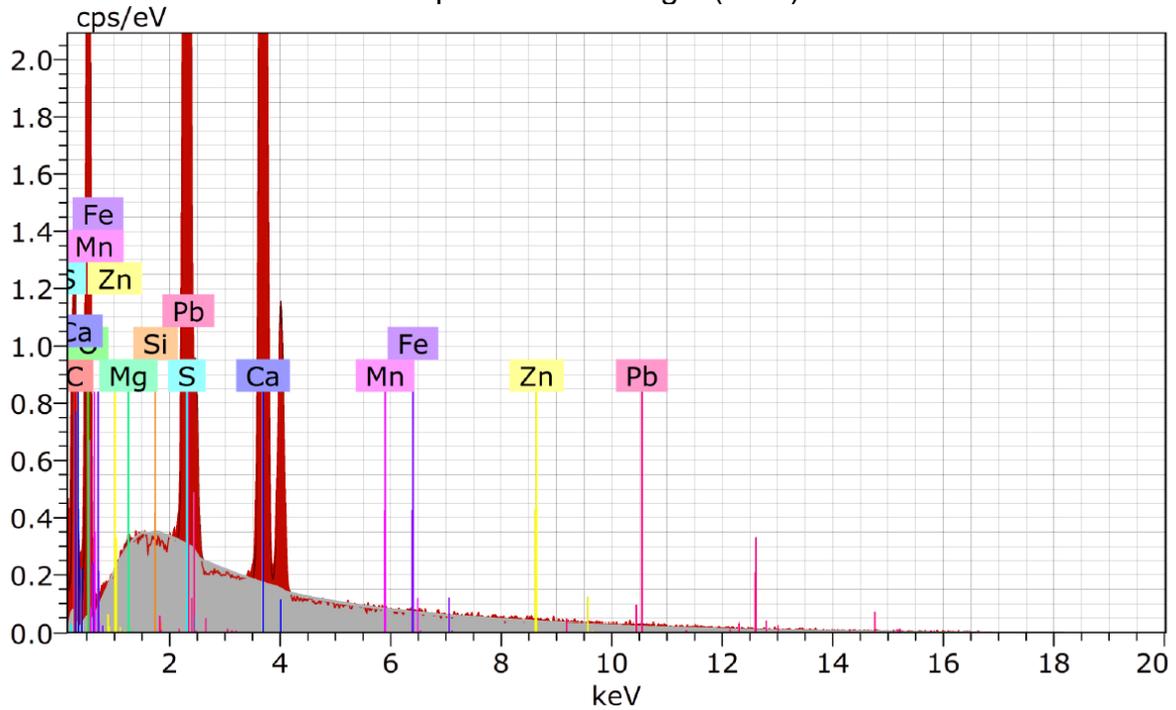
A partir das imagens pode-se observar a formação de agulhas prismáticas e poros em todas as amostras, estando mais evidente a presença de agulhas na

amostra de gesso comercial, e a presença de poros nas amostras de lodo. De acordo com Barbosa et al (2014) os cristais de dihidrato formados na hidratação do gesso tem predominância morfológica de agulhas prismáticas e a ocorrência de poros se deve a quantidade de água que não reage com o pó, a água ocupa o volume entre os cristais, e após a cura do dihidrato evapora, deixando vazios no material.

Nas amostras de *blend* de lodo com a utilização de aditivo, observa-se a formação de placas. De acordo com Kanno (2009), a presença de aditivos ou impurezas (íons ou moléculas) podem alterar a velocidade de crescimento em determinados planos cristalográficos e é a velocidade de crescimento que determina a formação de agulhas ou placas.

Na Figura 95, Figura 96 e Figura 97 observa-se as análises químicas elementar via EDS do gesso puro e das amostras antiga e nova do lodo.

Figura 95: Análise química do Gesso comercial por Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)

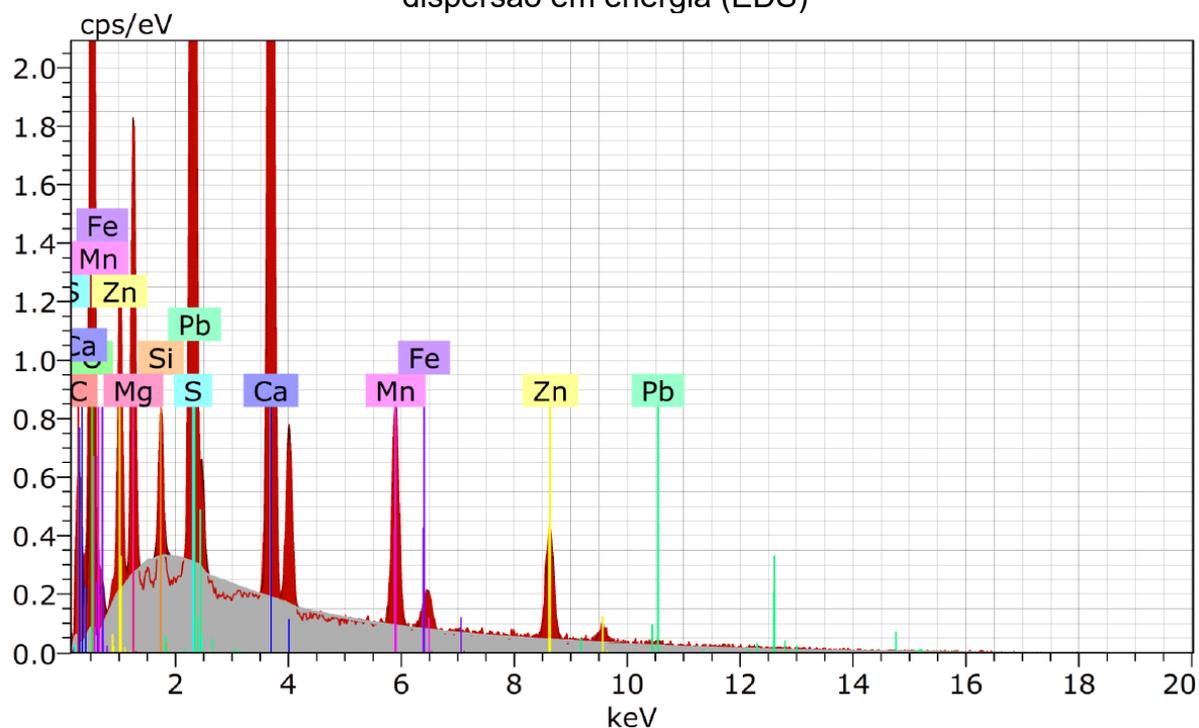


Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	61,12	42,81	56,76	8,80
Oxygen	K-series	47,49	33,27	33,11	5,87
Calcium	K-series	19,47	13,64	5,42	0,60
Sulfur	K-series	13,18	9,23	4,58	0,50
Manganese	K-series	0,03	0,02	0,01	0,03
Zinc	K-series	0,17	0,12	0,03	0,04
Silicon	K-series	0,00	0,00	0,00	0,00
Magnesium	K-series	0,05	0,04	0,02	0,03
Iron	K-series	0,06	0,04	0,01	0,03
Lead	L-series	1,19	0,83	0,06	0,11

Total: 142,74 100,00 100,00

Fonte: Autoria própria.

Figura 96: Análise química do Lodo antigo por Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)

