

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

**Desempenho de Misturas de Distintos Materiais com Cinza  
Volante e Cal Submetidas a Condições Climáticas Severas**

**Vinícius Batista Godoy**

Porto Alegre  
2018

VINÍCIUS BATISTA GODOY

**DESEMPENHO DE MISTURAS DE DISTINTOS MATERIAIS  
COM CINZA VOLANTE E CAL SUBMETIDAS A  
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SEVERAS**

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  
2018

#### CIP - Catalogação na Publicação

Godoy, Vinicius Batista

Desempenho de Misturas de Distintos Materiais com Cinza Volante e Cal Submetidas a Condições Climáticas Severas / Vinicius Batista Godoy. -- 2018.

164 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Melhoramento de solos. 2. Base e sub-base de pavimentos. 3. Cal, Cinza Volante. 4. Fresado de Asfalto. 5. Fibras e Sal. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Título.

**VINÍCIUS BATISTA GODOY**

**DESEMPENHO DE MISTURAS DE DISTINTOS MATERIAIS  
COM CINZA VOLANTE E CAL SUBMETIDAS A  
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SEVERAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessário para  
obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração de Geotecnia.

Porto Alegre, 15 de fevereiro de 2018

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. pela Concordia University, Canadá  
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Lucas Festugato (UFRGS)**  
Dr. pela UFRGS, Brasil

**Prof<sup>a</sup>. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dr<sup>a</sup>. pela UFRGS, Brasil

**Prof<sup>a</sup>. Beatrice Anne Baudet (UCL)**  
Ph.D. pela City University of London, Reino Unido

Dedico este trabalho a todos que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, entre eles meus familiares, amigos e colegas de laboratório.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por todo discernimento e paciência para superar todos os obstáculos em meu caminho.

Meus agradecimentos mais sinceros aos meus pais e familiares por sempre confiarem em mim e investirem em minha educação, tanto pessoal quanto profissional. Eu não chegaria até aqui sem o suporte e amor de vocês.

Agradeço também ao Professor Nilo Consoli, que demonstrou ser o melhor orientador que alguém poderia querer, sempre disposto a ajudar, a ensinar e o mais importante: a escutar a opinião de seus alunos.

Também gostaria de agradecer a todas as amigas que o PPGEC me proporcionou nesses dois anos, as boas risadas nas madrugadas de estudos com a Raquel, Júlia e Karina.

Aos colegas do LEGG que sempre deixaram o ambiente de trabalho mais divertido e agradável para os estudos científicos, em especial, a Mozara, “a psicóloga” do laboratório, que sempre me acalmou nos momentos de desespero, a Marina Bortolotto que foi minha tradutora e professora de inglês e aos parceiros de pesquisa que contribuíram diretamente nos experimentos realizados nesta Dissertação de Mestrado: Helena, Mariana, Caroline, Lennon, Anderson, Hugo, Thaís e todos os bolsistas do laboratório.

Meus mais sinceros agradecimentos à Capes e ao CNPq pela concessão de bolsas de estudo que possibilitaram a minha total dedicação a esta pesquisa e conseqüentemente o aprofundamento do conhecimento científico.

Muitos foram aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja de forma direta ou indireta. Por fim, meus sinceros agradecimentos a todas essas pessoas que me apoiaram em todos os momentos.

Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.

