

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com
pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio**

Lucas Eduardo Dornelles

Porto Alegre
2020

LUCAS EDUARDO DORNELLES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARGILOSO
ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO
E HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Dornelles , Lucas Eduardo

Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio / Lucas Eduardo Dornelles . -- 2020.

166 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: Lucas Festugato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. solos artificialmente cimentados. 2. estabilização de solos. 3. pó de vidro moído. 4. cal de carbureto. 5. hidróxido de sódio. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Festugato, Lucas, coorient. III. Título.

LUCAS EDUARDO DORNELLES

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARGILOSO
ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO
E HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração de Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 02 de junho de 2020

Prof. Nilo Cesar Consoli
Phd. pela Concordia University
Orientador

Prof. Lucas Festugato
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luizmar da Silva Lopes Júnior (UPF)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Rodrigo Beck Saldanha (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Angela e Mauro, pelo exemplo, apoio, confiança e amor incondicional. À minha irmã Julianni pelo companheirismo e apoio incondicional. Se eu cheguei até aqui neste momento, foi por causa do incentivo e suporte que recebi de vocês ao longo de todo esse caminho. Sou muito grato a Paola, pela recepção, convívio e pelo apoio durante o ano que morei em Porto Alegre.

Agradeço imensamente meu professor e orientador Nilo Cesar Consoli, não somente pela orientação, mas pela confiança depositada em mim, e por todo apoio e conhecimentos transmitidos. Agradeço também ao meu coorientador Lucas Festugato, pelo apoio e suporte para a realização desta pesquisa.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, que contribuíram de forma significativa para a minha formação.

Aos meus amigos e colegas, alguns em especial. À Laís, uma das primeiras pessoas com quem conversei no primeiro dia de aula do PPGEC. Agradeço pelo apoio, suporte emocional, ajudas em planilhas e gráficos e também por ter compartilhado diversos momentos do mestrado comigo, sejam eles ensaios de laboratórios, viagens para eventos, jantares no apartamento da Érico Veríssimo ou participações em competições de Mecânica das Rochas. À Brenda, também pelo apoio, pelos estudos conjuntos em momentos críticos, pela parceria nas idas à Lajeado para triturar, moer e peneirar garrafas, e pelos diversos momentos que compartilhamos, seja em Porto Alegre, Santa Cruz do Sul ou nas viagens para eventos. À Guilherme, também pelo apoio e companheirismo, pela ajuda prestada através de mensagens e áudios, pela parceria nos trabalhos e estudos em grupo na Av. Maryland ou a distância, enfim, sou muito grato. Uma das melhores sensações da vida é ter a certeza de que você pode confiar em alguém. Sou eternamente grato por ter convivido com vocês nesses dois anos de mestrado. Sem dúvidas, o porto se tornou mais alegre com vocês. Agradeço também Aziz, Gustavo, Lukas e demais colegas, pelos diversos momentos vividos e compartilhados durante o mestrado.

Aos amigos e ex-colegas dos tempos de UFSM, em especial à Desirre, Marina, Bethania e Débora. Por mais que o tempo e a distância possam nos afastar, pude contar com o apoio de vocês em diversos momentos do mestrado e por isso e muito mais sou grato.

Aos mestrandos e doutorandos do LEGG pela ajuda e apoio prestados, em especial à Mariana, Helena, Vinícius, Hugo e Mozara. Agradeço também os alunos de iniciação científica Guilherme e Thales, que me auxiliaram em algumas etapas desta pesquisa.

Aos colaboradores do LATEC e ao professor João Rodrigo Guerreiro Matos, por terem disponibilizado o espaço da Univates para realização de uma etapa do meu protocolo experimental.

À empresa Geobrugg, em especial Maria Teresa Soares e Felipe Gobbi, pelo apoio e patrocínio para participar das edições do Rockbowl em Salvador e Foz do Iguaçu. Sou muito grato por tudo que a empresa me proporcionou desde nosso primeiro contato, lá em 2016 no Cobramseg de Belo Horizonte. Sem dúvidas, vocês são muito especiais para mim e são determinantes na minha formação.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para eu chegar até aqui.

*“...You can break rocks
You can be a master
Don't wait for luck
Dedicate yourself and you can find yourself...”*

RESUMO

DORNELLES, L.E. **Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Em muitas regiões, a presença de solos expansivos, solos colapsíveis ou solos com baixa capacidade de suporte resultam em condições geotécnicas desfavoráveis para a implantação de uma obra de engenharia. Nestes casos, algumas técnicas de estabilização podem ser aplicadas para evitar mudanças radicais nas características do projeto, contornando as condições desfavoráveis. As técnicas de estabilização química mais difundidas são baseadas na utilização de cimento Portland. Entretanto, a produção de cimento pode implicar em elevados custos, emissões de gases, alta demanda energética e consumo de recursos naturais. Neste panorama, a utilização de materiais alternativos surge como possibilidade de um desenvolvimento mais sustentável em obras geotécnicas. Um dos setores com grande potencial de aplicação é o dos resíduos originados a partir de processos industriais e/ou domésticos, como o pó de vidro e a cal de carbureto. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de um solo residual argiloso com adição de diferentes teores de pó de vidro moído e cal de carbureto, estudado em misturas com diferentes pesos específicos aparentes secos. Além disso, avaliou-se a inclusão do ativador alcalino hidróxido de sódio e a estabilização do material somente com adição de cal de carbureto. A estabilização foi avaliada através da moldagem de corpos de prova e posterior realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e ensaios de rigidez inicial. Optou-se por avaliar os tempos de cura dos corpos de prova de sete e 28 dias e avaliar duas temperaturas distintas de cura (23°C e 40°C), de modo a analisar o efeito da cura acelerada no comportamento mecânico das amostras em um curto prazo. Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam que o solo estudado pode ser estabilizado com adição de materiais alternativos como o pó de vidro e a cal de carbureto, com a obtenção de melhores resistências e rigidezes. Além disso, a elevação da temperatura de cura das amostras permitiu uma melhora considerável no comportamento mecânico das amostras. Por outro lado, a adição de NaOH não propiciou um melhor comportamento às misturas conforme esperado.

Palavras-chave: *solos artificialmente cimentados; estabilização de solos; pó de vidro moído; cal de carbureto.*

ABSTRACT

DORNELLES, L.E. **Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In many regions, the presence of expansive soils, collapsible soils or soils with low support capacity result in unfavorable geotechnical conditions for the implementation of an engineering work. In these cases, some stabilization techniques can be applied to avoid radical changes in the characteristics of the project, bypassing the unfavorable conditions. The most widespread chemical stabilization techniques are based on the use of Portland cement. However, the production of cement implies high costs, gas emissions, high energy demand and consumption of natural resources. In this scenario, the use of alternative materials appears as a possibility for a more sustainable development in geotechnical works. One of the fields with great potential for application is the use of waste originated from industrial and/or domestic processes, such as glass powder and carbide lime. Thus, this work aims to evaluate the stabilization of a residual clay soil with the addition of different contents of ground glass powder and carbide lime, studied in mixtures with different dry specific weights. In addition, it was evaluated the inclusion of the alkaline activator NaOH, such as the stabilization of the material only with the addition of carbide lime. Stabilization was evaluated by molding specimens and later carrying out splitting tensile, unconfined compression strength and initial stiffness tests. It was decided to evaluate the curing times of the specimens of seven days and 28 days and to evaluate two different curing temperatures (23° C and 40° C), in order to evaluate the effect of accelerated curing on the mechanical behavior of the samples in a short term period. The results obtained in this study confirm that the studied soil can be stabilized with the addition of alternative materials such as glass powder and carbide lime, with better strengths and rigidities. In addition, the increase of the curing temperature allowed a considerable improvement in the mechanical behavior of the samples. On the other hand, the addition of NaOH did not provide a better behavior to the mixtures as expected.

Key-words: *artificially cemented soils; soil stabilization; ground glass powder; carbide lime.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	SOLOS RESIDUAIS	26
2.1.1	Origem e formação dos solos residuais	27
2.1.2	Mineralogia	28
2.1.3	Classificações de solos residuais	30
2.1.4	Solos tropicais	32
2.1.5	Metodologia MCT	36
2.1.6	Classificação MCT-M	37
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	37
2.2.1	Estabilização de solos com adição de cimento.....	39
2.2.2	Estabilização de solos com cal	42
2.2.3	Solo com adição de cal e pozolana.....	44
2.3	VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE CAL E POZOLANA	44
2.3.1	Efeito da adição de pozolana.....	45
2.3.2	Efeito da adição de cal.....	46
2.3.3	Nível de compactação da mistura	47
2.3.4	Relação entre Porosidade e os Teores Volumétricos de Cimento, Cal e Ligante	48
2.3.5	Umidade de moldagem.....	51
2.3.6	Condições de cura	53
2.4	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	57

2.4.1	Vidro.....	57
2.4.2	Aplicações de vidro em solos finos.....	62
2.4.3	Cal de carbureto.....	63
2.5	ATIVAÇÃO ALCALINA	64
2.5.1	Química das soluções alcalinas ativadoras.....	66
2.5.2	Precursores	68
2.5.3	Hidróxido de Sódio (NaOH)	68
2.5.4	O efeito do tempo e da temperatura de cura.....	69
3	MATERIAIS	71
3.1	SOLO ARGILOSO	71
3.1.1	Caracterização física do solo.....	74
3.1.2	Caracterização química e mineralógica do solo.....	78
3.1.3	Avaliação do potencial de expansibilidade do solo.....	80
3.1.4	Ensaio de compactação do solo e solo com adição de pó de vidro e cal de carbureto 81	
3.2	PÓ DE VIDRO MOÍDO	82
3.3	CAL DE CARBURETO	86
3.4	HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)	89
4	MÉTODOS	90
4.1	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	90
4.1.1	Projeto de Experimento	90
4.1.2	Projeto de Experimento Fatorial 2 ^k	91
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	93
4.2.1	Fase 1 – Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e NaOH	95
4.2.2	Fase 2 – Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e ligantes Alto CaO e Baixo CaO	95
4.2.3	Fase 3 – Solo estabilizado somente com cal de carbureto	96
4.3	DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS	97

4.3.1	Definição dos teores de pó de vidro e cal de carbureto.....	97
4.3.2	Definição das porosidades.....	99
4.3.3	Definição dos tempos e temperaturas de cura.....	99
4.3.4	Definição das concentrações de NaOH.....	100
4.4	DOSAGEM DOS MATERIAIS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA ...	100
4.5	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 102	
4.6	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	104
4.7	ENSAIOS DE PULSO ULTRASSÔNICO.....	105
5	RESULTADOS E ANÁLISES	108
5.1	FASE 1 – SOLO ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO E NaOH.....	108
5.1.1	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	108
5.1.2	Ensaio de Rigidez Inicial.....	117
5.1.3	Relação das variáveis resposta com o índice $\eta/(L_{iv})^k$	122
5.1.4	Relação entre as variáveis resposta.....	126
5.2	FASE 2 – SOLO ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO E LIGANTES ALTO CaO E BAIXO CaO.....	127
5.2.1	Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$	132
5.2.2	Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$	133
5.3	FASE 3 – SOLO ESTABILIZADO SOMENTE COM CAL DE CARBURETO..	134
5.3.1	Ensaio de resistência à compressão simples.....	135
5.3.2	Ensaio de rigidez inicial.....	138
5.3.3	Relação das variáveis resposta em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$	142
5.3.4	Relação entre as variáveis resposta.....	145
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
6.1	CONCLUSÕES.....	146
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	149

REFERÊNCIAS	150
APÊNDICE A –	161
Análise Estatística	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de delineamento da pesquisa	24
Figura 2.1: Ocorrência das camadas de solos tropicais (VILLIBOR; NOGAMI, 2009)	33
Figura 2.2: Ábaco classificatório da MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995)	36
Figura 2.3: Ábaco classificatório da MCT-M (VERTAMATTI, 1988).....	37
Figura 2.4: Relação η x q_u para um solo estabilizado com cimento (CONSOLI <i>et al.</i> , 2009a).....	47
Figura 2.5: Relação η x q_u para um solo estabilizado com cal (CONSOLI <i>et al.</i> ;2009b)	48
Figura 2.6: Relação entre q_u e η /C_{iv} (SCHEUERMANN FILHO, 2019).....	49
Figura 2.7: Relação entre q_u , teor de umidade (w) e peso específico aparente seco (γ_d) para um solo argiloso (MATEOS,1961).....	52
Figura 2.8: Relação entre q_u , teor de umidade (w) e peso específico aparente seco (γ_d) para um solo arenoso (MATEOS, 1961).....	53
Figura 2.9: Tendência de ganho de resistência frente a variação do tempo de cura (SALDANHA,2018; adaptado de DALLA ROSA, 2009).....	54
Figura 2.10: Percentual de cal consumida em diferentes temperaturas de cura ao longo do tempo (LEONARD, 1958).	55
Figura 2.11: Consumo de cal em função do tempo e temperatura de cura para diferentes tipos de cinzas volantes (LEONARD;1958).	55
Figura 3.1: Perfil onde o solo foi coletado.	72
Figura 3.2: Mapa de localização do município de Ijuí no estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2019).....	72
Figura 3.3: Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2006).....	73
Figura 3.4: Grupo São Bento, Formação Serra Geral, Fácies Gramado (CPRM, 2006).....	74
Figura 3.5: Distribuição granulométrica do solo estudado.....	75
Figura 3.6: Ábaco classificatório da MCT.	77
Figura 3.7: Ábaco classificatório da MCT-M.	78
Figura 3.8: Difratoograma do solo estudado.	80
Figura 3.9: Curvas de compactação do solo e do solo com adições.....	81
Figura 3.10: Equipamentos utilizados na trituração e moagem do vidro.	83
Figura 3.11: Pó de vidro moído passante na peneira #200.....	84

Figura 3.12: Distribuição granulométrica do pó de vidro moído.	84
Figura 3.13: Difratoograma do pó de vidro utilizado.	85
Figura 3.14: Aspecto da cal de carbureto após o processo de secagem e peneiramento.	87
Figura 3.15: Distribuição granulométrica da cal de carbureto (SALDANHA, 2018).	87
Figura 3.16: Difratoograma da cal de carbureto (SCHEUERMANN FILHO, 2019).	89
Figura 4.1: Representação de experimentos 2 ² e 2 ³ (SCHEUERMANN FILHO, 2019).	92
Figura 4.2: Exemplo de gráfico de Pareto (Elaborado pelo autor).	92
Figura 4.3: Variação do pH com o teor de cal para o solo com adição de 10% de pó de vidro moído.	98
Figura 4.4: Variação do pH com o teor de cal para o solo com adição de 30% de pó de vidro moído.	99
Figura 4.5: Molde tripartido utilizado para moldagem de corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.	101
Figura 4.6: Ensaio de compressão diametral.	103
Figura 4.7: Ensaio de compressão simples.	104
Figura 4.8: Medição do tempo de deslocamento de ondas de compressão.	106
Figura 4.9: Medição do tempo de deslocamento de ondas de cisalhamento.	106
Figura 4.10: Variação da onda cisalhante no ensaio ultrassônico (Elaborado pelo autor).	107
Figura 5.1: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 23°C.	109
Figura 5.2: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 40°C.	110
Figura 5.3: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 23°C.	110
Figura 5.4: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 40°C.	111
Figura 5.5: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.	111
Figura 5.6: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.	112
Figura 5.7: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.	112
Figura 5.8: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.	113

Figura 5.9: Efeitos principais para q_t	115
Figura 5.10: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_t	116
Figura 5.11: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.	118
Figura 5.12: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.	119
Figura 5.13: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.....	119
Figura 5.14: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.....	120
Figura 5.15: Efeitos principais para G_0	120
Figura 5.16: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para G_0	121
Figura 5.17: Relação entre q_t e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por sete dias.....	123
Figura 5.18: Relação entre q_t e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por 28 dias.....	124
Figura 5.19: Relação entre G_0 e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por 28 dias.....	125
Figura 5.20: Relação entre G_0 e q_t para as amostras moldadas sem NaOH.....	126
Figura 5.21: Relação entre G_0 e q_t para as amostras moldadas com NaOH.....	127
Figura 5.22: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 10% de ligante, aos sete dias de cura.....	129
Figura 5.23: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 10% de ligante, aos 28 dias de cura.....	129
Figura 5.24: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 30% de ligante, aos sete dias de cura.....	130
Figura 5.25: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 30% de ligante, aos 28 dias de cura.....	130
Figura 5.26: Efeitos principais para q_u	131
Figura 5.27: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_u	131
Figura 5.28: Relação entre q_u e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras moldadas com o ligante A.....	133
Figura 5.29: Relação entre q_u e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para amostras moldadas com o ligante A.....	134
Figura 5.30: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 3% de cal.....	136

Figura 5.31: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 6% de cal.....	136
Figura 5.32: Efeitos principais para q_u	137
Figura 5.33: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_u	138
Figura 5.34: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 3% de cal.....	139
Figura 5.35: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 6% de cal.....	140
Figura 5.36: Efeitos principais para G_0	141
Figura 5.37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para G_0	141
Figura 5.38: Relação entre q_u e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$	143
Figura 5.39: Relação entre G_0 e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$	144
Figura 5.40: Relação entre G_0 e q_u	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características físicas do solo estudado.....	75
Tabela 3.2: Índices classificatórios obtidos na Metodologia MCT.....	77
Tabela 3.3: Características químicas do solo estudado.	79
Tabela 3.4: Características físicas do pó de vidro moído.....	84
Tabela 3.5: Composição química do vidro utilizado na pesquisa.	86
Tabela 3.6: Características físicas da cal de carbureto (SALDANHA et al, 2018).....	88
Tabela 3.7: Composição química da cal de carbureto.....	88
Tabela 3.8: Características do hidróxido de sódio.....	89
Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral em kPa.	109
Tabela 5.2: Taxa de variação da resistência à tração por compressão diametral com a adição da solução de NaOH.	114
Tabela 5.3: Resultados de módulo de rigidez inicial (G0) em Mpa.....	117
Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (qu) em kPa.	128
Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (qu) em kPa.	135
Tabela 5.6: Resultado dos ensaios de módulo de rigidez inicial (G0) em MPa.....	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Classificação dos principais tipos de vidro (adaptado de SCHEUERMANN FILHO, 2019).	58
Quadro 2.2: Porcentagem de vidro reciclado no ano de 2010 em diferentes países do mundo (CONTAINER RECYCLING INSTITUTE, 2017).	60
Quadro 4.1: Fatores controláveis adotados no estudo.	93
Quadro 4.2: Fases do programa experimental.	94
Quadro 4.3: Misturas utilizadas na Fase 1.....	95
Quadro 4.4: Misturas utilizadas na Fase 2.....	96
Quadro 4.5: Misturas utilizadas na Fase 3.....	97

LISTA DE SIGLAS

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

CBR – *California Bearing Ratio*

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CPRM – Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem

DRX - Difração de Raios-X

FRX - Fluorescência de Raios-X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICL – *Initial Consumption of Lime*

IEA – *International Energy Association*

IP - Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

ISSMFE – *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*

LACER - Laboratório de Materiais Cerâmicos

LATEC - Laboratório de Tecnologia da Construção

LEGG - Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura, Compactada, Tropical

NBR – Norma brasileira

NG' - Solo argiloso de comportamento não laterítico

PMA – Perda de Massa Acumulada

RCS - Resistência à Compressão Simples

RTCD - Resistência à Tração por Compressão Diametral

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB – *Transportation Research Board*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIVATES – Universidade do Vale do Taquari

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

LISTA DE SÍMBOLOS

η - porosidade (%)

γ_d - peso específico aparente seco (kN/m^3)

B_{iv} – teor volumétrico de ligante

C_{iv} – teor volumétrico de cimento

L_{iv} . teor volumétrico de cal

q_u - resistência à compressão simples (kPa)

q_t - resistência à tração por compressão diametral (kPa)

G_0 - módulo cisalhante inicial (MPa)

w – teor de umidade

t_p – tempo de propagação da onda de compressão (μs)

t_s – tempo de propagação da onda cisalhante (μs)

V_p – velocidade da onda de compressão (m/s)

V_s – velocidade da onda cisalhante (m/s)

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Devido ao seu baixo custo de aquisição e ampla disponibilidade, os solos podem ser considerados um dos materiais de construção mais versáteis existentes. Suas aplicações vão desde elementos de suporte, como em fundações e subleitos rodoviários, até a constituição de estruturas, como em barragens, aterros e muros de arrimo. Em muitas regiões, as condições geotécnicas não são favoráveis para a implantação de uma obra de engenharia. São os casos dos solos expansivos, solos colapsíveis e solos com baixa capacidade de suporte. Nestes cenários, técnicas de estabilização de solos podem ser aplicadas de modo a se contornar tais condições desfavoráveis, sem a necessidade de mudanças radicais nas características do projeto.

O melhoramento das propriedades geotécnicas, seja para aplicação em pavimentação ou em fundações, pode ser obtido com o uso de materiais convencionais como cimento, cales comerciais e materiais granulares. A estabilização química, tradicionalmente empregada com o uso de cimento Portland, caracteriza-se pela adição de agentes cimentantes que irão atuar nos pontos de contato entre os grãos do material. Esta adição permite um aumento na massa específica aparente seca da mistura, um melhor empacotamento das partículas e a redução do índice de vazios. Contudo, a produção de cimento Portland ocasiona elevadas emissões de gases de efeito estufa, além de uma dependência de extração mineral e alta demanda energética.

A utilização de novas técnicas e materiais tem o potencial de contribuir para um desenvolvimento mais sustentável em obras geotécnicas. A reutilização de resíduos, que seriam descartados ou depositados em aterros, tem se mostrado uma alternativa muito eficaz para a introdução de práticas sustentáveis em projetos de engenharia. Além de permitir uma redução do consumo de recursos naturais e a substituição de materiais convencionais como o cimento Portland, tal desenvolvimento permite uma destinação nobre a materiais que acabariam estocados ou descartados em locais inadequados. Neste contexto, identifica-se como potencial a utilização de resíduos provenientes de processos industriais e/ou domésticos, que é o caso do pó de vidro e a cal de carbureto.

O pó de vidro pode ser obtido através da moagem e trituração de vidro de descartes, como garrafas não retornáveis e vidros planos. Já a cal de carbureto é um resíduo da produção de gás acetileno, apresentando hidróxido de cálcio em sua composição. Devido à disponibilidade de sílica em estado amorfo, o pó de vidro apresenta uma atividade pozolânica. Quando finamente moído e em presença de água, a sílica é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos cimentantes. As reações que ocorrem neste processo são denominadas de reações pozolânicas, e elas propiciam o desenvolvimento de materiais com melhores resistências, rigidezes e durabilidades.

Mesmo com diversas aplicações, nem sempre é possível o uso destes resíduos em obras de engenharia. Isso porque as reações pozolânicas são consideravelmente lentas, demandando longos períodos de cura para a formação da cimentação. Assim, existe a possibilidade de aplicações de ativadores alcalinos, como o NaOH e KOH, e a elevação da temperatura de cura, de modo a acelerar as reações e os ganhos de resistência das misturas.

Deste modo, o presente estudo visa avaliar o comportamento mecânico de um solo residual argiloso com adição de pó de vidro moído e cal de carbureto, através de ensaios de resistência à tração e compressão e rigidez inicial. Visa-se também avaliar o efeito do aumento da temperatura de cura e da adição de hidróxido de sódio (NaOH) na aceleração das reações pozolânicas e consequente efeito nas propriedades mecânicas avaliadas. Em adição, objetiva-se também avaliar as misturas estabilizadas com cimentos alternativos com teores distintos de óxido de cálcio (Alto CaO e Baixo CaO) e a avaliação do comportamento do solo estudado somente com adição de cal de carbureto. Dentro de um contexto de desenvolvimento sustentável, a estabilização de solos com pó de vidro e cal de carbureto pode se mostrar uma alternativa viável para construção de camadas de pavimentos rodoviários, proteção de taludes e camada de suporte para fundações superficiais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é a avaliar o comportamento mecânico de um solo residual argiloso estabilizado com pó de vidro moído e cal de carbureto.

Os objetivos específicos estabelecidos nesta pesquisa são:

- Quantificar e qualificar a influência das diferentes variáveis estudadas (teor de pó de vidro, teor de cal de carbureto, tipo de cal, porosidade, tipo de ligante (Alto CaO e Baixo CaO), teor de ligante, tempo de cura e temperatura de cura) no comportamento da mistura quanto à resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e rigidez inicial;
- Avaliar a utilização de cura acelerada (temperatura de cura igual a 40°C) e da adição de hidróxido de sódio (NaOH) para obtenção de melhores resistências à curto prazo;
- Avaliar a influência da adição da cal de carbureto como único aditivo no comportamento das misturas quanto à resistência e rigidez inicial;
- Verificar a possibilidade de correlação entre as variáveis resposta (resistência e rigidez) e à relação entre porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) e a relação entre porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}).

1.3 DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente estudo foi estruturado conforme o diagrama apresentado a seguir.

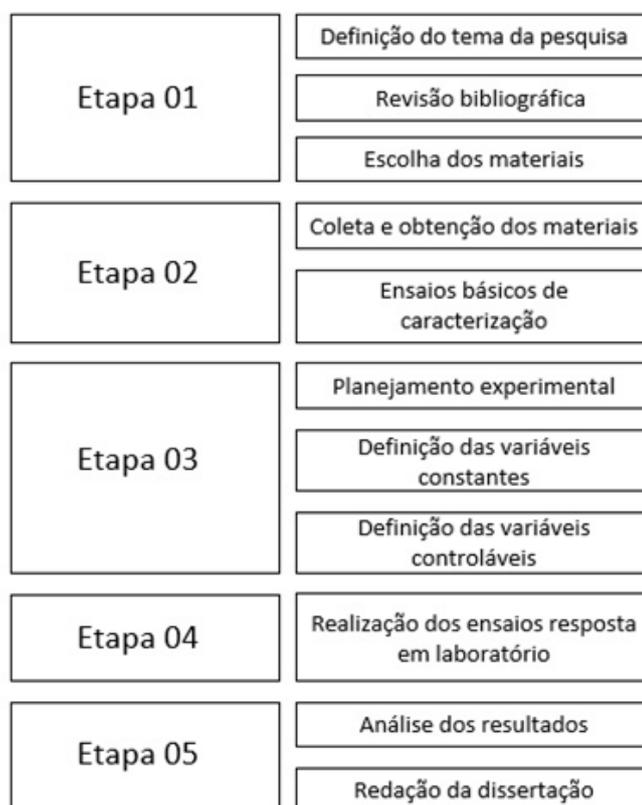


Figura 1.1: Diagrama de delineamento da pesquisa

No capítulo 1, é realizada uma introdução do trabalho, onde se apresenta o problema e a relevância da pesquisa. São apresentados também os objetivos gerais e os objetivos específicos que o estudo visou atingir.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica acerca de solos residuais; estabilização de solos; variáveis que influenciam o comportamento de solos com adição de cal e pozolanas; utilização de resíduos em estabilização de solos; e ativação alcalina de solos.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa. É feita uma caracterização física, química e mineralógica do solo residual argiloso, do pó de vidro moído, da cal de carbureto e do hidróxido de sódio (NaOH).

O capítulo 4 exhibe os procedimentos experimentais utilizados no estudo. São apresentadas as variáveis de interesse, o programa experimental e os métodos utilizados.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados e a análise destes.

Por fim, o capítulo 6 salienta os principais resultados obtidos, com considerações e conclusões acerca do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica acerca dos seguintes temas: solos residuais; estabilização de solos; variáveis que influenciam o comportamento de solos com adição de cal e pozolanas; utilização de resíduos em estabilização de solos; ativação alcalina de solos.

2.1 SOLOS RESIDUAIS

Martínez (2003) relata que um acúmulo de solo residual ocorre quando a velocidade de degradação da rocha é superior ao arraste dos produtos formados a partir desta decomposição. Alguns fatores são determinantes para a velocidade da alteração dos materiais, como temperatura, pluviosidade, natureza da rocha-mãe, vegetação, drenagem e atividade biológica. De acordo com Lambe e Whitman (1979), um perfil de um solo residual pode ser segmentado em três zonas diferentes. São elas:

- a) **Zona superior:** nesta parte do perfil existe um elevado grau de intemperismo, entretanto há também um certo arraste de materiais;
- b) **Zona intermediária:** na parte superior deste segmento é possível identificar um certo intemperismo, ao passo que na parte inferior o intemperismo proporciona uma granulometria variável;
- c) **Zona parcialmente intemperizada:** representa a zona de transição entre o solo residual e a rocha não alterada.

Outras terminologias para classificar os horizontes de solos tropicais podem ser encontradas em Vargas (1953) e Deere e Patton (1971).

Há uma concordância entre diversos autores em relação às características que os solos residuais apresentam, totalmente diferentes daquelas que os solos transportados possuem. O conceito original de solo granular, relacionado ao tamanho das partículas, não se aplica à grande parte dos solos residuais. Estes apresentam um concrecionamento característico, de modo que as agregações modificam o tamanho originário das partículas.

No que tange às suas características gerais, os solos residuais não apresentam um comportamento completamente determinado pelos parâmetros geotécnicos convencionais, devido ao fato de apresentarem diferentes graus de intemperismo. Os princípios de Mecânica dos Solos, desenvolvidos tendo como base solos sedimentares ou transportados, são por vezes inadequados para solos residuais, podendo conduzir a interpretações e classificações errôneas. Fookes (1997) relata que os solos residuais apresentam propriedades de engenharia peculiares e características diferenciadas das encontradas em solos sedimentares, consequência do intemperismo, fator determinante na gênese do solo. Alguns dessas características são descritas abaixo.

- A ocorrência de solos residuais se dá frequentemente onde o clima propiciou uma dessecação profunda ou onde há presença de umidade sazonal severa e seca;
- Há uma variação da tensão efetiva de acordo com a época do ano e quando do impedimento da evaporação superficial estas mudanças podem levar a deformações consideráveis no solo superficial;
- As camadas superficiais do solo podem ser mais quimicamente ativas do que o habitual para solos sedimentares.

Algumas características devem ser avaliadas em solos residuais *in situ*. São elas:

- Mineralogia;
- Fratura de grãos;
- Estrutura variável e presença de ligações entre as partículas;
- Variação de índice de vazios independente da história de tensões;
- Condutividade hidráulica geralmente não relacionada ao tamanho das partículas e granulometria do material;
- Presença de descontinuidades de baixa resistência;
- Saturação parcial, geralmente ocorrendo em profundidade considerável.

2.1.1 Origem e formação dos solos residuais

Fookes (1997) relata que, ao contrário do que ocorre em solos de regiões temperadas, os solos residuais tropicais lateríticos sofrem um intemperismo tão acentuado que raramente apresentam as mesmas características das rochas de origem. Nestas regiões, o intemperismo atinge profundidades consideráveis. Em adição, estes solos são caracterizados também pela

presença de húmus, proveniente de decomposição vegetal, lixiviação de materiais insolúveis, carreamento de partículas finas, escavações realizadas por animais, perturbação devido à penetração de raízes e dessecação.

A ação individual ou conjunta dos fatores supracitados estabelece uma sucessão de horizontes um tanto distintos, paralelos à superfície. No que tange à composição química, é possível identificar que óxidos de ferro e alumínio, liberados pelo intemperismo tropical que ocorre na subsuperfície, não são dissolvidos da mesma forma que ocorre em ambientes mais ácidos (típicos de regiões temperadas). Esse efeito leva a permanência daqueles compostos no solo. A cristalização do óxido de ferro produz hematitas em épocas secas e goethita em ambientes predominantemente úmidos. Por outro lado, o principal óxido de alumínio formado é a gipsita, o que resulta em um solo de cores predominantemente vermelhas (hematita) ou amarelas (goethita).

Em relação aos processos de formação, com extrema laterização ocorre o surgimento de horizontes de solos endurecidos, formados pelo acúmulo residual de ferro e alumina ou ainda por precipitação de calcita, dolomita ou gipsita. Há possibilidade de ocorrência de transporte de ferro ferroso em solução sob distâncias muito curtas, o que origina horizontes heterogêneos com concreções ou segregações. Pode ocorrer também uma nova precipitação do ferro na forma férrica, causando uma acumulação na base de taludes sobre vales e outras depressões.

Conforme McFarlane (1976), materiais não concrecionados formam ligações sequenciais em placas contínuas de lateritas endurecidas próximo à superfície. As ricas em ferro são denominadas lateritas e as com predomínio de alumínio são chamadas de bauxita. É importante salientar que o processo de formação de solos residuais é complexo e muito dependente de fatores como intemperismo, clima e topografia.

2.1.2 Mineralogia

Os processos de intemperismo envolvidos na gênese de um solo influenciam consideravelmente a mineralogia de solos residuais. As diferentes características mineralógicas proporcionam aos solos comportamentos distintos. Um exemplo dessa distinção é o fato de que o peso específico dos grãos de solos residuais geralmente varia mais do que em solos sedimentares.

A caulinita está presente na maioria dos solos residuais, especialmente em solos residuais tropicais como os fersialíticos, ferruginosos e ferralíticos. É caracterizada por um baixo coeficiente de atrito entre partículas, apresentando partículas maiores e mais ativas do que esmectitas. Desta forma, solos com caulinita em sua composição apresentam uma maior resistência ao cisalhamento e menor compressibilidade em comparação com outro solo, da mesma fração argila, mas com presença de esmectita. As lâminas de argilominerais com baixo coeficiente de atrito, que é o caso da caulinita e esmectita, podem se orientar quando o cisalhamento ocorre com deslocamentos relativos consideráveis ao longo de uma superfície de ruptura (LUPINI *et al.*, 1981).

É possível a inexistência de orientação das partículas dos argilominerais durante o cisalhamento, de modo que um único valor de ângulo de atrito interno de estado crítico é obtido a grandes deformações. Um solo com composição de mais de 40% de fração argila tem suas propriedades geomecânicas governadas pela presença dessa fração. Nestes solos, as lâminas de argilominerais podem ter uma orientação ao longo de uma superfície de cisalhamento contínua, conforme mencionado anteriormente. Nestes casos, o ângulo de atrito interno diminui para um valor residual mais baixo. Para solos com frações intermediárias de argila, há um comportamento cisalhante transitório entre os dois estados descritos (BOYCE, 1985).

Queiroz (1991) relata que, em solos residuais tropicais, a mineralogia e microestrutura estão relacionadas ao modo de formação e ocorrência. Em climas tropicais, as reações pedogenéticas podem ocorrer de forma rápida, de modo que há uma possibilidade de modificação de solos recentemente transportados, subsecutivamente transformados em materiais com características de solos residuais. A lixiviação e redeposição, incluídas no processo de laterização, compreendem a excisão da sílica combinada resultante em solos alcalinos e álcalis. A remoção é resultado do acúmulo de óxidos e hidróxidos de sesquióxidos. As partículas lixiviadas podem ser redepositadas, aglomerando-se em outro local do perfil do solo.

Conforme Richards (1985), diversos processos podem levar à formação de solos residuais. Assim, é importante uma descrição metodológica adequada de cada perfil de solo residual, registrando com precisão os diferentes horizontes. Diversos métodos são utilizados para o estudo da mineralogia dos solos, como a difração de raios-X (DRX), termogravimetria,

microscopia ótica, microscopia eletrônica de transmissão ou varredura, entre outros. Em muitos casos, é necessária uma combinação de diferentes técnicas para um estudo mais preciso da mineralogia do material. A preparação das amostras e os processos de medição geralmente alteram os minerais, de modo que os processos de determinação não são diretos.

2.1.3 Classificações de solos residuais

Existem diversos motivos pelos quais os solos residuais necessitam um sistema classificatório especial, uma vez que suas características não são plenamente identificáveis através das metodologias tradicionais de classificação de solos (WESLEY E IRFAN, 1997). Algumas razões mencionadas são:

- A mineralogia dessemelhante encontrada em argilas ocasiona, em alguns solos tropicais, características que não são condizentes com o grupo no qual estão enquadrados no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A composição mineralógica acarreta a agregação das partículas, o que conduz a resultados incoerentes para a distribuição granulométrica do material;
- O perfil de solo residual *in situ* pode conter uma sequência de materiais, indo desde um solo propriamente dito até a rocha não alterada, dependendo do grau de intemperismo. Essa sequência não pode ser descrita e classificada de modo adequado utilizando sistemas classificatórios que foram desenvolvidos tendo como base solos transportados;
- Os sistemas classificatórios tradicionais evidenciam as propriedades de solos no estado deformado. Nos solos residuais a situação é diferente, uma vez que as propriedades são muito influenciadas pelas características estruturais do solo *in situ*, herdadas da massa de solo original ou desenvolvidas a partir do intemperismo. O termo solo residual compreende toda a profundidade do perfil, incluindo até alguns horizontes com um comportamento mais próximo ao de uma rocha do que de um solo.

Wesley e Irfan (1997) propuseram um sistema classificatório que engloba todos os solos residuais, fundamentado na composição mineralógica e na micro e macroestrutura do solo. A proposta do sistema desenvolvido pelos autores não é substituir os sistemas previamente existentes, mas sim de fornecer um sistema de agrupamento geral para complementar as metodologias já consolidadas.

No Brasil, destaca-se a Classificação MCT, desenvolvida por Nogami e Villibor (1981). Baseada em ensaios com corpos de prova em miniatura compactadas, a metodologia permite enquadrar os solos de acordo com seu comportamento laterítico ou não laterítico. Solos lateríticos, quando compactados sob determinadas condições de umidade e energia, adquirem boas capacidades de suporte e pequena perda dessa capacidade quando imersos em água. Além disso, a metodologia permite avaliar diferentes características de solos tropicais compactados, como contração, expansão, permeabilidade e infiltrabilidade.

Os estudos geotécnicos no meio rodoviário são baseados, de uma maneira histórica, nas características geológicas do local. Marangon e Motta (2001) relatam que, ao se utilizar de mapas geotécnicos obtidos a partir de informações geológicas e pedológicas, se possibilita a combinação de características geomecânicas do solo com a sua gênese. Essa associação de dados permite a obtenção de um índice mais confiável para a organização de informações sobre regiões distintas, contribuindo para a localização de áreas com potencial de ocorrência de materiais exploráveis.

No entanto, nem sempre há uma correspondência simples e direta entre as características geomecânicas do material e a sua gênese. Nogami e Villibor (1983) citam que, sob um ponto de vista geotécnico, uma camada ou horizonte de solo pode apresentar um comportamento laterítico mesmo não pertencendo a um perfil pedológico laterítico. Do mesmo modo, solos pertencentes a perfis pedológicos lateríticos podem não possuir comportamento laterítico. A Metodologia MCT divide os solos em dois grandes grupos, os de comportamento laterítico (L) e os de comportamento não laterítico (N). Estes são ainda subdivididos em classes, três lateríticas (LA, LA' e LG') e quatro não lateríticas (NA, NA', NS', NG').

Cruz e Maiolino (1985) propuseram outro sistema de classificação nacional, designado de Tipologia de Solos Compactados. Consiste em um detalhamento das características e resultados de ensaios comuns, para quatro grupos de solos tropicais. São eles:

- **Grupo I:** Solos lateríticos argilosos;
- **Grupo II:** Solos saprolíticos;
- **Grupo III:** Solos lateríticos arenosos;
- **Grupo IV:** Solos transportados

O grupo I reúne os solos lateríticos, de solos residuais provenientes de rochas intrusivas, extrusivas e metamórficas. De modo geral, são solos argilosos estruturados com algum agente cimentante, devido à presença de óxidos de ferro e alumínio. Correspondem geralmente à primeira camada intemperizada e possuem porosidade elevada.

Solos do grupo II são enquadrados como saprolíticos. São mais jovens e passaram por pouca ou nenhuma laterização. Correspondem à segunda camada de intemperismo. São heterogêneos, compactos, relativamente siltosos e guardam uma estrutura reliquiar da rocha de origem. Quando são remoldados, desagregam-se e perdem sua estrutura. São originados das mesmas rochas que os solos do grupo I. Quando compactados, são mais homogêneos.

O grupo III agrupa os solos lateríticos arenosos, algumas vezes caracterizados como colúvios. São solos que sofreram mais com o fenômeno do transporte do que solos do grupo I, sendo comum a ocorrência em combinação com outros solos. É o caso de solos provenientes do intemperismo do arenito, porém com presença de fração arenosa proveniente de solos de basalto.

Por fim, o grupo IV reúne os solos transportados, identificados como solos coluviais, originários de sedimentos. São muito pouco afetados pela laterização, podendo ser mais ou menos argilosos ou mais ou menos siltosos.

A descrição dos grupos relaciona itens como grau de intemperismo, posição no perfil, rocha de origem, trabalhabilidade, entre outras. Desta forma, para um sistema de classificação de solos residuais e residuais tropicais ser efetivo ele deve considerar fatores complementares em relação aos métodos tradicionais de classificação, tais como grau de intemperismo, mineralogia, estrutura e clima.