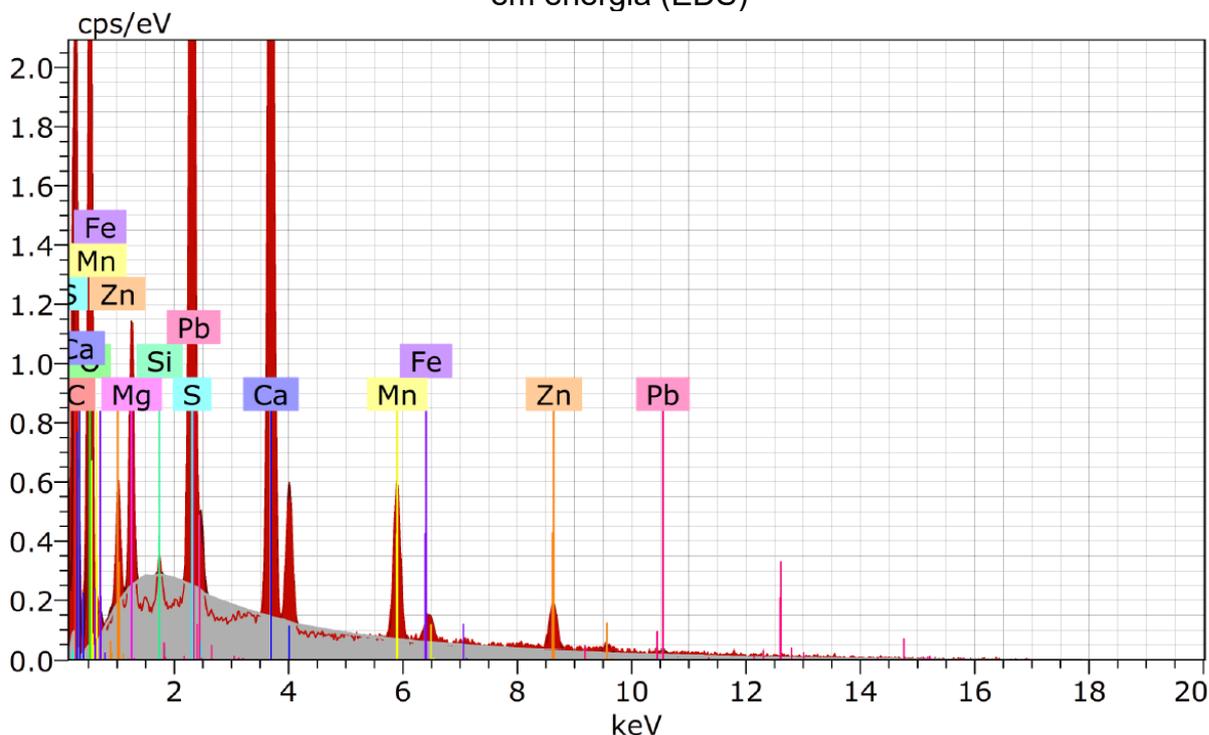


Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	129,46	61,80	73,04	16,70
Oxygen	K-series	53,84	25,70	22,80	6,82
Silicon	K-series	0,01	0,01	0,00	0,03
Calcium	K-series	11,15	5,32	1,88	0,36
Sulfur	K-series	7,19	3,43	1,52	0,29
Manganese	K-series	2,72	1,30	0,34	0,11
Zinc	K-series	3,37	1,61	0,35	0,14
Lead	L-series	1,60	0,76	0,05	0,14
Iron	K-series	0,15	0,07	0,02	0,04

Total: 209,48 100,00 100,00

Fonte: Autoria própria.

Figura 97: Análise química do Lodo novo Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS)



Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	25,20	21,89	33,88	4,78
Oxygen	K-series	50,11	43,52	50,57	6,19
Calcium	K-series	12,82	11,13	5,16	0,41
Sulfur	K-series	8,70	7,56	4,38	0,34
Manganese	K-series	4,82	4,18	1,42	0,17
Zinc	K-series	7,08	6,15	1,75	0,25
Silicon	K-series	0,63	0,55	0,36	0,06
Lead	L-series	1,98	1,72	0,15	0,16
Iron	K-series	0,52	0,46	0,15	0,05
Magnesium	K-series	3,28	2,85	2,18	0,21

Total: 115,15 100,00 100,00

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados as amostras de lodo apresentaram elementos químicos que estão presentes no gesso comercial, observa-se que as amostras de lodo apresentam os elementos constituintes da fase cristalina do gesso; cálcio, oxigênio e enxofre. Entretanto, como o EDS é uma análise qualitativa, há a possibilidade de que o percentual dos elementos que constituem as duas amostras é

diferente. De acordo com Kanno (2009), isso pode influenciar de forma significativa o tempo de pega do material (velocidade da reação de hidratação do hemi-hidrato).

6.7 Análise De Viabilidade Econômica

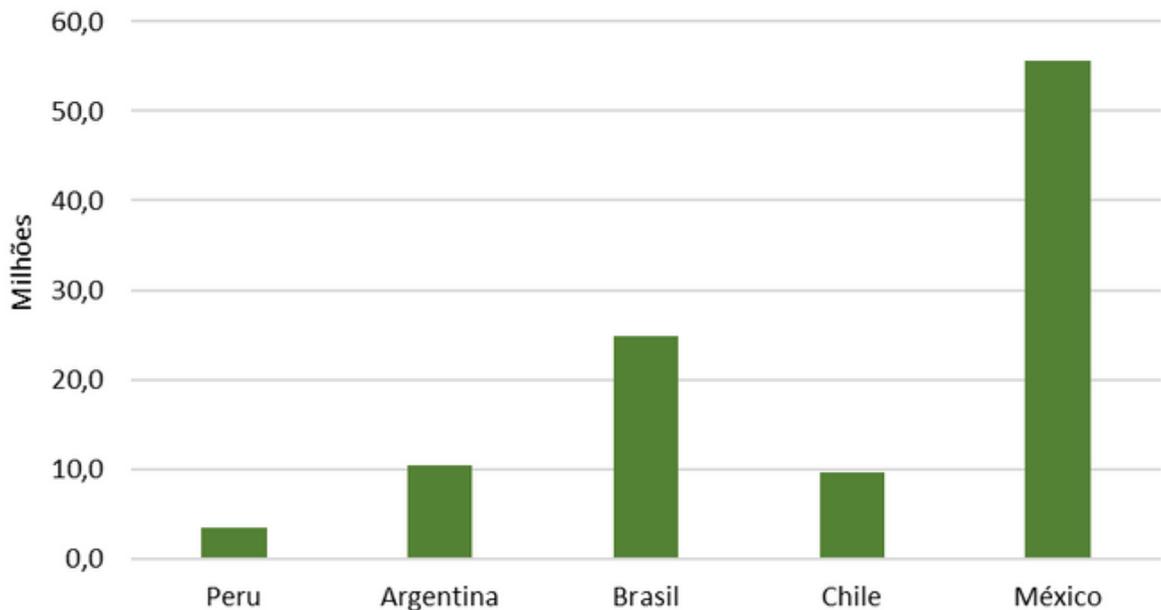
Os resultados a seguir foram obtidos pela consultoria da empresa FEA Junior e mostra uma estimativa de mercado para gesso no Peru. Através desta estimativa elaborou-se o modelo de viabilidade financeira para a produção e comercialização do *blend*.

6.7.1 Mercado de Gesso Global

Em 2022, a produção global de gesso correspondeu a cerca de 150 milhões de toneladas e, no geral, esse volume é relativamente constante ao longo dos anos. A oferta peruana para este segmento é irrelevante para o cenário mundial, correspondendo a cerca de 0,2% da produção global em 2022.

Na América, os países com maior produção de gesso são México e Estados Unidos que inclusive exportam uma parte deste material para alguns países sul-americanos, incluindo o Peru. O México é o principal parceiro comercial do Peru neste segmento e foi responsável, em 2021, por exportar cerca de 78% do gesso a qual o Peru importou do mercado global total, uma quantidade muito relevante e que representou 139 mil toneladas de gesso. A Figura 98 mostra a produção em toneladas entre 2013-2022.

Figura 98: Gráfico da produção em toneladas entre 2013-2022



Fontes: Mineral commodity summaries e Boletín estadístico minero, elaboração FEA Júnior USP.

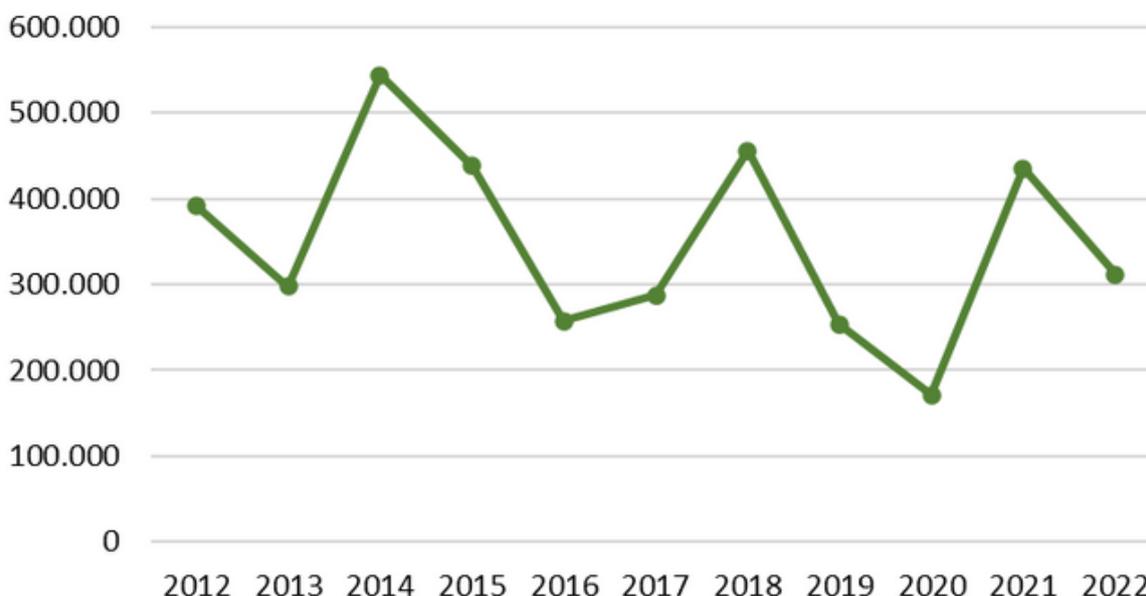
O gráfico acima demonstra que mesmo se desconsiderar o cenário global, a qual a produção peruana representa 0,2% da produção global, os números dos países próximos ainda são bem maiores em volume produzido.

6.7.2 Mercado de Gesso no Peru

O Peru tem uma produção de gesso pouco constante nos últimos anos, ou seja, há grandes disparidades em volume produzido ano a ano. Muito dessas variações, como será demonstrado posteriormente, podem ser explicadas pela influência do mercado externo na formação de expectativas das quantidades que devem ser produzidas, dado que quantidades relevantes de gesso são transicionadas entre o Peru e demais países, sobretudo americanos, seja na importação ou exportação.