*Carl Sagan*

## RESUMO

GODOY, V.B. **Desempenho de Misturas de Distintos Materiais com Cinza Volante e Cal Submetidas a Condições Climáticas Severas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A aplicação prática de resíduos industriais, como cinza volante proveniente da queima de carvão, em bases e sub-bases de rodovias, é de grande interesse para engenheiros geotécnicos, uma vez que reduz o consumo de recursos naturais e oferece um destino a esses resíduos. Nesse sentido, esta dissertação de mestrado avalia o desempenho de misturas cinza volante-cal submetidas a condições climáticas extremas. Foram analisadas as propriedades resistência, rigidez e durabilidade de misturas de cinza volante (25%) com areia de Osório, comparando-se ciclos de molhagem-secagem com ciclos de congelamento-degelo. Para isso variou-se: o teor de cal hidratada (3%, 5%, 7%), o grau de compactação (14,0 kN/m<sup>3</sup>, 15,0 kN/m<sup>3</sup>, 16,0 kN/m<sup>3</sup>), a adição de 0,5% de cloreto de sódio (NaCl) como catalisador e a adição de 0,5% de fibras de polipropileno. Foi estudada a influência da temperatura (23°C e 40°C) em um período de 7 dias de cura, chegando-se à conclusão que o aumento de temperatura proporciona elevados ganhos de durabilidade por congelamento e degelo, resistência e rigidez, assim como a adição de sal e fibras de polipropileno. Visando ampliar esta pesquisa foi proposta a troca da matriz da mistura (areia de Osório) por fresado (RAP) e a cal hidratada pela cal de carbureto. Para esse novo tipo de mistura, também foi realizado ensaios triaxiais para análise do comportamento tensão-deformação em relação a adição de 0,5% de NaCl, onde percebeu-se um aumento de 3,4° no ângulo de atrito e de 42,8 kPa no intercepto coesivo. As misturas de RAP e cal de carbureto obtiveram melhores resultados de resistência por compressão e durabilidade do que as misturas com areia de Osório e cal dolomítica, para a mesma temperatura de cura. Posteriormente constatou-se que a perda de massa acumulada após os referidos tipos de ciclos é controlada pelo índice porosidade ( $\eta$ )/teor volumétrico de cal ( $L_{IV}$ ), para ambas as misturas. Além disso, percebeu-se que menores perdas de massa acumulada foram obtidas para os ciclos de molhagem e secagem comparados aos ciclos de congelamento e degelo, tanto para as misturas com areia quanto para as misturas com RAP.

Palavras-chave: *Durabilidade; resistência; areia de Osório; NaCl; fibra de polipropileno; índice porosidade/teor volumétrico de cal; fresado.*

## ABSTRACT

GODOY, V.B. **Desempenho de Misturas de Distintos Materiais com Cinza Volante e Cal Submetidas a Condições Climáticas Severas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The practical application of industrial residues, such as coal fly ash, on bases and sub-bases of highways, is of great interest to geotechnical engineers, since it reduces the consumption of natural resources and gives a destination to these residues. In this sense, this master's thesis evaluates the performance of coal fly ash-lime mixtures under extreme climatic conditions. Was analysed the impact of the hydrated lime content (3%, 5%, 7%), the degree of compaction (14.0 kN/m<sup>3</sup>, 15.0 kN/m<sup>3</sup>, 16.0 kN/m<sup>3</sup>), the addition of 0.5% sodium chloride (NaCl) as a catalyst and the addition of 0.5% polypropylene fibers, on strength, stiffness and durability (comparing freezing-thawing to wetting-drying cycles), in fly ash mixtures (25%) with Osório sand. The influence of temperature (23 °C and 40 °C) in a period of 7 days of cure was also studied, this increase in temperature has been shown to provide high durability (for freezeing-thawing cycles), strength and stiffness gains, as well as addition of salt and polypropylene fibers. In order to extend this research, it was propose the exchange of the matrix's mixture (Osório sand) by reclaimed asphalt paving (RAP) and lime hydrated by carbide lime. For this new type of mixture, triaxial tests are also performed to analyze the stress-strain behavior in relation to the addition of 0.5% NaCl, where a 3.4° increase in the friction angle was observed, and 42.8 kPa in the cohesive intercept. The mixtures of RAP and carbide lime obtained better strength and durability results than mixtures with Osório sand and dolomitic lime, for the same cure temperature. Subsequently, It was verified that the accumulated loss of after these kinds of cycles is controlled by the index of porosity ( $\eta$ ) / volumetric content of lime ( $L_{iv}$ ), for both mixtures. Besides that, lower losses of accumulated mass was observed for the wetting and drying cycles, compared to the freezing and thawing cycles.

Keywords: *Durability; strength; Osório sand; NaCl; polypropylene fibre; porosity/volumetric lime content index; reclaimed asphalt paving.*

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	23
1.2	OBJETIVOS E METAS.....	25
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1	GENERALIDADES SOBRE A CINZA VOLANTE.....	27
2.1.1	A produção de Carvão Mineral.....	27
2.1.2	A produção de Cinza Volante.....	28
2.2	GENERALIDADES SOBRE A CAL.....	31
2.3	MISTURAS CINZA VOLANTE-CAL.....	33
2.3.1	Cinza volante.....	33
2.3.2	Cal.....	37
2.3.3	Solo-Cinza volante-Cal.....	39
2.3.4	Água necessária à mistura.....	40
2.4	REAÇÕES POZOLÂNICAS.....	40
2.5	PRINCIPAIS VARIÁVEIS INFLUENTES NAS MISTURAS CINZA VOLANTE-CAL.....	43
2.5.1	Cal.....	43
2.5.2	Moagem.....	43
2.5.3	Porosidade, Densidade e Compactação.....	44
2.5.4	Tempo de Cura.....	46
2.5.5	Temperatura de Cura.....	48
2.6	ÍNDICE POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL ( $\eta/L_{iv}$ ).....	50
2.7	COMPORTAMENTO DAS MISTURAS CINZA-CAL.....	54
2.7.1	Resistência.....	54