2.1.4 Solos tropicais

Solo tropical pode ser definido como aquele que possui propriedades e um comportamento peculiar em relação a solos não tropicais. Esta peculiaridade se dá em virtude da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos em solos de regiões tropicais úmidas (*Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985*).

Os solos tropicais são típicos de regiões com características climáticas tropicais e úmidas. Devido à ocorrência do processo de laterização, esses materiais podem possuir diferentes comportamentos no que tange às suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Este processo,

que também é conhecido como latolização, se dá em regiões onde os cátions básicos sofrem lixiviação, com concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio.

Nogami e Villibor (1995) evidenciam que os solos têm de apresentar duas condições básicas para que sejam considerados tropicais. Além de possuir propriedades e comportamentos diferentes de solos tradicionais (classificados através das metodologias de classificação SUCS e TRB), eles devem ocorrer em regiões de clima quente e úmido.

Visando sua aplicação em obras de infraestrutura rodoviária, os solos tropicais podem ser divididos em dois grandes grupos: solos lateríticos e solos saprolíticos. A Figura 2.1 apresenta a designação da comum de ocorrência das camadas de solos tropicais.

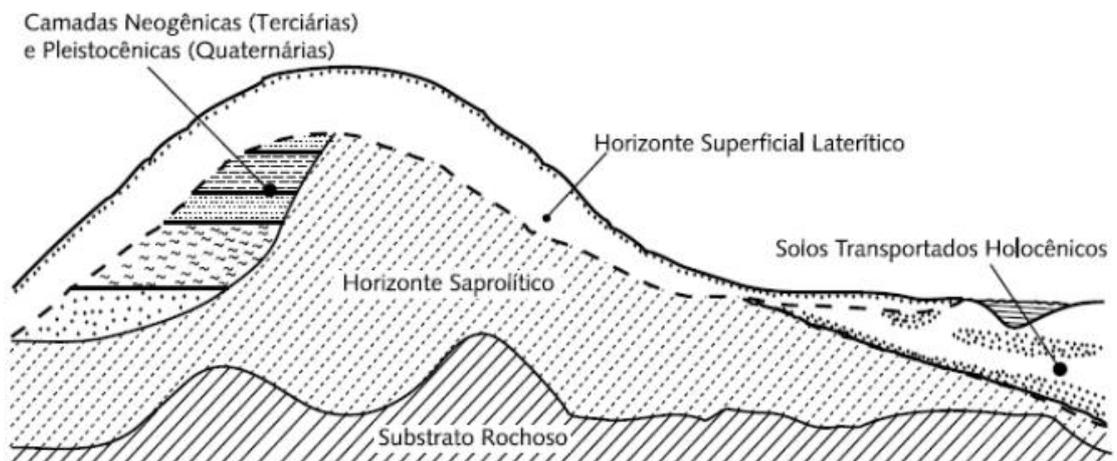


Figura 2.1: Ocorrência das camadas de solos tropicais (VILLIBOR; NOGAMI, 2009)

2.1.4.1 Solos lateríticos

Johnston (2010) relata que um solo é considerado laterítico quando for considerado de comportamento geotécnico laterítico. Ou seja, é caracterizado por possuir determinadas características que levam a classificá-lo como solo de comportamento laterítico na classificação MCT.

Os solos lateríticos são bem intemperizados, típicos de áreas em boas condições de drenagem, ocupando as camadas mais superficiais do solo. Apresentam uma coloração predominantemente vermelha e amarela, com uma macroestrutura visivelmente homogênea e isotrópica. Apresentam quartzo, agregações lateríticas, minerais como magnetita e turmalina,

e minerais pesados (em menor escala) na fração areia, enquanto que a fração argila é constituída basicamente por argilominerais e óxidos e hidróxidos de alumínio. A presença destes componentes confere uma estabilidade ao solo em presença de água, graças ao recobrimento dos argilominerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados. Estes últimos, além de reduzirem a capacidade de adsorção de água pelos argilominerais, também agem como agentes cimentantes naturais entre as partículas do solo (NOGAMI E VILLIBOR, 1983).

Em relação às suas propriedades mecânicas, é importante diferenciar o solo laterítico em sua condição natural e em condição compactada. Em obras rodoviárias e geotécnicas, tem-se o interesse pelo conhecimento das características e propriedades dos materiais em seu estado compactado. Um solo de comportamento laterítico é caracterizado por apresentar, após compactação, alta capacidade de suporte e pequena perda dessa capacidade quando imerso em água.

Ainda, de acordo com Santana e Gontijo (1987), solos lateríticos apresentam elevadas capacidades de suporte, baixa expansibilidade, elevados limites de liquidez (LL) e índices de plasticidade (IP), além de elevados valores de módulo resiliente. Podem apresentar contração elevada quando secos e possuem aglomeração bem desenvolvida, o que os torna permeáveis e resistentes à erosão.

De acordo com a classificação MCT, os solos de comportamento laterítico são designados pela letra L. São subdivididos em três diferentes grupos:

- **LA** – areia laterítica;
- **LA'** - solo arenoso laterítico;
- **LG'** - solo argiloso laterítico.

2.1.4.2 Solos saprolíticos

Solos saprolíticos são conceituados como resultantes da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha (considerada material consolidado da crosta terrestre). São peculiares por manter de forma nítida a estrutura da rocha que lhe deu origem (*Committee on Tropical Soils of ISSMFE*, 1985).

Nogami e Villibor (1995) classificam o solo saprolítico como um solo genuinamente residual, frequentemente denominado solo residual ou solo residual jovem. Possuem espessuras variáveis, podendo chegar a dezenas de metros de profundidade. Grande parte destes solos se

encontram em boas condições de drenagem. Além disso, possuem manchas e mosqueamentos, o que torna sua estrutura visivelmente heterogênea. Estas feições são originadas da rocha de origem ou desenvolvidas durante o processo de intemperismo. Os solos saprolíticos apresentam cores variadas, como branco, preto, cinza, roxo, azul, entre outros.

Solos saprolíticos apresentam uma composição mineralógica caracterizada pela presença de um grande número de minerais, formados pela intemperização ou herdados da rocha matriz. Na fração argila, é possível identificar a presença de grande variedade de argilominerais, enquanto que na fração silte são encontrados macrocristais de caulinitas e micas. Estes minerais podem conferir um comportamento peculiar a estes solos.

No que tange à plasticidade e expansibilidade, os solos saprolíticos possuem um comportamento muito peculiar. Podem variar de extremamente plásticos até não plásticos e de altamente expansivos (quando saturados) a muito contráteis (quando secos). São considerados bastante erodíveis, apresentando baixos valores de CBR e módulo resiliente. A presença de mica na composição destes solos pode causar uma alteração no seu comportamento. Quando presente em elevada concentração na fração silte, a mica torna o solo muito expansivo, seja no umedecimento quanto na secagem.

Nogami e Villibor (1981) destacam, ainda, que os solos saprolíticos geralmente apresentam um valor de capacidade de suporte abaixo das previsões dos índices classificatórios tradicionais. Associados a um valor de expansão alto, são geralmente enquadrados como inadequados para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

Solos de comportamento não laterítico são designados pela letra N na Metodologia MCT e são subdivididos em quatro grupos:

- **NA** – areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico;
- **NA'** – misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso);
- **NS'** – solo siltoso não laterítico;
- **NG'** – solo argiloso não laterítico.

Alguns autores como Nuñez (1991), Junior e Conciani (2005), Oliveira (2010), Ribeiro *et al.* (2014) e Silva (2016), ao estudar solos de comportamento não laterítico, identificaram a possibilidade de melhoria de suas propriedades com técnicas de estabilização de solos.

2.1.5 Metodologia MCT

A Metodologia MCT é composta por diversos ensaios geotécnicos. Ela se aplica somente aos solos com no mínimo 95% de material passante na peneira de abertura de 2mm. São utilizados corpos de prova em miniatura compactadas, com dimensões de 5cm de diâmetro e 5 cm de altura. Através dos ensaios da MCT, é possível avaliar diversas características dos solos tropicais, como contração, permeabilidade, expansão, capacidade de suporte e curvas de compactação. Além disso, ela permite identificar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos.

Para classificar os solos de acordo com a Metodologia MCT, ou seja, para enquadrá-lo em determinado grupo, são necessários apenas dois ensaios básicos. São eles o ensaio de Compactação Mini-MCV e o ensaio de Perda de Massa por Imersão. A partir destes dois ensaios, são obtidos dois parâmetros classificatórios, o coeficiente c' e o índice e' . O c' é associado à argilosidade do solo e corresponde às abscissas do ábaco da MCT (Figura 2.2). Já o índice e' é relacionado ao caráter laterítico do solo e corresponde às ordenadas do gráfico.

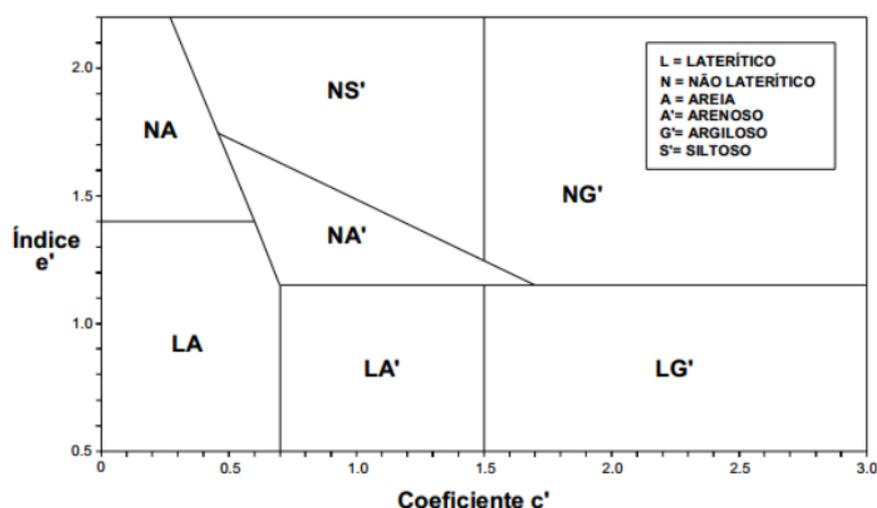


Figura 2.2: Ábaco classificatório da MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995)

2.1.6 Classificação MCT-M

Vertamatti (1988) estudou solos plínticos da Amazônia, que podem passar totalmente ou ter uma parcela retida na peneira de 2mm. A partir do estudo, o autor propôs uma modificação da classificação MCT-M, incluindo o grupo de solos transicionais (T) no ábaco classificatório. O ábaco, apresentado na Figura 2.3, foi denominado de MCT-M. O sufixo M indica a condição de modificação do gráfico. Assim, surgiu o conceito de solos transicionais, localizados na faixa intermediária entre os solos de comportamento laterítico e os de comportamento não laterítico.

Segundo o autor desta nova proposta, o ábaco classificatório MCT-M pode ser utilizado como uma ferramenta de previsão de propriedades de engenharia, tal como a correlação entre a MCT e o módulo de resiliência. Assim, é possível estimar, com maior precisão, aspectos tecnológicos relativos à gênese dos materiais e às suas propriedades resilientes.

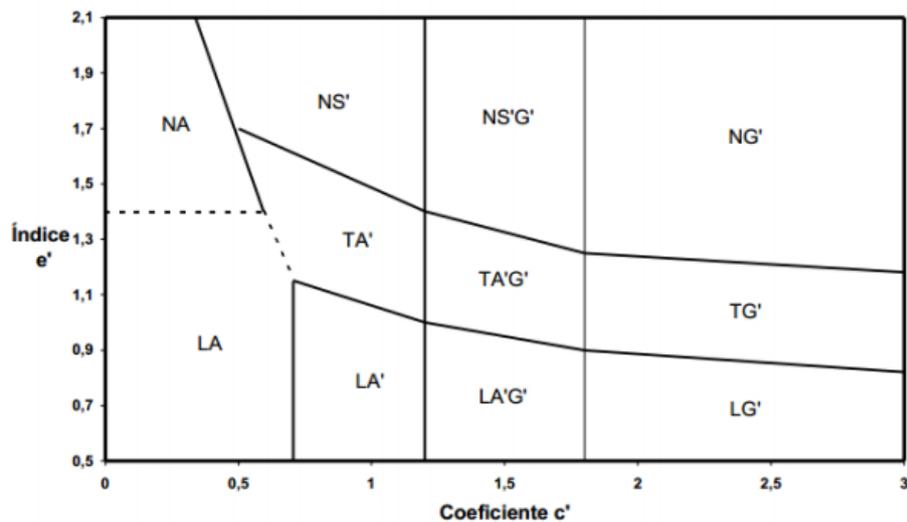


Figura 2.3: Ábaco classificatório da MCT-M (VERTAMATTI, 1988).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Um solo natural é um material complexo e muito variável de acordo com sua localização geográfica. Mesmo assim, devido à sua grande disponibilidade e baixo custo, apresenta uma grande utilidade como material de construção ou como elemento de suporte. Entretanto, é comum que um solo de determinado local não apresente os requisitos técnicos para aplicação em obras de engenharia, seja total ou parcialmente.

Cristelo (2001) relata que, nestes casos, uma decisão deve ser tomada em relação à solução que é mais indicada para cada caso, e que irá geralmente contemplar uma das seguintes possibilidades:

1. Aceitar o material como ele é e adaptar o projeto às suas características;
2. Remover o material do local de origem, substituindo-o por um material com melhores propriedades;
3. Alterar as propriedades do solo local de modo a criar um material que cumpra aos requisitos técnicos e econômicos do projeto.

Esta última possibilidade, ou seja, a alteração das propriedades do solo para aplicação como material de engenharia, é geralmente designada por “Estabilização de Solos”.

A melhoria das propriedades dos solos pode ser obtida de diferentes maneiras. Kézdy (1979) dividiu os métodos utilizados para estabilização das propriedades dos solos em três categorias especiais:

- A. **Métodos mecânicos:** garantem ao solo estabilidade sem a mistura de aditivos. Desta forma, as propriedades do solo podem ser melhoradas através de processos como compactação, drenagem ou a mistura de diferentes tipos de solos. É importante enfatizar que estas técnicas são geralmente combinadas, uma vez que a compactação é necessária quase que sempre.
- B. **Métodos físicos:** consistem nas reações físicas que conduzem à estabilização, incluindo mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção.
- C. **Métodos químicos:** representam as reações químicas que propiciam a estabilização do solo. São elas a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação.

Nuñez (1991) relata que, do ponto de vista técnico e econômico, vários dos métodos citados são frequentemente adaptados para solucionar um problema. Além disso, o autor enuncia alguns fatores que devem ser considerados de modo a selecionar o melhor método de estabilização. São eles: as propriedades do solo no estado natural, propriedades desejadas para o solo estabilizado e efeitos no solo após a estabilização. Neste último grupo, o papel mais importante é o desempenhado pelo caráter, magnitude e frequência das solicitações (no caso de pavimentos rodoviários representada pelo tráfego), assim como pelos efeitos meteorológicos como secagem, umedecimento, congelamento, lixiviação, entre outros.

Cristelo (2001) salienta que a estabilização não é necessariamente um processo infalível que permitirá a alteração de toda e qualquer propriedade do solo para melhor. A aplicação correta de qualquer método exige a identificação clara de quais propriedades dos solos que se pretende melhorar. Diversos materiais são utilizados como aditivos para a estabilização de solos, como cimento, cal, cinzas, betume e ligantes hidráulicos.

2.2.1 Estabilização de solos com adição de cimento Portland

De acordo com o Instituto Americano de Concreto - ACI (2009), solo-cimento é definido como uma mistura compactada de solo com cimento Portland e água em quantidades pré-estabelecidas. A NBR 12253, norma vigente no Brasil de dosagem de solo-cimento para a utilização em camadas de pavimentos rodoviários, conceitua solo-cimento como o produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento Portland e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (ABNT, 2012).

O cimento comumente utilizado na estabilização de solos é o do tipo Portland. Este material é composto de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, provenientes de calcário, argila e gesso. A presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) é fundamental para se obter produtos com elevadas resistências. (COUTINHO, 1973).

De forma alternativa ao cimento Portland, outros materiais são usualmente utilizados a fim de garantir cimentação aos solos, tais como a cal, cinzas e betume. Bernucci *et al.* (2008) relatam a utilização de brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal e macadame betuminoso na execução de pavimentos semi-rígidos ou invertidos.

A estabilização de solos com cimento Portland é a técnica mais difundida atualmente. Sua introdução ocorreu nos Estados Unidos em 1915, quando uma rua na cidade litorânea de Sarasota, na Flórida, foi construída com a utilização de uma mistura de conchas, areia e cimento Portland. Em 2009, o país já possuía mais de 200.000 Km de rodovias pavimentadas com bases de solo-cimento (ACI, 2009).

Kézdi (1979) descreve a utilização de solo-cimento pelos países envolvidos na Segunda Guerra mundial, principalmente na construção de pistas de aeroportos e estradas. Após o término da guerra, a utilização da técnica continuou em alguns países europeus, particularmente na execução de estradas secundárias, ciclovias, calçadas ou bases de rodovias.

No Brasil, a introdução da técnica em campo foi realizada na estrada de acesso ao aeroporto de Bauru/SP. Um trecho de 500 metros de extensão foi executado, utilizando-se o solo local e um teor volumétrico de 11% de cimento Portland. Posteriormente, foi construído o acesso ao aeroporto de Presidente Prudente/SP, com extensão de 14 Km e teor de cimento variando entre 12 e 14%. A partir destas duas experiências, bases e sub-bases de solo-cimento passaram a ser amplamente utilizadas no estado de São Paulo, representando mais da metade das rodovias pavimentadas no que se refere à estas camadas (SENÇO, 2001).

Leon (2018) indica que a estabilização de solos com cimento Portland é adequada para diversos tipos de solos, desde materiais granulares a materiais siltosos e argilosos, uma vez que os efeitos da cimentação resultam não apenas da interação entre o aglomerante e o solo, mas também do próprio cimento.

Ingles e Metcalf (1972) relatam uma maior eficácia na estabilização com cimento Portland em solos arenosos de boa graduação e com plasticidade de média a baixa, devido à facilidade de mistura, dos baixos teores de cimento requeridos e pelas maiores resistências resultantes. Em contraste, solos com elevada plasticidade exigem altas quantidades de cimento Portland e energéticos equipamentos misturadores.

Nuñez (1991) relata que o mecanismo que ocorre quando da aplicação de cimento em solos granulares é semelhante ao que ocorre na utilização do cimento no concreto. Já em relação às reações que ocorrem nos solos argilosos, Herzog e Mitchel (1963) relatam que nestes materiais o processo de endurecimento ocorre devido à cimentação das partículas de argila pelos produtos da hidratação do cimento. Além desta, também influenciam no processo as chamadas reações secundárias, entre a cal liberada pela hidratação do cimento e os argilominerais presentes no solo.

Ao estudar um solo arenoso denominado arenito Botucatu, Foppa (2005) identificou que mesmo a adição de pequenas quantidades de cimento gera um ganho na resistência do solo. O autor relata que a adição de finos permite a elevação da massa específica aparente seca do material, gerando um melhor empacotamento da mistura.

Ao avaliar os fatores que mais influenciam na resistência de solos cimentados com cimento Portland, Moore *et al.* (1970) concluíram que a resistência destes materiais depende principalmente:

- Do teor de umidade inicial da mistura;
- Do tempo de cura dos corpos de prova;
- Das condições de cura dos corpos de prova;
- Da granulometria da mistura;
- Da mineralogia do solo;
- Das condições de compactação;
- Da quantidade de cimento adicionada a mistura.

As duas reações químicas básicas que propiciam uma estabilização ao solo com a adição do cimento são as reações de hidratação e as pozolânicas. A adição de água permite o início da hidratação, que envolve a combinação de cálcio, sílica e água (C_3S – silicato tricálcico e H_2O - água), ocasionando a formação do composto CSH (silicato hidratado de cálcio). Esse processo é mostrado na Equação 2.1, onde é possível identificar a geração de cal hidratada ($Ca(OH)_2$ - hidróxido de cálcio) como produto excedente.



O hidróxido de cálcio excedente da reação de hidratação sofre hidrólise, conforme a Equação 2.2, e resulta na formação de compostos C-S-H ou C-A-H (aluminato hidratado de cálcio), conforme as equações 2.3 e 2.4. Estas equações foram apresentadas inicialmente por Moh (1965), que estudou a natureza dos produtos de reações secundárias em um sistema solo-cimento.



O cimento Portland contribui para a melhoria de diversas propriedades do solo, aumentando sua resistência, capacidade de suporte, durabilidade e rigidez. Além disso, sua adição permite controlar a expansão, diminuir a plasticidade e modificar a curva granulométrica do solo. Kézdi (1979) observou, na curva de compactação, um aumento no peso específico máximo e na umidade ótima ao estabilizar solos arenosos. O autor ressalta que uma outra consequência

da estabilização com cimento é que o solo se torna mais sensível a ação da água, ou seja, os dois ramos da curva de compactação se aproximam muito em relação à curva do solo natural.

2.2.2 Estabilização de solos com cal

A utilização de cal como aditivo no melhoramento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecido, tendo sido utilizado em diversas aplicações, como na construção da Via Appia, importante via do Império Romano. Solo-cal pode ser definido como o produto resultante da mistura compactada de solo (usualmente argiloso), cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (USBR, 1998).

Ingles e Metcalf (1972) relatam que a utilização de solo-cal é possível quando não se dispõe de um material ou uma combinação de materiais com os requisitos de resistência, deformabilidade e permeabilidade requeridos e adequados ao projeto. Assim como as misturas de solo-cimento, as misturas de solo-cal são comumente aplicadas na construção de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

A utilização da técnica de solo-cal ganhou expressão na década de 1950. Guimarães (1971) relata algumas experiências de sucesso obtidas a partir da construção de pistas experimentais de solo-cal no Brasil. Destaca-se uma área de hangares no aeroporto de Congonhas em São Paulo/SP, com base de solo-cal-agregado (teor de 6% de cal hidratada), um trecho de 1000 metros de extensão na rodovia Curitiba/Porto Alegre no Paraná (solo siltoso estabilizado com teores de 3 a 7% de cal) e dois trechos da rodovia BR 377 entre Cruz Alta e Carazinho no Rio Grande do Sul (solo argiloso estabilizado com 4% de cal).

Sandroni e Consoli (2010) relatam técnicas de engenharia disponíveis para a estabilização de solos moles e expansivos, onde a cal também possui boa aplicação na estabilização destes materiais. Eles enunciam técnicas como evitação, substituição, aterros convencionais, sobrecarga, drenos verticais, tratamento de camada superficial por mistura com aglomerante seco, coluna de mistura de solo com ligantes, entre outros. Os autores destacam que a adoção de uma ou mais soluções técnicas está associada ao tipo de obra e espessura da camada de baixa resistência.

Conforme Ingles e Metclaf (1972), a cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila, sendo mais eficiente em solos argilosos e podendo ser mais eficiente que a aplicação de cimento em pedregulhos argilosos.

A verificação de qual aditivo é mais indicado para ser utilizado na estabilização de solos deve considerar a granulometria e a plasticidade do solo. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos para a cal. Isso aumenta sua trabalhabilidade, o que pode propiciar uma melhor mistura, além de diminuir sua expansão volumétrica e aumentar sua resistência (USACE, 1994).

Uma resposta mais rápida à adição de cal pode ser identificada em argilas expansivas. Ao estudar a mineralogia de solos estabilizados com cal, Bell (1996) verificou um rápido aumento inicial na resistência à compressão simples para um solo com a presença do argilomineral montmorilonita, com teores de cal de 2 a 3%. Para este material, um teor de 4% de cal foi suficiente para se obter a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi obtida com teores entre 4 e 6%. É importante salientar que o nível de resistência da mistura do solo caulínico com cal foi levemente superior em comparação com a outra mistura.

Thomé (1994) cita diversas reações químicas que ocorrem quando da aplicação de cal no solo, sendo algumas delas imediatas e outras ao longo do tempo. As principais delas são:

- Floculação - aumento e estabilização das partículas argilosas devido aos fenômenos de troca catiônica, aumento da capacidade de troca catiônica dependente do pH e aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros;
- Carbonatação - é a reação da cal com o dióxido de carbono do ar atmosférico. Ela gera cristais de CaCO_3 e ocorre imediatamente após a exposição da cal ao ar;
- Adsorção química das moléculas da cal – os íons são liberados na mistura;
- Reações pozolânicas - reação do cálcio da cal com a sílica e a alumina do solo, resultando na formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Estes são os responsáveis pela maior parte do ganho de resistência das misturas solo/cal.

Castro (1995) relata que algumas reações químicas ocorrem de forma simultânea quando da adição de cal a um solo fino com presença de água. Estas reações podem ser caracterizadas por duas etapas distintas, uma inicial que dura de horas a dias e outra mais lenta, podendo levar de meses a anos. A etapa inicial constitui-se de troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada, adsorção da cal e reações químicas. Já a etapa lenta é caracterizada pela ocorrência de reações pozolânicas e carbonatação.

As reações pozolânicas são responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica de misturas solo-cal. Isso se deve ao fato de que as fontes de sílica, alumina e ferro disponíveis no solo reagem com a cal e a água e formam diferentes compostos cimentantes (JOHANN, 2013). Conforme o relato de Rogers e Glendinning (2000), a cal libera íons hidroxila que elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas do solo. Estas reações permitem a formação de géis de silicato ou aluminatos hidratados.

Os géis de silicatos resultantes da reação cobrem e ligam as partículas de argila de forma imediata, bloqueando seus vazios. Os géis são então lentamente cristalizados e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Salienta-se que essa reação só ocorre na presença da água, que tem a função de conduzir os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

2.2.3 Solo com adição de cal e pozolana

Conforme Mateos (1961), quando da adição de cal e pozolana a um solo úmido, uma parte da cal pode reagir com as partículas do solo, outra com o dióxido de carbono presente no ar e na água intersticial e o restante com a pozolana. Assim, em comparação com um sistema solo-cal, haverá um maior nível de complexidade, uma vez que pode ocorrer uma competição pelo consumo da cal entre o solo e a pozolana. Além disso, a quantidade de água pode não ser suficiente para o desenvolvimento das reações pozolânicas de forma completa. Os argilominerais, assim como a cal e a pozolana, apresentam uma grande avidez por água. Isso implica em uma incompatibilidade entre a umidade ótima, determinada através do ensaio de compactação, e a umidade necessária para o completo desenvolvimento das reações pozolânicas. Isto é, o primeiro teor de umidade pode estar aquém em relação ao segundo.

2.3 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE CAL E POZOLANA

Conforme Scheuermann Filho (2019), a resposta mecânica de solos estabilizados com pozolanas pode ser expressa por alguns fatores de baixa complexidade como resistência à compressão simples (q_u), resistência à tração por compressão diametral ($q_{t,d}$), resistência à tração na flexão ($q_{t,f}$), módulo cisalhante inicial/rigidez inicial (G_0), perda de massa ocorrida em ciclos de durabilidade (molhagem-secagem escovação e/ou gelo-degelo escovação), entre

outros. Ensaio mais complexos, como o triaxial, triaxial cíclico e de fadiga por aplicação de carregamentos cíclicos permitem a determinação de outros parâmetros, tais como resistência ao cisalhamento, degradação da rigidez do material, módulo de resiliência e vida de fadiga.

Não obstante, os teores de cal e pozolana utilizados na estabilização de um solo argiloso, assim como a energia de compactação, umidade de moldagem, tempo e temperatura de cura influenciam no comportamento mecânico que a mistura apresentará.

2.3.1 Efeito da adição de pozolana

Em estabilização de solos, a adição de uma pozolana como pó de vidro moído, cinza de casca de arroz e cinza volante, combinada com um ativador alcalino (hidróxido de cálcio), objetiva a obtenção de melhores propriedades mecânicas. Essa melhoria ocorre devido a formação de uma matriz cimentícia proveniente das reações entre o hidróxido de cálcio e as partículas sílico-aluminosas da pozolana adicionada. Desta forma, os produtos finais obtidos possuem características comparáveis àqueles formados nas reações de hidratação do cimento Portland (MASSAZA, 2004). A quantidade de pozolana adicionada deve ser então suficiente para promoção da melhoria mencionada acima, evitando-se quantidades exageradas que possam inviabilizar a aplicação técnica e econômica do projeto.

Ao contrário de técnicas de dosagem de solos tratados com cimento Portland, a estabilização com materiais pozolânicos alternativos, especialmente em se tratando de resíduos, não está plenamente documentada e normatizada. Scheuermann Filho (2019) diz ser viável a aplicação de normas, parâmetros mecânicos (resistência e deformabilidade) e de desempenho (durabilidade) utilizadas nas técnicas que utilizam cimento Portland, uma vez que o solo estabilizado tende a apresentar um comportamento muito parecido devido à semelhança química dos produtos de reação.

Considerando um solo argiloso com adição de pozolana e cal, adequadamente hidratado, o aumento no teor de pozolana provoca uma disponibilidade imediata de sílica e/ou alumina. Como consequência, há formação de uma maior quantidade de compostos cimentantes em um prazo menor, em comparação a um solo com adição somente de cal. O mesmo ocorre para solos não argilosos estabilizados com pozolana e cal, porém com uma necessidade de uma menor magnitude nos níveis de hidratação. Assim, de um modo geral, as quantidades usuais

de pozolana utilizadas, em relação a massa seca do solo, variam entre 10 e 40% (Mateos, 1961; Consoli *et al.*, 2001; Consoli *et al.*, 2017; Consoli *et al.*, 2018).

2.3.2 Efeito da adição de cal

A adição de cal em um solo argiloso propicia mudanças nas características granulométricas, plasticidade e trabalhabilidade, além de reduzir o potencial de expansão do solo devido às reações de floculação e aglomeração (Herzog e Mitchell, 1963). A longo prazo, com uma quantidade suficiente de cal reativa e condições mínimas requeridas para a hidratação, ocorrem as reações pozolânicas com precipitação de compostos cimentantes. Por outro lado, em um solo argiloso com presença de cal e pozolana, adequadamente hidratado, haverá uma reação da cal tanto com os argilominerais presentes no solo quanto com a pozolana. As reações pozolânicas entre a cal e a pozolana são teoricamente mais rápidas devido a disponibilidade imediata de sílico-aluminatos.

A utilização de cal requer um processo de dosagem com testes de laboratório, de modo a determinar teores mínimos que possam conduzir as modificações e melhorias desejadas no solo estabilizado. Com base na Transportation Research Board – TRB (1987) e em Rogers e Glendinning (1976), alguns aspectos devem ser considerados quando da determinação do teor mínimo de cal a ser utilizado no projeto. São eles:

- Com a crescente adição de cal, ocorre a estagnação do valor de Índice de Plasticidade (IP) a partir de um ponto denominado “ponto de fixação de cal” ou *lime fixation point*. A partir deste ponto, a quantidade excedente de cal estaria a disposição para o desenvolvimento das reações pozolânicas;
- Redução considerável no potencial de expansão do solo tratado;
- Obtenção dos parâmetros desejados de resistência e desempenho;
- Estabilização do pH da mistura até determinado valor, a partir do qual a adição de hidróxido de cálcio não propicia uma alteração do pH da mistura, ficando disponível para consumo nas reações pozolânicas. O valor limite de pH é conhecido como *Initial Consumption of Lime*, geralmente superior a 12.

Os valores usuais para teor de cal geralmente encontram-se entre 3% e 10% em relação a quantidade de material seco da mistura. Scheuermann Filho (2019) indica que um desempenho satisfatório do solo estabilizado só pode ser alcançado com a utilização de teores superiores aos encontrados pelas metodologias citadas acima.

2.3.3 Nível de compactidade da mistura

O aumento da compactidade de solos estabilizados provoca uma redução dos vazios, com um consequente aumento do intertravamento entre os grãos do solo, redução da permeabilidade até valores próximos da umidade ótima e aumento da resistência mecânica. O aumento da energia de compactação propicia um decréscimo da umidade ótima, uma vez que há um menor número de vazios para serem preenchidos por água (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

Desta forma, a compactidade de um solo estabilizado pode ser expressa em termos de porosidade (η) que, quando relacionada à resistência à compressão simples (q_u), tende a apresentar uma relação aproximadamente linear. Essa relação foi apresentada por Consoli *et al.* (2009a, 2009b). A Figura 2.4 apresenta esta relação para um solo estabilizado com cimento Portland, enquanto a Figura 2.5 para um solo com adição de cal. De um modo geral, o aumento do peso específico aparente seco da mistura acarreta em um aumento de resistência mecânica (SILVANI *et al.*, 2016; CONSOLI *et al.*; 2017; CONSOLI *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2018).

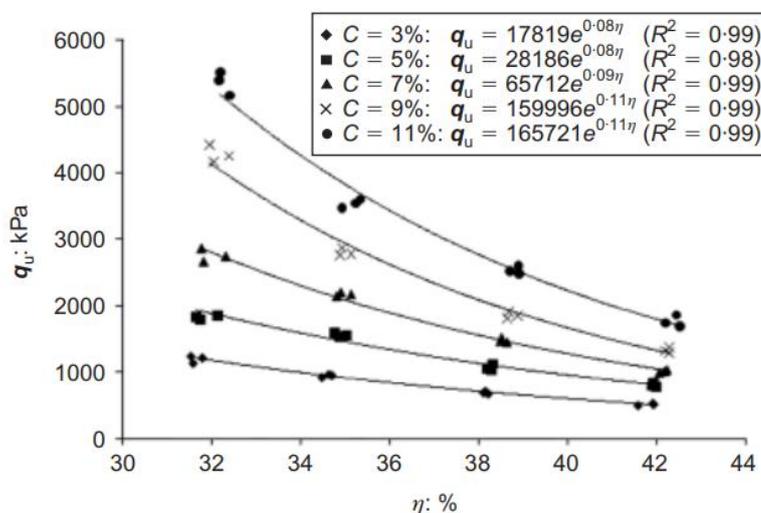


Figura 2.4: Relação η x q_u para um solo estabilizado com cimento (CONSOLI *et al.*, 2009a)

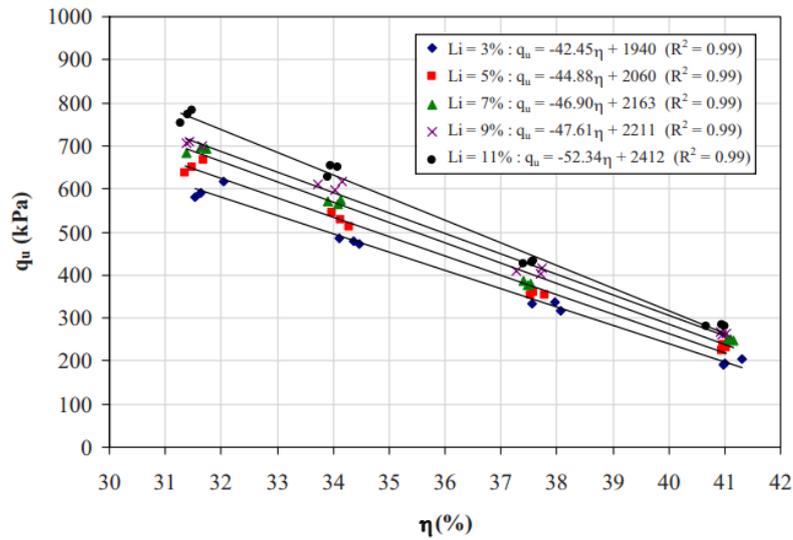


Figura 2.5: Relação η x q_u para um solo estabilizado com cal (CONSOLI *et al.*;2009b)

2.3.4 Relação entre Porosidade e os Teores Volumétricos de Cimento, Cal e Ligante

A partir da identificação dos fatores com maior influência no comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) propuseram um método racional de dosagem tendo como base a relação entre o volume absoluto de vazios da mistura (V_v) e o volume absoluto de cimento (V_c). Essa relação pode ser expressa também como a relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}), conforme a Equação 2.5, onde V_{total} representa o volume total da amostra de solo cimentado.

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{total}}{V_{cimento}/V_{total}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) demonstraram que existe uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples (q_u) das amostras de solo artificialmente cimentados e a relação ajustada entre porosidade e o teor volumétrico de cimento ($\eta / (C_{iv})^k$). Esta relação pode ser visualizada na Figura 2.6.

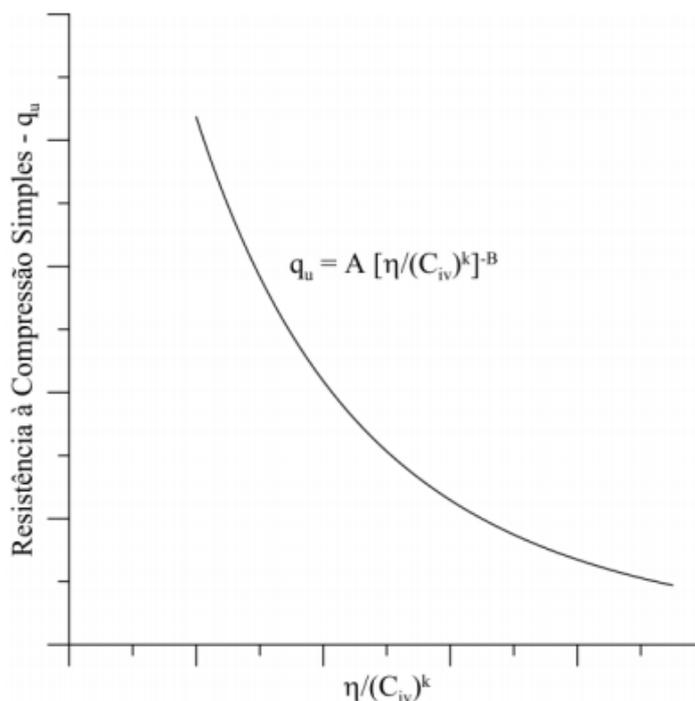


Figura 2.6: Relação entre q_u e η / C_{iv} (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

O ajuste realizado através do expoente k permite uma combinação dos efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta. Ou seja, se o efeito da porosidade for maior do que o do teor de cimento, o expoente k é inferior a 1,0. Caso contrário, ele é superior a 1,0. Quando o efeito dos dois parâmetros é igual, o parâmetro k é igual a zero.

A Equação 2.6 abaixo relaciona a resistência à compressão simples (q_u) com a relação $\eta / (C_{iv})^k$, com a inclusão do expoente de ajuste polinomial B e um escalar A . Diambra *et al.* (2017) demonstraram recentemente que os valores de k e B dependem principalmente das características do solo, sendo que o valor de B pode ser aproximado ao inverso de k . A magnitude do escalar A é governada por propriedades tanto do solo quanto da matriz cimentícia. Desta forma, o valor de A é muito influenciado pelos tempos e temperatura de cura, ao passo que esses fatores influenciam a dinâmica de hidratação do cimento e consequentemente a formação dos compostos hidratados. Mesmo assim, a determinação de uma relação da forma da Equação 2.6 para um material cimentado permite, teoricamente, a obtenção de determinada resistência através do aumento da compactidade da mistura ou de um incremento no teor de cimento, contanto que certos limites experimentais sejam respeitados (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

$$q_u = A \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Em seguida, a validade da relação $\eta / (C_{iv})^k$ foi demonstrada para avaliação de outros parâmetros de comportamento de materiais artificialmente cimentados além da resistência mecânica. São eles a rigidez inicial (CONSOLI *et al.*, 2017b) e a durabilidade em termos de perda de massa acumulada (CONSOLI; TOMASI, 2018).

Para emprego em solos finos estabilizados com cal, Consoli *et al.* (2009a, 2009b) propuseram uma relação análoga à Equação 2.6, na qual substitui-se o teor volumétrico de cimento pelo teor volumétrico de cal (L_{iv}). Assim como foi verificado com o uso de cimento Portland, a formulação do novo índice foi válida, uma vez que foi verificada a existência de uma relação potencial entre a resistência da areia argilosa tratada com cal e o índice proposto $\eta / (L_{iv})^k$. Da mesma maneira que o índice $\eta / (C_{iv})^k$, o novo índice também deve ser ajustado com um expoente k para que exista uma compatibilização entre os efeitos da compactação e do teor de cal.

Posteriormente, Consoli *et al.* (2011) aplicaram o índice $\eta / (L_{iv})^k$ em uma mistura de areia siltosa, cinza volante e cal hidratada. O índice foi considerado eficaz para descrever o comportamento mecânico em relação à resistência a compressão simples para diferentes tempos de cura e teores de cinza volante. Ou seja, a descrição do comportamento mecânico das misturas pelas relações do tipo potência foi considerada satisfatória. É importante salientar que cada relação incluía apenas um teor de pozolana, no caso a cinza volante, para valores distintos de cal. Mais tarde, a mesma relação foi utilizada de modo satisfatório por outros autores no estudo de misturas solo-cal, solo-cal-pozolana e pozolana-cal, tanto para modelagem de parâmetros de resistência quanto na descrição do comportamento em relação a durabilidade e rigidez (CONSOLI *et al.*, 2014; SAMANIEGO, 2015; MARIN, 2017; SALDANHA, 2018).