Essas questões de mercado externo, junto à presença de produtos substitutos como o cimento Portland, placas de fibrocimento e materiais de aplicação em alvenaria produzidos sob outra base, que afetam diretamente o mercado de gesso, são as explicações mais plausíveis para tamanha variação de produção que existe no segmento do gesso, como pode ser observada na Figura 99.

Figura 99: Produção de gesso no Peru em toneladas



Fontes: Mineral commodity summaries e Boletim estadístico minero, elaboração FEA Júnior USP

Esta inconstância de produção prejudica estimativas de demanda, pois não há como prever, nem mesmo para anos próximos, qual será a produção total de gesso no país, dado que esse número está em constantes alterações.

Como forma de exposição, assim como feito para o mercado global, ao observar o crescimento dos últimos 10 anos, entre 2013 e 2022, o CAGR foi positivo, de 0,5%, mostrando que mesmo ao tentar realizar uma estimativa de crescimento a métrica dependerá muito do ano a qual será utilizado como fim. De acordo com o Empricus (2024), CAGR é a sigla para Compound Annual Growth Rate e trata-se de um indicador que, quando calculado, traz a taxa de retorno necessária para que determinado investimento evolua do saldo inicial para o final em um período determinado.

Mesmo que esses anos sejam subsequentes, já que ao colocar o crescimento composto entre 2013 e 2021, este número será alterado instantaneamente para 4%, uma diferença muito grande entre os CAGR's com a variação de apenas um ano, mostrando a fragilidade de estimativas de crescimento futuro para um mercado tão volátil.

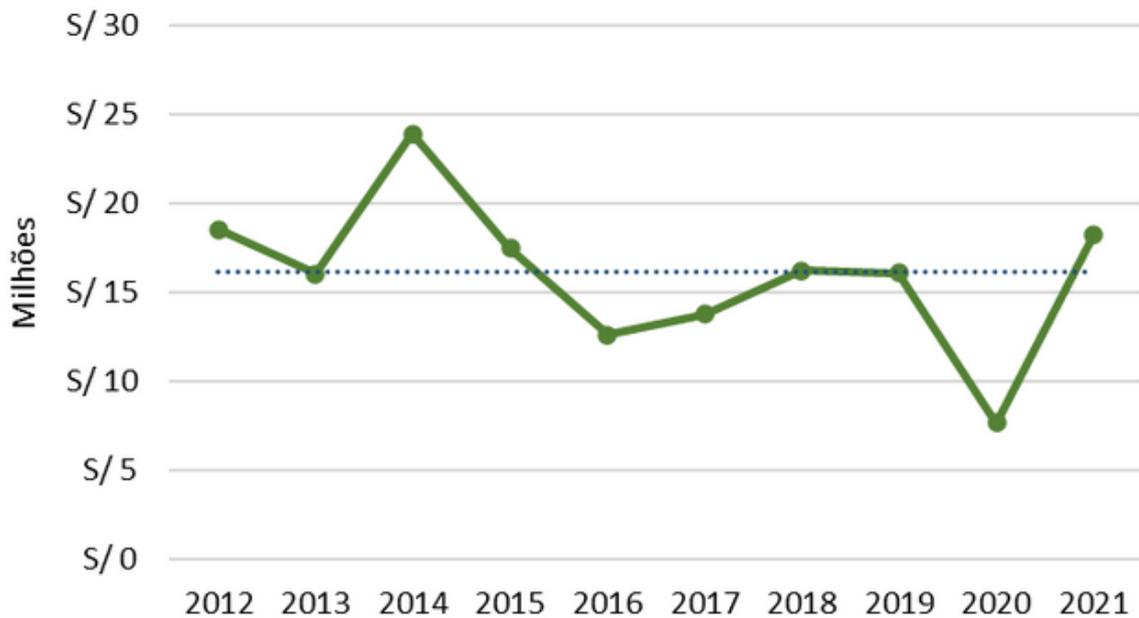
Por isso, uma boa ideia é utilizar a mediana como projeção da produção para os próximos anos, dado que não há como prever quais serão os anos com aumento

de 59% e queda de 44% no ano subsequente, como ocorre entre os anos de 2018 e 2019, sem contar que o coeficiente de variação para esse período de 10 anos analisados é alto, de pouco mais de 30%.

Neste caso, a mediana tende a ser uma boa métrica que estabilizará em partes as grandes variações ano a ano e, no médio prazo, tende a ser observada na produção acumulada, essa produção é de 312 mil toneladas ano a ano.

Esta produção, sem contar as margens utilizadas pelas mineradoras para venda, as margens de transporte, entre outros valores que podem ser embutidos, representa cerca de S/ 16.100.000 ao ano. Para esta estimativa, também se utilizou da mediana, pois há de considerar que a variação desses valores anuais é muito afetada pela produção total que, como visto anteriormente, tem alta taxa de variabilidade ano após ano, fazendo com que seja mais seguro utilizar a mediana para essa padronização do valor total gerado pela produção do gesso. Para citar, o coeficiente de variação dos valores desde 2012 até 2021 não foi igual ao de toneladas produzidos, porém, mesmo assim, alto, de aproximadamente 27%, isso porque diferente da análise de produção total, ao considerar os valores gerados pelo gesso, foi necessário incluir outras variáveis externas além das toneladas produzidas, como o câmbio USD/PEN (Dólar para Novo Sol Peruano) e questões de precificação que não são fixas de um ano ao outro e flutua conforme a disposição de compra do mercado para o gesso. Vale considerar ainda que mudanças no valor da moeda deveriam ser consideradas, no entanto para toda análise foram considerados preços correntes, ou seja, sem retirar os índices de inflação/deflação, por isso não há necessidade de incluir essa outra variável para composição do valor total gerado. A Figura 100 mostra o gráfico de valores da produção de gesso no Peru.

Figura 100: Gráfico de valores da produção de gesso no Peru

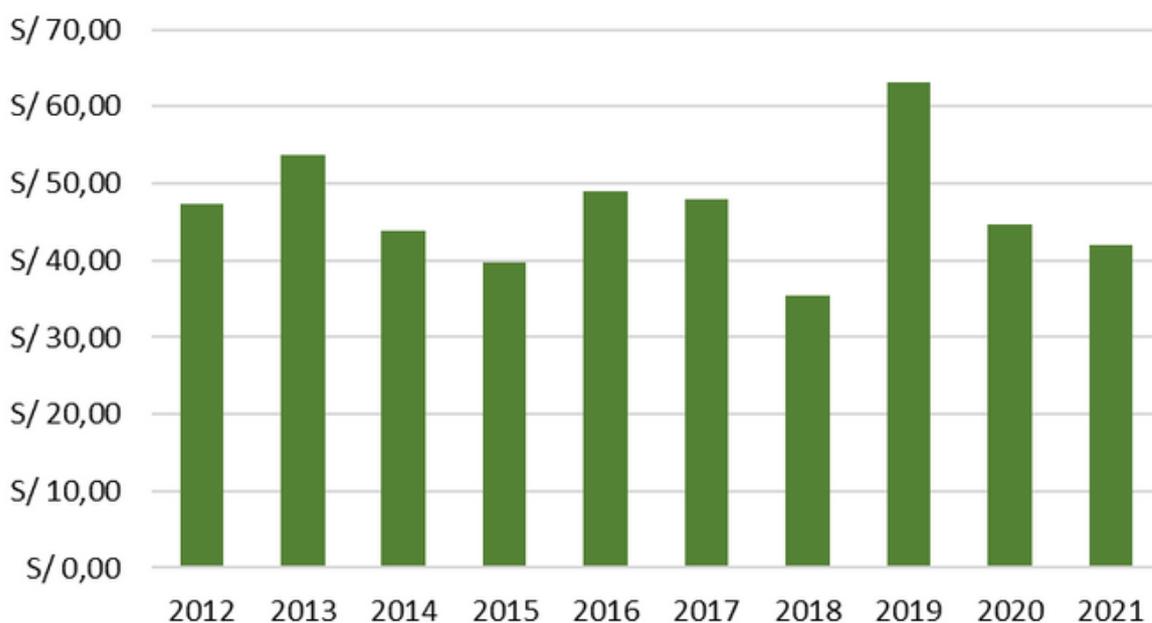


Fontes: Cuadro de Oferta y Utilización - INEI e Boletín Estadístico Minero, elaboração FEA Júnior USP

O gráfico acima demonstra a grande variabilidade dos números no valor total produzido em Novo Sol peruano que, padronizando, obtém-se o valor de S/ 16.100.000.

Desta forma, utilizando as medianas para volume de produção e valor agregado à produção do gesso (tratado como custo para produção, dado que não há margens praticadas sobre esse valor, como citado anteriormente), é possível dizer que o custo de produção da tonelada de gesso foi, em média, S/ 51,63, considerando os dados entre 2012-2021. A Figura 101 mostra o gráfico de custos de produção por tonelada de gesso.

Figura 101: Gráfico de custos de produção por tonelada de gesso.



Fontes: Cuadro de Oferta y Utilización - INEI e Boletín Estadístico Minero, elaboração FEA Júnior USP.