2.7.2	Durabilidade.....	57
2.7.3	Classificação.....	59
2.8	FRESADO (RAP).....	60
2.8.1	Classificação.....	60
2.8.2	Equipamento Utilizado.....	61
2.8.3	Tipos de reciclagem asfáltica.....	63
2.9	FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS.....	64
2.10	SAIS COMO CATALISADORES DE REAÇÕES.....	66
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>67</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	67
3.2	MATERIAIS.....	67
3.2.1	Areia de Osório.....	67
3.2.2	Fresado (RAP).....	68
3.2.3	Cinza Volante.....	69
3.2.4	Cal Hidratada.....	71
3.2.5	Cal de Carbureto.....	71
3.2.6	Fibra de Polipropileno.....	72
3.2.7	Sal (NaCl).....	73
3.2.8	Água.....	73
3.3	MÉTODOS.....	73
3.3.1	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	76
3.3.2	Ensaio de Resistência à Tração na Compressão Diametral.....	78
3.3.3	Medições de Rigidez Inicial.....	79
3.3.4	Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem.....	81
3.3.5	Ensaio de Durabilidade por Congelamento e Degelo.....	83
3.3.6	Ensaio Triaxiais.....	84
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>90</b>

4.1	MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO-CFA-CAL DOLOMÍTICA.....	90
4.1.1	Curadas a 23°C.....	90
4.1.2	Curadas a 40°C.....	106
4.2	MISTURAS DE RAP-CFA-CAL DE CARBURETO.....	118
4.2.1	Compressão Simples.....	118
4.2.2	Compressão Diametral.....	120
4.2.3	Durabilidade.....	122
4.2.4	Triaxial.....	132
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>138</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	138
5.1.1	Misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica.....	138
5.1.2	Misturas de RAP-CFA-cal de carbureto.....	140
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>159</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Microscopia eletrônica de cinzas volantes americanas (FISCHER <i>et al.</i> 1976, <i>apud</i> DE PAULA 2016).....	36
Figura 2.2 – Resistência à compressão em relação a (a) porcentagem retida na peneira 45 $\mu\text{m}$ e (b) superfície específica (adaptado de RAVINA, 1980).....	44
Figura 2.3 – Variação da resistência à compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C (adaptado de SILVANI, 2013 <i>apud</i> NOVAES, 2016).....	45
Figura 2.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C (adaptado de SILVANI, 2013 <i>apud</i> NOVAES, 2016).	46
Figura 2.5 – Resistência à compressão simples x tempo (INGLES E METCALF, 1972).....	47
Figura 2.6 – Efeito do tempo de cura (28, 60 e 90 dias) nas amostras com 12,5% de cinza (DALLA ROSA, 2009).....	47
Figura 2.7 – Resistência à compressão simples de resíduos de pedras preciosas e cal, para diferentes temperaturas de cura (DALLA ROSA e THOMÉ, 2002).....	48
Figura 2.8 – Comportamento da resistência da mistura cinza volante e cal, em relação à temperatura de cura (adaptado de SALDANHA, 2014).....	50
Figura 2.9 – Volume de vazios/teor de cimento x resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960 <i>apud</i> FOPPA, 2005).....	51
Figura 2.10 – Volume de vazios/teor de cimento ajustado x resistência à compressão simples (FOPPA, 2005).....	51
Figura 2.11 – Resultados de compressão simples e triaxiais tendo por base a relação ajustada de $\eta/C_{iv}$ (Consoli <i>et al.</i> 2007).....	52
Figura 2.12 – Resultados de compressão simples de amostras com 25% de CFA e 28 dias de cura em função da relação $\eta/C_{av}$ (adaptado de DALLA ROSA, 2009)....	53
Figura 2.13 – Resistência à tração x $\eta/L_{iv}^{0,3}$ para misturas de areia-CFA-cal curadas a 20, 27, 35 e 50°C (adaptado de SILVANI, 2013).....	53
Figura 2.14 – Resistência à compressão simples x $\eta/L_{iv}^{0,11}$ para misturas de CFA-cal curadas a 7 dias com (a) 40 °C e (b) 23°C (adaptado de SALDANHA, 2014).....	54
Figura 2.15 – Resistência à tração por compressão diametral x resistência à compressão simples para 20°C durante a cura (adaptado de SILVANI, 2013).....	55