Consoli *et al.* (2018a, 2018b) introduziram recentemente o índice $\eta / (B_{iv})^k$, visando expressar em apenas uma relação à combinação dos efeitos da porosidade, do teor de pozolana e teor de cal no comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados. O índice equivale à relação entre a porosidade e o teor volumétrico de ligante, sendo este o total do teor volumétrico da pozolana acrescido ao teor volumétrico de cal, ajustado pelo expoente k . A função do expoente neste caso é análoga a apresentada anteriormente.

Scheuermann Filho (2019) relata que a relação entre resistência, rigidez inicial e durabilidade (expressa em perda de massa acumulada) com a aplicação do novo índice se mostrou satisfatória com a utilização de diferentes pozolanas, como cinza volante e pó de vidro moído, em distintos teores combinados com teores variados de cal. É importante salientar que a relação porosidade e teor de ligante somente foi aplicada até então em solos cuja fração argilosa não supera 5,0%. Entende-se que solos desta natureza são pouco reativos, uma vez que não apresentam parcela considerável de argilominerais em sua composição. Assim, existe uma tendência de que a cal reaja praticamente somente com a pozolana adicionada. Em solos argilosos com adição de pozolana e cal podem ocorrer reações entre a cal e os argilominerais presentes no solo, de modo que o índice $\eta/(B_{iv})^k$ talvez seja inapropriado.

2.3.5 Umidade de moldagem

As reações pozolânicas são caracterizadas pelo consumo de óxido de cálcio na combinação com os sílico-aluminatos presentes nos argilominerais do solo e/ou pozolana. Tais reações requerem condições adequadas de hidratação, ou seja, disponibilidade de água. O teor de umidade utilizado no solo a ser estabilizado está intimamente ligado a compacidade que a mistura irá apresentar, uma vez que alguns níveis de densidade só são obtidos com teores ótimos de umidade obtidos no ensaio de compactação.

De acordo com Mateos (1961), o teor de umidade conhecido como ótimo pode não ser o mais adequado e favorável para o desenvolvimento das reações de cimentação, especialmente na presença de argilominerais ávidos por água. Desta forma, em solos argilosos estabilizados com cal e pozolana ou somente cal, o potencial pozolânico dos materiais pode estar sendo subutilizado em razão da indisponibilidade de água para o pleno desenvolvimento das reações. Assim, parte da pozolana, disponível para as reações, estaria desempenhando um mero papel de material inerte de preenchimento.

As Figuras 2.7 e 2.8 expressam o comportamento de um solo argiloso e outro arenoso quando estabilizados com o emprego de cinza volante e cal hidratada. Para o solo argiloso, é possível identificar que os maiores valores de resistência à compressão simples (q_u) estão relacionados à disponibilidade de água e não aos valores de peso específico aparente seco (γ_d). Por outro lado, para a areia o efeito é o contrário, com as menores resistências sendo obtidas para pontos próximos às umidades ótimas, especialmente na energia de compactação modificada.

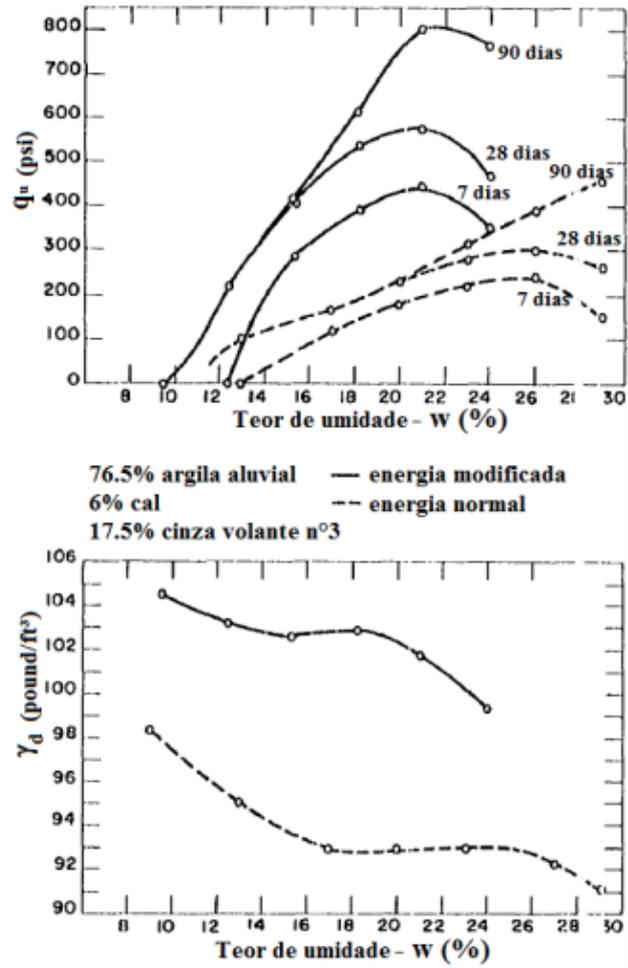


Figura 2.7: Relação entre q_u , teor de umidade (w) e peso específico aparente seco (γ_d) para um solo argiloso (MATEOS,1961).

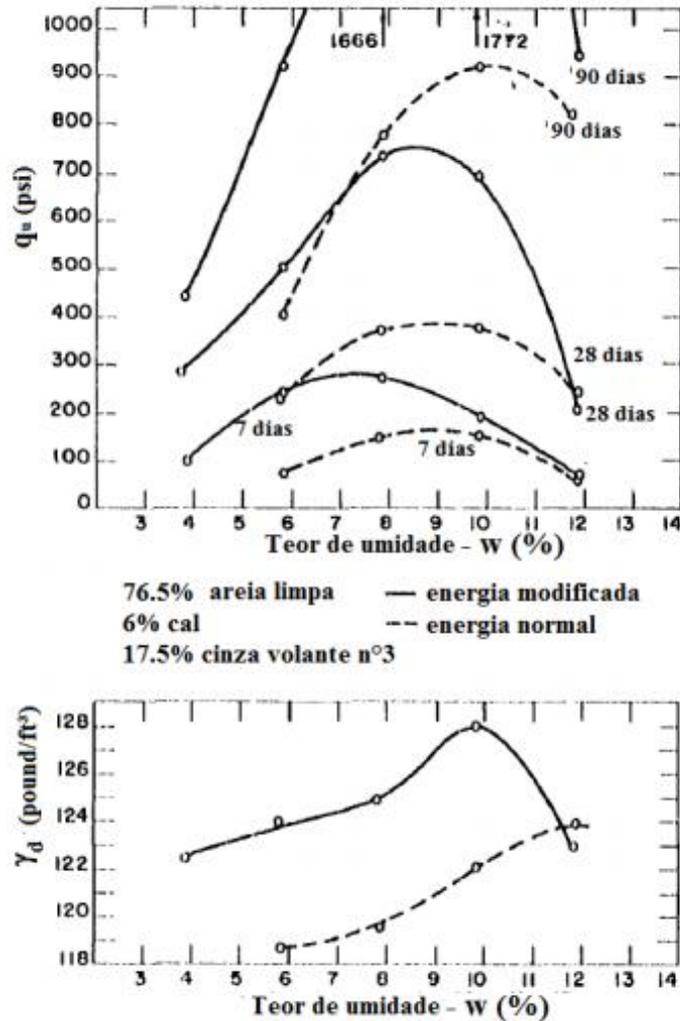


Figura 2.8: Relação entre q_u , teor de umidade (w) e peso específico aparente seco (γ_d) para um solo arenoso (MATEOS, 1961).

2.3.6 Condições de cura

A utilização de maiores tempos de cura permite a combinação de maiores quantidades de cal para o desenvolvimento das reações pozolânicas, com formação dos compostos C-S-H e C-A-H e obtenção de melhores propriedades do material tratado (MASSAZA, 2004). Contudo, é importante salientar que essa melhora só se dá com disponibilidade de hidróxido de cálcio livre, sílica e alumina e com condições adequadas de hidratação.

Thomé (1994) estudou um solo argiloso mole tratado com cal, visando sua aplicação como camada de suporte de fundações superficiais. Para os tempos de cura avaliados (7, 28 e 90 dias) o autor identificou que a adição de cal propiciou apenas uma melhora nas características físicas da mistura, não resultando em ganho de resistência. Tal efeito foi creditado à

indisponibilidade de cal para o pleno desenvolvimento das reações pozolânicas. Dalla Rosa (2009) obteve ganhos consideráveis de resistência ao aumentar o tempo de cura (28, 60, 90, 180 e 360 dias) para uma areia siltosa estabilizada com cinza volante e cal. O ganho se deu até o prazo de 180 dias, como pode ser visualizado na Figura 2.9.

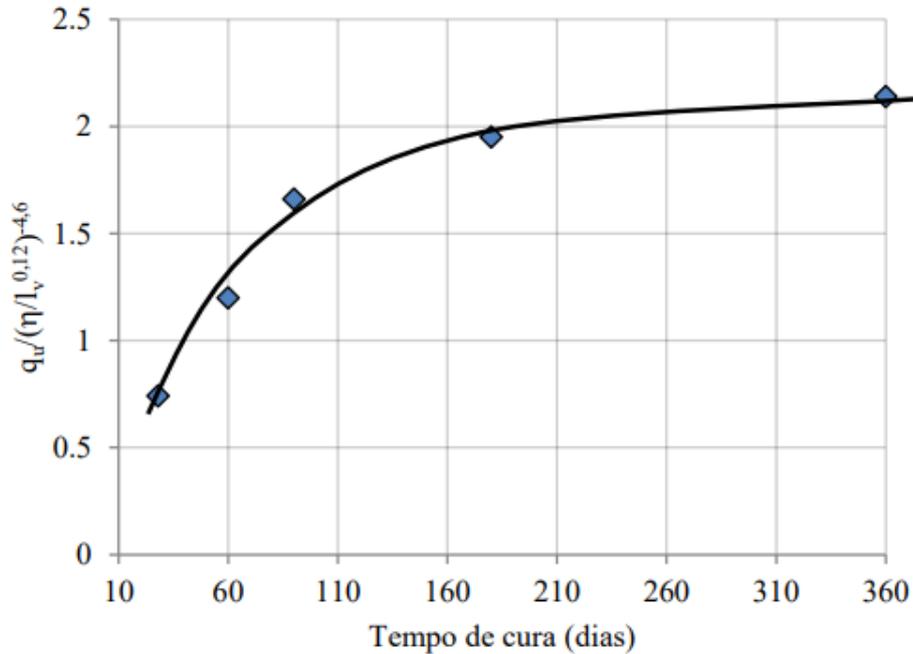


Figura 2.9: Tendência de ganho de resistência frente a variação do tempo de cura (SALDANHA,2018; adaptado de DALLA ROSA, 2009).

Consoli *et al.* (2016), ao estudarem uma argila dispersiva tratada com cal hidratada, constataram um aumento considerável na resistência com o aumento dos tempos de cura (7, 28 e 60 dias). Marin (2017) também identificou este efeito ao tratar uma argila dispersiva sulfatada com cinza volante e cal hidratada. Schuermann Filho (2019), ao avaliar a adição de pó de vidro moído e cal de carbureto a um solo argiloso dispersivo, constatou que um tempo de cura de sete dias é insuficiente para que ocorra o pleno desenvolvimento das reações entre os materiais adicionados ao solo. Isso indica a necessidade de um maior tempo de cura ou um aumento na temperatura de cura.

Além dos tempos de cura, o desenvolvimento das reações pozolânicas é influenciado também pela temperatura de cura. Existem algumas faixas de temperatura onde são verificadas maiores taxas de atividade pozolânica (consumo de hidróxido de cálcio) para sistemas distintos de solo-cal e/ou solo-cal-pozolana (Sheuermann Filho, 2019). Neste contexto, a

Figura 2.10 mostra o consumo de hidróxido de cálcio ao longo de 45 dias para uma mistura de cinza volante com cal hidratada, enquanto que a Figura 2.11 apresenta o tempo necessário para um consumo de 50% da cal, em relação à temperatura de cura, para diferentes cinzas volantes. É possível identificar que o consumo de hidróxido de cálcio é dependente não somente da temperatura, mas também das características da pozolana, uma vez que taxas distintas foram identificadas para os diferentes tipos de cinza.

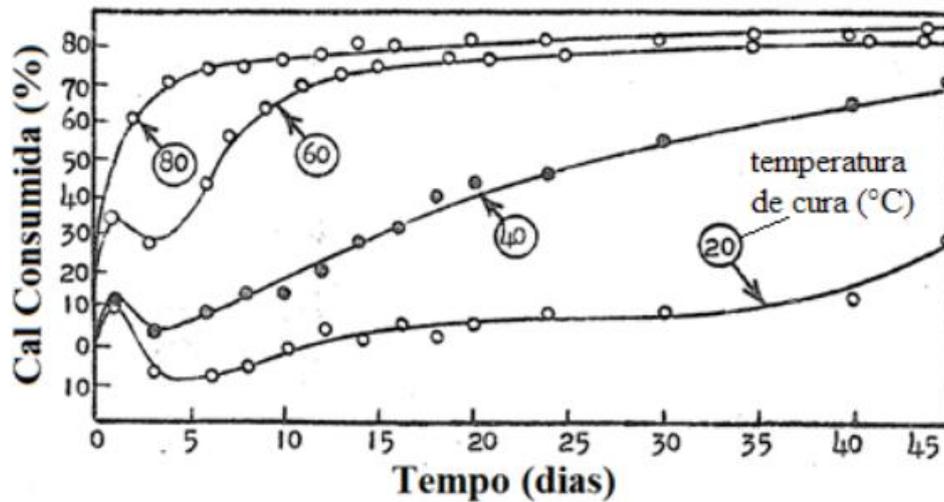


Figura 2.10: Percentual de cal consumida em diferentes temperaturas de cura ao longo do tempo (LEONARD, 1958).

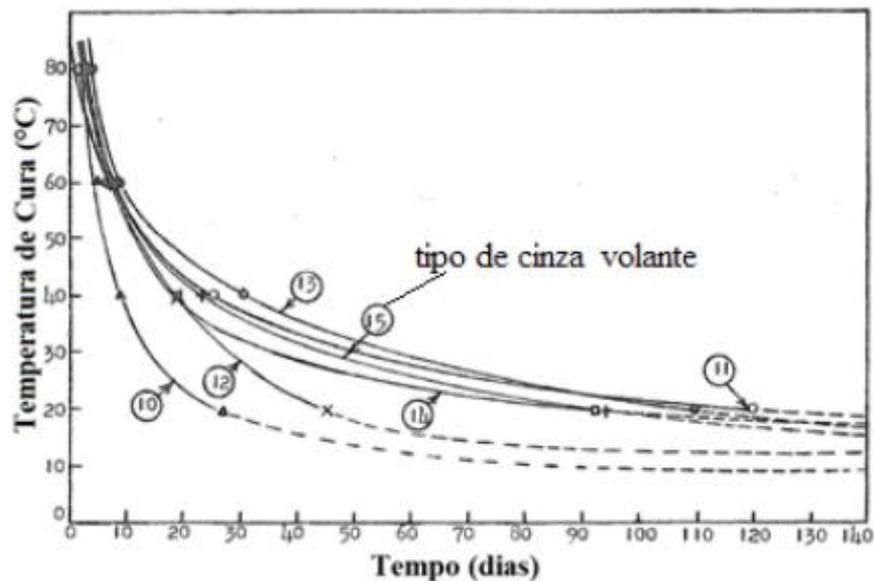


Figura 2.11: Consumo de cal em função do tempo e temperatura de cura para diferentes tipos de cinzas volantes (LEONARD;1958).

Herrin e Mitchell (1968) indicam que existe uma relação direta entre a proporção de aumento de resistência de misturas solo-cal e a temperatura com a qual a cal é curada. Em cura em baixas temperaturas, o aumento da resistência é lento. Em condições normais de temperatura (aproximadamente 70°F ou 21°C), existe um maior aumento da resistência. Já em temperaturas elevadas, superiores a 140°F ou 60°C, as misturas de solo-cal aumentam de resistência bem rapidamente com o tempo. Os autores relatam casos estudados em que o aumento da resistência foi tão rápido que foi possível obter em 10 dias a cura a 140°F (60°C) a mesma resistência obtida em períodos de três a quatro vezes maiores de cura a 70°F (21°C).

Silvani (2013) obteve um comportamento assintótico, a partir de 35° C, na relação entre resistência à compressão simples e temperatura em um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto para um período de cura de 28 dias. Saldanha (2014), ao estudar uma mistura entre cinza volante e cal de carbureto, avaliou o efeito de quatro temperaturas de cura (23, 40, 60 e 80° C) e três tempos de cura distintos (1, 3 e 7 dias) na resistência à compressão simples da mistura. O autor identificou que, para os tempos de cura de três e sete dias, a cura a temperaturas mais elevadas (60 e 80°C) não propiciou melhorias significativas na resistência, apesar do ganho obtido para a faixa entre 23 e 60°C. Saldanha (2018), ao estudar misturas de cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio, identificou que para curtos períodos de cura (3 a 14 dias) a temperatura pode ser utilizada como um acelerador no aumento da resistência à compressão simples.

Por fim, Schuermann Filho (2019), ao estudar um solo argiloso dispersivo tratado com pó de vidro moído e cal de carbureto, concluiu que a temperatura de cura foi o fator controlável que exerceu maior efeito sobre a resistência à compressão simples das misturas avaliadas, uma vez que o aumento dela propicia uma aceleração da dinâmica das reações pozolânicas. O autor identificou que, para um mesmo período de cura, maiores temperaturas elevam a taxa de fixação do hidróxido de cálcio e a precipitação dos compostos hidratados. Ao comparar a resistência verificada pelo aumento da temperatura de 23° a 40°C, foi identificada uma relação linear entre RCS e a temperatura. Além disso, foi possível identificar, através da determinação da rigidez inicial (G_0), uma influência do aumento da temperatura de cura para a formação de uma matriz cimentícia mais rígida.

2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Neste capítulo, serão apresentadas algumas propriedades e aplicações em Engenharia Civil dos materiais alternativos utilizados nesta pesquisa. São eles o pó de vidro moído e a cal de carbureto.

2.4.1 Vidro

O vidro é um material largamente utilizado na construção civil e em diversas outras atividades. Na linguagem popular, é designado como um material incolor e frágil, enquanto que na científica refere-se à descrição de sólidos não cristalinos obtidos mediante rápido resfriamento (SALES, 2014).

Sheuermann Filho (2019) conceitua vidro como um sólido amorfo no qual há ausência total de ordem de longo alcance e periodicidade, apresentando uma região de transição vítrea. Sendo assim, qualquer material que apresente estas características pode ser considerado um vidro. É importante salientar que a especificação usual deste material se aplica aos vidros cerâmicos de silicatos, constituídos predominantemente por sílica (SiO_2) com estrutura amorfa. Outros elementos, em menores proporções, também constituem este tipo de vidro, modificando suas propriedades físicas e químicas.

Além dos silicatos, existem vidros cerâmicos constituídos por grandes partes de elementos à base de boro (B), germânio (Ge) e outros (SALES, 2014). O Quadro 2.1, adaptado de Scheuermann Filho (2019) apresenta um resumo da classificação em relação à composição química predominante dos principais tipos de vidro produzidos na atualidade.

Quadro 2.1: Classificação dos principais tipos de vidro (adaptado de SCHEUERMANN FILHO, 2019).

Tipo de vidro	Características
Soda-cal	É o tipo de vidro mais comum. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e produtos que não necessitam de grande resistência química e/ou térmica.
Chumbo	Possuem um alto índice de refração, brilho e densidade. Comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes.
Boro-silicatos	Caracterizados por baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e uma grande estabilidade química, sendo empregados em situações que requerem uma boa durabilidade do material vítreo.
Ópticos	Possuem alta densidade e elevado índice de refração. Utilizados principalmente na fabricação de lentes e elementos afins.
Alumino-silicato	Apresentam resistência à altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão.

Dentre todos os tipos de vidro, o sodo-cálcico é o mais utilizado, totalizando mais de 85% da produção mundial (MOHAJERANI *et al.*, 2017). Além da presença de sílica, este tipo de vidro é constituído por adição de óxido de cálcio (de 8 a 20%), responsável pela cristalização da sílica e incorporação de 10 a 20% de sódio na forma de carbonato ou óxido. Esta última adição promove resistência e evita a formação de bolhas no material. Ainda, há inclusão de compostos como alumina e óxido de magnésio em pequenas porcentagens.

Devido à tamanha produção, o vidro do tipo soda-cal representa também a maior parte dos resíduos de vidro que são gerados globalmente. No Brasil, a NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c) enquadra esses materiais como resíduos inertes não perigosos de classe II-A.

O processo de produção de uma tonelada de vidro consome, em média, 560 Kg de areia (fonte de sílica), 190 Kg de carbonato ou óxido de sódio, 146 Kg de calcário (fonte de carbonato de cálcio) e 64 Kg de rochas dolomíticas (fontes de feldspato) (MOHAJERANI *et al.*, 2017). Devido à necessidade de altas temperaturas para promover a fusão nas matérias primas envolvidas no processo, geralmente variando entre 1500 e 1600° C, a indústria do vidro é enquadrada como uma atividade de alta demanda energética (SCHMITZ *et al.*, 2011). Além do alto consumo energético, cabe salientar que a produção de vidro libera também gases do efeito estufa, principalmente dióxido de carbono, no processo de aquecimento dos materiais em razão da decomposição dos compostos carbonáceos.

Conforme dados da IEA (2007), a produção mundial de vidro estimada no ano de 2005 foi de 130 milhões de toneladas, sendo que 60% corresponde a vidro para recipientes e 30% a vidros planos. O percentual de vidro que é reciclado varia muito de acordo com o local. Alguns países da Europa têm destaque pelas suas altas taxas de reciclagem de vidro, em alguns casos superior à 90%. Nos Estados Unidos, de acordo com dados da USEPA (2015), o percentual é bem inferior. No ano de 2013, apenas 30% da produção anual de vidro do país foi efetivamente reciclada, sendo o que restante foi disposto em aterros sanitários. Dados do CEMPRE (2018) mostram que no Brasil os resíduos de vidro representam cerca de 3% dos resíduos urbanos produzidos, sendo que 1% é proveniente de embalagens e o restante da quebra e descarte de peças. Do total de vidro produzido anualmente no Brasil, cerca de 45% é reciclado. O Quadro 2 apresenta a porcentagem de vidro que foi reciclado em diferentes países do mundo no ano de 2010.

Quadro 2.2: Porcentagem de vidro reciclado no ano de 2010 em diferentes países do mundo (CONTAINER RECYCLING INSTITUTE, 2017).

País	Porcentagem de vidro reciclado
Bélgica	96%
Suíça	94%
Luxemburgo	93%
Holanda	91%
Suécia	91%
Noruega	89%
Alemanha	82%
Itália	74%
França	67%
Reino Unido	61%
Espanha	57%
Austrália	34%
Estados Unidos	33%

Mohajerani *et al.* (2017) sugerem que a reciclagem de vidros encontrados em aterros sanitários para produção de novas peças compostas integralmente por material reciclado é inviável, em razão das diferenças existentes na composição química destes materiais. No entanto, o vidro tem sido altamente reciclado na forma de incorporação do resíduo na fabricação de novas peças vítreas, implicando em um menor gasto energético no processo produtivo e redução da emissão de gases poluentes. Dados da ABIVIDRO (2013) mostram que a simples adição de 10% de resíduo de vidro na produção de novas peças do material propicia uma economia de 4% da energia total, reduzindo o consumo de CO₂ em 5% e o de água em 9,5%.

Algumas aplicações de resíduos de vidro podem ser encontradas no ambiente acadêmico. Scheuermann Filho (2019) relata a aplicação em estudos visando o emprego do vidro na substituição parcial e/ou total de agregados finos em concreto com cimento Portland, incorporação de vidro moído em misturas de concreto asfáltico como agregado e/ou material

de preenchimento (*filler*), aplicação de pó de vidro em misturas com materiais pétreos para bases e sub-bases de pavimentos, utilização de resíduos de vidro para fabricação de fibras e adição destas em concretos ultraleves e utilização de pó de vidro moído como um ligante pozolânico.

Wartman *et al.* (2004) citam a possibilidade de utilização do vidro moído em diferentes aplicações, como bases e sub-bases de pavimentos, aterros, preenchimentos estruturais, não estruturais e estruturas de contenção, cama para tubulações, material antiderrapante, material de drenagem e execução de fossas sépticas, entre outros.

Ganiron Jr. (2013) avaliou a utilização de garrafas de vidro moídas como agregado fino em concretos, utilizando teores de substituição da areia por vidro de 25, 50, 75 e 100%. O autor identificou que a utilização do vidro tem o potencial de reduzir a relação água/cimento para algumas porcentagens e reduzir o custo do concreto produzido. Entretanto, ao adicionar vidro obtém-se um concreto com menor módulo de elasticidade, não sendo recomendada essa adição para concretos com fins estruturais.

Salamatpoor e Salamatpoor (2017) avaliaram o efeito da adição de vidro em estado granular em areias artificialmente cimentadas, através da realização de ensaios triaxiais e de resistência à compressão simples. A partir dos resultados, os autores identificaram que quanto maior a porcentagem de vidro adicionado, na faixa de valores estudados, maior o ângulo de atrito interno e a coesão obtida para o material, resultando em uma maior resistência à compressão. Os autores conferem este aumento nos parâmetros constitutivos da areia artificialmente cimentada a uma melhor distribuição granulométrica da mistura com a adição do vidro granular.

Mohajerani *et al.* (2017) relatam a utilização de pó de vidro moído na substituição parcial de cimento em concretos. A partir da análise de resultados obtidos por diferentes autores, foi possível identificar na maior parte dos casos uma perda de resistência ao se ensaiar a resistência de argamassas com substituição do cimento por pó de vidro aos 28 dias de cura, em comparação à argamassa em seu estado inicial.

Islam *et al.* (2016) estudaram a substituição parcial do cimento de concretos por pó de vidro moído, utilizando teores de substituição de 10, 15, 20 e 25% de cimento por vidro. A partir da realização de ensaios de compressão simples com tempos de cura de 7, 14, 28, 56, 90, 180

e 365 dias, foi possível um estudo mais preciso do comportamento das misturas ao longo do tempo. Assim como as pesquisas citadas por Mohajerani *et al.* (2017), a substituição parcial do vidro causou uma redução da resistência do material para menores tempos de cura. No entanto, para tempos de cura maiores ocorreu um efeito oposto, com misturas se tornando até mais resistentes em relação às originais. O autor indica a possibilidade de que o cálcio que é liberado durante o processo de hidratação do cimento reage ao longo do tempo com o silício disponível no pó de vidro, o que propicia um ganho de resistência ao longo do tempo.

2.4.2 Aplicações de vidro em solos finos

Olufowobi *et al.* (2014) avaliaram o efeito estabilizante de pó de vidro adicionado a um solo fino argiloso classificado como inadequado para uso em camadas de pavimentos rodoviários. O pó utilizado foi obtido a partir de fragmentos de vidro quebrado, sendo adicionado ao solo em teores de 1, 2, 5, 10 e 15%, junto com um teor base de 15% de cimento Portland. Para avaliação do efeito da adição de pó de vidro foram realizados ensaios de Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e ensaio de Cisalhamento Direto. A partir dos resultados, os autores identificaram os melhores valores de ISC para a amostra com adição de 5% de pó de vidro, enquanto que o maior ângulo de atrito interno e coesão foram obtidos para a amostra com teor de adição de 10%.

Benny *et al.* (2017) analisaram a influência da adição de pó de vidro na resistência ao cisalhamento, compressibilidade e valores de ISC de solos argilosos através de ensaios de resistência ao cisalhamento direto, resistência à compressão não confinada, compactação Proctor Normal e Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). Os autores optaram por teores de adição de 2, 4, 6, 8 e 10% de pó de vidro. A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível identificar um aumento nos parâmetros de ângulo de atrito interno, coesão e resistência à compressão não confinada com o aumento do teor de vidro adicionado. Para o ensaio de ISC, o aumento ocorreu somente até o teor de 6% de pó de vidro, diminuindo a partir do teor de 8%.

Gullu *et al.* (2017) estudaram o comportamento de um solo argiloso artificialmente cimentado com cimento Portland e adição de pó de vidro, visando aplicação em colunas de solo cimento. Com os resultados, os autores concluíram que um maior teor de adição de vidro representa também um maior tempo necessário para o ganho de resistência da mistura. Além disso, eles

identificaram a existência de um teor ótimo de vidro que maximiza o ganho de resistência nas misturas, sendo que ao se ultrapassar este valor a adição se torna prejudicial.

2.4.3 Cal de carbureto

De acordo com Saldanha (2018), a cal de carbureto é um resíduo gerado na produção do gás acetileno. O produto é constituído basicamente por hidróxido de cálcio com pequenos teores de carbonato de cálcio, óxido de silício e outros óxidos formados durante o processo produtivo.

Em 2014, a produção global de gás acetileno atingiu a marca de aproximadamente 500.000 toneladas, gerando um montante de 1.423.000 toneladas de cal de carbureto. O Brasil possui uma capacidade produtiva anual do gás em torno de 12.000 toneladas, mas acaba por produzir cerca de 6.000 toneladas (HORPIBULSUK *et al.*, 2015).

Saldanha (2018) relata que, devido às suas propriedades químicas e físicas, a cal de carbureto pode ser reciclada e reutilizada em diferentes processos e atividades, como agricultura, indústrias, estações de tratamento de água e construção civil. Na Engenharia Geotécnica, a cal de carbureto encontra possibilidade de aplicação na estabilização de solos. A reutilização deste resíduo tem o potencial de reduzir radicalmente o impacto gerado pelo descarte em aterros, assim como diminuir a necessidade de exploração de minas de calcário.

Saldanha (2014) avaliou o comportamento mecânico de misturas compactadas de cinza volante e cal de carbureto através de ensaios de resistência à compressão simples em corpos-de-prova com diferentes teores de cal e pesos específicos aparentes secos. Além disso, o autor utilizou também diferentes tempos e temperaturas de cura. A partir dos resultados, foi possível identificar um aumento da resistência da mistura com o aumento do teor de cal, do peso específico aparente seco, do tempo de cura e da temperatura, esta última com limitações para tempos de 3 e 7 dias.

Bilondi *et al.* (2018) estudaram a utilização de cal de carbureto na estabilização de solos argilosos em misturas com adições de pó de vidro. Os autores variaram os teores de pó de vidro de 0 a 20% e os teores de cal de 0 a 13%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples com duas temperaturas de cura diferentes (25 e 70° C) e três tempos de cura distintos (7, 28 e 91 dias). Foi identificada uma tendência de aumento da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura até o período de 28 dias, sendo que a

taxa de aumento se mostrou insignificante após esse período. Além disso, o aumento da temperatura de cura também refletiu em um ganho de resistência para os períodos de sete e 28 dias de cura, se mostrando menos efetivo para os períodos maiores.

Scheuermann Filho (2019) avaliou a estabilização de um solo dispersivo do Paraguai através da adição de pó de vidro moído e cal de carbureto. Solos dispersivos são caracterizados por uma defloculação na presença de água pura estática, estando propensos a fenômenos erosivos. Foram definidos como fatores-chave para a pesquisa o peso específico aparente seco, teor de cal, teor de pó de vidro moído, umidade de moldagem e temperatura de cura. O autor estudou parâmetros de resistência à compressão simples, rigidez inicial, durabilidade e dispersibilidade. A partir da análise dos resultados obtidos no protocolo experimental, foi possível constatar uma melhoria de desempenho das misturas à durabilidade e uma supressão da dispersibilidade com a adição de pó de vidro moído e cal de carbureto.

2.5 ATIVAÇÃO ALCALINA

A ativação alcalina é conhecida como a técnica que permite a obtenção de ligantes poliméricos. O termo “geopolímero” surgiu em 1978, quando Joseph Davidovits desenvolveu ligantes obtidos através da ativação alcalina de caulim e metacaulim. O autor caracteriza os materiais geopoliméricos como polímeros inorgânicos não somente devido ao fato de que eles se transformam e se condensam, mas também por ganharem forma e endurecer a baixas temperaturas. (TORGAL *et al.*, 2007).

Os geopolímeros ou ligantes geopoliméricos são materiais com propriedades cimentícias, obtidos através da dissolução de matérias-primas ricas em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) no produto ativador. Estes são soluções, no estado líquido, com um pH deveras elevado. Estes produtos são misturados com o solo, resultando em misturas quimicamente mais estáveis, com melhores propriedades mecânicas, onde o cálcio está praticamente inexistente. Ligantes deste tipo são alternativos aos convencionais, como o cimento Portland e a cal, e sua utilização propicia diversas vantagens, especialmente do ponto de vista ambiental. Além de permitir uma redução nas emissões de CO_2 , sua utilização permite uma redução de consumo de combustíveis fósseis e redução do consumo de energia de produção.

A primeira evidência documentada da utilização de ligantes alcalinos remete ao final do século XIX, em uma escória granulada de alto forno e soda cáustica em combinação com cal

apagada. No início do século XX, Hans Kühl, notório químico e engenheiro alemão, investigou o endurecimento de escórias de alto forno na presença de soluções de KOH. Já na década de 1940, na Bélgica, A. Purdon avaliou mais de trinta escórias de alto forno distintas, ativadas por soluções de NaOH, assim como combinações de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e diferentes sais de sódio. Neste caso, foi possível obter resistências à compressão simples comparáveis aos dos cimentos Portland e melhores resistências à tração.

Na década de 50, o oriente passou por uma escassez de cimento Portland que conduziu à uma necessidade de utilização de materiais alternativos. Assim, a ativação alcalina surgiu na China e na União Soviética como um meio de superar tal escassez aplicando os materiais disponíveis, especificamente escória metalúrgica. No oriente, destaca-se o trabalho realizado por Victor Glukhovsky entre 1950 e 1960 e Privenko na década de 1980.

Com o fim da cortina de ferro entre ocidente e oriente, na década de 80, Joseph Davidovits desenvolveu uma série de ligantes derivados da interação entre metacaulim e soluções alcalinas. Ele chamou estes materiais de “geopolímeros” e desenvolveu um produto comercial catalogado denominado Pyrament, sendo basicamente um cimento ativado por álcalis. Este produto foi aplicado em pistas de pouso em aeroportos nas cidades de Chicago, Dallas e Nova York, nos Estados Unidos, apresentando um bom desempenho.

A inclusão de materiais recicláveis em misturas álcali-ativadas constitui uma abordagem científica recente. Assim, alguns estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos com o intuito de desenvolver e identificar o potencial de aplicação da técnica em estabilização de solos.

Lampris *et al.* (2009) comprovaram a capacidade de ativação de finos predominantemente siltosos provenientes da lavagem de resíduos de construção civil (RCC). Foi possível obter materiais com resistências à compressão simples (RCS) máximas de 18 MPa e 22 MPa (quando misturados com 20% de cinza volante), após cura de sete dias a 25° C. Os autores realizaram um extensivo trabalho para otimizar as misturas, no que tange à relação água/cimento, concentração de silício solúvel, concentração de NaOH e condições de cura.

Robayo *et al.* (2016) estudaram as propriedades mecânicas e microestruturais de um resíduo de tijolo vermelho ativado com hidróxido de sódio (NaOH) e sílicato de sódio (Na_2SiO_3), em misturas apenas com adição dos ativadores e em outras com adição de até 20% de cimento

Portland. A adição do silicato de sódio ao ativador original de NaOH representou em um acréscimo de resistência de 626% (de 7,49 MPa para 54,38 MPa) para a mistura curada a 25°C por 28 dias. Além disso, a adição de 20% de cimento na mistura ativada com ambos os ativadores permitiu um acréscimo ainda maior de resistência, atingindo 102,6 MPa. A adição de 10% de cimento à mistura ativada apenas com NaOH conduziu a uma RCS de 41,1 MPa, para as mesmas condições de cura. Os autores concluíram que uma fonte de cálcio representa a maior contribuição para a performance final do material.

Vásquez *et al.* (2016) avaliaram a utilização de um ativador composto por hidróxido de sódio e silicato de sódio, em misturas curadas em temperatura ambiente durante 28 dias. Eles obtiveram RCS em torno de 25 MPa, para misturas com 100% de resíduo de construção civil, 33 MPa para misturas híbridas (70% de RCC e 30% de cimento Portland) e 46 MPa para misturas binárias (90% de RCC e 10% de metacaulim).

Mohammadinia *et al.* (2016) produziram misturas de tijolos moídos, agregados britados e material fresado com um teor de precursor de 4% (cinza volante ou escória), ativadas com soluções de NaOH e Na₂SiO₃. Os autores obtiveram RCS máximas de 1,8 MPa, 4,5 MPa e 2,1 MPa para os tijolos moídos, agregados britados e fresado, respectivamente.

Cristelo *et al.* (2018) estudaram a estabilização da parte fina de resíduos de construção civil. O agregado reciclado foi avaliado em misturas com e sem a adição de cinza volante, ativadas com uma solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que a presença de cinza volante causa um aumento na resistência à compressão simples e módulo de elasticidade, chegando a valores de RCS superiores à 8 MPa após 28 dias de cura a temperatura ambiente. Tais valores são superiores a qualquer limite estabelecido para obras geotécnicas como subleitos rodoviários e ferroviários e aterros, consideradas aplicações efetivas pra resíduos de construção civil reciclados.

2.5.1 Química das soluções alcalinas ativadoras

Em geral, utilizam-se sais de álcalis ou hidróxidos alcalinos como ativadores alcalinos de cimentos e concretos ativados alcalinamente. Glukhovski *et al.* (1980) e Shi *et al.* (2006) os classificaram em seis grupos de acordo com sua composição química:

- Hidróxidos alcalinos;
- Sais de ácidos fracos;

- Silicatos;
- Aluminatos;
- Aluminosilicatos;
- Sais de ácidos fortes.

Os produtos químicos mais amplamente disponíveis e empregados em ativação alcalina são o NaOH, Na₂CO₃, Na₂ · nSiO₂ e Na₂SO₄.

Os cátions presentes no ativador (Na⁺ e K⁺) desenvolvem um papel importante na ativação alcalina. Além de manterem o pH do sistema estável, eles formam parte da estrutura do gel, onde neutralizam a carga elétrica quando um SiO₄ tetraedro se substitui por um AlO₄⁻. Na ativação de materiais com alto teor de CaO, que é o caso das escórias, o NaOH favorece a dissolução de Ca e Mg da escória, e a formação de um gel C-S-H (relação Ca/Si próxima de 1). O KOH, por sua vez, dissolve menor quantidade de Mg procedente da escória. Já na ativação de materiais com baixos teores de CaO, como as cinzas, o NaOH favorece a formação de zeolitas em razão de seu menor tamanho (em comparação com o K⁺) e flui melhor através do gel. O KOH, por outro lado, quando aplicado em altas concentrações, dissolve uma alta porcentagem dos aluminosilicatos, comparável com o NaOH em baixas concentrações.

Diversos tipos de ligantes álcali-ativados têm sido desenvolvidos nas últimas décadas. Baseado na natureza dos seus compostos cimentantes (sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃), os ligantes alcalinos podem ser agrupados em duas categorias: ligantes de alto CaO e ligantes de baixo CaO. Nas duas categorias, o mecanismo de ativação ocorre de maneira diferente.

- A. **Sistemas Alto CaO – Sistema (Na,K)₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O** – neste modelo, materiais com predomínio de cálcio e silício, como a escória de alto forno, são ativados sob condições alcalinas relativamente moderadas (FERNÁNDEZ-GIMENEZ, 2000; SHI *et al.*, 2006). Neste caso, o produto principal das reações é denominado de gel C-A-S-H, similar ao gel obtido durante a hidratação do cimento Portland.
- B. **Sistemas Baixo CaO - Sistema (Na,K)₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O** – este modelo os materiais compreendem basicamente aluminosilicatos. Materiais utilizados neste sistema, tais como metacaulim e cinzas volantes, possuem baixos teores de CaO. Nestes casos, são necessárias condições de trabalho mais agressivas

para iniciar as reações (meio altamente alcalino e temperaturas de cura entre 60 e 200°C). O principal produto das reações formado neste sistema é um polímero alcalino inorgânico tridimensional, denominado N-A-S-H, gel considerado precursor das zeólitas (Palomo *et al.*, 1999).

Uma das características mais proeminentes da tecnologia de ativação alcalina é que materiais naturais (como argila ou feldspato) e subprodutos industriais (como escória, cinzas volantes e resíduos de vidro e cal) podem ser usados como materiais precursores nestes sistemas.