Assim, para que a proposta do projeto de redução dos custos de produção seja um atrativo para o mercado e considerando apenas a produção nacional, sem interferências externas, é necessário que os custos para produção utilizando os rejeitos da Nexa sejam menores que S/ 51,63/ton., somente desta forma o produto cumprirá com a proposta de ser um atrativo por preço.

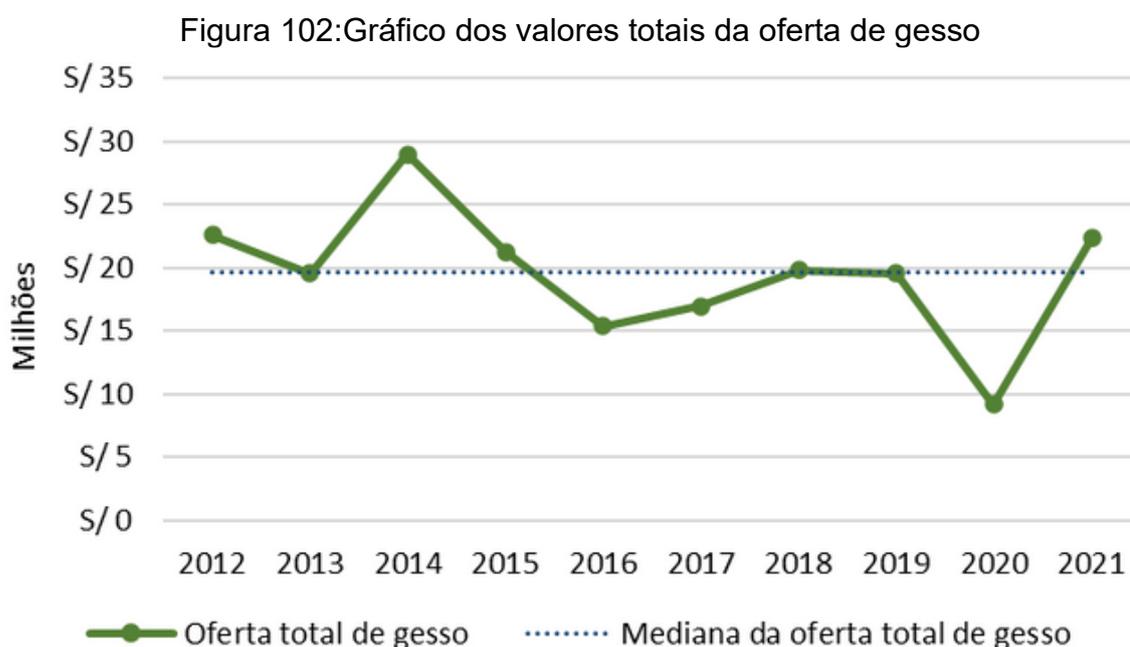
6.7.3 Preços ofertados para o mercado de gesso

Até aqui, foram citados dados acerca do custo de produção do gesso, mantendo a ótica dos custos que o produtor (concorrentes para o projeto/mineradoras) tem para explorar e extrair o gesso, antes de praticar a comercialização para indústria que realizará o beneficiamento desse mineral e o transformará em matéria-prima/artigos para uso nos mais diversos setores.

Neste momento, o foco será explorar as margens utilizadas por esses produtores na comercialização do gesso produzido, ou seja, os preços a qual as mineradoras oferecem o gesso no mercado e que as empresas de beneficiamento pagam por ele. Portanto, ao final teremos o intervalo a qual as mineradoras

consideram atualmente entre custo e receita por tonelada, bem como a disposição a pagar dessas indústrias de beneficiamento, ou seja, potenciais clientes do projeto.

Sem considerar os agentes externos nas formações desses preços, ou seja, desconsiderando importações e exportações e trabalhando exclusivamente com a produção nacional e supondo que toda produção fica restrita ao mercado interno, o gráfico da Figura 102 é formado, com o total ofertado ano a ano pelas mineradoras peruanas.



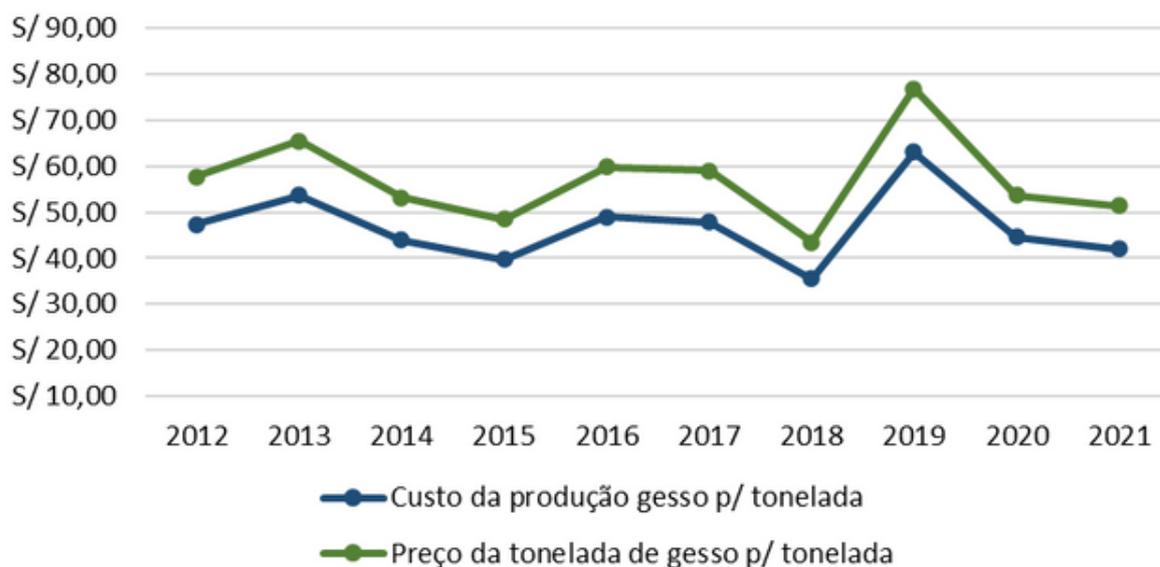
Fontes: Cuadro de Oferta y Utilización, Boletín Estadístico Minero e INEI, elaboração FEA Júnior USP.

Neste caso, a mediana, tratada mais uma vez como total médio dada insegurança na evolução dos valores, é de S/ 19.680.000. Esse valor representa todo o valor movimentado na compra, por parte de empresas de beneficiamento de gesso, de todo o material ofertado pelas mineradoras.

Utilizando, portanto, deste valor médio realizado entre 2012 e 2021, é possível inferir que a venda da tonelada de gesso ocorre ao preço de S/ 63,08. Este valor é 22,16% maior que o custo de produção interno, ou seja, este é o intervalo que as mineradoras trabalham atualmente entre seus custos de produção de gesso e o valor final ofertado à indústria.

Considerando apenas os custos de produção e preços ofertados ano a ano, sem considerar as medianas que estão servindo como base para construção dos valores base, estes intervalos entre custos de produção da mineradora e preços pagos pelas empresas de beneficiamento teria a evolução anual por tonelada mostrada na Figura 103.

Figura 103: Gráfico da evolução dos custos e preços praticados



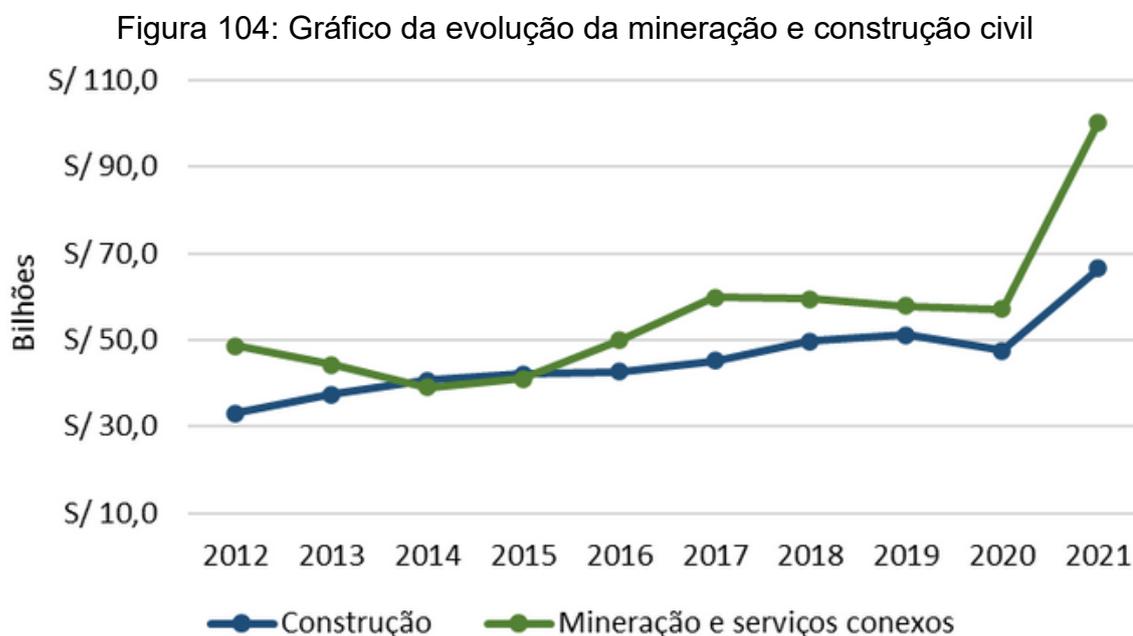
Fontes: Cuadro de Oferta y Utilización, Boletín Estadístico Minero e INEI, elaboração FEA Júnior USP.