Figura 2.16 – Efeito do teor de cal na resistência a compressão simples de diversos solos, com cura de 7 dias (adaptado de INGLES E METCALF, 1972, <i>apud</i> BENETTI, 2015).....	55
Figura 2.17 – Perda de Massa acumulada x ciclos de molhagem e secagem – Misturas de solo e 5% de cal, com $\gamma_d$ de 16,0 kN/m <sup>3</sup> , para 7, 14, 28 e 60 dias de cura (KANAZAWA, 2015).....	58
Figura 2.18 – Corpos de prova de areia-20% CFA-5% cal após (a) 0, (b) 6 e (c) 12 ciclos de congelamento e degelo (PARKER, 2008).....	59
Figura 2.19 – Superfície de asfalto após o procedimento de fresagem (BONFIM, 2011).....	60
Figura 2.20 – Fresadora de pequeno porte (BONFIM, 2011).....	61
Figura 2.21 – Fresadora de médio porte (BONFIM, 2011).....	61
Figura 2.22 – Fresadora de grande porte (BONFIM, 2011).....	62
Figura 2.23 – Cilindro fresador do modelo W1900 com troca rápida (BONFIM, 2011).....	62
Figura 2.24 – Procedimento de fresagem de um equipamento de grande porte (WIRTGEN, 2018 <i>apud</i> PASCHE, 2016).....	63
Figura 3.1 – Curva Granulométrica da Areia de Osório (SILVANI, 2013).....	68
Figura 3.2 – Fresado em (a) seu depósito provisório na cidade de Porto Alegre e (b) estocado em laboratório.....	69
Figura 3.3 – Cinza volante de carvão utilizada neste trabalho.....	69
Figura 3.4 – Curva Granulométrica do RAP e da cinza volante de carvão.....	70
Figura 3.5 – Cal de carbureto utilizada neste trabalho.....	72
Figura 3.6 – Fibra de polipropileno utilizada neste trabalho.....	73
Figura 3.7 – Definição do teor de cal mínimo pelo método ICL (adaptado de NOVAES, 2016).....	74
Figura 3.8 – Curvas de Compactação da mistura com areia de Osório (adaptado de SILVANI, 2016).....	75
Figura 3.9 – Câmara de controle de temperatura.....	77
Figura 3.10 – Corpos de prova [(a) mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica e (b) RAP-CFA-cal de carbureto] sobre a prensa de compressão simples.....	78

Figura 3.11 – Ruptura típica dos corpos de prova nos ensaios de tração por compressão diametral.....	79
Figura 3.12 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração por compressão diametral.....	79
Figura 3.13 – Equipamento Pundit Lab (adaptado de PROCEQ, 2016 <i>apud</i> HOCH, 2016).....	80
Figura 3.14 – Calibração do equipamento Pundit Lab.....	80
Figura 3.15 – Exemplo de leitura obtida pelo Pundit Lab.....	81
Figura 3.16 – Corpo de prova de RAP-CFA-cal de carbureto após retirada do molde.....	82
Figura 3.17 – Escova de aço de fio zero.....	83
Figura 3.18 – Corpos de prova das misturas com RAP dentro da estufa para o processo de secagem.....	83
Figura 3.19 – Corpos de prova das misturas com RAP dentro do freezer para o processo de congelamento.....	84
Figura 3.20 – Molde e corpo de prova das misturas com RAP para ensaios triaxiais e de compressão simples.....	85
Figura 3.21 – Equipamento triaxial utilizado.....	86
Figura 3.22 – Constituintes do equipamento triaxial: (a) interface ar/água ( <i>Bladder</i> ), (b) transdutor da marca ASHCROFT, (c) reguladores de pressão.....	86
Figura 3.23 – (a) Medidor externo do tipo Imperial College e (b) célula de carga.....	87
Figura 3.24 – Preparação do corpo de prova para o início do ensaio triaxial.....	88
Figura 4.1 – $q_u \times \eta / (L_{iv})^{0,11}$ para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C.....	91
Figura 4.2 – Comparação de $q_u$ entre as misturas com ou sem aditivos, curadas a 23°C.....	92
Figura 4.3 – Ruptura típica dos CP's (a) com fibras e (b) sem fibras, curados a 23°C.....	92
Figura 4.4 – $G_0 \times \eta / (L_{iv})^{0,11}$ para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C.....	93