2.5.2 Precursores

Precursores são compostos que, ao participar das reações, produzem um ou mais compostos. Em geral, são materiais ricos em alumínio e/ou silício no seu estado amorfo ou semicristalino. Além disso, eles têm a capacidade de fornecer alumina, silicato ou até mesmo aluminossilicatos, sendo capazes de ser dissolvidos por uma solução alcalina. Eles podem ser naturais, resíduos industriais ou resíduos transformados. Castro (2015) relata que os precursores mais pesquisados na produção de materiais geopoliméricos ou concreto alcalino ativado são os resíduos provenientes da indústria de mineração e de usinas termoelétricas, como escória de alto forno, metacaulim e cinza volante. Além destes, materiais como pó de vidro, cinza de casca de arroz, cerâmica e caulim também são considerados precursores, devido aos seus elevados teores de alumínio e/ou silício.

Fernández-Gimenez e Palomo (2005) salientam que as propriedades mecânicas, físicas, químicas e mineralógicas dos materiais formados a partir de metacaulim, cinzas volantes, escória de alto forno em combinação com metais alcalinos, como Na e K, dependem principalmente da composição química e mineralógica, especialmente do teor de sílica, da matéria-prima ou precursor. Isso significa que o desenvolvimento de melhores resistências dos geopolímeros está relacionado às principais transformações estruturais dos precursores que ocorreram no processo de geopolimerização, e principalmente pela formação de uma nova fase do gel aluminossilicato amorfo na matriz do geopolímero.

2.5.3 Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio (NaOH) é um produto químico altamente solúvel e miscível na presença de água. Conhecido popularmente como soda cáustica, é considerado uma base forte. Quando em solução aquosa, o hidróxido de sódio é altamente alcalino e reage de maneira espontânea

com ácidos. No mercado, o NaOH é encontrado como um sólido cristalino, geralmente em forma de pó, bloco ou grão em temperatura ambiente ou como uma solução aquosa com concentrações variáveis, porém de mesma composição química.

Ao ser diluído em água, o NaOH causa uma entalpia e aumenta a temperatura do sistema, o que resulta em uma liberação de calor, característica de reações exotérmicas. A intensidade dessa liberação de calor aumenta proporcionalmente com a concentração da solução. Em alguns compostos orgânicos ou minerais, como ácidos fortes, clorofórmio, cetonas, ácido clorídrico e fósforo, as reações podem ser muito violentas ou até mesmo explosivas.

Para materiais com alto teor de CaO, o NaOH é considerado um ativador muito efetivo. Costuma-se utilizar concentrações entre 2 e 4 M. Ativadores com concentração de Na₂O superior a 5% em massa do precursor provocaria uma redução dos valores de resistência das misturas finais. Altos teores de álcalis podem favorecer a presença de fluorescências e enfraquecer os materiais. Em materiais com baixo teor de CaO, o NaOH é muito utilizado em virtude de sua disponibilidade, viscosidade e preço. Neste caso, geralmente se utilizam concentrações variando entre 8 e 10 M. Uma baixa alcalinidade afeta negativamente as propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que a hidrólise do silício e do alumínio presentes não ocorre adequadamente (PALOMO *et al.*, 1999).

2.5.4 O efeito do tempo e da temperatura de cura

Diversos estudos têm mostrado a importância da temperatura no processo de desenvolvimento de geopolímeros. Conforme Van Deventer *et al.* (2006), a temperatura é muito importante no processo de geopolimerização, uma vez que ela atua na aceleração das reações, aumentando o volume dos mesóforos para fechar os vazios presentes entre as partículas precursoras.

Thakur e Ghosh (2009) avaliaram a influência da temperatura no comportamento mecânico de uma argamassa geopolimérica de cinzas volantes, com uma temperatura de cura variando entre 45°C e 120°C. A partir da realização de ensaios de resistência à compressão simples, os autores identificaram um aumento linear de resistência com a elevação de temperatura de cura entre 45°C e 85°C. Ainda, eles identificaram que a melhor resistência à compressão foi obtida após 48h de cura a uma temperatura de 85°C.

O tempo de cura pode exercer influência no comportamento mecânico de um material alcalinamente ativado, de acordo com as condições ambientais em que as amostras são

submetidas no chamado período de endurecimento. De um modo geral, com a aplicação de condições térmicas (elevação de temperatura), o aumento da resistência nas primeiras 24 horas é muito rápido. Entretanto, o aumento de resistência torna-se lento após 24 horas. Em alguns casos, é possível obter a resistência máxima do geopolímero a 48h de cura sob condições de alta temperatura, em torno de 85°C (THAKUR e GHOSH, 2009).

Wallah e Rangan (2006) avaliaram a variação de resistência em função do tempo de cura de um geopolímero obtido a partir de cinzas volantes. A partir das análises, os autores concluíram que a resistência à compressão simples aumenta com a elevação do tempo de cura, porém um período elevado de cura (semanas, meses ou anos) não resulta em um aumento considerável da resistência, especialmente se as condições térmicas fossem consideradas ou aplicadas.

3 MATERIAIS

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados no estudo e suas características avaliadas através de ensaios de laboratório. Para o desenvolvimento da pesquisa, utilizou-se um solo residual argiloso, pó de vidro moído e cal de carbureto. Além destes, utilizou-se também o ativador alcalino hidróxido de sódio (NaOH). As características físicas, químicas e mineralógicas destes materiais estão apresentadas neste capítulo.

3.1 SOLO ARGILOSO

O solo utilizado nesta pesquisa é procedente do município de Ijuí/RS, localizado na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O material foi coletado às margens da RS-342, importante rodovia da região, no km 120, entre os municípios de Ijuí e Cruz Alta. De acordo com dados do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS, a rodovia RS-342 possuía, no mês de junho de 2011, um VDM de 5594. O VDM (Volume Diário Médio) é o volume ou tráfego registrado em um dia e é utilizado para avaliar a distribuição do tráfego, medir a demanda e programar melhorias básicas. Ao analisar a série histórica, é possível identificar quase que uma duplicação no VDM da rodovia entre outubro de 2002 e agosto de 2011. Ainda, o trecho onde o solo foi coletado é caracterizado por uma série de defeitos estruturais no pavimento, o que reforça a necessidade de pesquisas e estudos de modo a propor melhorias a estrutura do pavimento como um todo.

As coordenadas geográficas do ponto de coleta, aferidas por GPS, são de 28°26'14" S e 53°53'22" W. De acordo com Lambe e Whitman (1979), o perfil de um solo residual pode ser dividido em três zonas distintas (zona superior, zona intermediária e zona parcialmente intemperizada). Neste estudo, o solo coletado é considerado pertencente à parte superior da zona intermediária, ou seja, o segmento onde é possível identificar certo intemperismo. A Figura 3.1 mostra o perfil onde o solo em estudo foi coletado, enquanto a Figura 3.2 mostra a localização do município de Ijuí no estado do Rio Grande do Sul.



Figura 3.1: Perfil onde o solo foi coletado.

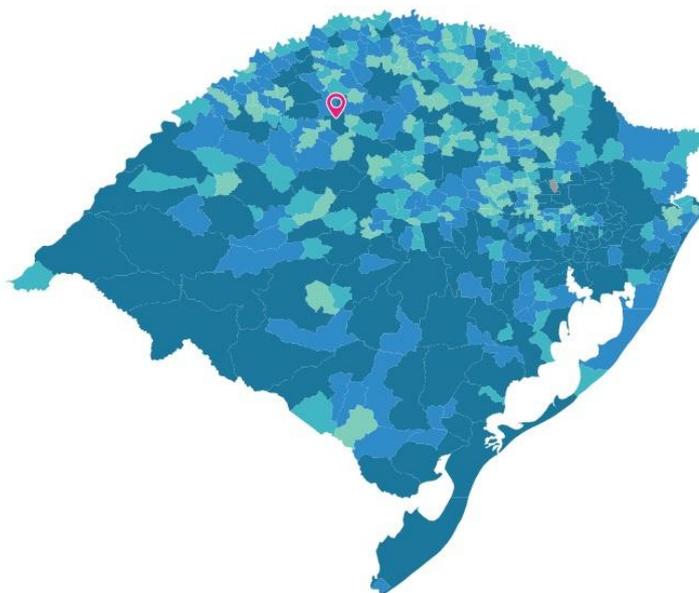


Figura 3.2: Mapa de localização do município de Ijuí no estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2019)

Conforme a classificação Taxonômica das Unidades de Mapeamento do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul desenvolvido pela Emater/RS, o ponto onde o solo foi coletado está situado na classe de mapeamento Latossolo Vermelho Distroférico típico (STRECK *et al.*, 1999). São solos caracterizados por baixos valores de saturação por bases (inferior a 50%) e elevados teores de ferro em sua composição (superior à

18%). Por serem muito intemperizados, possuem uma predominância de caulinita e óxidos de ferro, resultando em baixas capacidades de troca catiônica (CTC).

Além disso, o solo em estudo está localizado sobre rochas do grupo São Bento, Formação Serra Geral, Fáceis Gramado, de acordo com o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul elaborado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM, 2006), mostrado na Figura 3.3. Tais rochas são provenientes de derrames basálticos granulares finos a médios, de cor cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita. São comuns, nestas rochas, estruturas de fluxo, sendo que é possível a ocorrência de intercalação com arenitos Botucatu nos primeiros derrames.

O ponto de coleta do solo está inserido na unidade de mapeamento geotécnico Santo Ângelo, como pode ser identificado na aproximação do mapa exposta na Figura 3.4. Conforme o IBGE (1986), esta formação é um agrupamento de vulcanitos predominantemente basálticos entremeados com termos ácidos, sobretudo no topo, e intercalados com arenitos de origem eólica da Formação Botucatu. Em adição, o ponto de coleta está localizado em região de clima subtropical (ou temperado) úmido, com as quatro estações bem definidas e temperatura média anual em torno dos 20° C e precipitação anual superior a 1700 mm.

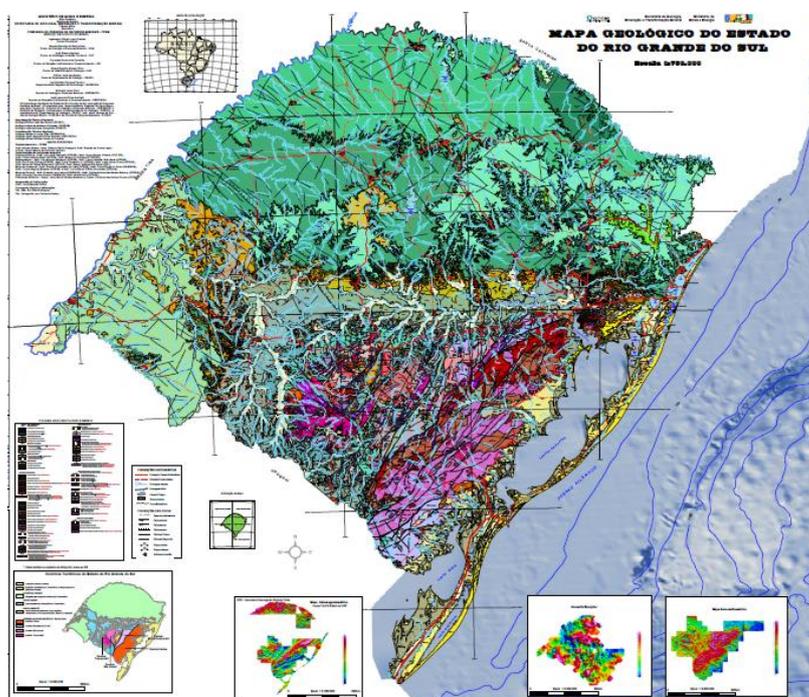


Figura 3.3: Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2006).

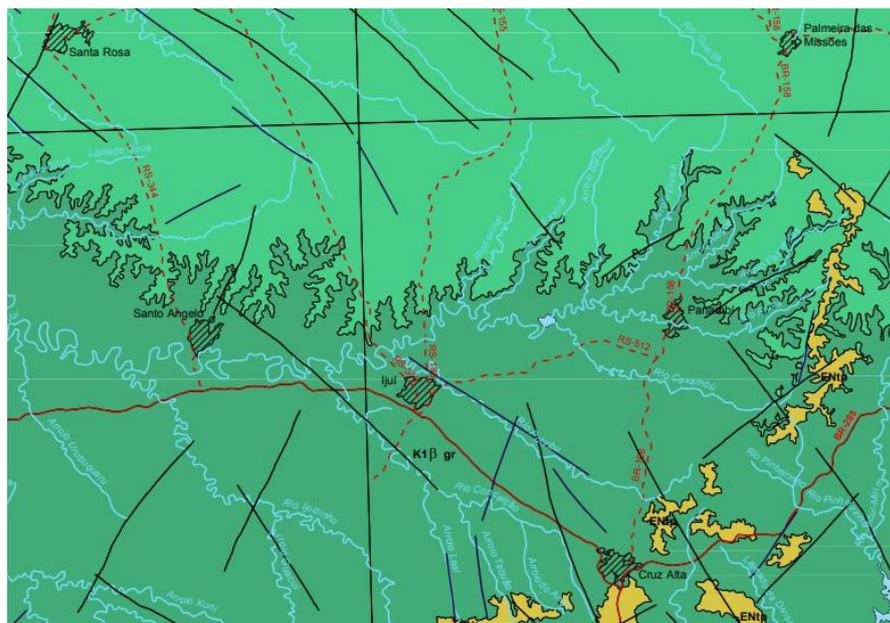


Figura 3.4: Grupo São Bento, Formação Serra Geral, Fáceis Gramado (CPRM, 2006).

Após uma limpeza superficial do perfil, amostras deformadas de solo foram coletadas com o auxílio de pás. Foi coletado um total de 100 Kg de solo, posteriormente levado ao Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental - LEGG da UFRGS para secagem ao ar. Após a secagem, as amostras foram destorroadas e passadas pela peneira de nº 4 (4,8mm). O material passante foi acondicionado em bombonas de plástico, em local seco e arejado. É importante salientar que todos os ensaios laboratoriais foram realizados com a utilização de amostras deformadas.

3.1.1 Caracterização física do solo

A distribuição granulométrica do solo estudado é apresentada na Figura 3.5. Foi realizado o ensaio convencional de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, de acordo com a normativa NBR 7181 (ABNT, 2016), com e sem o uso de defloculante. A Tabela 1 apresenta um resumo das características físicas do solo em estudo.

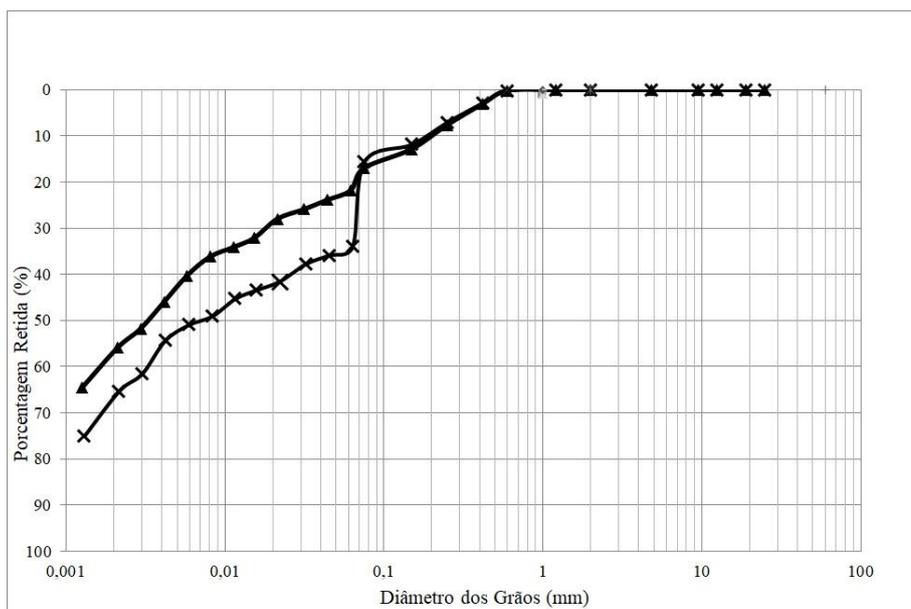


Figura 3.5: Distribuição granulométrica do solo estudado.

Tabela 3.1: Características físicas do solo estudado.

Característica	Resultado	Normativa utilizada
Limite de Liquidez (LL)	79	ABNT NBR 6459
Limite de Plasticidade (LP)	60	ABNT NBR 7180
Índice de Plasticidade (IP)	19	-
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,89 g/cm ³	ABNT NBR 6508
% Areia média	10%	
% Areia fina (0,06 < d > 0,2mm)	10%	
% Silte (0,002 > d > 0,06mm)	37%	ABNT NBR 6502
% Argila (d < 0,002mm)	43%	
Classificação SUCS	CH	-
Classificação TRB	A-7-5	-
Classificação MCT	NG ⁷	-
Índice de Suporte Califórnia (%)	5,2 (Energia normal)	ABNT NBR 9598
Expansão (%)	2,21 (Energia normal)	

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo estudado é classificado como um CH, ou seja, uma argila inorgânica de alta plasticidade. Este grupo enquadra essencialmente argilas sem matéria orgânica, incluindo argilas gordas, gumbos, massapês, algumas argilas vulcânicas e a bentonita. Já através do sistema da *Transportation*

Research Board (TRB), o solo é enquadrado como um solo argiloso do subgrupo A-7-5. Esta classe agrupa materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume. Além disso, são enquadrados como materiais de fraco a pobre comportamento quando utilizados como subleito rodoviário. Os valores de ISC e expansão obtidos indicam que o solo não é indicado para utilização em subleitos rodoviários. Os altos valores de limite de liquidez e plasticidade resultam em um índice de plasticidade (IP) de 19, enquadrado como alto.

Cruz e Maiolino (1985) caracterizam materiais deste tipo como sendo jovens, que passaram por pouca ou nenhuma laterização, correspondendo à segunda camada do intemperismo. São heterogêneos, compactos, relativamente siltosos e guardam uma estrutura reliquiar da rocha de origem. Quando remoldados, desagregam-se e perdem sua estrutura. Porém, quando compactados, são mais homogêneos.

Ao classificar o solo de acordo com a Metodologia MCT, desenvolvida por Nogami e Villibor (1981), é possível identificar que o solo possui um comportamento não laterítico (NG'). Tal grupo reúne solos saprolíticos argilosos originários de rochas sedimentares argilosas ou cristalinas pobres em quartzo, solos superficiais podogenéticos não lateríticos, vertissolos e solos transportados. Solos de comportamento não laterítico (Classe N), de uma forma geral, apresentam valores de capacidade de suporte abaixo dos índices classificatórios das metodologias tradicionais, podendo apresentar altos valores de expansão. Além disso, são geralmente erodíveis e possuem baixos valores de ISC e módulo resiliente. Desta forma, são geralmente considerados inadequados para uso em pavimentação.

Os índices classificatórios obtidos através da Metodologia MCT estão apresentados na Tabela 3.2, enquanto a Figura 3.6 apresenta o ábaco classificatório utilizado na metodologia. O parâmetro c' reflete a argilosidade do material. Valores próximos a 2,0, como o obtido para o solo estudado, são típicos de argilas e solos argilosos. O parâmetro e' indica o caráter laterítico do solo, sendo que solos de comportamento não laterítico geralmente apresentam um valor superior a 1,0. O elevado valor de P_i , que representa a porcentagem de perda de massa decorrente da imersão da amostra em água durante a realização do ensaio classificatório, confirma a tendência de perda da capacidade de suporte do material quando saturado, além de atestar o seu potencial erosivo.

É importante salientar que o ponto onde o solo foi enquadrado o deixa muito próximo de um solo de comportamento laterítico. Ainda, Nogami e Villibor (1995) informam que, para certos solos, a linha horizontal principal do ábaco apresenta, na realidade, uma pequena inclinação, que não foi possível se calcular com suficiente precisão. Isso significa que podem ocorrer casos em que o comportamento laterítico se manifeste para valores de e' superiores a 1,15.

Tabela 3.2: Índices classificatórios obtidos na Metodologia MCT.

Índice classificatório	Valor obtido
c'	1,94
d'	42,86
Pi (%)	160
e'	1,27

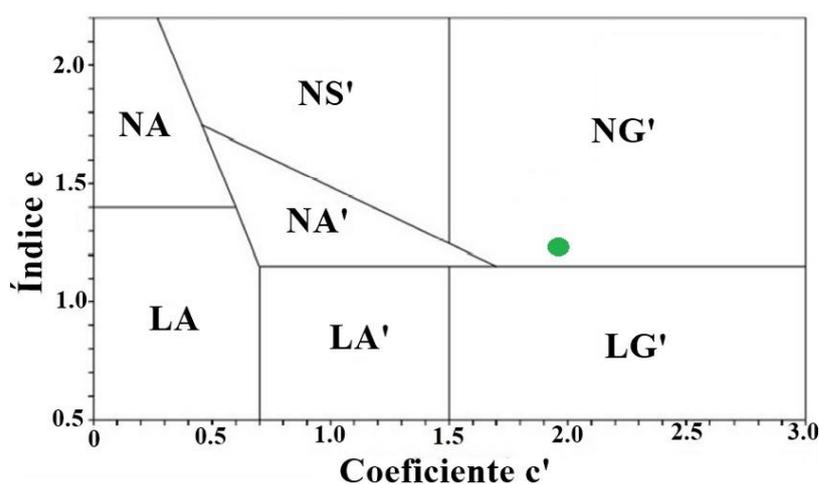


Figura 3.6: Ábaco classificatório da MCT.

Conforme a normativa DNER-CLA 259 (DAER, 1996), o grupo NG' enquadra os materiais denominados de argilas, argilas arenosas e argilas siltosas. São caracterizados por altos valores de Mini-CBR sem embebição, altas perdas de suporte por embebição e alta a média expansão e contração. Além disso, possuem uma alta plasticidade e permeabilidade de baixa a média. Os parâmetros obtidos para o solo em estudo estão de acordo com os enquadramentos desta normativa, com exceção da plasticidade, classificada como média ao invés de alta. Nogami e Villibor (1995) indicam que materiais do grupo NG' não são indicados para uso como base de pavimentos, reforço de subleito compactado, proteção à erosão e revestimento

primário, sendo somente indicados, ainda que com ressalvas, para subleitos compactados e corpos de aterros compactados.

Ao utilizar o ábaco modificado proposto por Vertamatti (1988), o solo em estudo passa a apresentar um comportamento transicional, sendo enquadrado no grupo TG' (solos argilosos transicionais), como pode ser visualizado na Figura 3.7. Ou seja, apresenta características comuns tanto a solos de comportamento laterítico quanto a solos de comportamento não laterítico.

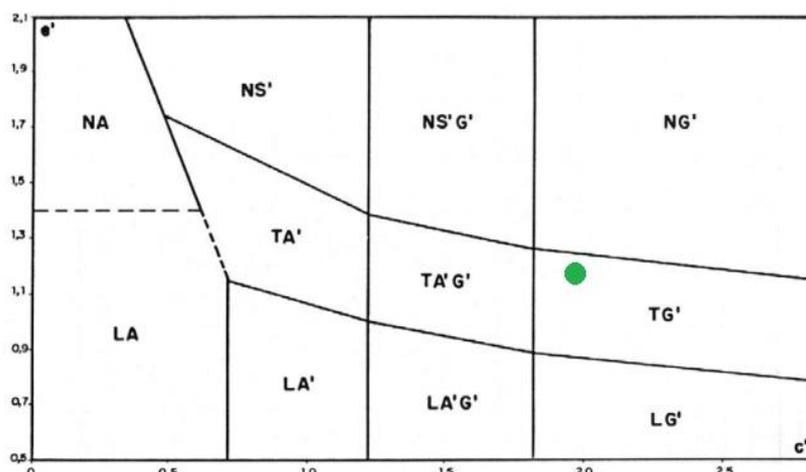


Figura 3.7: Ábaco classificatório da MCT-M.

Diversos pesquisadores realizaram estudos classificatórios em solos da região de Ijuí/RS utilizando a Metodologia MCT. De acordo com Wayhs (2004), o solo da região de Ijuí é apresentado como uma argila vermelha de alto índice de plasticidade, com alto teor de finos. De acordo com o autor, seu emprego em camadas de bases e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego é possível, contanto que este seja estabilizado granulometricamente com agregados de granulação mais grossa. Alguns autores como Bernardi (2013), Amaral (2015), Buligon (2015), Callai (2017) e Zappe (2017) comprovaram uma melhoria significativa nas propriedades do solo da região em misturas com adição de areia natural, areia industrial, areia de fundição e RCC moído.

3.1.2 Caracterização química e mineralógica do solo

Para solos empregados em subleitos rodoviários, a realização de ensaios de caracterização química é muito importante, uma vez que a análise química permite a obtenção de

informações acerca da fração argila dos solos, o que é essencial no estudo das características mecânicas dos mesmos.

As características químicas do solo, obtidas através de análise química completa, estão apresentadas na Tabela 3.3. Este método permite avaliar parâmetros como percentual de argila, classe textural, pH em água, teores de P e K disponíveis, presença de matéria orgânica, Al, Ca e Mg trocáveis, saturação por bases e por Al, CTC efetiva e CTC a pH 7,0.

Tabela 3.3: Características químicas do solo estudado.

Característica		Resultado
Cátions básicos (cmolc/dm ³)	Ca	0,43
	K	0,143
	Mg	0,4
Acidez	Al	2,4
	H+Al	6,9
Saturação (%)	V	12,3
	S	71
CTC (cmolc/dm ³)		3,4
Matéria orgânica (%)		0,3
pH		5,1

A partir da análise química, é possível enquadrar o solo como distrófico devido ao seu valor de saturação por bases inferior à 50%. Solos deste tipo são pouco ou muito pouco férteis, não possuindo reservas de nutrientes. Além disso, o solo em estudo é ácido, com pH de 5,1. O valor inferior à 5,0 para capacidade de troca catiônica (CTC) é típico de materiais de baixa atividade com pouca ou nenhuma presença de matéria orgânica. Valores de CTC entre 3 e 15 cmolc/dm³ indicam a presença do argilomineral caulinita, característico de solos não expansivos. O baixo valor encontrado pra percentual de matéria orgânica comprova isso.

A caracterização mineralógica do solo foi realizada através do ensaio de difração de raios-X (DRX), executado em um difratômetro da marca *Philips*, modelo *X'Pert MPD*. O ensaio foi realizado através do método do pó, com pulverização e desagregação do material, que é depositado em um porta-amostra para manutenção da desorientação das partículas minerais do solo. Os dados foram coletados através de radiação Cu-K α 1 (comprimento 1,54056Å) no intervalo de 5-75°2 θ a um passo de 0,05° e tempo por passo de 1 segundo. A identificação das

fases minerais do solo foi realizada através do software X'Pert HighScore Plus, com refinamento no software Origin v8. As fichas cristalográficas utilizadas foram retiradas da base de dados do *Inorganic Crystal Structure Database – ICSD*. Os principais picos encontrados foram das fases minerais caolinita, esmectita e hematita, conforme a Figura 3.8.

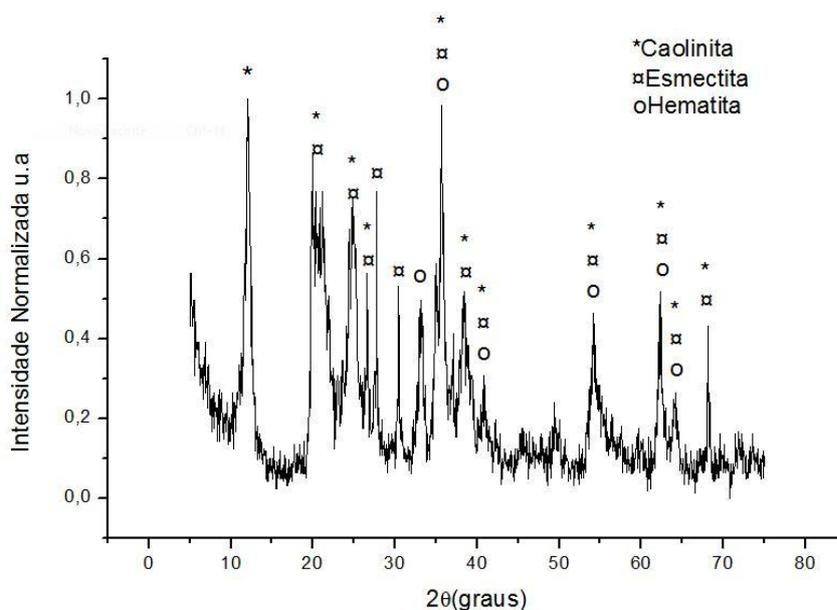


Figura 3.8: Difratograma do solo estudado.

3.1.3 Avaliação do potencial de expansibilidade do solo

A partir da identificação da presença de argilominerais expansivos no solo e do valor obtido para a expansão no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), acima dos limites recomendados para solos de subleitos rodoviários, optou-se pela realização do ensaio de expansão em uma dimensão. Este permite uma avaliação do potencial de expansibilidade de um solo quando submetido a saturação em uma célula edométrica. O ensaio é normatizado pela ASTM D4546 (2008). Optou-se pela moldagem de um corpo de prova com 50mm de diâmetro e 20mm de altura, utilizando um valor de peso específico seco aparente de 14,0 kN/m³ e teor de umidade de 34,5%, ambos retirados da curva de compactação do solo na energia normal. O corpo de prova foi submetido a uma tensão vertical de 1 kPa, aplicada por um cabeçote. Após trinta minutos, a célula de adensamento foi inundada com água destilada, e a variação de altura do corpo de prova foi medida em intervalos crescentes de tempo através de um extensômetro. Após 96h da inundação, mesmo período de imersão utilizado no ensaio

de CBR, não foi identificada variação da altura da amostra, o que indica que o solo não apresenta um potencial de expansibilidade nas condições estudadas.

3.1.4 Ensaios de compactação do solo e solo com adição de pó de vidro e cal de carbureto

Para avaliar o efeito inicial da adição de pó de vidro moído e cal de carbureto ao solo, foram realizados ensaios de compactação, de acordo com as diretrizes apresentadas na normativa NBR 7182 (ABNT, 1986). De forma inicial, foram definidos os teores de 5% de cal de carbureto e de 10% e 30% de pó de vidro. As curvas de compactação obtidas para o solo, solo com adição de 5% de cal, solo com 10% de adição de vidro e solo com 30% de adição de vidro são apresentadas na Figura 3.9.

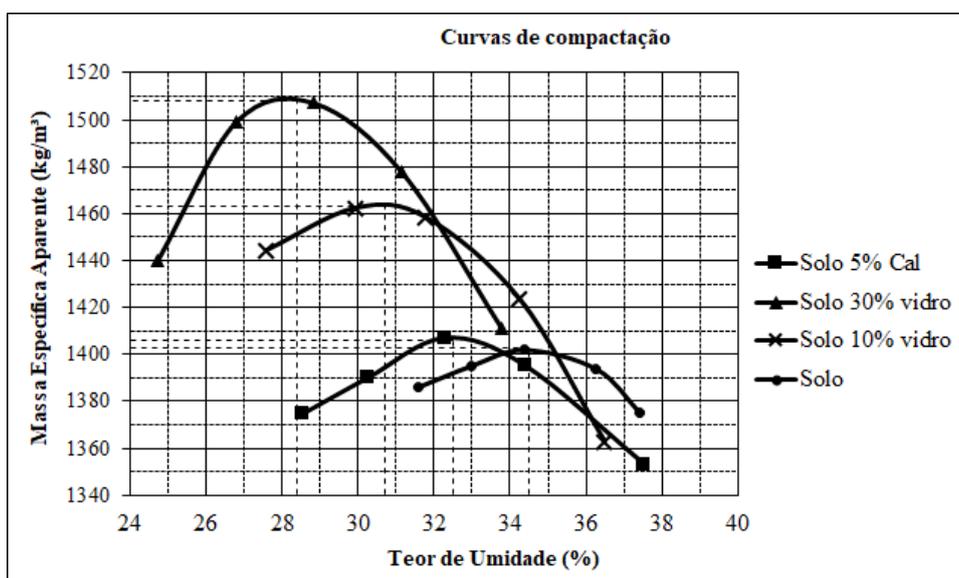


Figura 3.9: Curvas de compactação do solo e do solo com adições.

Devido às dificuldades de execução, foram realizados ensaios apenas na energia normal. Os ensaios de solo com adição de pó de vidro foram realizados com reutilização de material, de modo que a cal não poderia ser adicionada, uma vez que já reagiria ao longo do ensaio. Optou-se pela reutilização devido à disponibilidade limitada de pó de vidro moído.

O solo sem adições apresentou um valor de peso específico aparente seco relativamente baixo (14 kN/m^3) e um valor de umidade ótima elevado (34,5%). Estes valores são esperados para solos de comportamento não laterítico com predomínio de silte e argila. É possível identificar que a adição de pó de vidro propicia um aumento no peso específico aparente seco do solo e

uma redução no teor de umidade ótima da mistura. A adição da cal de carbureto não promoveu uma grande alteração da curva de compactação, deslocando-a apenas um pouco para a esquerda.

3.2 PÓ DE VIDRO MOÍDO

Para o estudo em questão, optou-se por utilizar vidro proveniente de garrafas de cor verde. Todas as garrafas utilizadas foram coletadas na Central de Descarte de Vidros do município de Ijuí/RS. Após a coleta, as garrafas foram lavadas com água e sabão neutro, e posteriormente passaram por secagem ao ar.

O processo de trituração e moagem das garrafas para obtenção de pó de vidro foi realizado no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES. Seguiu-se um procedimento padronizado, de modo a se obter um material com o maior nível de homogeneidade possível. Inicialmente, as garrafas eram trituradas em um britador de mandíbulas. Após, separava-se cerca de 1,5 kg deste material triturado para ciclagem no moinho de bolas metálicas, com número de giros variando entre 1500 e 2000. Manteve-se também constante o número e o tamanho das bolas metálicas utilizadas em cada ciclo de moagem. A Figura 3.10 mostra os equipamentos utilizados na trituração e moagem do vidro.



Figura 3.10: Equipamentos utilizados na trituração e moagem do vidro.

Após o processo de moagem, o material obtido era peneirado até a fração que realmente seria utilizada na pesquisa, ou seja, o material passante na peneira de malha #200 (diâmetro das partículas inferior a 0,075mm). O processo de peneiramento resultou em um rendimento entre 30 e 40%. Isso significa que cada amostra de 1,5 kg submetida ao processo de moagem resultava em cerca de 500g de material passante na peneira #200. A Figura 3.11 mostra o aspecto do pó de vidro passante na peneira #200.



Figura 3.11: Pó de vidro moído passante na peneira #200.

A distribuição granulométrica obtida para o pó de vidro através do procedimento de granulometria a laser é apresentada na Figura 3.12. A Tabela 3.4 apresenta algumas características físicas do pó de vidro moído, assim como as frações granulométricas obtidas.

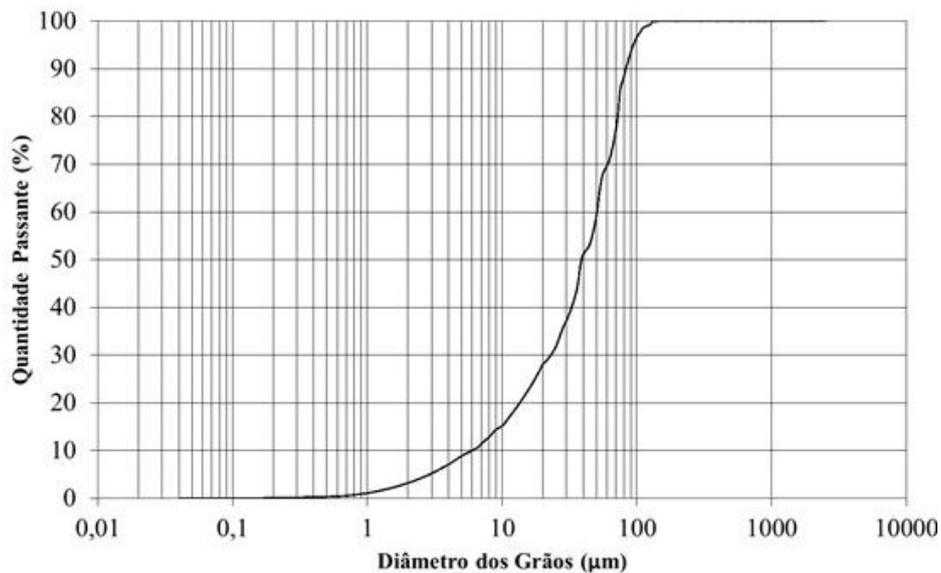


Figura 3.12: Distribuição granulométrica do pó de vidro moído.

Tabela 3.4: Características físicas do pó de vidro moído.

Característica	Resultado	Normativa/Método
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,35 g/cm ³	ABNT NBR 6508

Superfície específica (SSA)	4,821 m ² /g	Análise BET
pH	10,39	ASTM D4972
% Passante na peneira #200	100%	
% Silte (0,002 < d < 0,06mm)	97%	
% Argila (d < 0,002mm)	3%	ABNT NBR 7181

É possível identificar que o valor de superfície específica do pó de vidro, obtido a partir da análise BET, é de 4,821 m²/g. Sales (2014) obteve valores próximos para o pó de vidro em seu estudo, isto é, 5,23 m²/g para o pó de vidro oriundo de vidro incolor e 3,06 m²/g para o oriundo do vidro âmbar. Scheuermann Filho (2019), ao estudar pó de vidro obtido a partir de garrafas comuns de cor marrom obteve um valor de superfície específica de 5,45 m²/g. Os valores obtidos, em todos casos supracitados, são superiores aos que enquadrariam o material como uma pozolana reativa, conforme indicado por Sales (2014).

O ensaio de Difração de Raios-X (DRX) do pó de vidro moído foi realizado nas mesmas condições mencionadas para o solo estudado. O difratograma resultante está apresentado na Figura 3.13. Não foram identificadas fases minerais, indicando a inexistência de uma estrutura bem definida. Assim, é possível caracterizar o material como altamente amorfo.

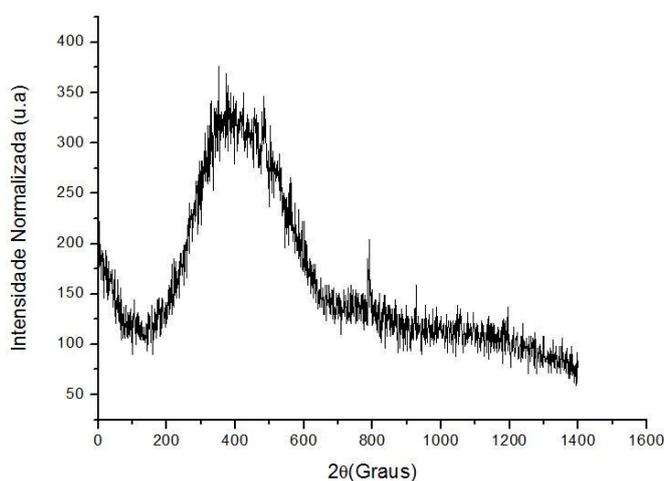


Figura 3.13: Difratograma do pó de vidro utilizado.

A composição química do pó de vidro utilizado neste estudo, obtida através de ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), está apresentada na Tabela 3.5. Também são apresentados resultados obtidos por outros autores, em materiais semelhantes, para efeito de comparação.

Os resultados são apresentados em termos de óxidos, de modo que a composição química obtida é elementar. Assim, não há distinção entre substâncias diferentes compostas por um mesmo elemento.

Tabela 3.5: Composição química do vidro utilizado na pesquisa.

Elemento	Estudo atual	Scheuermann Filho (2019)	Sales et al. (2014)	Pereira et al. (2012)
SiO ₂	66,78%	75,0%	72,95%	72,25%
CaO	24,58%	17,36%	9,28%	12,35%
Al ₂ O ₃	1,76%	2,64%	0,82%	2,54%
Fe ₂ O ₃	2,46%	1,74%	0,66%	-
Na ₂ O	2,08%	1,44%	6,00%	10,54%
K ₂ O	-	1,19%	-	1,18%
MgO	-	0,21%	3,58%	-
TiO	-	0,19%		1,15%
SO ₃	0,28%	0,12%	-	-
SrO	0,08%	0,08%	0,25%	-

3.3 CAL DE CARBURETO

A cal de carbureto utilizada neste estudo é um resíduo da produção de gás acetileno de uma indústria localizada em Esteio/RS, região metropolitana de Porto Alegre. Conforme Saldanha *et al.* (2018), a empresa gera aproximadamente 2160 toneladas de cal de carbureto por ano.