A semelhança das curvas demonstra que as margens trabalhadas entre o custo de produção e o valor ofertado são muito parecidas ano após ano, oferecendo maiores insumos para precificação do gesso produzido a partir dos rejeitos da Nexa e entendimento de como os concorrentes internos precifica a produção deles.

6.7.4 Cenário da Construção Civil

O setor de construção é parte fundamental para economia peruana e, assim como a mineração, movimenta uma boa parte do PIB do país. Os referidos setores têm movimentado valores muito semelhantes ao longo dos últimos anos e, em alguns momentos, a construção civil ultrapassa os valores da mineração, demonstrando a grande relevância desse segmento. Juntos, a Construção civil e Mineração representaram aproximadamente 20% de todo o PIB peruano em 2021, maior

representação nos últimos 10 anos, dado que o número vinha se mantendo constante ao longo dos anos, em uma faixa de 14% ao ano (Figura 104).



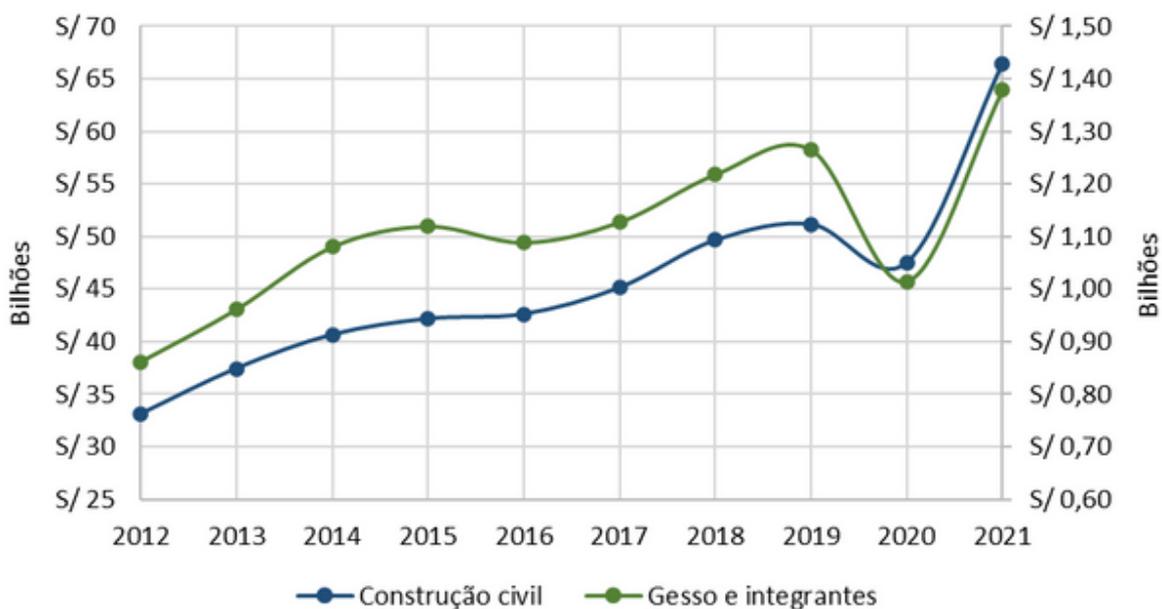
Fontes: Producto Bruto Interno según actividades económicas - INEI, elaboração FEA Júnior USP.

Além de tamanha representatividade do setor de construção para economia peruana, o setor é responsável direto pela demanda de gesso, dado que retém a maior parte da produção do material, seja para acabamentos em edifícios, sistemas de construção a seco (drywall), misturas de alvenaria, entre outras utilidades. Estas utilidades são as mais demandantes de gesso e todas são agrupadas nesses valores de construção civil. O restante da demanda de gesso integra a utilização em itens de decoração, produção de moldes para outros segmentos, como o odontológico, entre outras utilidades que têm pouca relevância para o produto total de gesso que é concentrado nas atividades anteriores.

Para demonstrar tamanha relevância do mercado de construção civil para demanda de gesso, é possível observar as curvas do produto gerado por esses dois segmentos nos últimos anos, sendo que para o gesso há agregação com outros mercados, dado que nas Contas Nacionais peruanas o gesso é agrupado com produtos de natureza semelhantes, no entanto o gráfico da Figura 105 tem correlação

tão relevante que não há como esconder a importância do mercado de construção para o mercado de gesso.

Figura 105: Gráfico do mercado de gesso e construção civil 2012-2021



Fontes: Productos Bruto Interno según actividades económicas - INEI, elaboração FEA Júnior USP.

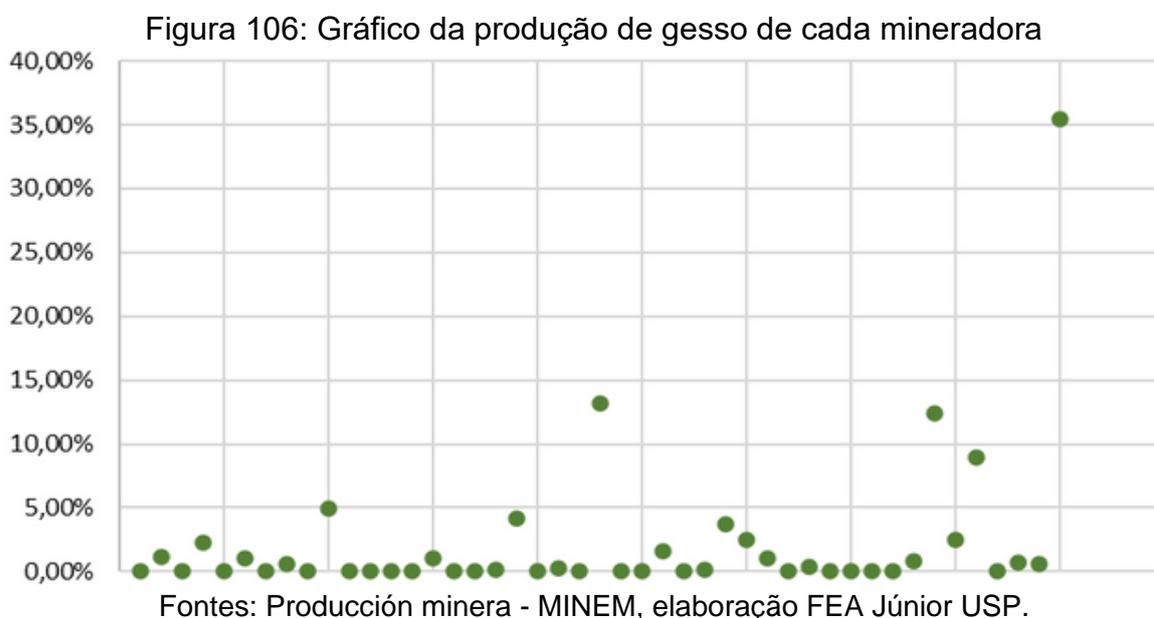
Tais valores têm 79% de explicação entre variável dependente e independente (R quadrado ajustado), neste caso como se 79% do produto gerado pela demanda de gesso fosse direcionada pela produção em construção civil. Desta forma, é possível observar que o mercado de gesso é realmente dependente do mercado de construção civil e esta é uma posição que não será alterada ao longo dos anos, dado que a utilidade do gesso é completamente atrelada à utilização na construção civil.

Este fato destaca que o mercado de destino do gesso produzido pelo projeto é o de construção, pois este tem a maior parte da demanda mediana de 416 mil toneladas anuais, fazendo mais sentido direcionar os esforços de produção para este setor que é mais confiável em termos de demanda e de movimentação de valores, que flutua anualmente entre os S/ 45 milhões.

6.7.5 Concorrência: Mineradoras

Como a proposta do projeto é atuar na produção de gesso, os concorrentes para este mercado são mineradoras que já trabalham no oferecimento do gesso no Peru, além daquelas que realizam exportação do material para o país, no entanto não há como mapear quais são as mineradoras que realizaram essas movimentações internacionais, deixando a análise restrita ao mercado interno peruano.

Como é possível observar no gráfico abaixo, a produção de gesso é muito concentrada em poucas empresas e somente 4 delas já são responsáveis por fornecer aproximadamente 70% de toda produção nacional de gesso entre 2012 e 2022 (Figura 106).



agregaram a produção de cada empresa nos últimos 11 anos, entre 2012 e 2022, e se listar em ordem decrescente de produção, o décimo maior produtor teve um total de 84.425 toneladas, uma média de apenas 640 toneladas produzidas ao mês, um número extremamente baixo para uma mineradora que foi a décima maior produtora nos últimos 11 anos.

Este fato reforça que, atualmente, as maiores probabilidades é de que não tenha muitas mineradoras com foco estabelecido em extrair e ofertar gesso ao mercado e só o fazem por questões de aproveitar a oportunidade de produção no local, mas as plantas são construídas com foco na extração de outros minerais.

Um ponto crítico, no entanto, é que ao estimar a produção que o projeto teria tido nesses 11 anos, mantendo constante os volumes atuais estimados de produção que são 8000 toneladas mensais (considerando 50% do *blend* e 50% do gesso comercial), o volume fornecido ao mercado seria de aproximadamente 1.056.000 toneladas, valor abaixo somente da produção da mineradora que ocupa a primeira colocação de extração neste mesmo período e mais que duas vezes superior à atual segunda colocada. Portanto, analisando a atual distribuição de mercado e a produtividade de cada mineradora, junto à opção de não fazer da extração do gesso uma atividade prioritária para as plantas, este número de 8000 toneladas mensais se demonstra um volume muito agressivo e que não tem validação do volume produzido pelos atuais concorrentes, nem mesmo aqueles estabelecidos a anos neste mercado e que concentram maior parte da produção.

Atualmente, os principais concorrentes para o mercado de gesso e suas respectivas produções em toneladas entre 2012 e 2022, são: Yura S.A (Arequipa) - 1.304.638 toneladas, Juan Paulo Quay S.A.C (Piura) - 485.444 toneladas, Union Andina de Cementos S.A.A (Junín) - 457.792 toneladas e Union Andina de Cementos S.A.A (Ica) - 329.647 toneladas.

Vale destacar, porém, que apesar de serem os concorrentes diretos e mais próximos ao projeto, nem todas essas empresas tiveram produção ininterrupta ao longo desse período, ou seja, é comum entre elas que alguns anos não tenha nem mesmo registros de produção, revelando a inconstância de mercado para essas mineradoras.

Ao verificar sobre a existência de subsidiárias diretas dessas mineradoras que faça beneficiamento do gesso para venda no mercado com maior valor agregado, não foi encontrada nenhuma informação a respeito, sendo portanto um bom indicativo, já que se alguma dessas grandes produtoras tivesse uma subsidiária forte no mercado, uma grande fatia deste segmento já ficaria impossibilitada para o projeto alcançar como cliente, dado que tal empresa seria auto suficiente no que tange à disponibilidade de gesso para transformação em material de construção, drywall, gesso de aplicação ou qualquer outra finalidade observada para o gesso comercial.

A mediana de 416 mil toneladas, tomada como base da demanda anual do mercado peruano, pode ser considerada como uma fatia única de mercado à espera de beneficiamento, ou seja, pode-se considerar que essas 416 mil toneladas são demandadas por empresas que são possíveis clientes do projeto, dado que nenhuma mineradora trabalha na extração e trabalha na agregação de maior valor ao gesso.

6.7.6 Potenciais Clientes

Como já trazido durante a fase reservada aos concorrentes, nenhuma mineradora trabalha com o beneficiamento do gesso próprio para comercialização direta ou de uma subsidiária, uma informação relevante dada que os potenciais clientes retratados para o projeto, são justamente estas empresas que trabalhará o gesso para oferecimento no mercado geral, podendo ser para o mercado empresarial, para construtoras por exemplo, ou com destino ao varejo.

O papel do projeto, portanto, é trabalhar como um intermediário, fazendo a transformação dos resíduos da Nexa em gesso que pode ser oferecido a estas empresas que finalizarão a cadeia de agregação de valor a estes resíduos de gesso, fabricando drywall, gesso cerâmico, gesso em pó, base de cimento, massas de revestimento, entre outros.

Durante toda fase de análise do mercado de gesso no cenário peruano, é possível observar que o mercado é segmentado em poucas empresas que praticam o beneficiamento e comercialização de gesso, por isso a relevante necessidade da construção de uma análise voltada, sobretudo, às variáveis que cercam o mercado de gesso, casos do mercado externo, demanda total, evolução ano a ano da produção,

entre outros, para embasamento acerca da viabilidade do projeto e busca posterior destes clientes para teste com amostras do gesso produzido e conseguinte aprovação de parceria.

O motivo central por não haver muitas informações acerca das empresas que fazem o tratamento de gesso é que atualmente o mercado está concentrado majoritariamente em duas empresas, a Volcan e a Gyplac. Para o mercado de drywall, por exemplo, a revista australiana Global Gypsum noticiou que em 2018 as duas empresas concentravam aproximadamente 90% de todo o mercado de drywall peruano, um número extremamente relevante que deixa à margem todas as demais empresas, com tamanha concentração e que, muito provavelmente, pulveriza os demais 10% entre as outras empresas que não têm poder nenhum de mercado, barganha ou até mesmo demanda para trabalharem apenas com a fabricação de gesso acartonado.

Com isso, a referência aos potenciais clientes será muito ressaltada com base nessas duas empresas, pois além de fornecer placas de gesso acartonado que é o ponto fortíssimo das duas, têm também produtos na construção civil e destinados à indústria de revestimentos.

Para que as empresas que trabalham exclusivamente com gesso de aplicação, mercado tratado aqui em segundo plano, as informações gerais de mercado para gesso podem ainda ser replicadas juntamente à informação de redução de custos do gesso proveniente do projeto, pois estas informações de mercado são do mercado de gesso, em geral.

Além disso, a maioria destas empresas que trabalham com a venda de gesso de aplicação, não têm informações de demanda, disponibilização de políticas de P&D, investimento na área de produção, nem mesmo reports que abordem estas informações, por isso o menor aprofundamento nelas e o foco na Gyplac e Volcan, com o mercado de drywall, dado que estes dados são observáveis e podem ser trabalhados com maior segurança para realização de apontamentos para o projeto. Para termos de citação e para que fiquem mapeadas, as empresas que mais aparecem nos rótulos ao realizar a busca de gesso de aplicação no Peru (de forma empírica) são: Losaro, Martell, Hades e Alpamayo.

6.7.7 Modelo da viabilidade financeira

Para confecção da viabilidade financeira, as principais variáveis consideradas para estimar e projetar custos e receitas foram o preço a qual as empresas estariam dispostas a pagar pelo Lodo e demanda total que poderia ser adquirida durante 5 anos projetados. Para isso, foram considerados três cenários que estressassem essas variáveis principais (Pessimista, Realista e Otimista), permitindo uma visualização ampla e a criação de margens de segurança para downside e upside desses custos e receitas totais, variando ao redor do cenário base, o Realista.

6.7.8 Demanda prevista

Para estimar a demanda total que o mercado terá de Lodo, foi considerado duas segmentações diferentes: a demanda provinda do mercado interno, ou seja, a fatia de mercado que pode ser adquirida que hoje refere-se à produção interna de gesso, e a demanda provinda do mercado de importação que, como relatado anteriormente, tem custos adicionais para as empresas peruanas que praticam a importação e, por isso, haverá maior abertura para inserção do Lodo a estas empresas.

Para o gesso de aplicação, principal alvo do projeto, as demandas projetadas entre os três cenários considerados são mostradas na Figura 107.

Figura 107: Demandas projetadas entre os três cenários considerados

	2024	2025	2026	2027	2028
Gesso de aplicação (t)	12521	15072	17732	20507	23401
Marketshare do mercado total	3,0%	3,6%	4,3%	4,9%	5,6%
Gesso de aplicação (t)	14013	17005	20148	23447	26911
Marketshare do mercado total	3,4%	4,1%	4,8%	5,6%	6,5%
Gesso de aplicação (t)	10788	12792	14883	17064	19338
Marketshare do mercado total	2,6%	3,1%	3,6%	4,1%	4,6%

Fontes: elaboração FEA Júnior USP.

Para chegar a estas conclusões de demanda, o principal foi estimar o marketshare que era possível ser adquirido, dado que a demanda por gesso no Peru é pouquíssimo linear e há grande variação de um ano para o outro, fazendo com que

considerássemos como demanda geral apenas a mediana dos últimos 10 anos como forma de estabilizar esses valores.

A conclusão deste marketshare inicial considerando o mercado interno é resultado da combinação entre a redução de preços em cada cenário proporcional ao marketshare inicial provindo de importações, 16,23% que corresponde à participação das menores empresas na importação de gesso, valor que, para importação, foi replicado nos 3 cenários. Com isso, concluímos a variação de marketshare de 6,53% no cenário pessimista até 13,88% no cenário otimista, passando por 10,48% no cenário base.

Para finalização da projeção de marketshare interno, há o acréscimo de demanda durante os outros 4 anos projetados. Tais valores foram estimados considerando a aquisição de fatia de mercado que, atualmente, está nas mãos de empresas menores que, normalmente, têm maiores custos envolvidos de produção e comercialização. Para isto, foi considerado percentual de mercado variando entre as duas menores empresas, no cenário pessimista, às quatro menores empresas, no cenário otimista. Portanto, o acréscimo anual de demanda (Figura 108) é estimado em 577 toneladas no cenário pessimista, 1048 no cenário realista e 1328 no cenário otimista.