O material foi coletado em um estado úmido e com consistência aquosa (umidade entre 48 e 80%). Desta forma, deve ser seco a 50° C por dois a três dias antes de sua utilização. Em seguida, o material é destorroado e passado em peneira de malha #100 ($d < 0,149\text{mm}$), de modo a se obter um material com um bom nível de uniformidade. É importante guardar o material peneirado em embalagem hermética para se evitar a reação do óxido de cálcio com o dióxido de carbono do ar, que causaria uma carbonatação do material (formação de CaCO₃). A Figura 3.14 mostra o aspecto da cal de carbureto após o processo de secagem e peneiramento.

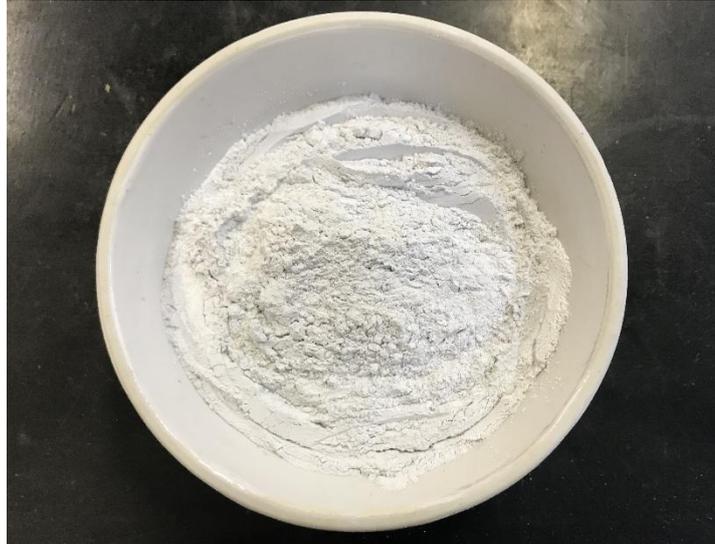


Figura 3.14: Aspecto da cal de carbureto após o processo de secagem e peneiramento.

A distribuição granulométrica da cal de carbureto, obtida por Saldanha et al. (2018), é apresentada na Figura 3.15, enquanto que suas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 3.6. O alto valor obtido para a superfície específica, obtido através da análise BET, pode indicar uma elevada reatividade do material.

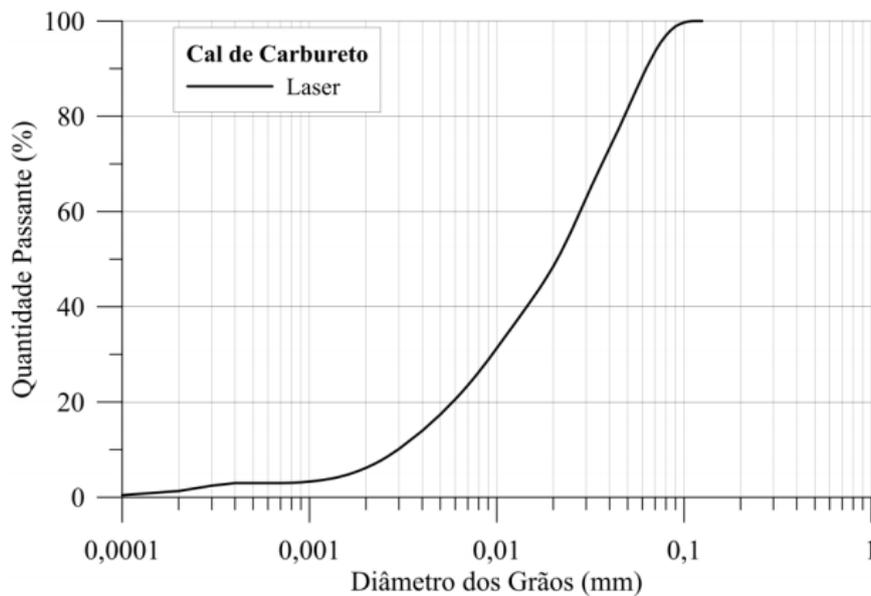


Figura 3.15: Distribuição granulométrica da cal de carbureto (SALDANHA, 2018).

Tabela 3.6: Características físicas da cal de carbureto (SALDANHA et al, 2018).

Característica	Resultado	Normativa/Método
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,19 g/cm ³	ABNT NBR 6508
Superfície específica (SSA)	22,60 m ² /g	Análise BET
pH	12,4	ASTM D4972
% Areia fina (0,06 < d < 0,2mm)	10%	Granulometria a laser
% Silte (0,002 < d < 0,06mm)	83%	
% Argila (d < 0,002mm)	7%	

A composição química da cal de carbureto utilizada na pesquisa é apresentada na Tabela 3.7. São apresentadas também, para efeito de comparação, composições químicas obtidas em outras pesquisas recentes. A cal e carbureto é constituída basicamente por óxido de cálcio, possuindo uma pureza de cálcio maior do que a cal dolomítica comercializada no estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 3.7: Composição química da cal de carbureto.

Óxido	Presente Estudo	Horpibulsuk et al. (2013)	Vichan e Rachan (2013)	Jiang et al. (2016)
CaO	74,0 %	70,78 %	83,10 %	68,99 %
SiO ₂	3,10 %	6,49 %	5,71 %	2,84 %
Al ₂ O ₃	0,46 %	2,55 %	2,61 %	2,16 %
Fe ₂ O ₃	0,23 %	3,25 %	0,72 %	0,15 %
MgO	0,72 %	0,69 %	0,80 %	0,12 %
SO ₃	0,54 %	0,66 %	0,05 %	0,76 %
Na ₂ O	-	-	0,29 %	-
K ₂ O	-	7,93 %	-	-
LOI (<i>loss on igniton</i> ou perda ao fogo)	20,9%	7,70 %	6,70 %	25,0%

A Figura 3.16 apresenta o resultado do ensaio de difração de raio X (DRX) da cal de carbureto obtido por Scheuermann Filho (2019). É possível identificar a predominância do mineral portlandita, correspondente à fase cristalina do hidróxido de cálcio que compõe a cal de carbureto. Foi constatada também, em quantidades menores, a presença de calcita,

proveniente da carbonatação do hidróxido de cálcio quando em contato com o ar. A presença do carbonato de cálcio, em relação ao hidróxido, é quase que insignificante. O carbono está presente em forma de grafite como um mineral traço, possivelmente da produção do gás acetileno.

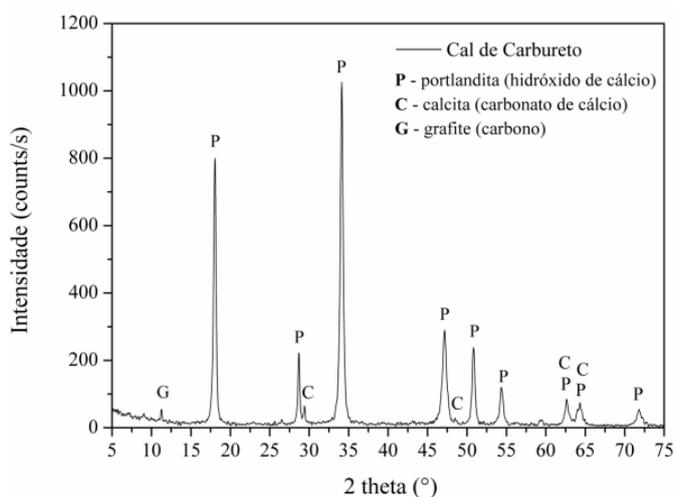


Figura 3.16: Difratograma da cal de carbureto (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

3.4 HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

O hidróxido de sódio utilizado nesta pesquisa é de origem industrial, comercialmente conhecido como soda cáustica. O material é um hidróxido cáustico utilizado principalmente como base química e é considerado uma base forte. É altamente corrosivo, podendo causar queimaduras, cicatrizes e cegueira devida à sua elevada reatividade, de modo que sua utilização em laboratório demanda total cuidado e utilização de equipamentos de proteção. A Tabela 3.8 apresenta algumas características do NaOH.

Tabela 3.8: Características do hidróxido de sódio.

Característica	Valor
Massa molar	39,9971 g/mol
Densidade	2,13 g/cm ³
Ponto de fusão	322°C
Ponto de ebulição	1388°C
Solubilidade em água	1090 g/L a 20°C

4 MÉTODOS

As metodologias e procedimentos experimentais utilizados no estudo são apresentadas neste capítulo, assim como as normativas regentes utilizadas na condução dos ensaios de laboratório.

A metodologia do estudo pode ser sintetizada como a estabilização de um solo residual argiloso com adições de diferentes teores de pó de vidro moído e cal de carbureto, estudadas em misturas com diferentes pesos específicos secos, tempos e temperaturas de cura. Avaliou-se também a adição do ativador alcalino hidróxido de sódio (NaOH) e a estabilização do solo somente com adição de cal de carbureto. A estabilização dos solos foi avaliada através da realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e rigidez inicial.

4.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A abordagem experimental utilizada neste estudo está baseada em conceitos estatísticos de projeto e análise de experimentos. Estes procedimentos permitem avaliar o efeito dos fatores controláveis e suas interações nas variáveis respostas estudadas (MONTGOMERY, 2009).

4.1.1 Projeto de Experimento

Um experimento envolve, indispensavelmente, a avaliação dos efeitos de fatores previamente definidos sobre, no mínimo, uma variável resposta. Assim, experimentos fatoriais completos, os quais possibilitam que todas as combinações possíveis entre os níveis (n) de cada fator (f) sejam testados, podem ser considerados como a forma mais abrangente de avaliar os efeitos sobre a resposta (MONTGOMERY, 2009). Porém, o aumento no número de fatores e níveis avaliados implica, inevitavelmente, em um maior número de tratamentos com consequente aumento no número de experimentos, sobretudo quando as amostras devem ser replicadas.

Scheuermann Filho (2019) exemplifica que, em um experimento com cinco fatores, cada qual em três níveis distintos, replicado três vezes, resultaria em um total de 243 tratamentos e 729 experimentos elaborados aleatoriamente. Entretanto, alguns planejamentos alternativos permitem a avaliação do efeito dos fatores estudados sobre a variável resposta com um menor

número de experimentos. Dentre estes planejamentos, destaca-se o Experimento Fatorial 2^k , utilizado nesta pesquisa.

É fundamental, na aplicação de planejamentos experimentais, que os testes sejam conduzidos de forma aleatória, garantindo assim a independência entre os erros. Isso significa que estes não podem estar relacionados (BOX *et al.*, 2005). Caso contrário, o princípio da randomização, tido como base para os métodos estatísticos, não é respeitado. Além disso, a randomização contribui para homogeneizar o efeito de possíveis ruídos nos tratamentos distintos avaliados, assegurando que as variações identificadas entre diferentes réplicas sejam reflexo apenas de variabilidade inerente ao experimento.

4.1.2 Projeto de Experimento Fatorial 2^k

De acordo com Box et al. (2005), um experimento fatorial do tipo 2^k permite uma avaliação dos efeitos de k fatores sobre a variável resposta, sendo esses definidos em dois níveis distintos, sem a ocorrência de ambiguidade entre os efeitos principais e as interações de ordem superiores. Desta forma, este tipo de projeto é muito útil para uma avaliação preliminar dos principais fatores e níveis que influenciam no comportamento de determinada característica estudada, uma vez que 2^k tratamentos são executados. Ao concluir este tipo de planejamento, decisões sobre as próximas fases do estudo podem ser tomadas, quais sejam, a realização de novos testes com a manutenção ou exclusão de um nível dos fatores identificados como insignificantes ou a ampliação de níveis que se mostraram significativos.

A Figura 4.1, elaborada por Scheuermann Filho (2019), exemplifica experimentos 2^2 e 2^3 . O primeiro apresenta dois fatores (A e B) e o segundo três (A, B e C), sendo que cada um é avaliado em dois níveis distintos (-1 e +1) em diferentes magnitudes. Cada vértice das figuras geométricas representam um tratamento, no qual o nível dos fatores pode ser o mínimo (-1) ou o máximo (+1). Para obtenção do efeito de um fator principal, é necessário subtrair a média dos tratamentos nos quais o fator se encontra em seu nível máximo pela média dos tratamentos no nível mínimo. Por outro lado, a interação entre dois ou mais fatores é representada pela média entre os tratamentos diagonais correspondentes. Apesar da aparente complexidade, o processo de determinação dos efeitos principais e suas interações pode ser facilmente obtido através do arranjo dos resultados experimentais em softwares de estatística.

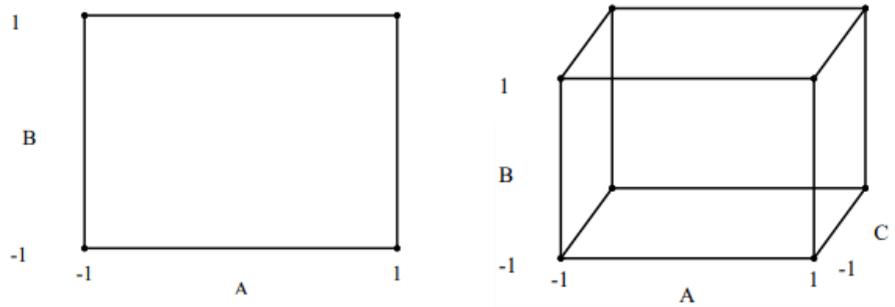


Figura 4.1: Representação de experimentos 2^2 e 2^3 (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

Os resultados obtidos a partir deste tipo de experimento permitem a determinação de relações gráficas entre os efeitos principais dos fatores e suas interações, assim como a elaboração de um gráfico de probabilidade normal das grandezas. Tal abordagem é extremamente útil quando os experimentos são realizados sem réplicas, uma vez que o que é significativamente estatístico tende a se afastar da linha reta, que representa os efeitos não significativos com média zero e variância σ^2 . (MONTGOMERY, 2009).

Além disso, é possível quantificar e qualificar estatisticamente os efeitos, considerando-se um nível de significância (α) pré-determinado, através de gráficos de Pareto. Este tipo de gráfico apresenta os valores absolutos dos efeitos padronizados de cada fator e uma linha de referência, de modo que são considerados estatisticamente significativos os fatores que cruzam esta linha (Figura 4.2). A abordagem utilizada é semelhante à uma análise de variância, na qual é considerado estatisticamente significativo o efeito de algum fator ou suas interações quando o p-valor é menor que o alfa adotado.

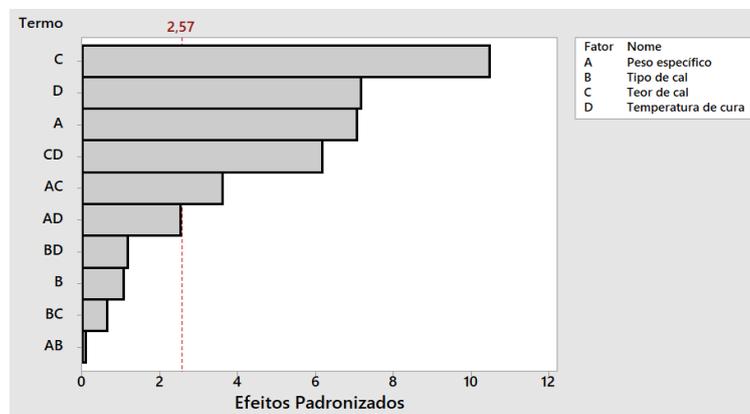


Figura 4.2: Exemplo de gráfico de Pareto (Elaborado pelo autor).

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De modo a avaliar e atender os objetivos propostos neste estudo, as variáveis foram divididas em dois grupos: variáveis independentes e variáveis dependentes. As variáveis independentes estão diretamente ligadas ao objetivo do estudo, que visa a investigação da influência sobre a variável dependente.

As variáveis independentes são divididas em fatores controláveis e fatores constantes.

- Fatores controláveis:
 - *Porosidade da mistura*: expressa através da porosidade (η) ou do peso específico aparente seco (γ_d) da mistura;
 - *Teor de pó de vidro moído*: expresso em relação à massa seca total da mistura;
 - *Teor de cal de carbureto*: expresso em relação à massa seca total da mistura;
 - *Umidade de moldagem*: teor de umidade utilizado para a moldagem dos corpos de prova;
 - *Temperatura de cura*: temperatura a qual o corpo de prova foi submetido durante o tempo de cura;
 - *Tempo de cura*: número de dias que as amostras permaneceram em cura;
 - *Concentração de NaOH*: concentração molar do ativador alcalino hidróxido de sódio (NaOH).

O Quadro 4.1 apresenta os fatores controláveis, unidades e níveis adotados para o estudo.

Quadro 4.1: Fatores controláveis adotados no estudo.

Fator	Unidade	Níveis utilizados
Peso específico aparente seco	kN/m ³	13 e 15
Teor de pó de vidro moído	%	10 e 30
Teor de cal de carbureto	%	3 a 7
Umidade de moldagem	%	28 a 30
Temperatura de cura	°C	23 e 40
Tempo de cura	dias	7 e 28
Concentração de NaOH	M	3 e 10

- Fatores constantes:
 - *Tipo de solo*: solo residual argiloso proveniente de Ijuí/RS;
 - *Tipo de pozolana*: pó de vidro moído proveniente de garrafas verdes;
 - *Tipo de cal*: cal de carbureto proveniente da empresa White Martins;
 - *Tipo de ativador alcalino*: Hidróxido de sódio (NaOH);

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta obtidas a partir dos ensaios de laboratório:

- Resistência à tração por compressão diametral (q_t);
- Resistência à compressão simples (q_u);
- Rigidez ou Módulo Cisalhante inicial (G_0);

Além dos fatores controláveis e constantes existem os fatores de ruído. Eles estão apresentados abaixo, assim como os procedimentos adotados a fim de minimizá-los.

- *Equipamento e operador*: utilização de um único equipamento com um único operador;
- *Homogeneidade dos materiais aditivos*: Uso de amostra única, coletada ou obtida de uma única vez ou pelo mesmo procedimento;
- *Homogeneidade do solo*: Uso de amostra única, coletada de uma única vez.

O Quadro 4.2 apresenta um resumo com as três fases principais do programa experimental, assim como os ensaios de laboratório realizados em cada etapa.

Quadro 4.2: Fases do programa experimental.

Fase	Mistura	Ensaio realizado
Fase 1	Solo, pó de vidro moído, cal de carbureto e NaOH	Resistência à tração por compressão diametral e Rigidez inicial
Fase 2	Solo, pó de vidro moído, cal de carbureto e NaOH	Resistência à compressão simples

Fase 3	Solo e cal de carbureto	Resistência à compressão simples e Rigidez inicial
--------	-------------------------	--

4.2.1 Fase 1 – Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e NaOH

Na Fase 1, foram definidas oito misturas diferentes a serem estudadas, conforme o Quadro 4.3. Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, elas foram avaliadas em quatro situações distintas pra cada tempo de cura (sete e 28 dias). Essas situações são: cura a 23°C sem NaOH; cura a 40°C sem NaOH; cura a 23°C com NaOH; e cura a 40°C com NaOH. Utilizou-se uma concentração única de 3 M para as amostras com adição de hidróxido de sódio. Para os ensaios de módulo de rigidez inicial, as amostras foram avaliadas somente para um único tempo de cura, de 28 dias.

Quadro 4.3: Misturas utilizadas na Fase 1.

Mistura	Peso esp. aparente seco (kN/m ³)	Teor de pó de vidro (%)	Teor de cal (%)
1A	13	10	3
2A	15	10	3
3A	13	30	3
4A	15	30	3
5A	13	10	7
6A	15	10	7
7A	13	30	7
8A	15	30	7

4.2.2 Fase 2 – Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e ligantes Alto CaO e Baixo CaO

Sabe-se que, para materiais com alto teor de CaO, o NaOH é um ativador muito efetivo. Nestes casos, costumam-se usar concentrações de 2 a 4 M. Ativadores com concentrações de Na₂O superior a 5% em massa do precursor provocaria uma redução dos valores de resistência dos materiais, uma vez que teores elevados de álcalis podem favorecer a

ocorrência de fluorescências e enfraquecer os materiais. Por outro lado, em compostos com baixo teor de CaO, o NaOH é utilizado em função de sua disponibilidade, viscosidade e preço. Nestes casos, costumam-se utilizar concentrações maiores, entre 8 e 10 M. Uma baixa alcalinidade afeta de modo negativo o comportamento dos materiais, uma vez que a hidrólise do silício e do alumínio presentes não ocorre satisfatoriamente.

Neste contexto, a Fase 2 foi fundamentada na elaboração de oito misturas diferentes, de acordo com o Quadro 4.4. Elas foram avaliadas em duas temperaturas de cura distintas (23°C e 40°C) e dois tempos de cura diferentes (sete e 28 dias). Para avaliar a estabilização do solo nas duas situações de alcalinidade descritas, optou-se pela utilização de dois ligantes distintos nesta fase do estudo. Para o ligante do tipo A, composto por 30% de cal e 70% de pó de vidro, utilizou-se uma concentração de NaOH de 3M. Já para o ligante do tipo B, composto por 10% de cal e 90% de pó de vidro, utilizou-se uma concentração de 10M. Nesta fase, foram realizados somente ensaios de resistência à compressão simples.

Quadro 4.4: Misturas utilizadas na Fase 2.

Mistura	Peso esp. aparente seco (kN/m ³)	Tipo de ligante	Concentração de NaOH (M)	Teor de ligante (%)
1B	13	A	3	10
2B	15	A	3	10
3B	13	B	10	10
4B	15	B	10	10
5B	13	A	3	30
6B	15	A	3	30
7B	13	B	10	30
8B	15	B	10	30

4.2.3 Fase 3 – Solo estabilizado somente com cal de carbureto

Diante da constatação da pouca influência do pó de vidro e do NaOH na obtenção de melhor comportamento mecânico das misturas nas Fases 1 e 2, optou-se pela avaliação de misturas somente com a adição de cal de carbureto. Assim, a Fase 3 é caracterizada pela utilização de oito misturas diferentes, conforme o Quadro 4.5. Elas foram ensaiadas em duas temperaturas

de cura distintas, 23°C e 40°C. Utilizou-se somente um tempo de cura, de sete dias. De modo a se obter uma análise mais completa, a Fase 3 incluiu a elaboração de dois tipos diferentes de cal de carbureto, de acordo com suas granulometrias. Assim, utilizou-se cal passante na peneira #100 e retida na peneira #300 (denominada aqui de #100) e somente cal passante na #300 (#300). Nesta fase, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e de rigidez inicial.

Quadro 4.5: Misturas utilizadas na Fase 3.

Mistura	Peso esp. aparente seco (kN/m³)	Tipo de cal	Teor de cal (%)
1C	13	#100	3
2C	13	#300	3
3C	13	#100	6
4C	13	#300	6
5C	15	#100	3
6C	15	#300	3
7C	15	#100	6
8C	15	#300	6

4.3 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS

4.3.1 Definição dos teores de pó de vidro e cal de carbureto

Em solos argilosos com adição de pozolana e cal, com a devida hidratação, o aumento no teor de pozolana resulta em uma disponibilidade imediata de sílica e/ou alumina. Assim, há uma maior formação de compostos cimentantes em um prazo menor, em comparação à solos em que há somente adição de cal. As quantidades usuais de pozolanas utilizadas, em relação à massa seca de solo, variam entre 10 e 40%. Neste estudo, foram definidos os teores de pó de vidro moído de 10 e 30% em relação à massa seca total das misturas. As proporções de cal de carbureto em relação ao solo com adição de pó de vidro foram definidas com o objetivo de se proporcionar um ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas, visando a obtenção de maiores resistências às misturas.

Para a determinação do teor mínimo de cal, utilizou-se o método do ICL (*Initial Consumption of Lime*), proposto por Rogers *et al.* (1997). O método consiste na adição de teores crescentes de cal na mistura, com medições da variação de pH. O teor mínimo de cal é definido como aquele que leva a um valor máximo e constante de pH que representa o teor de cal necessário para a realização das reações iniciais.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram os resultados obtidos através do Método do pH para o solo com 10% de pó de vidro e 30% de pó de vidro. É possível identificar como teor mínimo de cal o patamar de 3% para a primeira situação e de 2% para a segunda. Estes patamares representam uma estabilização do valor máximo do pH para as misturas. De modo a se estabelecer condições favoráveis para o desenvolvimento das reações pozolânicas, foi determinado como 3% o teor mínimo de cal para o presente estudo. A variação estabelecida para as dosagens foi de 2%, sendo os próximos teores fixados em 5 e 7%.

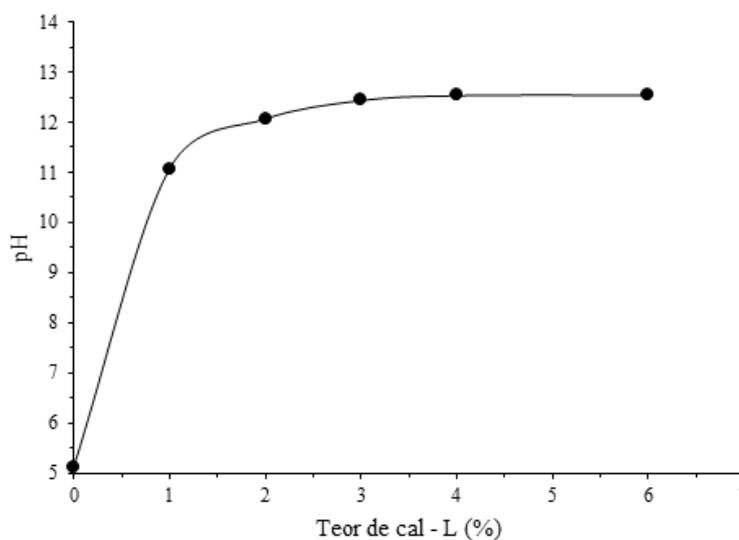


Figura 4.3: Variação do pH com o teor de cal para o solo com adição de 10% de pó de vidro moído.

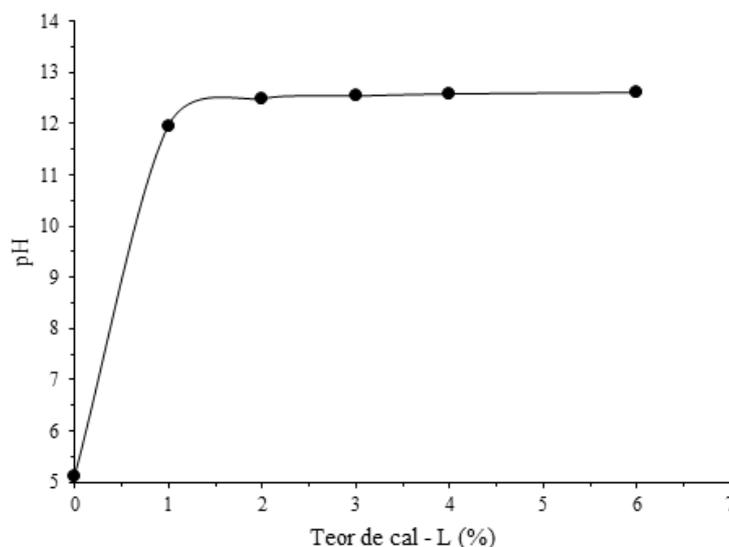


Figura 4.4: Variação do pH com o teor de cal para o solo com adição de 30% de pó de vidro moído.

4.3.2 Definição das porosidades

Os valores de porosidade das misturas, controlados a partir dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) e umidades de moldagem, foram definidos tendo como base as curvas de compactação do solo e solo com adição de pó de vidro e cal de carbureto, apresentados no capítulo anterior. A partir das curvas, foram definidos os valores de γ_d entre 13 kN/m³ e 15 kN/m³ e teores de umidade de moldagem entre 28 e 30%.

4.3.3 Definição dos tempos e temperaturas de cura

A cimentação decorrente das reações pozolânicas é relativamente lenta, de modo que longos períodos de cura são necessários para uma melhor avaliação do seu desenvolvimento. De um modo geral, as normativas utilizadas para avaliação do comportamento mecânico das misturas estabelecem os períodos de 7 e 28 dias de cura a 23° C para a realização dos ensaios. Assim sendo, foram estudados tempos de cura de sete e 28 dias.

A cura acelerada é caracterizada pela utilização de temperaturas maiores para aceleração das reações pozolânicas, de modo que menores períodos de cura são requeridos para a obtenção de comportamento mecânico similar ao de misturas que foram curadas em temperaturas menores. Assim, optou-se por avaliar a influência da temperatura no comportamento mecânico das misturas, através de cura a 40°C ($\pm 3^\circ\text{C}$).

4.3.4 Definição das concentrações de NaOH

Conforme mencionado anteriormente, em materiais com alto teor de CaO, o NaOH é considerado um ativador muito efetivo. Nestas situações, costuma-se utilizar concentrações entre 2 e 4 M. Já em materiais com baixo teor de CaO, costumam-se utilizar concentrações maiores, variando entre 8 e 10 M. Nestes casos, uma baixa alcalinidade afetaria negativamente as propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que a hidrólise do silício e do alumínio presentes não ocorre adequadamente. Desta forma, optou-se por utilizar uma concentração fixa de 3M na Fase 1 da pesquisa e duas concentrações distintas na segunda fase (3 M e 10 M).

4.4 DOSAGEM DOS MATERIAIS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram elaborados através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação estática, desmoldagem, acondicionamento, armazenamento e cura. Os materiais (solo, pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio) foram pesados em balança com resolução de 0,01g. A fração do solo utilizada foi a passante na peneira de malha #10 ($d < 2,00$ mm), a de vidro inferior a peneira de malha #200 ($d < 0,075$ mm) e a de cal de carbureto a passante na peneira #100 ($d < 0,149$ mm).

Os aditivos são misturados ao solo com o auxílio de uma espátula, até a mistura ficar uniforme. Em seguida, a água é adicionada, continuando o processo de mistura até se obter um material visivelmente homogêneo. As soluções de NaOH foram preparadas com antecedência mínima de quatro horas antes da moldagem, sendo que o produto sólido foi adicionado e misturado cuidadosamente à quantidade de água necessária para a moldagem do corpo de prova.

A massa seca total das amostras é composta pela soma das massas secas de solo, pó de vidro moído, cal de carbureto, e hidróxido de sódio, quando da adição destes. Desta forma, as quantidades de cada aditivo adicionado, assim como o teor de umidade, são determinadas em relação a massa seca total de cada corpo de prova. A quantidade total de mistura permite a moldagem de corpos de prova em duplicata, com sobra de uma pequena quantidade de solo para determinação do teor de umidade.

Após a mistura, a quantidade de material necessária para a produção de um corpo de prova é dividida em três partes iguais. Estas são mantidas em recipientes com tampa, de modo a se evitar perda de umidade até o momento da compactação. Ao fim deste procedimento, duas amostras do material são retiradas e colocadas em cápsulas. Estas são levadas à estufa para secagem e posterior determinação do teor de umidade. O teor de umidade do corpo de prova é definido como sendo a média dos dois teores de umidade determinados.

A compactação da amostra é feita de forma estática, em três camadas, no interior de um molde metálico tripartido devidamente lubrificado (Figura 4.5). Os topos da primeira e segunda camadas são escarificados após a compactação, de modo a aumentar a integração entre as camadas. Após o processo de moldagem, o corpo de prova é imediatamente retirado do molde e sua massa, diâmetro e altura são determinados e registrados.



Figura 4.5: Molde tripartido utilizado para moldagem de corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Para considerar cada corpo de prova apto para a realização dos ensaios, algumas tolerâncias foram definidas. São elas:

- *Peso específico aparente seco* (γ_d): grau de compactação de 99 a 101%, sendo este valor definido como a relação entre o valor de γ_d obtido na moldagem e o valor definido previamente.

- *Teor de umidade (w)*: valor estipulado $\pm 0,5\%$.
- *Dimensões*: variação de 1,5% no diâmetro e na altura.

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e rigidez inicial foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Durante o período de cura, os corpos-de-prova curados a uma temperatura de 23°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) foram colocados em uma câmara úmida com umidade relativa de aproximadamente 95%, enquanto que as amostras curadas em temperaturas de 40° C ($\pm 3^\circ\text{C}$) foram seladas em uma embalagem hermética e imergidas em água com esta temperatura.

4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados de acordo com a normativa norte-americana ASTM C496 (ASTM, 2017). Utilizou-se uma prensa automática com deslocamento controlado (Figura 4.6). Antes da ruptura, os corpos-de-prova foram submetidos a imersão em água por 24h, na mesma temperatura utilizada para a cura. Deste modo, minimizaram-se eventuais efeitos da sucção. Este procedimento também é utilizado para avaliar a ocorrência de reações que promovam algum tipo de cimentação nas misturas. Caso a cimentação ocorrida não tivesse sido suficiente, provavelmente o corpo-de-prova seria dissolvido na água.

Após o período mínimo de 24h em imersão, cada amostra era novamente pesada e então submetida ao ensaio de módulo cisalhante inicial, que será apresentado no item a seguir. Após, cada espécime era submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral ou resistência à compressão simples.



Figura 4.6: Ensaio de compressão diametral.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o corpo de prova é impelido a uma taxa constante de deslocamento contra uma base cilíndrica de um anel dinamométrico fixo a um sistema de reação. Mede-se, através do relógio comparador, o valor relativo à reação do corpo de prova contra o anel, transformado em carga por uma equação de calibração. Utilizou-se um anel dinamométrico com capacidade máxima de 10 kN.

A resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de cada corpo de prova pode ser determinada conforme a Equação 4.1.

$$q_{t(STS)} = \frac{2F}{\pi \cdot H \cdot D} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

q_t = resistência à tração por compressão diametral

F = máxima carga medida

H = altura média do corpo de prova

D = diâmetro médio do corpo de prova

4.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com as diretrizes propostas pela normativa norte-americana ASTM D5102 (ASTM, 2004), sendo realizados em uma prensa automática de deslocamento controlado (Figura 4.7). Assim como no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, as amostras também foram submetidas à imersão por 24h antes da ruptura.



Figura 4.7: Ensaio de compressão simples.

No ensaio de resistência à compressão simples, o corpo de prova é compelido contra uma base cilíndrica de uma célula de carga fixa a um sistema de reação. O valor relativo à reação do corpo de prova contra a célula é aferido e transformado em carga por uma equação de calibração. Utilizou-se uma célula de carga com capacidade máxima de 10 kN.

A resistência à compressão simples (RCS) de cada corpo de prova é determinada através da Equação 4.2.

$$q_u = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D m^2}{4}\right)} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde:

Q = carregamento aplicado ao corpo de prova e obtido pela calibração da célula de carga;

D_m = diâmetro médio do corpo de prova obtido através de medidas de topo, centro e base.

4.7 ENSAIOS DE PULSO ULTRASSÔNICO

A relação entre a tensão cisalhante aplicada (τ) e a deformação cisalhante resultante (γ) é definida como módulo cisalhante (G). Em meios elásticos, infinitos e contínuos há uma relação inerente entre este módulo com a massa específica do material (ρ) e a velocidade de propagação de uma onda cisalhante (V_s) (SANTAMARINA *et al.*, 2001). Tal relação está expressa na Equação 4.3. Ondas cisalhantes são caracterizadas pela propagação em uma direção, estímulo de movimento das partículas do meio perpendicularmente à propagação e pela necessidade de meios com certa rigidez ($G > 0$) para propagação, sendo filtradas em fluidos. Por outro lado, ondas de compressão são propagadas e induzem o movimento das partículas na mesma direção, podendo ser propagadas em sólidos e fluidos e sendo filtradas no vácuo.

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

ρ = massa específica do material

V_s = velocidade de propagação da onda cisalhante

Os ensaios foram realizados com o aparelho PunditLab (+). Consiste na medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento nos corpos de prova cilíndricos. A medição permite uma estimativa do módulo cisalhante a pequeníssimas deformações (G_0).

Foram utilizados os mesmos espécimes moldados para o ensaio de compressão diametral ou compressão simples, dependendo da etapa do programa experimental. A medição foi realizada após o período de cura e de imersão por 24h. As ondas de compressão são induzidas através da vibração de transdutores com frequência de 54 kHz, enquanto que as ondas de cisalhamento são propiciadas pela vibração de outros transdutores a 250 kHz. Inicialmente é determinado o tempo de deslocamento da onda de compressão através do corpo de prova (t_p), procedimento mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8: Medição do tempo de deslocamento de ondas de compressão.

Em seguida, mede-se o tempo necessário para o deslocamento da onda cisalhante (t_s) (Figura 4.9). Em cada medição, a interface entre os transdutores e o corpo de prova é preenchida com um gel especial, que facilita a transmissão das ondas e as leituras do sinal. As velocidades de propagação das ondas são determinadas a partir da relação entre a altura média e o tempo aferido para cada corpo de prova. Foram realizadas três medições para as ondas de compressão, sendo o tempo t_p definido como a média, e mais de dez leituras para as ondas de cisalhamento (t_s).



Figura 4.9: Medição do tempo de deslocamento de ondas de cisalhamento.

A leitura do t_p é realizada de maneira direta no aparelho, enquanto o t_s é determinado com o auxílio de ferramenta computacional no software PunditLab (+). A Figura 4.10 mostra a variação da onda cisalhante no ensaio ultrassônico.

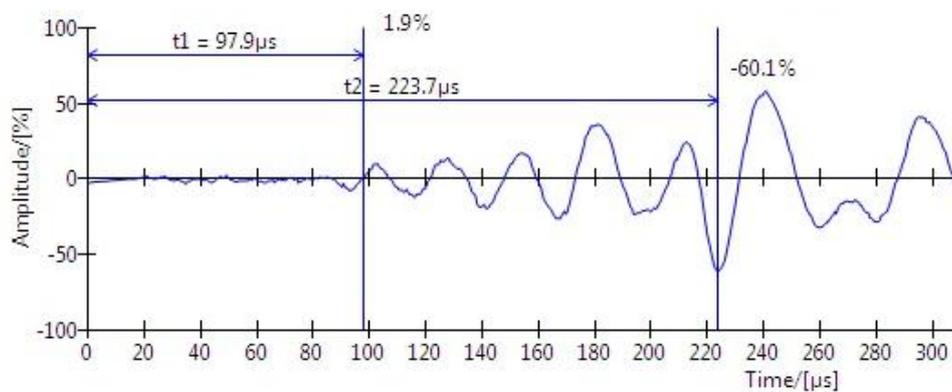


Figura 4.10: Variação da onda cisalhante no ensaio ultrassônico (Elaborado pelo autor).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório realizados nas três fases experimentais da pesquisa. De um modo geral, o modelo de exposição e análise experimental é igual em todas as etapas, composto por uma tabela com os resultados médios das duplicatas em cada tratamento, gráficos com os resultados dos tratamentos em função das variáveis avaliadas, um gráfico de efeitos principais e um gráfico de Pareto com os efeitos padronizados. Para cada variável resposta avaliada, é apresentada uma equação matemática obtida através de regressão linear, em função dos fatores controláveis e suas interações de segunda ordem. Assim, é possível identificar de maneira global os fatores que exercem maior influência sobre cada uma das variáveis resposta estudadas. Ainda, são apresentadas correlações entre as variáveis respostas e os índices $\eta/(L_{iv})^k$ e $\eta/(B_{iv})^k$ e correlações entre os parâmetros de resistência e rigidez avaliados. As tabelas geradas a partir da análise estatística e da formulação de regressões lineares estão apresentadas no Apêndice A.

5.1 FASE 1 – SOLO ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO E NaOH.

5.1.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados para misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m³ e 15 kN/m³, com teores de pó de vidro de 10% e 30% e teores de cal de carbureto de 3% e 7%. Ainda, utilizaram-se os tempos de cura de sete e 28 dias, temperaturas de cura de 23°C e 40°C e amostras com e sem adição de solução de hidróxido de sódio (NaOH). Os resultados médios obtidos para as duplicatas estão apresentados na Tabela 5.1 O valor máximo de q_t foi 594,68 kPa, para a amostra 8A, sem adição de NaOH e curada a 40°C por 28 dias.

Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (q_t) em kPa.

Mistura	Sete dias de cura				28 dias de cura			
	23°	40°C	23°C	40°C	23°C	40°C	23°C	40°C
1A	7,41	20,12	7,78	16,23	25,30	17,44	21,22	29,93
2A	44,99	70,02	21,61	48,99	56,74	159,87	45,49	154,58
3A	6,98	41,43	14,37	20,61	25,45	77,06	14,56	38,19
4A	51,67	83,05	27,62	59,94	70,09	256,78	43,98	219,8
5A	12,38	88,56	15,11	32,55	80,77	181,76	33,74	82,47
6A	47,78	284,83	44,93	141,97	188,93	492,78	84,99	293,95
7A	26,58	164,58	23,71	50,29	144,54	328,78	67,54	61,36
8A	104,89	394,65	47,64	72,35	336,75	594,68	73,79	241,86

As Figuras 5.1 a 5.8 ilustram os resultados de resistência à tração por compressão diametral em relação aos teores de cal de carbureto em função da variação do peso específico aparente seco e do teor de pó de vidro, de acordo com as diferentes condições de tempo e temperatura de cura e a adição ou não de NaOH.

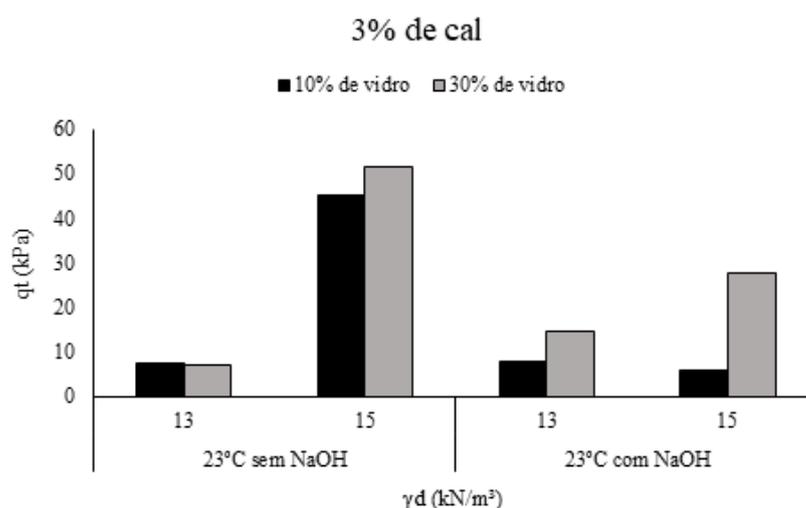


Figura 5.1: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 23°C.

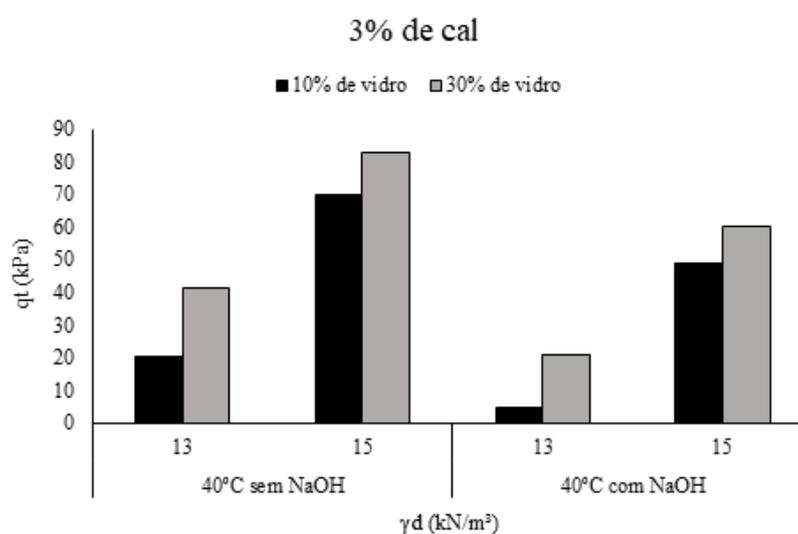


Figura 5.2: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 40°C.

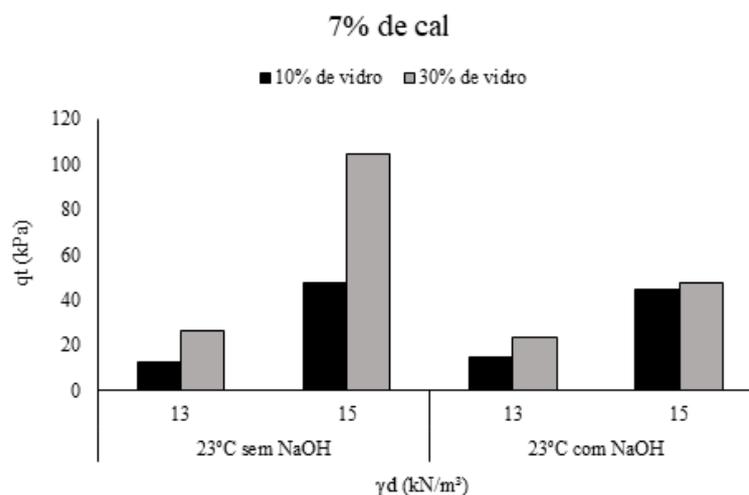


Figura 5.3: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 23°C.

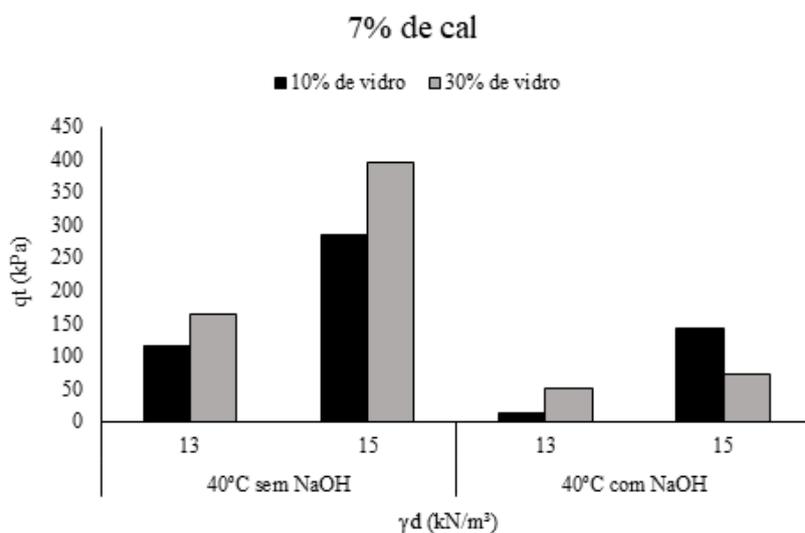


Figura 5.4: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos sete dias de cura a 40°C.

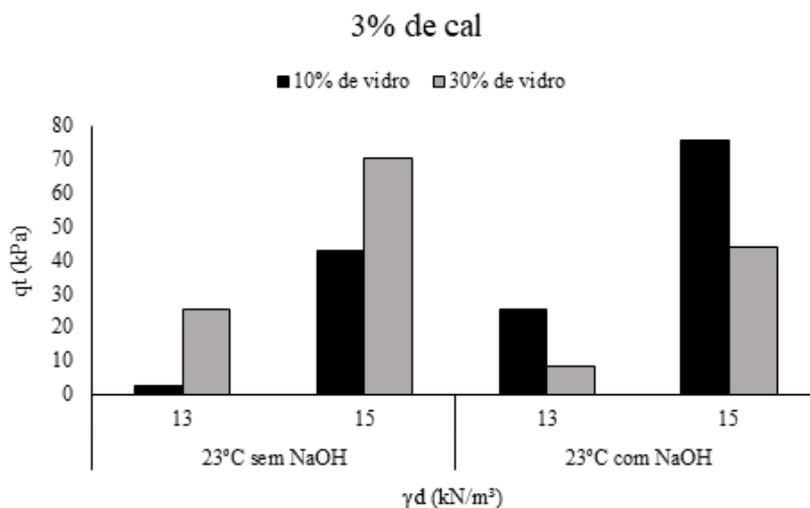


Figura 5.5: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.

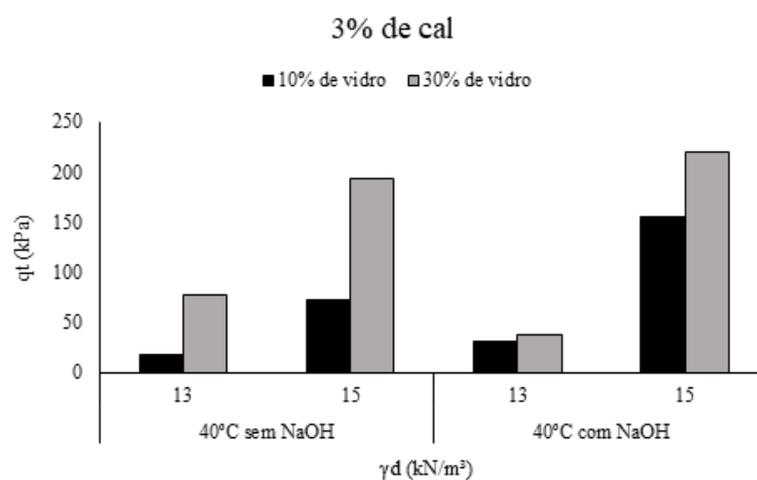


Figura 5.6: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.

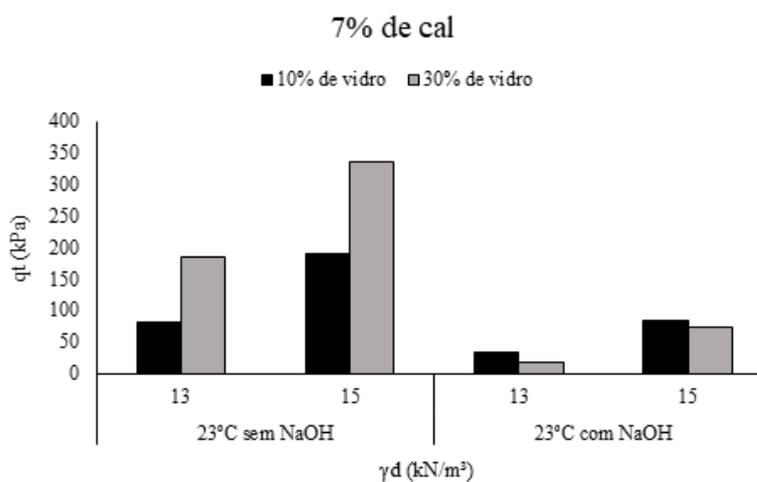


Figura 5.7: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.

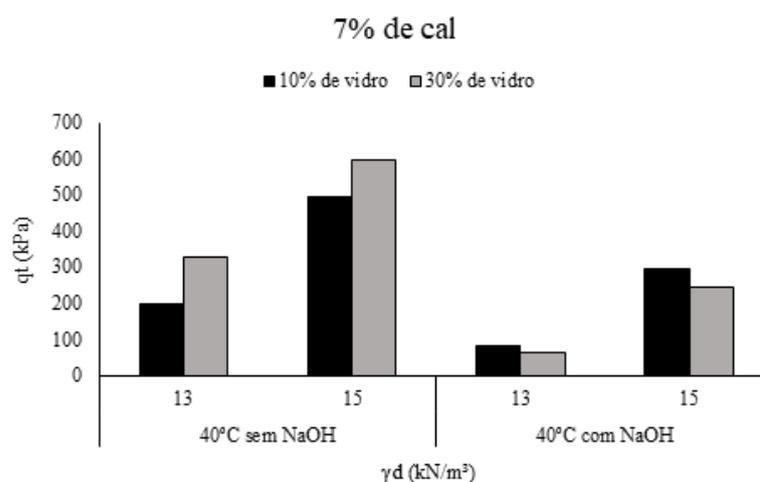


Figura 5.8: Variação da RTCD (q_t) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.

A partir dos resultados exibidos nos gráficos, é possível identificar que a resistência aumenta com a elevação do teor de cal de carbureto, conforme esperado. Isso indica que teores de cal inferiores à 7% não são suficientes para a obtenção das maiores resistências. Todavia, um maior tempo de cura pode ser necessário para que essa hipótese seja confirmada, uma vez que parte do hidróxido de cálcio excedente pode ainda não ter reagido com a cal no período de 28 dias.

De forma análoga, identifica-se também a elevação dos valores de q_t com o aumento do peso específico aparente seco e consequente redução da porosidade das misturas. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Esse efeito é explicado, em parte, pelo maior intertravamento entre as partículas do solo em virtude da maior área de contato para o desenvolvimento das reações no sistema e pela maior compacidade da mistura. Além disso, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, tal qual a maior a capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas, também contribuem para a elevação da resistência do material.

Por outro lado, a elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% não representou uma variação considerável na resistência das amostras. Isso pode indicar que existe uma espécie de competição entre as partículas do solo e da pozolana pelo consumo da cal de carbureto, qual seja, as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a

água antes de reagir com o pó de vidro. Ainda, o teor de umidade utilizado nas misturas pode não ter sido suficiente para o desenvolvimento pleno das reações pozolânicas. Os argilominerais, assim como a cal e a pozolana, possuem uma grande afeição por água. Esse efeito pode resultar em uma incompatibilidade entre a umidade ótima, determinada através do ensaio de compactação, e a umidade necessária para o completo desenvolvimento das reações cimentantes. Isto é, o primeiro teor de umidade pode estar aquém em relação ao segundo. Sendo assim, o potencial pozolânico dos materiais pode ter sido subutilizado em razão da indisponibilidade de água para o pleno desenvolvimento das reações, uma vez que parte da pozolana disponível para as reações estaria desempenhando um mero papel de material inerte de preenchimento.

Nas figuras ilustradas acima fica visível, de um modo geral, a redução da resistência das amostras quando da adição de hidróxido de sódio. A Tabela 5.2 apresenta as taxas de variação da resistência para amostras com as mesmas características de peso específico aparente seco, teor de pó de vidro, teor de cal de carbureto, tempo e temperatura de cura, porém com distinção entre a adição ou não de solução de NaOH. Das 32 amostras avaliadas, apenas 8 apresentaram um aumento de resistência com a adição do NaOH, ou seja, apenas 25%. Este comportamento pode ser explicado devido à dificuldade de homogeneização das amostras após a adição da solução de NaOH, na etapa de preparação das misturas para moldagem dos corpos de prova. A diferença entre amostras com e sem adição da solução de NaOH ficou visível principalmente nesta etapa, uma vez que a solução causava a formação de grumos no solo, difíceis de serem desfeitos.

Tabela 5.2: Taxa de variação da resistência à tração por compressão diametral (q_c) com a adição da solução de NaOH.

Mistura	Sete dias a 23°C	Sete dias a 40°C	28 dias a 23°C	28 dias a 40°C
1A	4,99%	-76,19%	905,53%	71,62%
2A	-87,17%	-30,03%	77,36%	113,42%
3A	105,87%	-50,25%	-67,78%	-50,44%
4A	-46,55%	-27,83%	-37,25%	13,49%
5A	22,05%	-88,60%	-58,23%	-58,61%
6A	-5,96%	-50,16%	-55,02%	-40,35%
7A	-10,80%	-69,44%	-90,13%	-81,34%
8A	-54,58%	-81,67%	-78,09%	-59,33%

A análise estatística dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral foi realizada no software Minitab v.18. A Figura 5.9 abaixo apresenta o gráfico dos efeitos principais (ou de primeira ordem) obtido para estes ensaios.

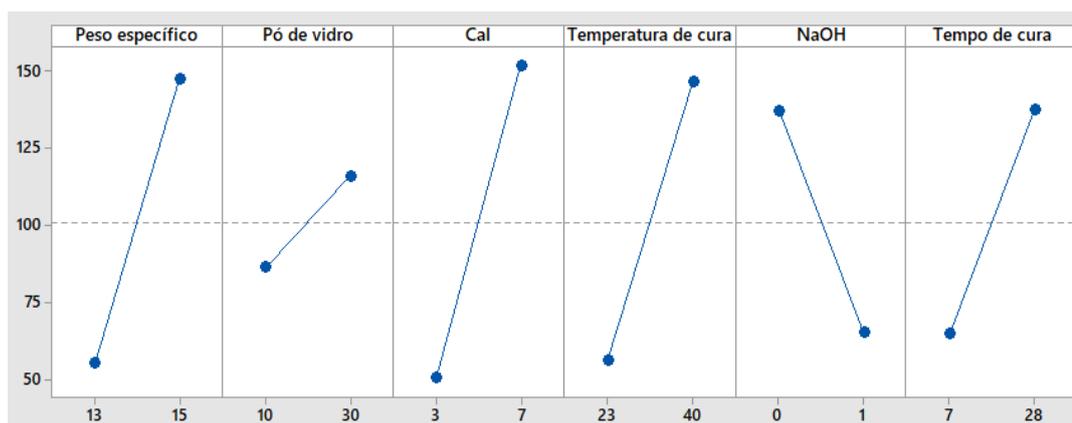


Figura 5.9: Efeitos principais para q_t .

A partir deste gráfico, é possível identificar que os fatores que mais exerceram efeito positivo sobre a resistência das misturas ensaiadas foram o peso específico, o teor de cal, a temperatura de cura e o tempo de cura. A adição de NaOH propiciou uma piora considerável no desempenho mecânico das amostras, enquanto o teor de pó de vidro apresentou um efeito menor do que as outras variáveis supracitadas.

Os efeitos de cada fator, assim como as interações de segunda ordem (entre fatores combinados) são apresentados de maneira quantitativa no gráfico de Pareto mostrado na Figura 5.10. Os efeitos considerados estatisticamente significativos são aqueles que cruzam a linha, determinada para um nível de significância de 5%. Assim como no gráfico de efeitos principais, é possível identificar que o fator (variável controlada) mais significativo foi o teor de cal, seguido do peso específico aparente seco e da temperatura de cura. É possível também identificar que as interações de segunda ordem entre algumas variáveis também possuem relevância.

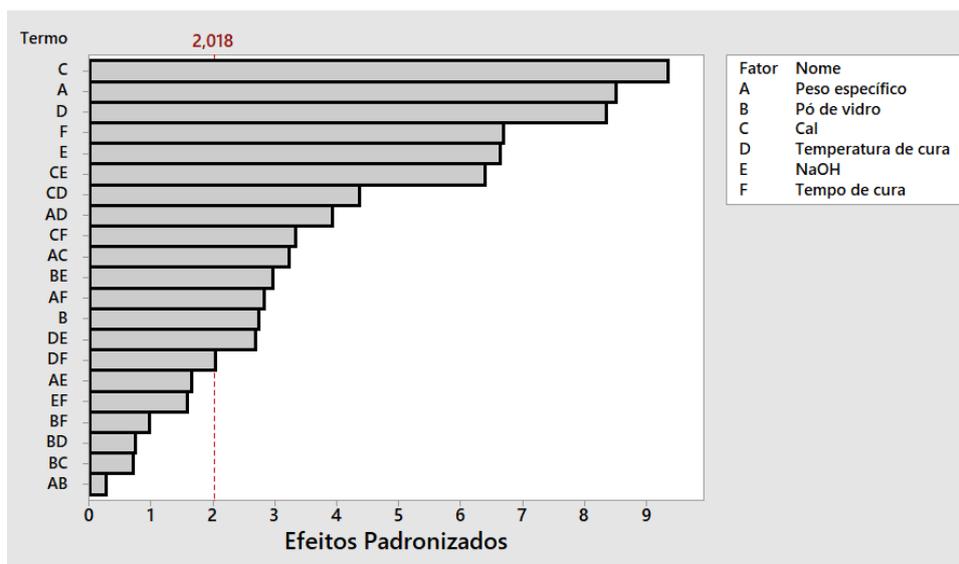


Figura 5.10: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_t .

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) foram correlacionados aos fatores controláveis. Através de uma regressão linear, executada no software MiniTab v.18, foi possível determinar as equações em função dos efeitos principais e também com e sem a interação entre esses. O processo resultou nas equações 5.1 e 5.2, nas quais as letras correspondem aos fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), teor de pó de vidro (B), teor de cal (C), temperatura de cura (D), adição ou não de NaOH (E) e tempo de cura (F). A equação 5.1, que considera apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 63,69%. Por outro lado, a equação 5.2 é capaz de explicar até 89,33% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear. Assim, é possível constatar que a incorporação dos efeitos de segunda ordem na previsão do comportamento do material estudado implicou em considerável aumento nos valores de R^2 . É importante salientar que o modelo considera apenas os fatores e as interações que exercem maior influência na variável resposta.

$$\text{RTCD (kPa)} = -816 + 46,15A + 25,35C + 5,32D - 3,422F + 72,5E \quad (\text{Equação 5.1})$$

$$\begin{aligned} \text{RTCD (kPa)} = & 1059 - 91,6A + 4,16B - 121,1C - 33,75D + 13,01F - 446E + \\ & 8,75AC + 2,498AD + 30,5AE - 0,1531BF + 1,391CD - 1,649 CF + 18,10 CE - \\ & 0,1628 DF \end{aligned} \quad (\text{Equação 5.2})$$

5.1.2 Ensaios de Rigidez Inicial

Os ensaios de rigidez inicial foram realizados para misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m³ e 15 kN/m³, com teores de pó de vidro de 10% e 30% e teores de cal de carbureto de 3% e 7%. Ainda, utilizou-se o tempo de cura de 28 dias, temperaturas de cura de 23°C e 40°C e amostras com e sem adição de solução de NaOH. As mesmas amostras utilizadas para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, antes da ruptura, foram submetidas ao ensaio de pulso ultrassônico para determinação do módulo de rigidez inicial. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.3. O valor máximo de G_0 foi 7640,36 MPa, para a amostra 8A, sem adição de NaOH e curada a 40°C por 28 dias, a mesma amostra que apresentou o maior valor de q_t .

Tabela 5.3: Resultados de módulo de rigidez inicial (G_0) em Mpa.

Mistura	28 dias de cura			
	23° sem NaOH	40°C sem NaOH	23°C com NaOH	40°C com NaOH
1A	270,29	243,01	165,30	294,26
2A	343,61	547,42	389,82	450,83
3A	274,01	420,40	134,95	268,43
4A	450,79	975,81	306,29	624,23
5A	773,68	1013,73	298,61	523,85
6A	4583,86	6124,93	671,52	838,14
7A	3686,08	1585,68	363,11	600,69
8A	5755,59	7640,36	752,58	921,67

As Figuras 5.11 a 5.14 ilustram os resultados de módulo de rigidez inicial (G_0) em relação aos teores de cal de carbureto em função da variação do peso específico aparente seco e do teor de pó de vidro, de acordo com as diferentes condições de temperatura de cura e a adição ou não de hidróxido de sódio. A partir dos resultados, é possível identificar que a rigidez das misturas aumenta com a elevação do teor de cal de carbureto, comportamento que era esperado. De forma análoga, identifica-se também a elevação dos valores de G_0 com o aumento do peso específico aparente seco.

A elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% não influenciou de maneira considerável no comportamento das misturas em relação à rigidez inicial. Inclusive, o efeito

do teor de vidro nos resultados de módulo de rigidez inicial foi ainda menor do que o efeito observado para a resistência à tração por compressão diametral. Ainda, foi possível identificar que, ao contrário do que foi observado para os valores de q_t , o aumento da temperatura de cura das amostras não resultou em um ganho considerável de rigidez às amostras curadas por 28 dias.

Os maiores valores de G_0 foram obtidos para as amostras moldadas com 7% de cal de carbureto, com pesos específicos secos de 15 kN/m³, curadas a 40°C e sem uso de NaOH. Assim como nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, a adição de solução de NaOH resultou, de uma maneira geral, em uma redução do módulo de rigidez inicial das misturas.

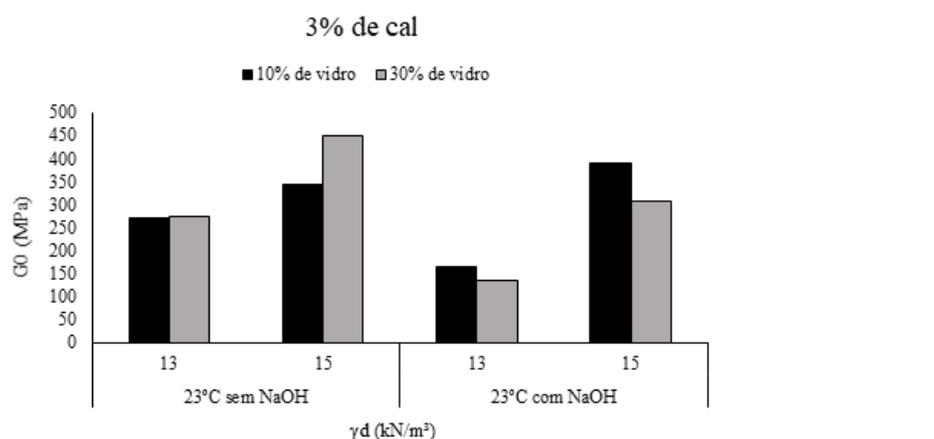


Figura 5.11: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.

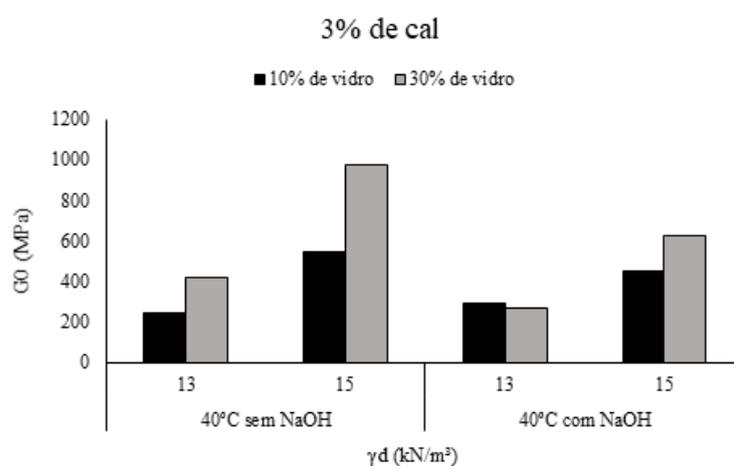


Figura 5.12: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco e teor de pó de vidro para 3% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.

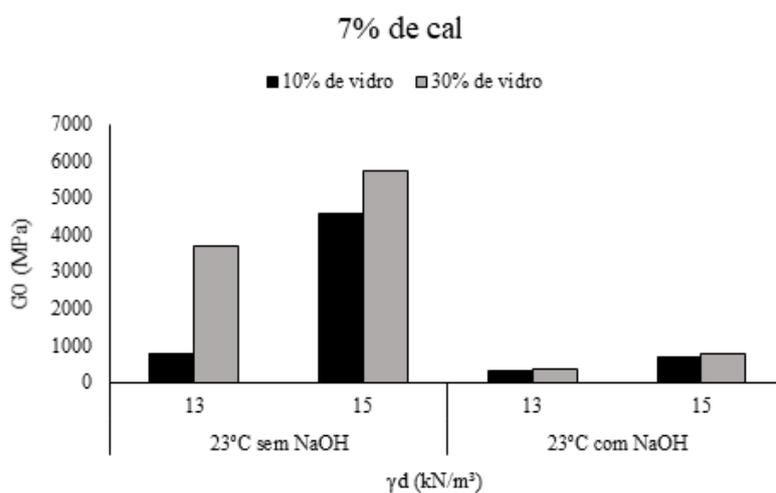


Figura 5.13: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 23°C.

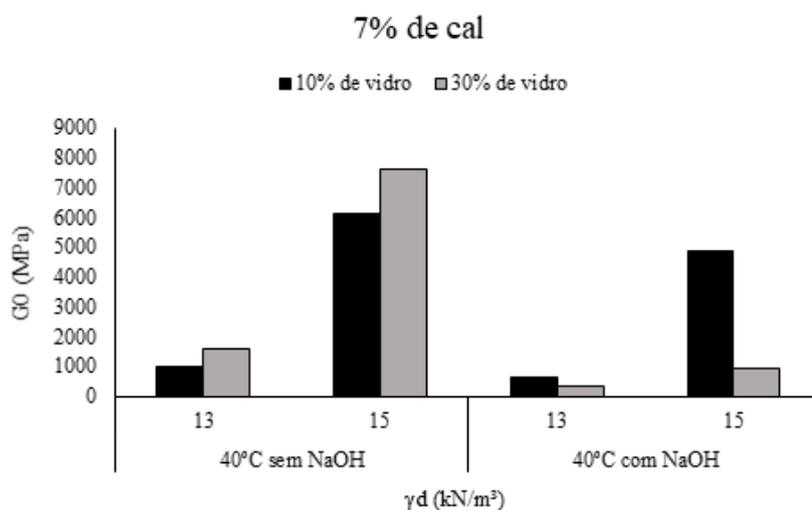


Figura 5.14: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico seco e teor de pó de vidro para 7% de cal de carbureto, aos 28 dias de cura a 40°C.

A Figura 5.15 abaixo apresenta o gráfico dos efeitos principais (ou de primeira ordem) obtido para os ensaios de módulo de rigidez inicial (G_0). É possível constatar que os fatores que mais influenciam na rigidez inicial das misturas estudadas são o peso específico aparente seco e o teor de cal. Assim como nos ensaios de resistência à compressão por tração diametral, a adição de NaOH também causa uma piora no desempenho do material em relação à rigidez, enquanto o pó de vidro pouco influencia nesse comportamento. Ao contrário da influência considerável identificada nos valores de q_t , o efeito da temperatura de cura foi menos pronunciado.

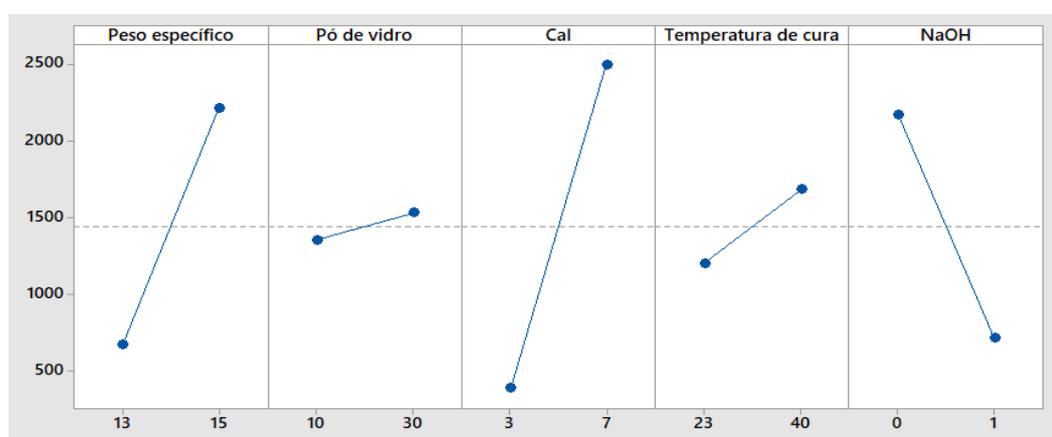


Figura 5.15: Efeitos principais para G_0 .

Os efeitos de cada fator e as interações entre os fatores combinados (de segunda ordem) são mostrados de maneira quantitativa no gráfico de Pareto exibido na Figura 5.16. Os efeitos considerados estatisticamente significativos são aqueles que cruzam a linha tracejada, estabelecida para um nível de significância de 5%. Assim como no gráfico de efeitos principais, é possível identificar que o fator (variável controlada) mais significativo foi o teor de cal, seguido do peso específico aparente seco e da presença de NaOH. É possível também identificar que as interações de segunda ordem entre algumas variáveis também possuem relevância.

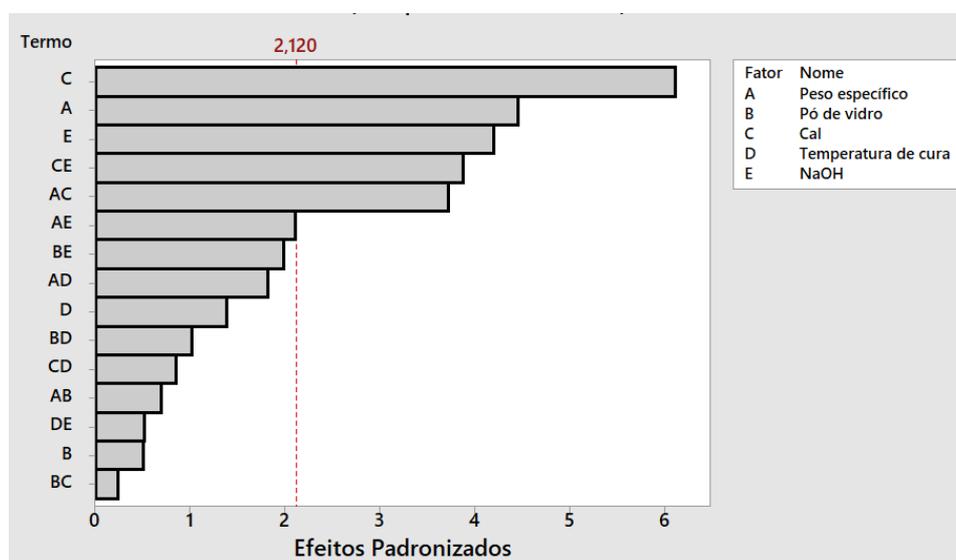


Figura 5.16: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para G_0 .

Os resultados de módulo de rigidez inicial (G_0) também foram correlacionados aos fatores controláveis. A equação 5.3, que leva em conta apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 56,53%. Já a equação 5.4, que considera também os efeitos secundários, é capaz de explicar até 88,25% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear. Assim, é possível constatar que a incorporação dos efeitos de segunda ordem na previsão do comportamento do material estudado implicou em considerável aumento nos valores de R^2 .

$$G_0 \text{ (MPa)} = - 11251 + 770A + 520C - 1454E \quad (\text{Equação 5.3})$$

$$G_0 \text{ (MPa)} = 8538 - 839A + 8,8B - 3643C + 28,2D + 1902E + 321,9AC - 671CE \quad \text{(Equação 5.4)}$$

5.1.3 Relação das variáveis resposta com o índice $\eta/(L_{iv})^k$

Levando em consideração que o material estudado é um solo artificialmente cimentado composto por pó de vidro moído e cal de carbureto, os resultados de resistência à tração por compressão diametral e módulo de rigidez inicial podem ser correlacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal, de modo a se estabelecer relações matemáticas entre o índice e a variável resposta.

Sendo assim, foram propostas relações da forma da Equação 2.6. Através da análise estatística, notou-se a grande influência do teor de cal e do peso específico aparente seco das misturas sobre as variáveis resposta. Sendo assim, o valor do expoente k foi fixado em 0,11 como sendo o melhor ajuste para o solo em estudo, visto que resultou em valores de coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis para todos os tratamentos.

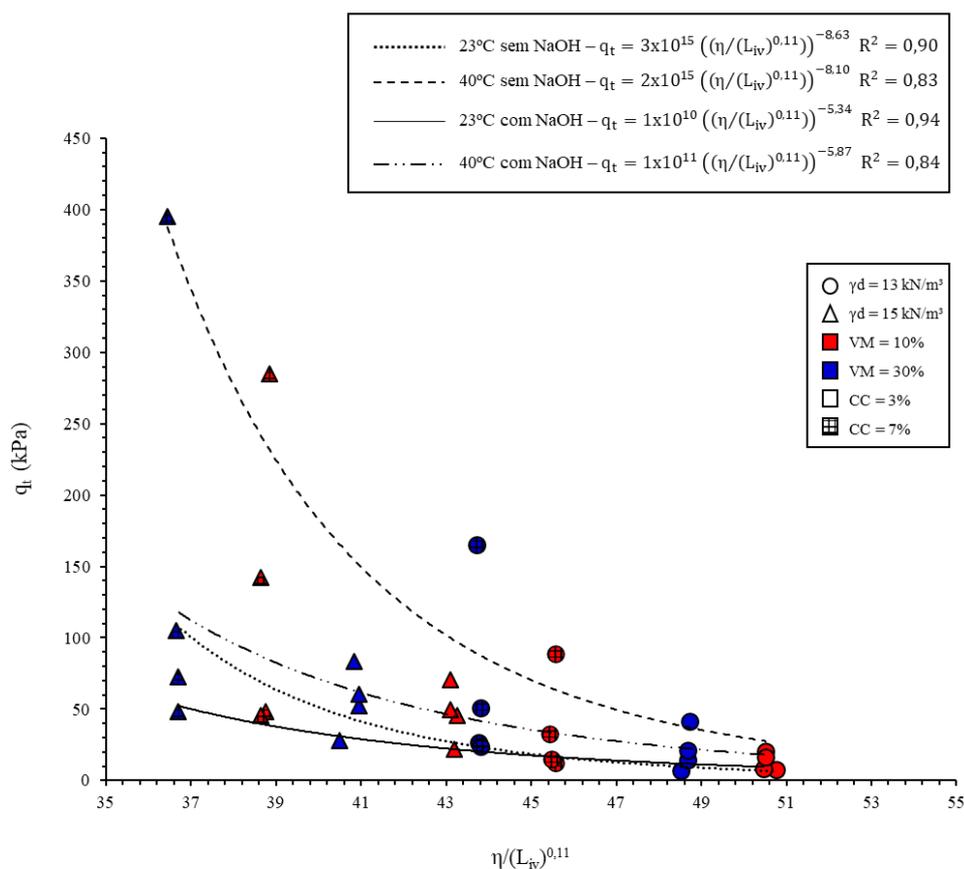


Figura 5.17: Relação entre q_t e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por sete dias.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova curados por sete dias estão apresentados na Figura 5.17. Os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro, temperatura de cura e adição ou não de hidróxido de sódio. Este gráfico corrobora as análises feitas anteriormente. A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 83 e 94%.

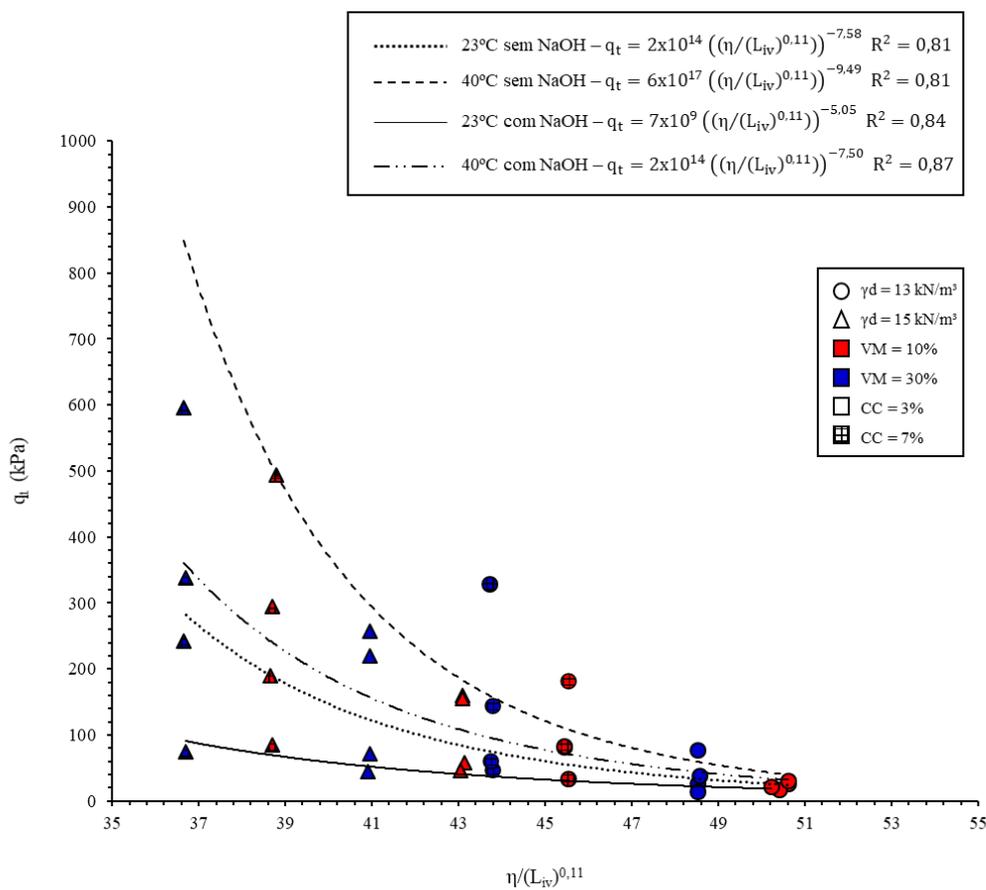


Figura 5.18: Relação entre q_t e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por 28 dias.

A Figura 5.18 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova curados por 28 dias. Novamente, os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro, temperatura de cura e adição ou não de NaOH. O gráfico apresentado valida as análises feitas anteriormente. A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 81 e 87%.