Figura 108: Acréscimo anual de demanda

	2024	2025	2026	2027	2028
Gesso de aplicação (t)	12521	15072	17732	20507	23401
Marketshare do mercado total	3,0%	3,6%	4,3%	4,9%	5,6%
Gesso de aplicação (t)	14013	17005	20148	23447	26911
Marketshare do mercado total	3,4%	4,1%	4,8%	5,6%	6,5%
Gesso de aplicação (t)	10788	12792	14883	17064	19338
Marketshare do mercado total	2,6%	3,1%	3,6%	4,1%	4,6%

Fontes: elaboração FEA Júnior USP.

Para finalizar a demanda, soma-se ao mercado interno adquirido, os valores correspondentes à demanda do mercado de importação que, inclusive, a maior porção da composição de marketshare adquirido para venda de Lodo.

O marketshare inicial considerado foi o mesmo entre os três cenários, de 33,33%, valor que corresponde à demanda de uma empresa exportadora de gesso mexicana. Para os demais acréscimos de demanda (Figura 109), foi considerado o

CAGR do mercado de construção civil no Peru, 4,30%, para os cenários pessimista e realista, e o crescimento de construção na América Latina, 5,00%, para o cenário otimista. Além disso, foi dividido para os demais anos os 16,23% referente às importações realizadas e pulverizadas entre as menores empresas.

Figura 109: Acréscimos de demanda considerando o CAGR do mercado de construção civil no Peru de 4,30%, para os cenários pessimista e realista, e o crescimento de construção na América Latina, 5,00%, para o cenário otimista

	2024	2025	2026	2027	2028
Demanda segmentada - Total geral importação					
Gesso de aplicação (t)	7919	9223	10583	12002	13482
Marketshare do mercado total	1,9%	2,2%	2,5%	2,9%	3,2%
Gesso de aplicação (t)	7919	9278	10706	12205	13779
Marketshare do mercado total	1,9%	2,2%	2,6%	2,9%	3,3%
Gesso de aplicação (t)	7919	9223	10583	12002	13482
Marketshare do mercado total	1,9%	2,2%	2,5%	2,9%	3,2%

Fontes: Elaboração FEA Júnior USP.

6.7.9 Custeio e definição de preço

Para inferência do preço a qual é possível ser cobrado, foi observado o preço que as empresas que distribuem gesso para aquelas que atendem o consumidor final praticam. Com a cotação, foi possível estimar as margens de comércio, ou seja, o lucro médio praticado por empresas do mesmo segmento, e as margens de transporte que são praticadas no setor de gesso e similares.

Fora isso, sobravam ainda custos relacionados à produção, armazenagem, vendas, envase e administração. Tais margens foram replicadas pela média de outros três pares do segmento de atividade, a Yura SA, Pacasmayo e Fábrica Eternit. Neste sentido, tais margens encontradas entre 2021 e 2022 são mostradas na Figura 110.

Figura 110: Margens de custos estruturais no setor de gesso

	2022	2021	Média
CUSTOS ESTRUTURAIS - SEGUNDO OS PARES DE MERCADO			
Custos de vendas e distribuição	3,2%	3,3%	3,2%
Custos de administração	11,3%	10,8%	11,0%
Custos de envase	5,1%	5,2%	5,2%

Fontes: elaboração FEA Júnior USP.

Estes custos, portanto, seriam adicionais à matéria-prima (gesso bruto) para que as empresas realizem a transformação em gesso de aplicação ou afins. A cotação para tonelada de gesso na empresa KRL Solutions foi de S/ 410,00 e, subtraindo todos os custos envolvidos e citados acima, o preço máximo a qual as empresas estariam dispostas a pagar pelo Lodo e realizar a posterior comercialização do gesso de aplicação para o consumidor final, varia entre S/ 50,00 no cenário pessimista, S/ 94,00 no cenário realista e S/ 151,00 no cenário otimista.

Tais valores citados acima já consideram as variações para o preço do gesso bruto, que como evidenciado na análise de mercado tem valores divergentes a depender da origem do gesso, seja do mercado interno pelo preço médio de S/ 63,00 e por importação pelo preço médio de S/ 80,72. Desta forma, pode-se considerar que, há depender da empresa a qual o produto será destinado, o Lodo pode ter variação do preço máximo que as empresas estariam dispostas a pagar, sendo S/ 66,00 no cenário pessimista, S/ 112,00 no cenário realista e S/ 169,00 no cenário otimista.

7 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que com exceção do traço de 30% de lodo sem aditivo, todos os demais traços; 10% e 20% sem aditivo, 30%, 40% e 50% com aditivo Blok Gesso, ficaram dentro da NBR13207/2017 para tempo de pega utilizando o aparelho Vicat.

Quanto a investigação do pH, observou-se que o lodo apresenta alcalinidade, e que esta aumentou ao fazer a lavagem do lodo. De acordo com os resultados do tempo de pega, observou-se que com o aumento da alcalinidade após a lavagem, o tempo de pega ficou ainda menor. Conclui-se que a alcalinidade do lodo é um dos fatores que influenciam no tempo de pega do blend.

Utilizando água em diferentes temperaturas 10°C, 20°C, 25°C e 35°C, observou-se uma pequena variação no tempo de pega, conclui-se, portanto, que a temperatura da água que será utilizada no Peru pode provocar variações nos tempos de pega do blend, entretanto, essa variação não é significativa.

Todos os traços: 10%, 20% sem aditivo; 30%, 40% e 50% com aditivo Blok Gesso, ficaram dentro da ASTM C28/C28M para resistência à compressão, e dentro da NBR 13528-2 e da Norma Europeia EN 13279-1 para resistência a aderência por tração. Apesar do traço de 30% sem aditivo ter atendido a estas normas, houve dificuldades durante os testes devido ao acelerado tempo de pega.

Para o ensaio de aderência não foi utilizada a porcentagem de 10% sem aditivo, pois a porcentagem de 20% apresentou um bom resultado, e o objetivo do projeto é utilizar o máximo de lodo possível.

Na aplicação do *blend* na parede, de acordo com as considerações do aplicador, a porcentagem de 20% sem aditivo apresentou facilidade de aplicação, porém secou rápido, esta secagem rápida de acordo com o aplicador é uma vantagem em relação ao gesso comercial. Com porcentagem de 50% com aditivo Blok Gesso, o aplicador relatou a ocorrência da secagem acelerada, mas afirmou que esta característica facilitou o acabamento em relação ao gesso comercial. Ainda de acordo com as considerações do aplicador, apesar do acelerado tempo de pega, os materiais apresentam maior economia em relação ao gesso comercial, pois devido ao melhor espalhamento desses, gasta-se menos material.

Todos os resultados indicam que tecnicamente é viável o uso do blend de lodo e gesso comercial como revestimento de paredes na construção civil, podendo-se utilizar a porcentagem de 20% sem aditivo e porcentagens de 30% a 50% com aditivo, porém, para o uso em grandes escalas, principalmente para os traços com maiores percentuais de lodo (40% e 50%), é possível que seja necessário ajustar a quantidade do aditivo para a obtenção de melhor tempo de pega.

De acordo com o estudo de mercado observou-se que o mercado mais promissor para direcionar a produção do *blend*, de fato é o de construção civil, trazendo como parâmetro principalmente a correlação entre os dois mercados e o indicativo que a demanda por gesso na construção civil se sobrepõe à soma dos demais mercados que utilizam gesso para outros fins, porém de acordo com os estudos, a aplicação do blend como produto alternativo do gesso não deve limitar apenas ao revestimento para paredes, deve - se considerar também as hipóteses de aplicação na produção de Drywall e na indústria de cimento, assim seria agregado valor ao produto produzido.

Nenhuma mineradora trabalha na extração e trabalha na agregação de maior valor ao gesso, desta forma todos os clientes das possíveis empresas concorrentes seriam também possíveis clientes para produto alternativo.

De acordo com os estudos de viabilidade financeira conclui-se que uma possível comercialização do gesso de aplicação para o consumidor final, varia entre S/ 50,00 no cenário pessimista, S/ 94,00 no cenário realista e S/ 151,00 no cenário otimista, consideram-se as variações para o preço do gesso bruto, que tem valores divergentes a depender da origem do gesso, seja do mercado interno pelo preço médio de S/ 63,00 e por importação pelo preço médio de S/ 80,72.

Conclui-se que, há depender da empresa a qual o produto será destinado, o Lodo pode ter variação do preço máximo que as empresas estariam dispostas a pagar, sendo S/ 66,00 no cenário pessimista, S/ 112,00 no cenário realista e S/ 169,00 no cenário otimista.

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuras pesquisas relacionadas a continuidade deste trabalho, sugere-se o estudo da viabilidade da utilização do lodo em produtos cimentícios, pois nos estudos de mercado do gesso, observou-se o uso de gesso neste segmento.

Sugere-se uma investigação sobre a composição do lodo e sua influência na cor que o lodo apresenta. Investigar também possíveis influências a longo prazo em aplicações de tinta em revestimentos executados com o *blend*.