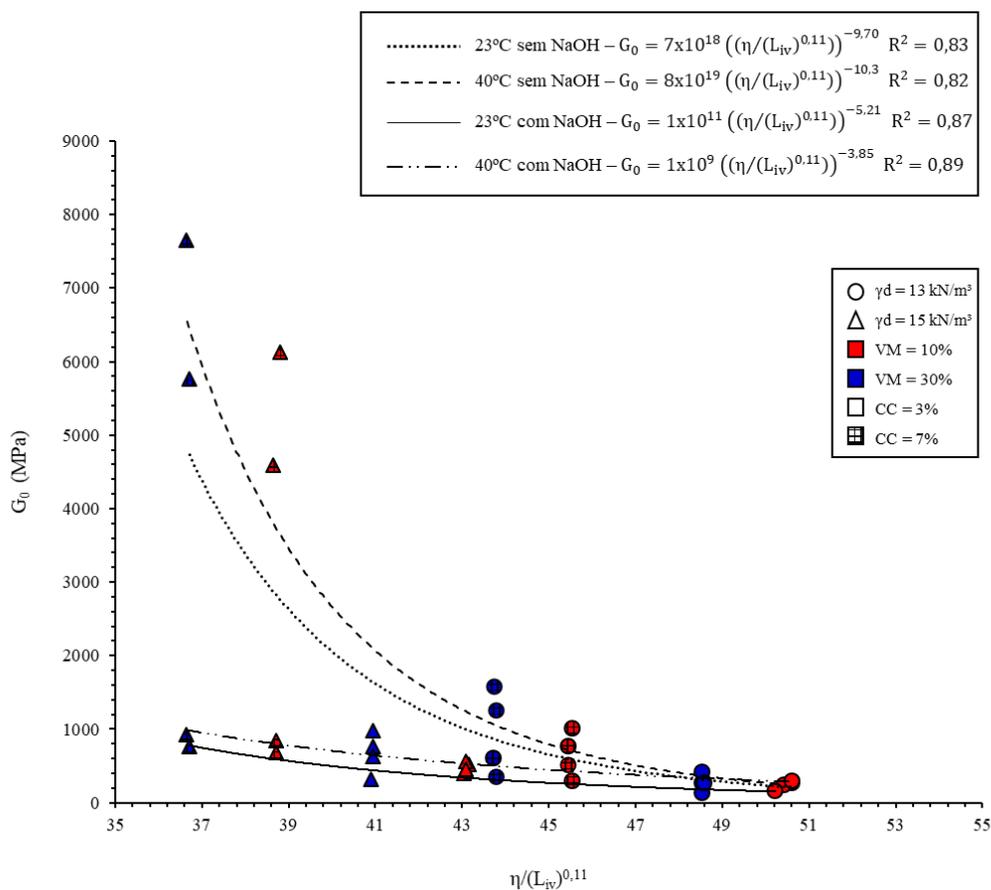


Figura 5.19: Relação entre G_0 e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras curadas por 28 dias.

Os resultados obtidos para o módulo de rigidez inicial estão exibidos na Figura 5.19. Os valores estão apresentados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro, temperatura de cura e adição ou não de NaOH. O gráfico apresentado reafirma as análises feitas. A relação entre os dados experimentais de G_0 e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 82 e 89%.

Nesta etapa da pesquisa, a correlação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) e do módulo de rigidez inicial (G_0) com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ($\eta/(B_{iv})^k$) não resultou em coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis.

5.1.4 Relação entre as variáveis resposta

Além das correlações anteriores, foi possível também correlacionar as variáveis resposta da Fase 1 da pesquisa, que são a resistência à tração por compressão diametral (q_t) e o módulo de rigidez inicial (G_0). Foram estabelecidas relações matemáticas do tipo linear, para as amostras moldadas sem NaOH (Figura 5.20) e com NaOH (Figura 5.21), com valores de R^2 entre 0,63 e 0,78. É importante relatar que as correlações foram realizadas para amostras curadas por 28 dias, uma vez que foram realizados ensaios de rigidez inicial somente para este tempo de cura.

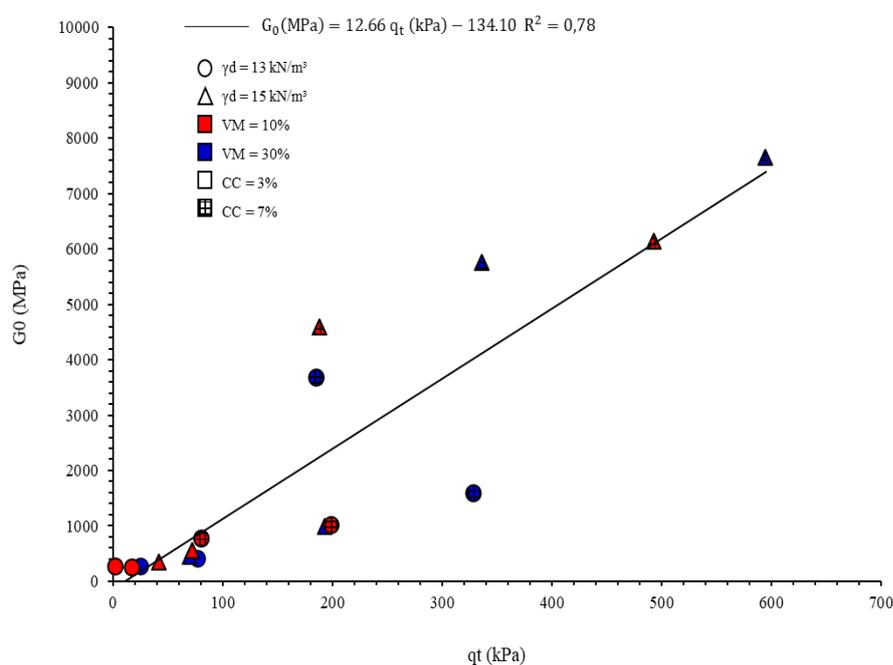


Figura 5.20: Relação entre G_0 e q_t para as amostras moldadas sem NaOH.

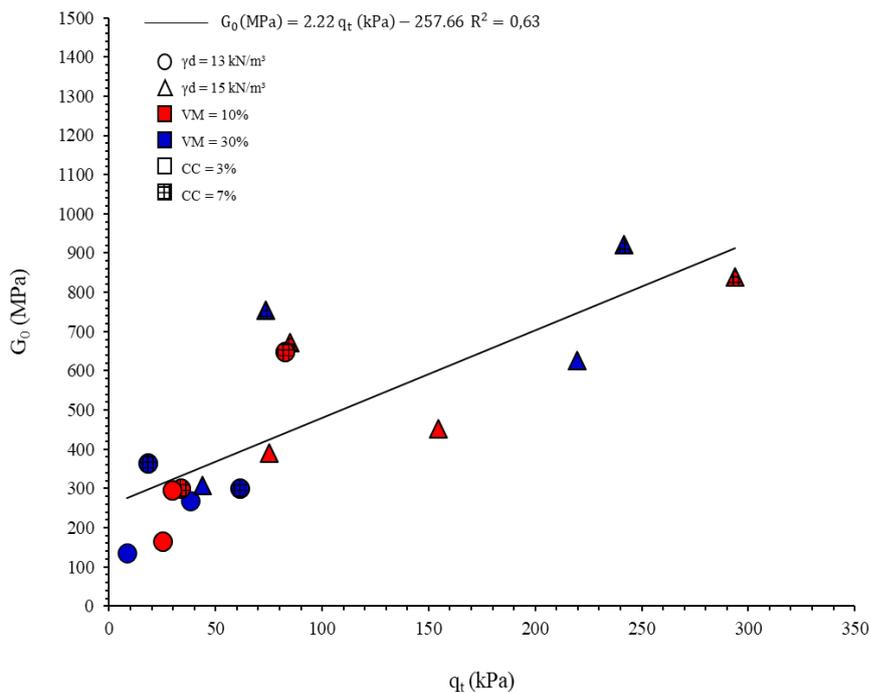


Figura 5.21: Relação entre G_0 e q_t para as amostras moldadas com NaOH.

5.2 FASE 2 – SOLO ESTABILIZADO COM PÓ DE VIDRO, CAL DE CARBURETO E LIGANTES ALTO CaO E BAIXO CaO.

Na Fase 2, a estabilização do solo foi avaliada através da realização de ensaios de resistência à compressão simples. Foram utilizadas misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m³ e 15 kN/m³, com dois ligantes diferentes (A e B) e teores de ligante de 10% e 30%. Ainda, utilizaram-se os tempos de cura de sete e 28 dias e temperaturas de cura de 23°C e 40°C. Os resultados obtidos estão na Tabela 5.4. O valor máximo de q_u foi 5398,65 kPa, para a amostra 6B, curada a 40°C por 28 dias.

Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) em kPa.

Mistura	Sete dias de cura		28 dias de cura	
	Cura a 23°C	Cura a 40°C	Cura a 23°C	Cura a 40°C
1B	69,06	235,97	271,49	676,87
2B	203,28	769,12	641,07	1653,93
3B	215,67	520,66	518,68	761,86
4B	499,60	1199,46	1409,48	2366,00
5B	94,21	969,94	640,22	2564,43
6B	522,45	1892,21	1561,22	5398,65
7B	57,10	674,90	417,16	359,50
8B	195,51	949,22	954,54	1814,3

As Figuras 5.20 a 5.23 ilustram os resultados de resistência à compressão simples em relação aos teores de ligante em função da variação do peso específico aparente seco e do tipo de ligante utilizado, de acordo com as diferentes condições de tempo e temperatura de cura. Nesta etapa da pesquisa foram definidos dois tipos distintos de ligante (A e B). O ligante A (Alto CaO) é composto por 30% de cal de carbureto e 70% de pó de vidro, enquanto que o ligante B (Baixo CaO) possui 10% de cal de carbureto e 90% de pó de vidro. Ainda, para o ligante A utilizou-se uma concentração de NaOH igual a 3 M, enquanto que para o ligante B a molaridade foi de 10 M.

A partir dos resultados obtidos para as misturas com adição de 10% de ligante, foi possível identificar uma tendência de elevação da resistência à compressão simples com o aumento do peso específico aparente seco, da temperatura de cura e do tempo de cura. Ainda, é possível identificar que todas as amostras moldadas com a utilização do ligante do tipo B apresentaram os melhores resultados. Para as misturas com adição de 30% de ligante, os valores de q_u também aumentam com a elevação do peso específico aparente seco, da temperatura de cura e do tempo de cura. Porém, neste caso, os melhores resultados são obtidos com a utilização do ligante do tipo A. Isso significa que é possível obter melhores resistências ao utilizar maiores teores de ligante do tipo A (Alto CaO), diminuindo a quantidade de pozolana utilizada, uma vez que o ligante A possui maior teor de cal em relação à massa total de ligante do que o ligante B.

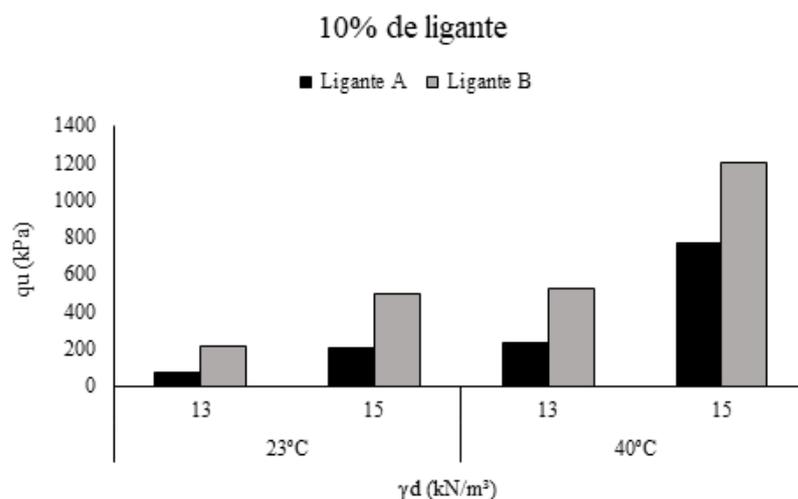


Figura 5.22: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 10% de ligante, aos sete dias de cura.

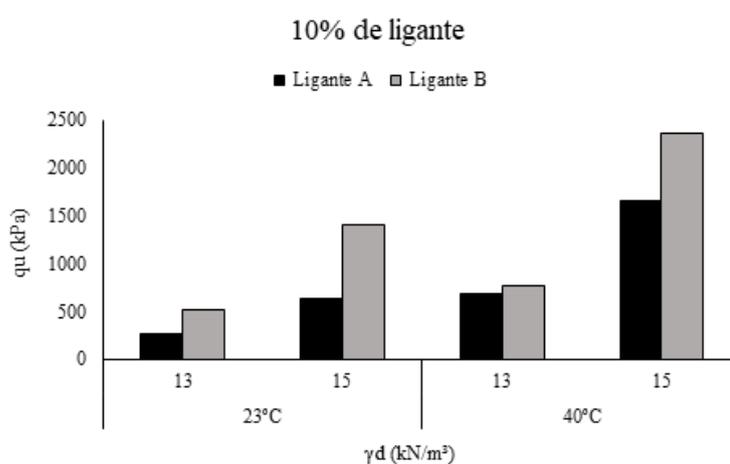


Figura 5.23: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 10% de ligante, aos 28 dias de cura.

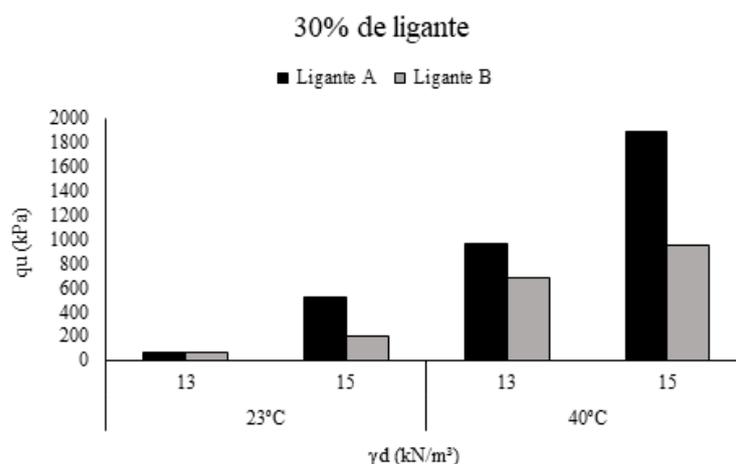


Figura 5.24: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 30% de ligante, aos sete dias de cura.

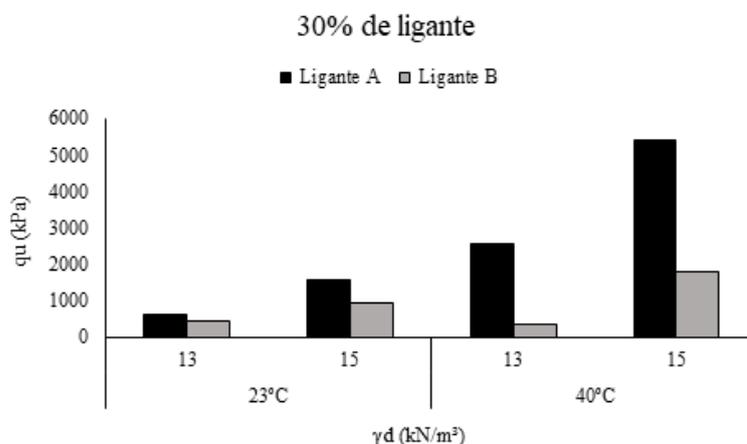


Figura 5.25: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco e tipo de ligante para 30% de ligante, aos 28 dias de cura.

A Figura 5.26 abaixo apresenta o gráfico dos efeitos principais (ou de primeira ordem) obtido para os ensaios de resistência à compressão simples (q_u). É possível identificar que os fatores que mais influenciam na resistência das misturas estudadas são o peso específico aparente seco, a temperatura e o tempo de cura. O tipo e o teor de ligante também apresentam influência no desempenho do material à compressão simples, porém de maneira menos pronunciada.

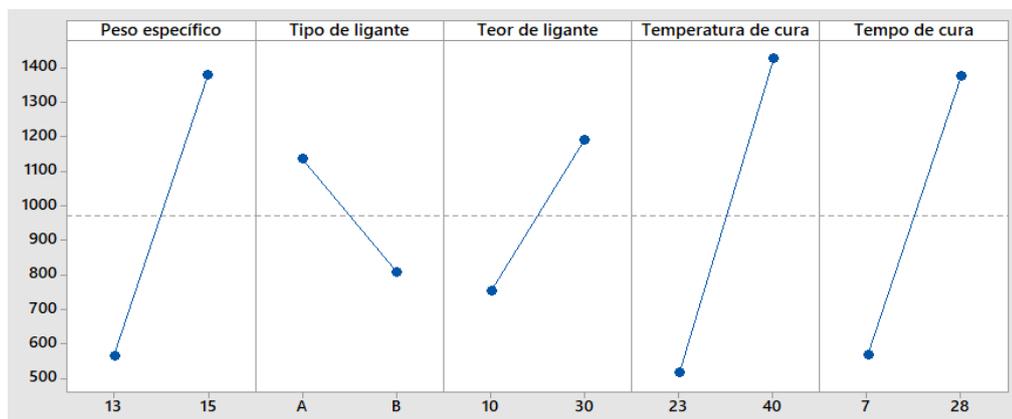


Figura 5.26: Efeitos principais para q_u .

A Figura 5.27 abaixo apresenta o gráfico de Pareto com os efeitos de cada fator e as interações entre os fatores combinados (de segunda ordem). Os efeitos considerados estatisticamente significativos são aqueles que cruzam a linha tracejada, estabelecida para um nível de significância de 5%. Assim como no gráfico de efeitos principais, é possível identificar que o fator (variável controlada) mais significativo foi a temperatura de cura, seguido do peso específico aparente seco e do tempo de cura. É possível também identificar que as interações de segunda ordem entre algumas variáveis também possuem relevância.

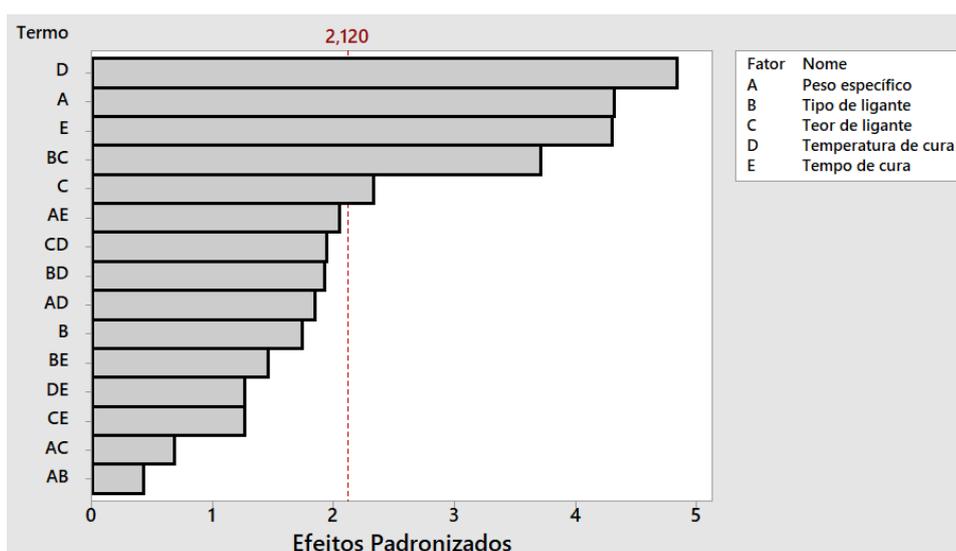


Figura 5.27: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_u .

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) também foram correlacionados aos fatores controláveis. Através de uma regressão linear, executada no software MiniTab v.18, foi possível determinar as equações em função dos efeitos principais e também com e sem a interação entre esses. O procedimento resultou nas equações 5.5 e 5.6, nas quais as letras correspondem aos fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), tipo de ligante (B), teor de ligante (C), temperatura de cura (D) e tempo de cura (E).

$$\text{RCS (kPa)} = -7251 + 406A + 535B + 22C + 53,5D + 38,6E \quad (\text{Equação 5.5})$$

$$\begin{aligned} \text{RCS (kPa)} = & 8064 - 558A + 1435B - 45,8C - 298D - 260E + 20,4AD - 18,36AE \\ & - 34,89BC - 21,3BD - 13,06BE + 2,15CD + 1,33DE \end{aligned} \quad (\text{Equação 5.6})$$

A equação 5.5, que considera apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 69,10%. Enquanto isso, a equação 5.6 é capaz de explicar até 84,80% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

5.2.1 Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$

Assim como para as variáveis resposta da Fase 1 da pesquisa, os resultados de resistência à compressão simples podem ser correlacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal, de modo a se estabelecer relações matemáticas entre o índice e a RCS.

De modo análogo à Fase 1 da pesquisa, o valor do expoente k foi fixado em 0,11 como sendo o melhor ajuste para o solo em estudo. Aqui, somente os dados obtidos para o ligante A (Alto CaO) resultaram em valores de coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis para todos os tratamentos.

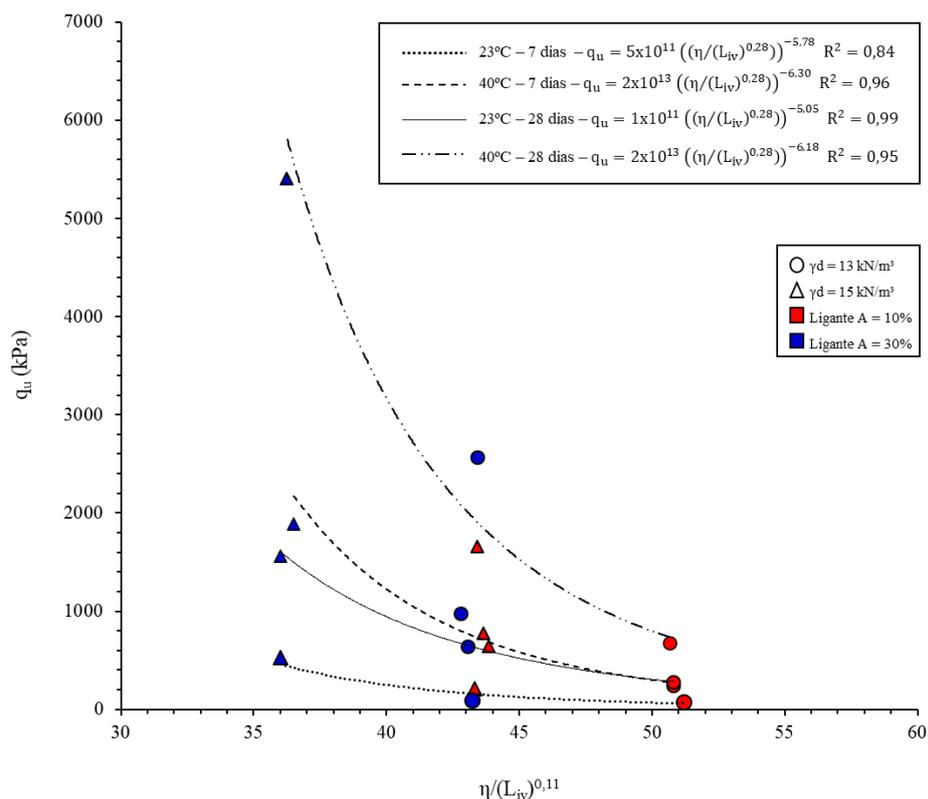


Figura 5.28: Relação entre q_u e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para amostras moldadas com o ligante A.

Os resultados de resistência à compressão simples para os corpos de prova moldados com a utilização do ligante A (Alto CaO) estão apresentados na Figura 5.28. Os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de ligante, tempo e temperatura de cura. A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 84 e 99%.

5.2.2 Resistência à compressão simples em função do índice $\eta/(B_{iv})^k$

Levando em consideração que o solo estabilizado é artificialmente cimentado com pó de vidro moído e cal de carbureto, os resultados de resistência à compressão simples podem ser correlacionados com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante. Consoli *et al.* (2018) e Winter (2018) consideram que o pó de vidro moído, similar ao utilizado nesta pesquisa, forma uma espécie de ligante ao reagir com a cal, devido à ocorrência de reações pozolânicas. O comportamento desse ligante é similar ao do cimento Portland quando utilizado em estabilização de solos. Assim, utilizou-se um expoente k igual a 0,28, utilizado em estudos de solos artificialmente cimentados com cimento Portland (Consoli *et al.*, 2007). Assim como no

item anterior, somente os dados obtidos para o ligante A (Alto CaO) resultaram em valores de coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis para todos os tratamentos.

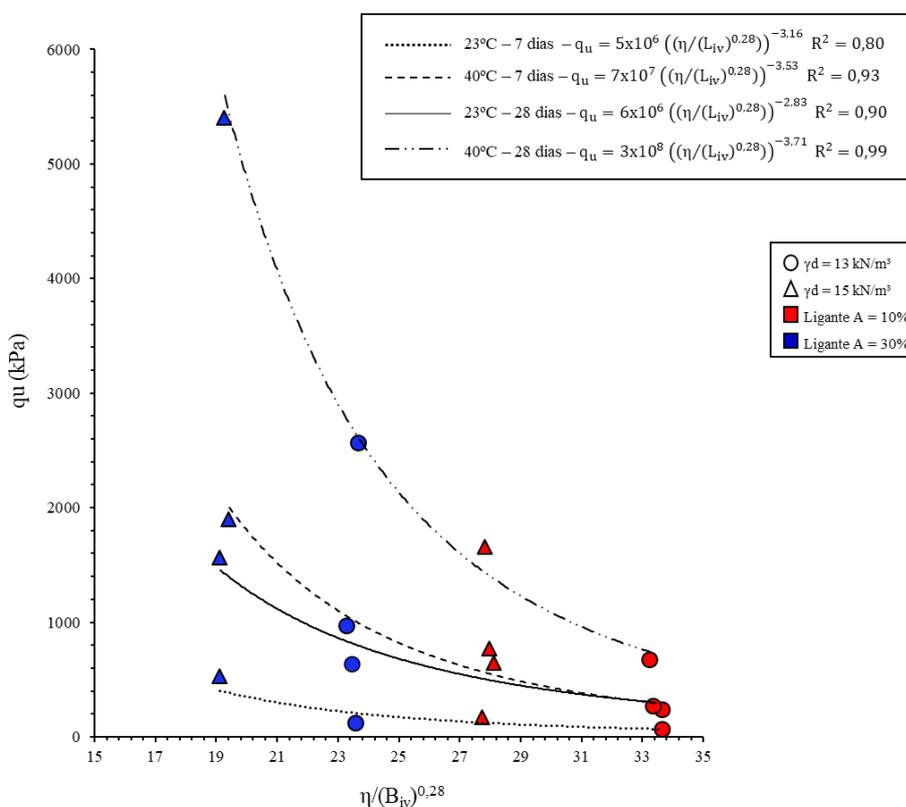


Figura 5.29: Relação entre q_u e $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ para amostras moldadas com o ligante A.

A Figura 5.29 apresenta os resultados de resistência à compressão simples para as amostras moldadas com utilização do ligante A (Alto CaO). Os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de ligante, tempo e temperatura de cura. A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(B_{iv})^{0,28}$ resultou em coeficientes de determinação entre 80 e 99%.

5.3 FASE 3 – SOLO ESTABILIZADO SOMENTE COM CAL DE CARBURETO

Na Fase 3, optou-se pela avaliação da estabilização do solo somente com adição de cal de carbureto, e sem a utilização de pó de vidro e NaOH, uma vez que foi identificada a pequena influência destes aditivos no comportamento mecânico do solo nas Fases 1 e 2 do estudo. A estabilização do solo foi avaliada através da realização de ensaios de resistência à compressão

simples e ensaios de rigidez inicial. Foram utilizadas misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m³ e 15 kN/m³, teores de cal de carbureto de 3 e 6% e temperaturas de cura de 23°C e 40°C. O tempo de cura foi fixado em sete dias.

5.3.1 Ensaios de resistência à compressão simples

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão simples. O valor máximo de q_u foi 1483,51 kPa, para a amostra 7C, curada a 40°C.

Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) em kPa.

Mistura	Cura a 23°C	Cura a 40°C
1C	93,49	102,50
2C	64,96	93,83
3C	191,59	730,42
4C	221,25	550,86
5C	221,33	313,19
6C	212,43	279,42
7C	495,97	1483,51
8C	524,84	1269,48

As Figuras 5.30 e 5.31 ilustram os resultados de resistência à compressão simples em relação aos teores de cal em função da variação do peso específico aparente seco e do tipo de cal utilizada, de acordo com as duas situações distintas de temperatura de cura (23°C e 40°C).

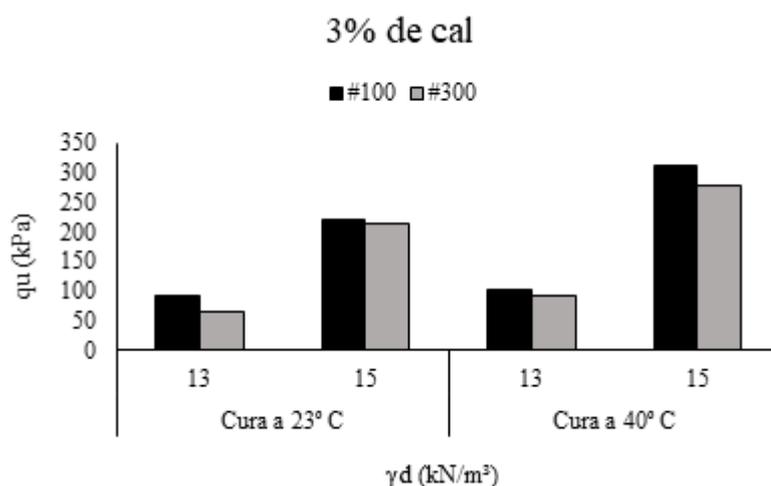


Figura 5.30: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 3% de cal.

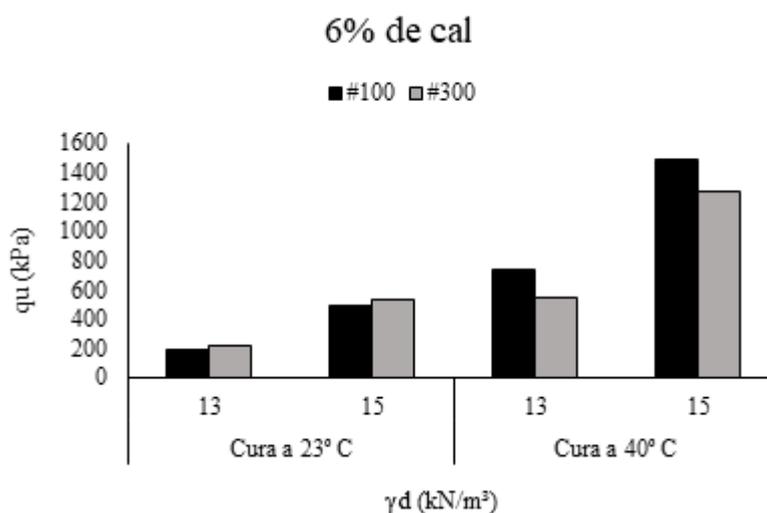


Figura 5.31: Variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 6% de cal.

A partir dos resultados exibidos nas figuras, é possível identificar que a resistência à compressão simples aumenta com a elevação do teor de cal de carbureto. Esse efeito foi identificado de maneira similar nas fases 1 e 2 do estudo. De maneira análoga, identifica-se também a elevação dos valores de q_u com o aumento do peso específico aparente seco e consequente redução da porosidade das misturas. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência.

Por outro lado, a utilização de uma fração mais fina de cal de carbureto (passante na peneira #300) não propiciou um aumento na resistência das amostras. Pelo contrário, os resultados de q_u foram levemente melhores para a cal com partículas passantes na peneira #100 e retidas na #300. Ainda, assim como nas fases 1 e 2 da pesquisa, a temperatura de cura se mostrou como sendo um fator de influência na obtenção de melhores resistências.

A Figura 5.32 abaixo apresenta o gráfico dos efeitos principais (ou de primeira ordem) para os ensaios de resistência à compressão simples (q_u). É possível constatar que os fatores que mais influenciam no comportamento mecânico das misturas estudadas são o peso específico aparente seco, o teor de cal e a temperatura de cura. A redução da finura da cal teve efeito análogo à adição de NaOH nas etapas anteriores, ou seja, propiciou uma piora no comportamento das misturas.

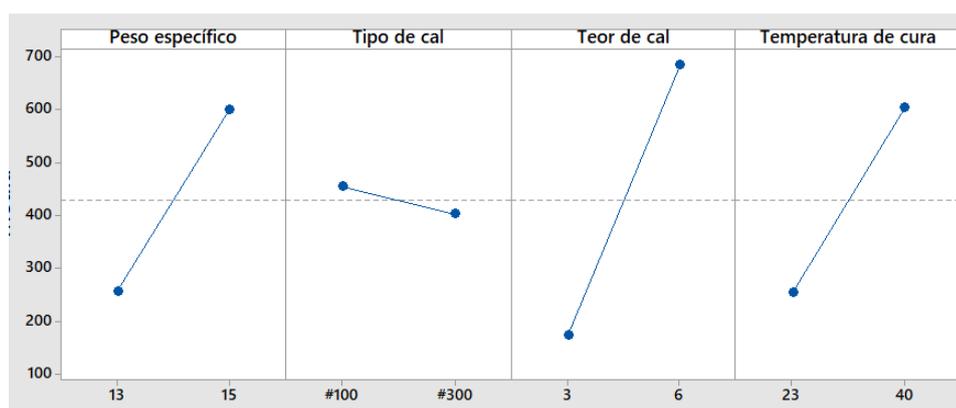


Figura 5.32: Efeitos principais para q_u .

A Figura 5.33 abaixo exibe o gráfico de Pareto com os efeitos de cada fator e as interações entre os fatores combinados (de segunda ordem). São considerados estatisticamente significativos os efeitos que cruzam a linha tracejada, estabelecida para um nível de significância de 5%. Assim como no gráfico de efeitos principais, é possível identificar que o fator (variável controlada) mais significativo foi o teor de cal, seguido da temperatura de cura e do peso específico. É possível também identificar que as interações de segunda ordem entre algumas variáveis também possuem relevância. O tipo de cal se mostrou estatisticamente insignificante.

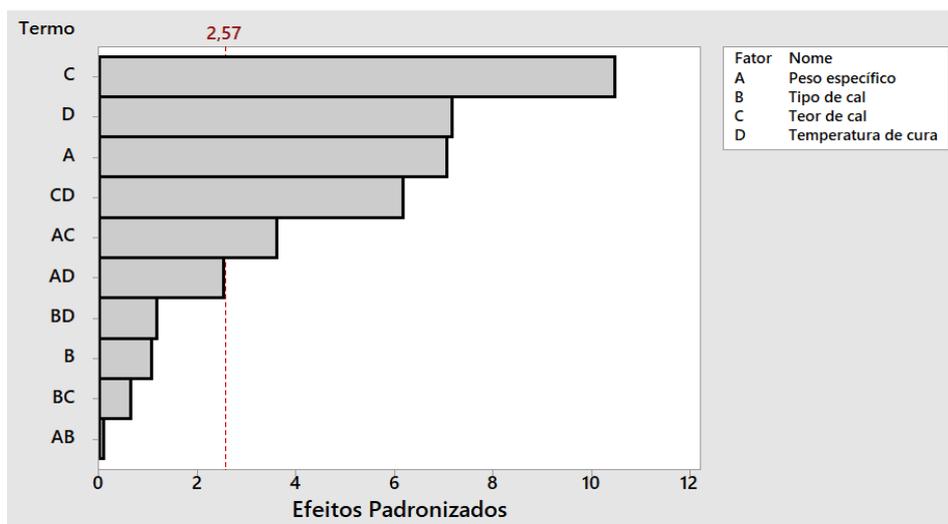


Figura 5.33: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_u .

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) também foram correlacionados aos fatores controláveis. Através de uma regressão linear, executada no software MiniTab v.18, foi possível definir as equações em função dos efeitos principais e também incluindo ou não a interação entre esses. O procedimento resultou nas equações 5.7 e 5.8, nas quais as letras correspondem aos fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), tipo de cal (B), teor de cal (C) e temperatura de cura (D).

$$\text{RCS (kPa)} = -3393 + 172A - 25,9B + 170,3C + 20,57D \quad (\text{Equação 5.7})$$

$$\text{RCS (kPa)} = 5166 - 320A + 10B - 1022C - 133,8D - 2,5AB + 58,7AC + 7,24AD + 11,78CD \quad (\text{Equação 5.8})$$

A equação 5.7, que considera apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 76,77%. Enquanto isso, a equação 5.8 é capaz de explicar até 97,54% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

5.3.2 Ensaio de rigidez inicial

Os resultados médios obtidos nos ensaios de rigidez inicial estão apresentados na Tabela 5.6. O valor máximo de G_0 foi 774,87, para a amostra 7C, curada a 40°C, a mesma que apresentou o maior valor de resistência à compressão simples.

Tabela 5.6: Resultado dos ensaios de módulo de rigidez inicial (G_0) em MPa.

Mistura	Cura a 23°C	Cura a 40°C
1C	130,78	153,40
2C	143,32	138,46
3C	232,67	510,12
4C	250,62	378,50
5C	278,73	272,38
6C	262,04	223,86
7C	389,06	774,87
8C	403,23	651,70

As Figuras 5.34 e 5.35 ilustram os resultados de módulo de rigidez inicial em relação aos teores de cal em função da variação do peso específico aparente seco e do tipo de cal utilizada, considerando as duas situações distintas de temperatura de cura (23°C e 40°C).

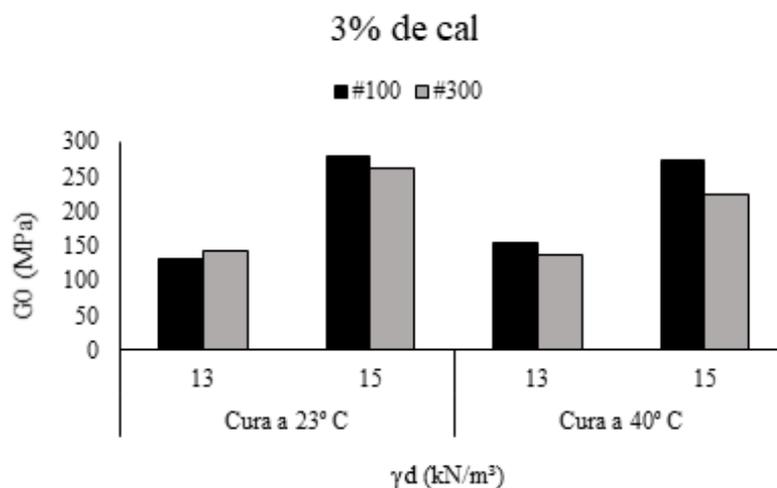


Figura 5.34: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 3% de cal.

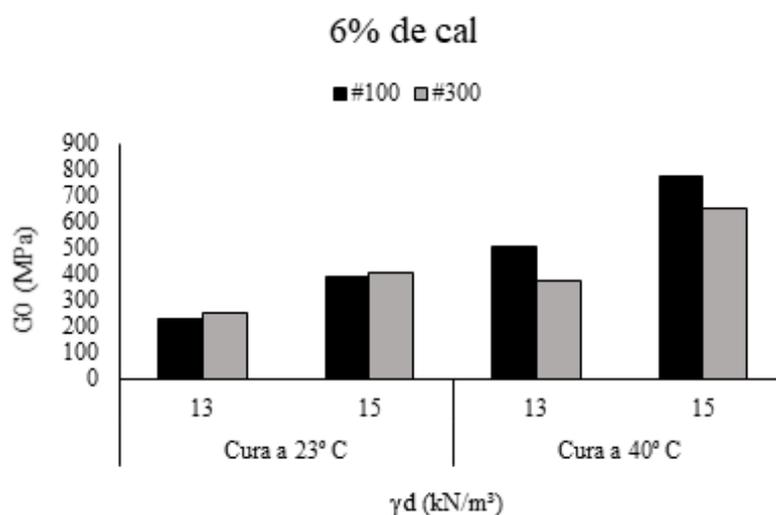


Figura 5.35: Variação do módulo de rigidez inicial (G_0) em função do peso específico aparente seco, tipo de cal e temperatura de cura, para 6% de cal.

A partir dos resultados exibidos nas figuras, é possível identificar que o comportamento do material no que tange à rigidez inicial é muito similar àquele observado para a resistência à compressão simples. Em suma, o G_0 é maior com o aumento do teor de cal de carbureto, com o aumento do peso específico aparente seco e com a elevação da temperatura de cura. Assim como nos valores de q_u , a utilização da fração mais fina de cal de carbureto não resultou no aumento dos valores de módulo de rigidez inicial (G_0).

A Figura 5.36 abaixo apresenta o gráfico dos efeitos principais (ou de primeira ordem) para os ensaios de rigidez inicial (G_0). O comportamento observado é muito similar àquele dos ensaios de resistência à compressão simples. Novamente, os fatores que mais influenciam no comportamento mecânico das misturas estudadas são o peso específico aparente seco, o teor de cal e a temperatura de cura, enquanto o tipo de cal representou um efeito menos pronunciado.

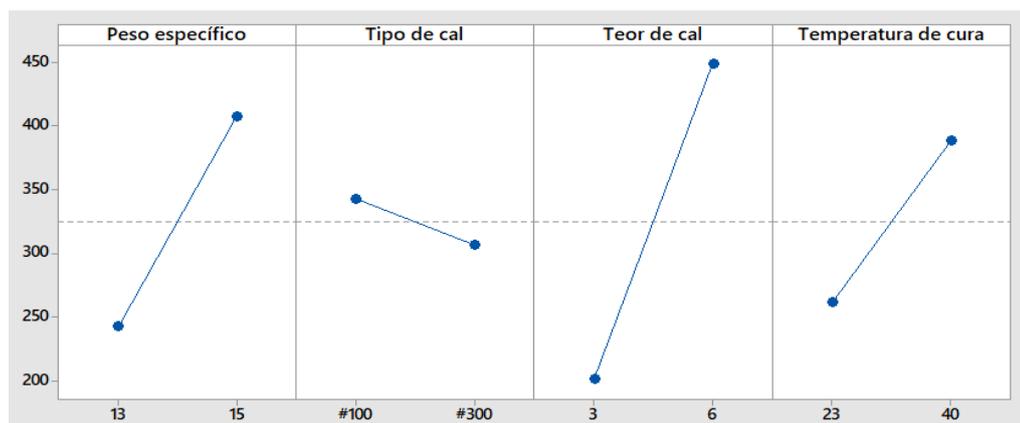


Figura 5.36: Efeitos principais para G_0 .

A Figura 5.37 abaixo exibe o gráfico de Pareto com os efeitos de cada fator e as interações entre os fatores combinados (de segunda ordem). Assim como no gráfico de efeitos principais, é possível identificar que o fator (variável controlada) mais significativo foi o teor de cal, seguido pelo peso específico e pela temperatura de cura. É possível também identificar que as interações de segunda ordem entre algumas variáveis também possuem relevância. O tipo de cal novamente se mostrou estatisticamente insignificante.

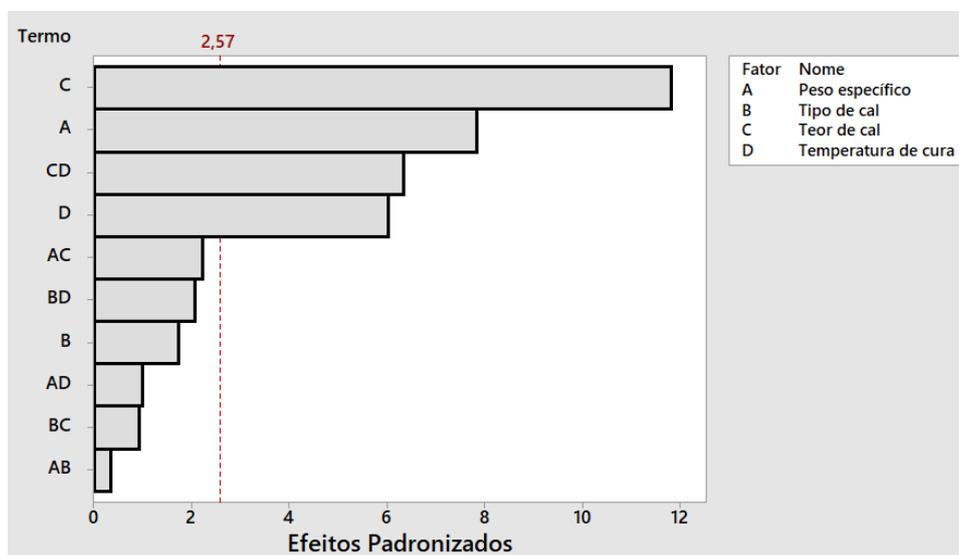


Figura 5.37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para G_0 .

Os resultados de módulo de rigidez inicial (G_0) também foram correlacionados aos fatores controláveis. Através de uma regressão linear, realizada no software MiniTab v.18, foi possível estabelecer as equações em função dos efeitos principais, incluindo ou não a

interação entre esses. O procedimento resultou nas equações 5.9 e 5.10, nas quais as letras correspondem aos fatores controláveis: peso específico aparente seco (A), tipo de cal (B), teor de cal (C) e temperatura de cura (D).

$$G_0 \text{ (MPa)} = - 1436 + 82,4A - 18,1B + 82,8C + 7,45D \quad \text{(Equação 5.9)}$$

$$G_0 \text{ (MPa)} = 292 + 11,9A + 62,0B - 301,1C - 16,08D + 15,66AC - 2,55BD + 5,227CD \quad \text{(Equação 5.10)}$$

A equação 5.9, que considera apenas os efeitos de primeira ordem, apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 81,00%. Já a equação 5.10, que leva em conta também os efeitos secundários, é capaz de explicar até 97,66% da variabilidade dos dados experimentais com relação ao ajuste linear.

5.3.3 Relação das variáveis resposta em função do índice $\eta/(L_{iv})^k$

Nesta fase da pesquisa, os resultados de resistência à compressão simples e módulo de rigidez inicial também foram correlacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cal, de modo a se estabelecer relações matemáticas entre o índice e a RCS. Novamente, o valor do expoente k foi fixado em 0,11 como sendo o melhor ajuste para o solo em estudo.

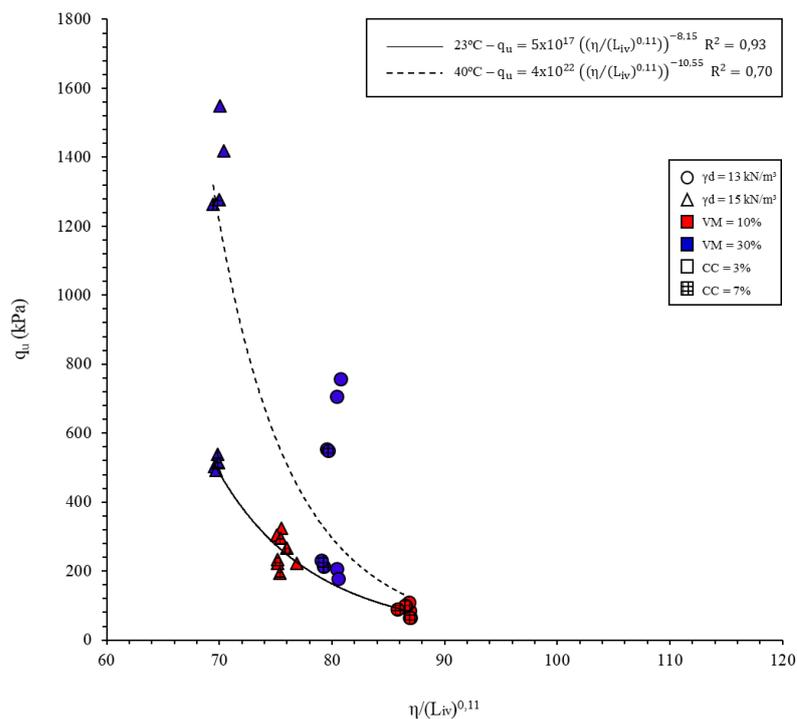


Figura 5.38: Relação entre q_u e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$.

Os resultados de resistência à compressão simples para todos os corpos de prova moldados na Fase 3 da pesquisa estão apresentados na Figura 5.38. Os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de pó de vidro moído e teor de cal de carbureto. Cada linha representa uma temperatura de cura distinta (23°C e 40°C). A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 70 e 93%.

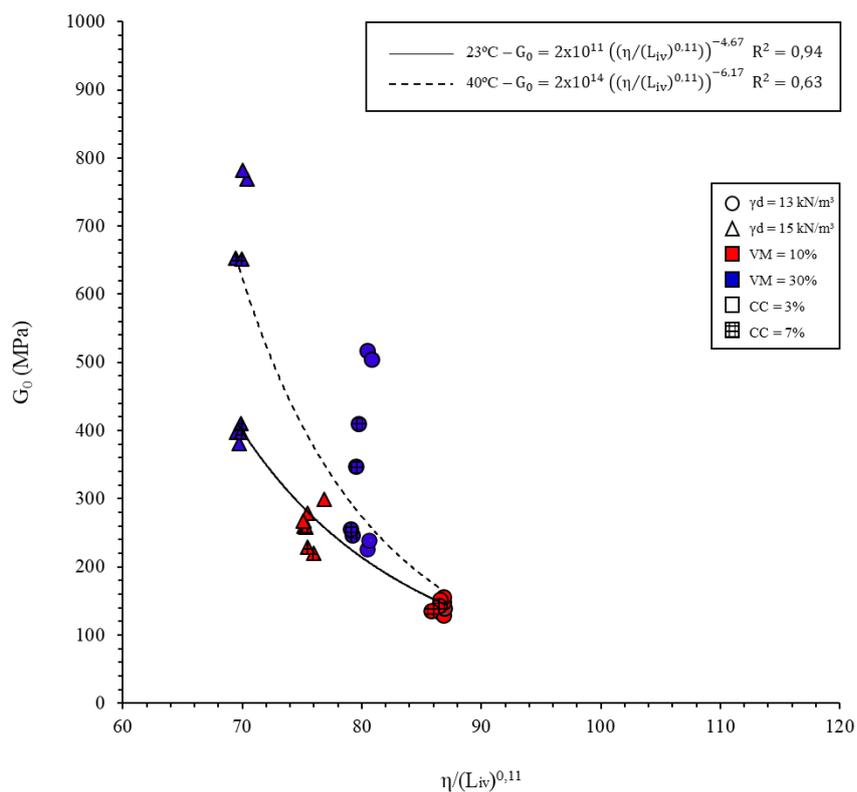


Figura 5.39: Relação entre G_0 e $\eta/(L_{iv})^{0,11}$.

A Figura 5.39 apresenta os resultados de módulo de rigidez inicial (G_0) para as amostras ensaiadas na Fase 3 da pesquisa. Novamente, os valores estão identificados de acordo com seu peso específico aparente seco, teor de cal de carbureto, teor de pó de vidro e temperatura de cura. O gráfico apresentado corrobora com as análises feitas anteriormente. A relação entre os dados experimentais e o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em coeficientes de determinação entre 63 e 94%.

5.3.4 Relação entre as variáveis resposta

Além das correlações anteriores, também foi possível correlacionar as variáveis resposta da Fase 2 da pesquisa, que são a resistência à compressão simples (q_u) e o módulo de rigidez inicial (G_0). Foi estabelecida uma relação matemática do tipo linear, mostrada na Figura 5.40, com um valor de R^2 de 0,97.

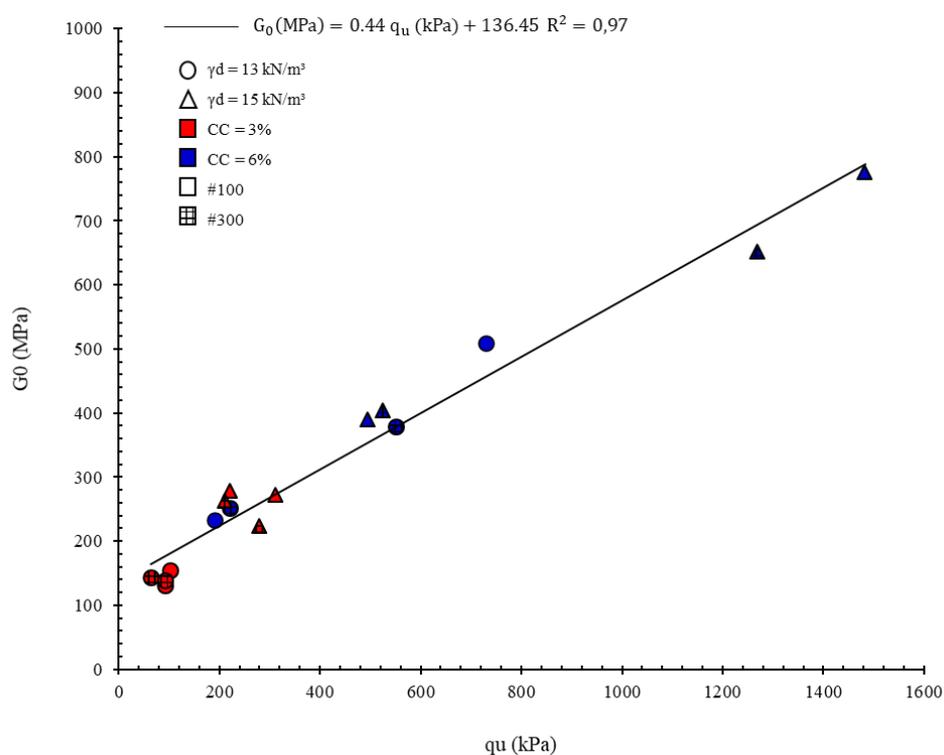


Figura 5.40: Relação entre G_0 e q_u .

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do que foi exposto e comentado neste trabalho, apresentam-se neste capítulo as conclusões finais e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Tendo como base a análise dos resultados apresentados no Capítulo 5 para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e rigidez inicial, nas diferentes fases do protocolo experimental, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

(Fase 1) Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e NaOH

- a) O teor de cal de carbureto utilizado nas misturas exerceu considerável influência sobre as variáveis respostas (q_t e G_0), uma vez que o aumento deste teor de 3% para 7% resultou em uma melhora considerável no comportamento mecânico do material em ambos os ensaios;
- b) O aumento do peso específico aparente seco, e conseqüente redução da porosidade das misturas, também exerceu influência significativa nos valores obtidos. Essa influência ficou visível na inclinação das retas nos gráficos de efeitos principais;
- c) A elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% exerceu pouca influência na melhoria do comportamento do material no que tange a resistência à tração por compressão diametral e rigidez inicial. Dentre os efeitos com influência positiva no comportamento, este fator controlável foi o com influência mais discreta, conforme pode ser observado no gráfico dos efeitos principais. Ainda, cabe salientar que o pó de vidro exerceu maior influência nos valores de q_t do que de G_0 .
- d) A adição de solução de hidróxido de sódio nas misturas resultou, na maioria das amostras avaliadas, uma piora no comportamento mecânico dos materiais. Esse efeito pôde ser identificado nos gráficos de efeitos principais. Uma hipótese para explicação deste comportamento é que a solução torna as misturas mais difíceis de serem homogeneizadas, causando a formação de grumos no material, o que torna sua estrutura mais heterogênea.

- e) Tanto a elevação do tempo de cura (de sete para 28 dias) e da temperatura de cura (de 23°C para 40°C) resultaram em um aumento dos valores de q_t . Esse comportamento era esperado e comprova que a elevação da temperatura de cura pode ser utilizada em materiais deste tipo para a obtenção de melhores resistências à curto prazo. Ainda, foi possível identificar, para o tempo de cura de 28 dias, uma elevação do módulo de rigidez inicial das amostras com o aumento da temperatura de cura.
- f) Ao relacionar q_t e G_0 com o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ foi possível estabelecer relações aceitáveis com coeficientes de determinação (R^2) entre 81 e 94%. Mesmo levando em consideração a existência de variabilidade entre as amostras estudadas e a possibilidade de erros experimentais, as relações obtiveram aproximações satisfatórias.
- g) Nesta etapa da pesquisa, a correlação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) e do módulo de rigidez inicial (G_0) com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ($\eta/(B_{iv})^k$) não resultou em coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis.

(Fase 2) Solo estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e ligantes Alto CaO e Baixo CaO

- a) O aumento do peso específico aparente seco, e conseqüente redução da porosidade das misturas, desempenhou influência considerável nos valores obtidos para resistência à compressão simples (q_u). Este efeito é facilmente identificável na inclinação das retas nos gráficos de efeitos principais;
- b) A utilização do ligante do tipo A (Alto CaO) resultou, de uma maneira geral, em maiores valores de q_u em relação às amostras moldadas com o ligante do tipo B (Baixo CaO). Isso confirma que é possível obter melhores resistências com a utilização de ligantes do tipo A, que requerem alcalinidades mais baixas para o desenvolvimento das reações pozolânicas e um menor teor de pozolana em relação ao teor de cal.
- c) Conforme esperado, a elevação dos teores de ligante resultou em um aumento dos valores obtidos para q_u . Dentre os efeitos que exerceram influência positiva no comportamento das misturas, este foi o menos pronunciado.
- d) O aumento do tempo de cura (de sete para 28 dias) e da temperatura de cura (de 23°C para 40°C) resultaram em um aumento dos valores de q_u . Esse comportamento valida a hipótese de que a elevação da temperatura de cura pode ser utilizada em materiais deste tipo para a obtenção de melhores resistências à curto prazo.

- e) A correlação de q_u com o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ resultou em relações aceitáveis com coeficientes de determinação (R^2) entre 81 e 99%, porém apenas para as amostras moldadas com utilização do ligante A (Alto CaO). Mesmo com a existência de variabilidade entre as amostras estudadas e a possibilidade de ocorrência de erros experimentais, as aproximações obtidas são satisfatórias.
- f) Nesta etapa da pesquisa, a correlação da resistência à compressão simples (q_u) com o índice porosidade/teor volumétrico de ligante ($\eta/(B_{iv})^{0,28}$) resultou em coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis, de 80 a 99%, mas somente para amostras moldadas com a utilização do ligante A (Alto CaO).

(Fase 3) Solo estabilizado somente com cal de carbureto

- a) O teor de cal de carbureto e os pesos específicos aparente secos utilizados nas misturas exerceram considerável influência sobre as variáveis respostas (q_u e G_0), visto que o aumento destes resultou em uma melhora considerável no comportamento mecânico do material em ambos os ensaios. Essa tendência pode ser observada no gráfico de efeitos principais.
- b) Assim como nas fases 1 e 2 da pesquisa, a elevação da temperatura de cura de 23°C para 40°C representou em um aumento considerável dos valores obtidos, tanto para q_u quanto para G_0 .
- c) A utilização de uma fração mais fina de cal de carbureto (passante na peneira #300) não propiciou um melhor comportamento às amostras. Pelo contrário, os resultados de q_u e G_0 foram levemente melhores para a cal com partículas passantes na peneira #100 e retidas na #300. Sendo assim, é necessário avaliar o tamanho da partícula de cal em solos com diferentes composições mineralógicas e granulométricas para um melhor entendimento deste comportamento.
- d) Ao relacionar q_t e G_0 com o índice $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ foi possível estabelecer relações aceitáveis com coeficientes de determinação (R^2) entre 63 e 93%. Mesmo levando em consideração a existência de variabilidade entre as amostras estudadas e a possibilidade de erros experimentais, as relações obtiveram aproximações satisfatórias.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De modo a ampliar o conhecimento e compreensão acerca do comportamento dos materiais estudados e suas propriedades, sugere-se:

- a) Avaliar o desempenho das misturas aqui estudadas em tempos de cura superiores como 60, 90, 180 e 360 dias;
- b) Estudar a influência de temperaturas de cura distintas das utilizadas nesta pesquisa (23°C e 40°C);
- c) Realização de ensaios de durabilidade para avaliar o comportamento do material estabilizado quando exposto às condições ambientais e às intempéries;
- d) Obtenção do módulo de resiliência do material estabilizado através de ensaios triaxiais cíclicos, de modo a avaliar a degradação da rigidez dos materiais em decorrência de ações deste tipo;
- e) Avaliar a adoção de alguma técnica especial de preparação da solução de NaOH ou de mistura do solo após a adição da solução, de modo a evitar a formação de grumos na mistura;
- f) Avaliar a utilização de outros tipos de pozolanas para estabilizar o solo estudado;
- g) Realizar ensaios de análise da microestrutura do material estabilizado, como microscopia eletrônica de varredura (MEV).

REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Soil Cement: ACI 230.1R-09.** Farmington Hills: ACI, 2009. 28 p.

AMARAL, Mariana Bamberg. **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico do noroeste do Rio Grande do Sul e areia industrial para uso em pavimentos econômicos.** 2015. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** Philadelphia, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4546: Standard Test Methods for One-dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils.** Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4972: standard test methods for pH of soils.** Philadelphia, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Guia Reciclagem do Vidro.** São Paulo: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos: terminologia.** Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Análise granulométrica de solos.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 1986. 10p. Origem: MB-33.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9598: Solo – Índice de suporte Califórnia – método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1987. 14p. Origem: MB-2545.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10005: procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 3 p.

BELL, F.G. **Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils.** Engineering Geology, n.42, p.223-237, 1996

BENNY, J. R.; JOLLY, J.; MAREENA, S. J.; THOMAS, M. **Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil.** International Journal of Engineering Research & Technology. 6, 2017.

BERNARDI, Cândida. **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico com agregados finos para uso em pavimentos econômicos.** 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 26 nov. 2013.

BERNUCCI, L.B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. 1995. São Paulo –SP. 237p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2008. 504 p.

BILONDI, M.P.; TOUFIGH, M.M.; TOUFIGH, V. **Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer.** Construction and Building Materials. 183. P. 417-428. 2018

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters.** Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.

BOYCE, J.R. **Some observations on the residual strength of tropical soils.** In: 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. 1985, Brasília, DF. Proceedings. V. 1, p.229-237.

BULIGON, Liliane Bonadiman. **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico e resíduo de construção civil para uso em pavimentos econômicos.** 89 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2015.

CALLAI, N. D. **Estudo mecânico de misturas de argila laterítica e agregado miúdo para emprego em pavimentos econômicos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de

Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2017.

CASTRO, F. J. C. O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquixídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTRO, J. F. A. (2015). **Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil. Especialização em Geotecnia, Universidade do Porto.

CLOUGH, G.W.; SITAR, N.; BACHUS, R.C.; RAD, N.S. **Cemented Sands Under Static Loading**. Journal of Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v.107, nGT6, p. 799-817, 1981.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2006. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br>. Acesso em 23 de Março de 2019.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM (CEMPRE). Associação sem fins lucrativos. Disponível em: www.cempre.org.br. Acesso em: março de 2019.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. ABMS. Progress Report. 1985. São Paulo – SP. 449p

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. **Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127 (9), p. 774 – 782, 2001.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for the strength control of artificially cemented soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 133(2), p. 197 – 205, 2007.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. da S.; HEINECK, K. S. **Key parameters for the strength control of lime stabilized soils**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 21(5), p. 210 – 216, 2009a.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L da S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. **Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils**. Geotechnical Engineering, v. 162 (GE2), p. 111 – 118, 2009b.

CONSOLI, N.C.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K.S. **Strain hardening behaviour of fiber reinforced sand in view of filament geometry**. Geosynth. Int. 16 (2), 109e115, 2009c.

CONSOLI, N. C.; BASSANI, M. A. A.; FESTUGATO, L. **Effect of fibre-reinforcement on the strength of cemented soils**. Geotextiles and Geomembranes, 28, No. 4, 344–351, 2010.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. **Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 23(4), p. 432 – 440, 2011.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G.; SALDANHA, R. B. **Coal fly ash-carbide lime bricks: an environment friendly building product.** Construction and Building Materials, v. 69, p. 301 – 309, 2014.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. **Durability, strength, and stiffness of dispersive clay-lime blends.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28(11), p. 1 – 11, 2016.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, J. K.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; RIVOIRE, A. B. **Compacted clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions.** Applied Clay Science, v. 146, p. 404 – 410, 2017a.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, A. P.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. **Durability, strength and stiffness of compacted gold tailings-cement mixes.** Canadian Geotechnical Journal, v. 55(10), p. 486 – 494, 2017b.

CONSOLI, N. C.; TOMASI, L. F. **The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand-cement blends.** Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement, v. 171(2), p. 96 – 102, 2018a.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Durability, strength and stiffness of green stabilized sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 144(9), p. 1 – 10, 2018b.

CONTAINER RECYCLING INSTITUTE. **Glass Recycling Rates by Country, 2010.** Disponível em: <http://www.container-recycling.org/index.php/glass-containers>. Acesso em 12 mar. 2019.

COUTINHO, A. de S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Lisboa: LNEC, 1973. 610 p.

CRISTELO, N.; FERNÁNDEZ-GIMENEZ, A.; VIEIRA, C.; MIRANDA, T.; PALOMO, A. **Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash.** Construction and Building Materials. Ed. 170. 2018. p. 26-39.

CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Geotecnia e Fundações. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, Portugal.

CRUZ, P.T.; MAIOLINO, A.L.G. **Peculiarities og geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils.** In: Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical, Lateritic and Saprolitic Soils. Progress report 9182-1985). ABMS. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE. 1985. Brasilia, DF.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** 2009. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DEERE, D.V. PATTON, F.D. **Slope stability in residual soil.** Proceedings of 4th Pan American Conference in Singapore, 1971. Vol. 1:87-170.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. **Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 143(5), p. 1 – 9, 2017.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER (UNP). **DNER-CLA 259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias, utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1996. 06p.

FERNÁNDEZ-JIMÉRNEZ, A. M., PALOMO, A., (2005). **Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator.** Cement and Concrete Research. 35 (10). 1984-1992.

FOOKES, P.G. **Tropical residual soils**, Edited by Geological Society Professional Handbooks, 1997.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GANIRON JR., T. U. G. **Use of recycled glass bottles as fine aggregates in concrete mixture.** International Journal of Advanced Science and Technology. 61, 17-28, 2013.

GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens.** Boletim n° 1. São Paulo:ABCP, 1971.

GÜLLÜ, H. **Unconfined Compressive Strength and Freeze–thaw Resistance of Fine-grained Soil Stabilized with Bottom Ash, Lime and Superplasticizer.** Road Materials and Pavement Design, 16, No. 3, 608–634, 2015.

GÜLLÜ, H.; CANAKCI, H.; AL ZANGANA, I. F. **Use of cement based grout with glass powder for deep mixing.** Construction and Building Materials. 137, 12-20, 2017.

HERRIN, M.; MITCHELL, H.. **Mistura de solo-cal.** Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1968.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. **Reactions accompanying stabilization of clay with cement.** Highway Research Record, 36, p. 146-171, 1963.

HORPIBULSUK, S.; KAMPALA, A.; PHETCHUAY, C.; UDOMCHAI, A.; ARULRAJAH, A. **Calcium carbide residue: A cementing agent for sustainable soil stabilization.** Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. 46, 22-27, 2015.

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. CHOLAPHATSORN, A. **Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash.** Soils and Foundations. 53, 477-486, 2013.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento de Recursos Naturais**. Projeto RADAM Brasil. v. 33. 1986. Rio de Janeiro/RJ. 791p.

INTERNATIONAL ENERGY ASSOCIATION – IEA. World Glass Production for the year 2005. 2007. Acesso em 27 de Março de 2019.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. **Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice**. International Journal of Sustainable Built Environment. Article in Press, Accepted in: 2016.

JIANG, N. J.; DU, Y. J.; LIU, S. Y.; WEI, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULJARAH, A. **Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical and microstructural properties of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue**. Canadian Geotechnical Journal, v. 53(1), p. 373 – 383, 2016.

JOHANN, A.D.R. **Metodologias para Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. 2013. 273f. Tese (Doutorado). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JOHNSTON, M.G. **Desempenho de Pavimentos com Materiais Alternativos do Estado do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. UFRGS. 2010. Porto Alegre – RS

JUNIOR, I.R.; CONCIANI, W. **Controle da Expansão do Solo Saprolítico de Filito com Cal Hidratada Cálcica para Construções Populares**. 2005. I Seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social. Anais. CEFETMT, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, 2005

KÉZDI, A. **Stabilized earth roads**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979. 327 p.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soils Mechanics, SI Version**. John Wiley & Sons. 1979

LEON, H.B. **O índice porosidade /teor volumétrico de cimento (n/Civ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 2018. 168f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LEONARD, R. J. **The pozzolanic activity of certain fly ashes and soil minerals**. Tese (Doutorado) – Iowa State University, Ames, 1958.

LIU, S.; LI, Z.; LI, Y.; CAO, W. **Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using orthogonal experiments**. Construction and Building Materials, v. 166, p. 544 – 563, 2018.

LAMPRIS, C.; LUPO, R.; CHEESEMAN, C. R. **Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants.** Waste Management. 2009. P. 368-373.

LUPINI, J.F.; SKINNER, A.E.; VAUGAHN, P.R.. **The drained residual strenght of cohesive soils.** Geotechnique. V. 31, p. 181-213, 1981.

MARANGON, M.; MOTTA, L.M.G. **Considerações sobre a Utilização da Pedologia na Engenharia Geotécnica a partir de um Sistema de Classificação dos Solos.** In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Anais. Florianópolis/SC. 2001.

MARIN, E. J. M. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal.** 2017, 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MARTÍNEZ, G.S.e S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras.** 2003. 291f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

MASSAZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: HEWLETT, P. C. (Org.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete.* 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004, p. 471 – 602.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash.** 1961. 253 f. Tese (Doutorado) – Iowa State University of Science and Technology, Ames, 1961.

McFARLANE, M.J. **Lateritic and Landscape.** Academic Press, London, 151p., 1976.

MITCHELL, J. K. **Soil Improvement: State-of-the-Art.** 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June, Vol. 4, pp. 509-565. 1981. NAPA TAS-14: mix design techniques: part I: Instructors Manual. 1982.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** Hoboken:John Wiley and Sons, 2009.

MOORE, R. K.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. **Factors Affecting the Tensile Strength of Cement-Treated Materials.** Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects, Washington, D. C: HRB, n.315, p.64-80, 1970.

MOH, Z. C. **Reactions of Soil Minerals with Cement and Chemicals.** Highway Research Record, Washington, O. C. 6a: 39-61, 1965.

MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMUS, H.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S. **Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review.** Construction and Building Materials, v. 156, p. 443 – 447, 2017.

MOHAMMADINIA, J.A. ARULRAJAH, J.; SANJAYAN, M.M.; DISFANI, M.M.; WIN BO, M.; DARMAWAN, S. **Stabilization of demolition materials for pavement**

base/subbase applications using fly ash and slag geopolymers: laboratory investigation. Journal of Materials of Civil Engineering. Ed. 28. 2016.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** 1981. In. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação.** 1983 In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação, 1983, Porto Alegre. Anais... p. 463-484.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia.** VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Anais. ABGE. 1996. Rio de Janeiro – RJ. v.1 p. 345-358.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLIVEIRA, E. **Emprego da Cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de Caso no Município de Ribeirão das Neves/MG.** 2010. 171f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

OLUFOWOBI, J.; OGUNDOJU, A.; MICHAEL, B.; ADERINLEWO O. **Clay soil stabilisation using powdered glass.** Journal of Engineering Science and Technology. 9, 541-558, 2014.

PALOMO, A., GRUTZECK, M. W., BLANCO, M. T. (1999). **Alkali-activated fly ashes. A cement for the future.** Cement and Concrete Research, 29, 1323-1329.

QUEIROZ, J.B. de C. **Lateritic soils: chemical and geotechnical properties.** In: Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Maseru, Lesoto. Proceedings. 1991

RICHARDS, B.G. **Residual soils in Australia.** Sampling and testing of residual soils. 1985. Scorpion Press, Hong Kong. p. 23-30.

RIBEIRO, K.F.A.; VALIN JR., M de O.; RIBEIRO JUNIOR, I. (2014) **Principais Métodos para Estabilização da Expansão dos Solos Saprolíticos de Filitos da Baixada Cuiabana.** Anais do XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014. Goiânia, Goiás. 2014.

ROBAYO, R.A.; MULFORD, A.; MUNERA, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. **Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste.** Construction Building Materials. Ed. 128. 2016. P;163-169.

ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T.E.J. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings: Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 125(4), p. 242–249. 1997.

ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S. **Modification of clay soils using lime**. In: Lime Stabilisation, 1976, London. Proceedings... London: Thomas Telford, 1976, p. 99 – 114.

ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirements for Stabilization**. In: Transportation Research Board. 79th Annual Meeting, 2000. Washington, D.C., 2000.

SALAMATPOOR, S.; SALAMATPOOR, S. **Evaluation of adding crushed glass to different combinations of cement-stabilized sand**. International Journal of Geo-Engineering. 8, 2017.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. **Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30(6), p. 1 – 7, 2018.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio: comportamento da resistência à compressão simples, durabilidade e lixiviação em coluna**. 2018. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANDRONI, S.S.; CONSOLI, N.C. **Sobre a Prática de Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: os Extremamente Moles e os Expansivos**. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010. Gramado. Anais eletrônicos: 8ª palestra (PA08), 2010.

SANTAMARINA, J. C.; KLEIN, K.; FAM, M. A. **Soils and Waves**. Chichester: John Wiley and Sons, 2001.

SANTANA, H.; GONTIJO, P.R.A. **Os materiais lateríticos na pavimentação de baixo custo**. In: 22ª Reunião Anual de Pavimentação. Anais. 1987. Maceió – AL.

SCHEUERMANN FILHO, H.C. **Estabilização de um Solo Dispersivo com Pó de Vidro Moído e Cal de Carbureto**. 2019. 205f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SCHMITZ, A.; KAMÍNSKI, J.; SCALET, B. M.; SORIA, A. **Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry**. Energy Policy, v. 39, 2011, p. 142 – 155.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**: v. 2. São Paulo: Pini, 2001. 672 p.

SHI, C.; KRIVENKO, P.V.; ROY, D. **Alkali-activated cements and concretes**. 1^a Ed. Londres. 2006

SILVA, M.F. **Estudo da Estabilização com Cal de um Solo Laterítico e um Solo Não Laterítico**. 2016. 142f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C.; BRAUN, E.; MASUSERO, G. B.; CONSOLI, N. C. **Behavior of soil-fly ash– lime blends under different curing temperatures**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS, n. 3, 2016, Guimarães. Proceedings... New York Elsevier, 2016, p. 220 – 228.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; KLAMT, E. **Atualização da classificação taxonômica das unidades de mapeamento do levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Informativo EMATER/RS. 1999. Porto Alegre, RS. v.16, n.9, p.1-5.

TAKEDA, M.C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos do subleito de rodovias do interior paulista**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 2006. São Carlos – SP.

THAKUR, N.R., GHOSH, S. (2009). **Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. 1994. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Lime stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington: TRB, 1987. State of the Art Report 5.

USACE – U.S. Army Corps of Engineering. **Soil stabilization for pavements.** Technical Manual, N° 5-822-15, Washington D.C., 1994

USBR – U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. **Earth Manual.** Third Edition, Denver, Colorado, 1998.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Advancing sustainable materials management 2013 fact sheet.** Washington DC: Office of Research and Development, 2015. Technical Report EPA530 – R – 15 – 003.

VAN DEVENTER, J. S. J., LUKEY, G. C., XU, H. (2006). **Effect of curing temperature and silicate concentration on fly ash-based geopolymerisation.** Industrial and Engineering Chemistry Research, 45(10): 3559-3568.

VARGAS, M. **Engineering properties of residual clays soils occurring in southern Brazil.** 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich, Switzerland. Proceedings. 1953. v.1. p. 259-268.

VÁSQUEZ, A.; CÁRDENAS, V.; ROBAYO, A.; GUTIÉRREZ, R.M. de. **Geopolymer based on concrete demolition waste.** Adv. Powder Technology. Ed. 27. 2016. P 1173-1179.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na investigação de Aeroportos e nas Metodologias MCT e Resiliente.** Tese de doutorado. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1988. 276p.

VICHAN, S.; RACHAN, R. **Chemical stabilization of soft Bangkok clay using blend of calcium carbide residue and biomass ash.** Soils and Foundations. 5, 272-281, 2013.

WALLAH, S. E.; RANGAN, B. V. (2006). **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties.** Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth,

WARTMAN, J.; GRUBB, D. G; NASIM, A. S. M. **Select Engineering Characteristics of Crushed Glass.** Journal of Materials in Civil Engineering. 16, 526-539, 2004.

WESLEY, L.D.; IRFAN, T.Y. **Classification of Residual Soils.** Ed. Balkema. Roterdã, 1997.

WINTER, D. **Resistência, Rigidez e Durabilidade de Solos Arenosos Estabilizados com Materiais Mais Sustentáveis.** 2018. 168f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ZAPPE, A. P. S. **Uso de areia de fundição em misturas com argila laterítica para estrutura de pavimentos econômicos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2017. 97 f.

APÊNDICE A –

Análise Estatística

FASE 1 – RTCD

Fonte de variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	14	839582	59970	29,30	0,000
Fatores	6	612660	102110	49,89	0,000
Peso específico - A	1	136298	136298	66,59	0,000
Teor de vidro - B	1	14015	14015	6,85	0,012
Teor de cal - C	1	164490	164490	80,37	0,000
Temperatura de cura - D	1	131087	131087	64,05	0,000
Tempo de cura - E	1	82612	82612	40,36	0,000
NaOH - F	1	84157	84157	41,12	0,000
Interações de 2ª ordem	8	226923	28365	13,86	0,000
A*C	1	19591	19591	9,57	0,003
A*D	1	28859	28859	14,10	0,000
A*E	1	14933	14933	7,30	0,009
B*E	1	16537	16537	8,08	0,007
C*D	1	35763	35763	17,47	0,000
C*E	1	76763	76763	37,51	0,000
C*E	1	20963	20963	10,24	0,002
D*E	1	13514	13514	6,60	0,013
Erro experimental	49	100290	2047		
Total	63	939872			

Resumo do Modelo			
Desvio Padrão	45,2408	R ²	89,33%
R ² ajustado	86,28%	R ² de previsão	81,80%

FASE 1 – G₀

Fontes de variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	15	114983314	7665554	8,01	0,000
Fatores	5	73662774	14732555	15,39	0,000
Peso específico - A	1	18968103	18968103	19,82	0,000
Teor de vidro - B	1	245594	245594	0,26	0,619
Teor de cal - C	1	35699074	35699074	37,30	0,000
Temperatura de cura - D	1	1842091	1842091	1,92	0,184
NaOH - E	1	16907912	16907912	17,66	0,001
Interações de 2ª ordem	10	41320539	4132054	4,32	0,005
A*B	1	462965	462965	0,48	0,497
A*C	1	13262190	13262190	13,86	0,002
A*D	1	3163222	3163222	3,30	0,088
A*E	1	4258843	4258843	4,45	0,051
B*C	1	53035	53035	0,06	0,817
B*D	1	997560	997560	1,04	0,322
B*E	1	3762703	3762703	3,93	0,065
C*D	1	690051	690051	0,72	0,408
C*E	1	14415993	14415993	15,06	0,001
D*E	1	253976	253976	0,27	0,614

Erro Experimental	16	15314380	957149		
Total	31	130297694			
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão	978,340	R ²	77,23%		
R ² ajustado	88,25%	R ² de previsão	52,99%		

FASE 2 – RCS

Fonte de variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	12	28789472	2399123	8,83	0,000
Fatores	5	19564690	3912938	14,40	0,000
Peso específico - A	1	5287589	5287589	19,46	0,000
Tipo de ligante - B	1	853145	853145	3,14	0,092
Teor de ligante - C	1	1543472	1543472	5,68	0,028
Temperatura de cura - D	1	6626402	6626402	24,39	0,000
Tempo de cura - E	1	5254083	5254083	19,34	0,000
Interações de 2ª ordem	7	9224782	1317826	4,85	0,003
A*D	1	962481	962481	3,54	0,075
A*E	1	1189715	1189715	4,38	0,050
B*C	1	3896404	3896404	14,34	0,001
B*D	1	1053223	1053223	3,88	0,064
B*E	1	601628	601628	2,21	0,153
C*D	1	1069702	1069702	3,94	0,062
D*E	1	451630	451630	1,66	0,213
Erro Experimental	19	5161509	271658		
Total	31	33950981			
Resumo do modelo					

Desvio Padrão	521,209	R ²	84,80
R ² ajustado	75,20	R ² de previsão	56,88

FASE 3 – RCS

Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados ajustada	Média dos quadrados ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	8	2562577	320322	34,73	0,000
Fatores	4	2016782	504195	54,67	0,000
Peso específico - A	1	473093	473093	51,30	0,000
Tipo de cal - B	1	10760	10760	1,17	0,316
Teor de cal - C	1	1043856	1043856	113,19	0,000
Temperatura de cura - D	1	489073	489073	53,03	0,000
Interações de 2ª Ordem	4	545795	136449	14,80	0,002
A*B	1	104	104	0,01	0,919
A*C	1	123920	123920	13,44	0,008
A*D	1	60603	60603	6,57	0,037
C*D	1	361168	361168	39,16	0,000
Erro Experimental	7	64554	9222		
Total	15	2627131			
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão	96,0312	R ²	97,54%		
R ² ajustado	94,73%	R ² de previsão	87,16%		

FASE 3 – G₀

Fonte de variação	GL	Soma dos Quadrados Ajustada	Média dos Quadrados Ajustada	F-valor	P-valor
Modelo	7	512307	73187	47,62	0,000
Fatores	4	424911	106228	69,12	0,000
Peso específico - A	1	108570	108570	70,65	0,000
Tipo de cal - B	1	5266	5266	3,43	0,101
Teor de cal - C	1	246959	246959	160,70	0,000
Temperatura de cura - D	1	64115	64115	41,72	0,000
Interações de 2ª ordem	3	87396	29132	18,96	0,001
A*C	1	8831	8831	5,75	0,043
B*D	1	7492	7492	4,87	0,058
C*D	1	71073	71073	46,25	0,000
Erro Experimental	8	12295	1537		
Total	15	524602			
Resumo do Modelo					
Desvio Padrão	39,2022		R ²	97,66%	
R ² ajustado	95,61%		R ² de previsão	90,63%	