Sugere-se também o estudo da viabilidade de produção de placas de *drywall* com a utilização do *blend* desenvolvido neste trabalho, a produção do *drywall* poderá utilizar uma grande quantidade do lodo e agregar valor ao mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Relatório de Segurança de Barragens**. Acesso em julho de 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-de-seguranca-de-barragens-aponta-reducao-de-35-no-numero-de-barragens-com-situacao-preocupante>>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C28/C28M-10: standard specification for gypsum plasters**. Pennsylvania, 2015.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR TRANSFORMAÇÃO DE NÃO METÁLICOS. **Cimento, Cerâmica Vermelha, Cerâmica de Revestimento, Louças Sanitárias e de Mesa, Vidro, Cal, Gesso e Fertilizantes**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. Brasília – DF, 2012.

ARAGÃO, M.M; **Materiais de construção II – Aglomerantes – Gesso: especificações e propriedades**. Acesso em julho de 2023. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/gesso.pdf>>

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F. e BORGES, L. E. P. (2004). **Variedades Mineralógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso**. In.: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Anais. Florianópolis, 2004.

BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. D.; BASTOS, F. D. F. Gipsita. In: BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. D.; BASTOS, F. D. F. **Rochas e Minerais Industriais**. [S.I.]: CETEM, 2005. p. 449-470.

BARBOSA. A. A.; FERRAZ. A. V.; SANTOS.G. A. **Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe**. Instituto de

Pesquisa em Ciência dos Materiais – IPCM. Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro. Juazeiro – BA, 2014.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. **Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica**. 2 Ed. São Paulo: Makron Books, São Paulo – SP, 2000.

BORGES. T.C. **Levantamento do Estado da Arte em Pesquisas Dedicadas a Destinar Rejeito e/ou Estéril a Novos Materiais de Construção Civil**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, curso Engenharia de Minas. Araxá – MG, 2021.

BRASIL MINERAL. **As maiores Empresas do Setor Mineral: Nexa**. Acesso em julho de 2023. Disponível em: <<https://www.brasilmineral.com.br/maiores/nexa>>.

CANUT. M. M. C.; GOMES. A. M.; VASCONCELOS. W. L.; JACOMINO. V. M. F. **Avaliação da Substituição do Gesso pelo Resíduo Fosfogesso como Insumo na Construção Civil**, p. 3177-3186. In: *61º Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, 2006. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-0357

CARVALHO. K. Q.; A. ERBS.A.; NAGALLI. A, V. MYMRINE. V. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado**. Associação Brasileira de Cerâmica. São Paulo – SP, 2015.

CIPRIANO. P.B.; GALDINO, T.S.G.; SÁ, C.S. **Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado**. Revista Matéria, v.26, n.3, 2021.

DEDAVID. B. A.; GOMES. C. I.; MACHADO. G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2007.

DIN EN 1168:2005-08. **Produtos de concreto pré-moldado**. Alemanha, 2005.

DIÓGENES. A. G. **Estudo do Comportamento de Argamassas de Revestimento com Areia de Britagem da Região Metropolitana de Fortaleza**. Departamento De Engenharia Estrutural E Construção Civil. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil: Estruturas E Construção Civil. Fortaleza – CE, 2016.

ECONSULT. **A Importância da Viabilidade Econômica para o sucesso empresarial**. Acesso em abril de 2024. Disponível em: <<https://econsult.org.br/blog/viabilidade-economica/>>.

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, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 207-221, out./dez. 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre – RS, 2018.

FGV Jr. **O que é Viabilidade Financeira e como ela é avaliada**. Acesso em abril de 2024. Disponível em: <<https://fgvjr.com/blog/o-que-e-viabilidade-financeira-e-como-ela-e-avaliada>>.

FINOTTI. F.P. **A Aplicabilidade de Projetos Financeiros na Contabilidade das organizações**. Pró-reitora De Graduação, Escola De Gestão E Negócios, Curso De Ciências Contábeis. Goiânia – GO, 2023.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas S/A, 2002.

GOLDENBERG, Mirian. **A arte de pesquisar**. Rio de Janeiro: Record, 1997.

KANNO. W.M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho.** Tese Dr. Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de S. Paulo, S. Carlos, SP (2009).

KOSLOWSKI, T.; LUDWIG, U. **Retardation of Gypsum Plaster with Citric Acid: Mechanism and Properties.** In: THE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF GYPSUM AND GYPSUM PRODUCTS, 1983, Atlanta. Anais. Atlanta: ASTM Committee C-11, 1983. p. 97- 104.

LIBRELOTTO. L. I.; FERROLI. P. C. M. **Gesso.** Acesso em julho de 2023. Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/>>.

LIRA. B. B.; NASCIMENTO. C. B. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE, 2008.

LOSSO.M.; VIVEIROS.E. **Gesso Acartonado e Isolamento Acústico: Teoria Versus Prática no Brasil.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo – SP, 2004.

MARTIN, L. M., MARQUES, K. M., CASTRO, J. A. D., PEIXOTO, R. A. F., & MENDES, J. C. (2023). Argamassas Isolantes Térmicas Produzidas com Resíduos. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 14(00). João Pessoa – PB, 2023. <https://doi.org/10.46421/sbta.v14.4764>.

MARTINS, Letícia Matias. **Argamassas isolantes térmicas para revestimento com resíduos da mineração e siderurgia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto - MG, 2022.

MORAES, S.L.; MOTTA, F.G.; MASSOLA, C.P.; SACCOCCIO, E.M.; CABRAL JÚNIOR, M. **Rejeitos de mineração: Um olhar do cenário brasileiro - Parte I: Cadeia produtiva.** In: 18º SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO. São Paulo - SP, 2017.

NBR 12128. **Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso.** ABNT, Rio de Janeiro – RJ, 2019.

NBR 12129. **Gesso para construção civil.** ABNT, Rio de Janeiro – RJ, 2019.

NBR 13207. **Gesso para construção civil - Requisitos.** ABNT, Rio de Janeiro – RJ, 2023.

NBR 13528 - 2. **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 2: Aderência a substrato.** ABNT, Rio de Janeiro – RJ, 2019.

NTP 334.188 – NORMA TECNICA PERUANA. **YESOS. Material para juntas para placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.** Lima – Peru, 2016.

NETO, M. L.Q.; MEDEIROS, M. K. S.; FLORÊNCIO, F.D. C.; JÚNIOR, P. L. S. **Uso de Resíduos da Mineração de Scheelita em Argamassas de Assentamento e Revestimento.** VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB. Campina Grande – PB, 2016.

NEXA RESOURCES. **Quem somos.** Acesso em julho de 2023. Disponível em:<<https://www.nexaresources.com/quem-somos/>>

NORMA EUROPEA - EN 13279-1. **Yesos de Construcción y Conglomerantes a Base de Yeso para la Construcción.** Espanha, 2014.

OLIVEIRA. A. **Gipsita: O que é?** Acesso em julho de 2023. Disponível em:<<https://lampejocientifico.com.br>>.

ORLANDO. G. O.; MORAIS. L.; BONSEMBIANTE. F. T.; LERMEN.R.T.; SILVA. R. A. **Argamassa para Revestimento Decorativo com Pigmento Amarelo à base de Óxido de Ferro Recuperado da Drenagem Ácida de Minas.** Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo – RS, 2021.

PEREIRA.D. S. S. **Desenvolvimento de Sistemas à base de Sulfato de Cálcio para Aplicação em Poços de Petróleo.** Programa de pós-graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 2019.

PEREIRA.K. S; PINHEIRO.E.C.N.M. **Utilização de gesso (liso) como revestimentos de paredes de alvenaria comparado a argamassa cimentícia convencional.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.11, p. 109449-109467. Curitiba – PR, 2021.

PORTO, M.L.R. **A reciclagem e a reutilização com o reaproveitamento do gesso.** Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco. São Luís – Maranhão, 2020.

ROCHA. A. S.; LIMA. C. S.; PEREZ. S. M. **Aplicação do Resíduo de Gesso da Construção Civil para Correção da Acidez do Solo.** Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Química da ETEC Trajano Camargo. Limeira – SP, 2021.

ROCHA.C.A.L. O Gesso na indústria da Construção Civil: Considerações Econômicas sobre utilização de Blocos de Gesso. Dissertação submetida à UFPE para obtenção de grau de mestrado. Recife – PE, 2007.

RODRIGUES, W.C. **Metodologia científica.** Rio de Janeiro: FAETEC, 2007.

SILVA. A. P. **Determinação das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Gesso Reforçados com Polímeros e Fibras Naturais.** Universidade Federal Do Vale Do São Francisco Curso De Pós- Graduação Em Ciência Dos Materiais. Juazeiro – BA, 2018.

SILVEIRA. M.D. **Utilização de Resíduos de Mineração na Construção Civil.** Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Curso de Especialização em Construção Civil. Belo Horizonte – MG, 2015.

TASCA, J. E. **Uma abordagem para a seleção de um quadro teórico para a avaliação de programas de treinamento.** Journal of European Industrial Training, v. 34, n. 7, p. 631- 655,2010.

TAVARES. C. **A importância do estudo de viabilidade econômica.** Acesso em fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://ctavares.com.br/a-importancia-do-estudo-de-viabilidade-economica/>>.

VELHO. J.; GOMES.C.; RAMARIZ. C. **Minerais Industriais.** Universidade de Aveiro, 591 p. Aveiro – Portugal, 1998.