Figura 4.5 – Comparação de $G_0$ entre as misturas com areia de Osório, curadas a 23°C.....	94
Figura 4.6 – Comparação da perda de massa acumulada obtida através de (a) duas escovadas por área e (b) mantendo-se 19 escovadas fixas.....	95
Figura 4.7 – PMA após ciclos de molhagem e secagem (linhas vermelhas) e ciclos de congelamento e degelo (linhas em azul) para misturas (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra e (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C.....	96
Figura 4.8 – PMA normalizada pelo número de ciclos de congelamento e degelo versus $\eta / (L_{iv})^{0,11}$ para 3, 6, 9 e 12 ciclos da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica, em vista de diferentes pesos específicos e teores de cal, fibra e NaCl, curadas a 23°C.....	100
Figura 4.9 – PMA dividida pelo número de ciclos de durabilidade versus $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para 3, 6, 9 e 12 ciclos, da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibras e sem cloreto de sódio: (b) com fibras; (c) com cloreto de sódio; (d) com cloreto de sódio e fibras.....	106
Figura 4.10 – Variação de $q_u$ em relação a $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para misturas de areia de Osório -CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23 e 40°C.....	107
Figura 4.11 – Comparação de $q_u$ entre as misturas sem sal e sem fibra, com sal, com fibra, com sal e com fibra.....	108
Figura 4.12 – Comparação de $q_u$ entre as misturas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica com aditivos ou não, curadas a 23°C e a 40°C, em relação a $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , forçando os expoentes das curvas para um valor comum.....	109
Figura 4.13 – Variação da rigidez inicial ( $G_0$ ) em relação ao índice porosidade/teor volumétrico de cal para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, para cura a 23°C e 40°C.....	110
Figura 4.14 – Comparação de $G_0$ entre as misturas sem sal e sem fibra, com sal, com fibra, com sal e com fibra, para cura a 23°C e 40°C.....	110
Figura 4.15 – PMA com ciclos de congelamento e degelo, cura de 23°C (linhas em azul) e cura a 40°C (linhas em vermelho), para misturas (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra.....	111
Figura 4.16 – PMA dividida pelo número de ciclos congelamento e degelo versus $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ para 3, 6, 9 e 12 ciclos da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibras e sal: (b) com fibras; (c) com sal; (d) com sal e fibras, curadas a 23°C e 40°C.....	118
Figura 4.17 – Comparação de $q_u$ entre as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C.....	119

Figura 4.18 – Ruptura típica dos corpos de prova (a) sem sal e (b) com sal, curados a 23°C, ensaiados à compressão simples.....	119
Figura 4.19 – $q_u \times \eta / (L_{iv})^{0,11}$ , para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, forçando os expoentes das curvas para um valor comum	120
Figura 4.20 – Comparação de $q_t$ entre as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, em relação a $\eta / (L_{iv})^{0,11}$ .....	121
Figura 4.21 – Ruptura típica dos corpos de prova com e sem sal, curados a 23°C, ensaiados a compressão diametral.....	121
Figura 4.22 – $q_t \times \eta / (L_{iv})^{0,11}$ , para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, forçando os expoentes das curvas para um valor comum...	122
Figura 4.23 – Resultados de durabilidade após ciclos de congelamento e degelo para misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com e sem sal, curadas a 23°C.....	123
Figura 4.24 – PMA para 3, 6, 9 e 12 ciclos $\times \eta / (L_{iv})^{0,11}$ para misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, (a) sem e (b) com 0,5% de sal, sujeitas a congelamento e degelo.....	126
Figura 4.25 – Perda de massa acumulada dividida pelo número de ciclos de durabilidade versus $\eta / (L_{iv})^{0,11}$ para 6, 9 e 12 ciclos de misturas de RAP-CFA-cal de carbureto.....	127
Figura 4.26 – PMA após ciclos de molhagem e secagem para misturas com RAP, curadas a 23°C.....	128
Figura 4.27 – PMA após ciclos de molhagem e secagem (linhas vermelhas) e congelamento e degelo (linhas em azul) para misturas com RAP, com e sem sal, curadas a 23°C.....	128
Figura 4.28 – Perda de massa acumulada para 3, 6, 9 e 12 ciclos versus $\eta / (L_{iv})^{0,11}$ de misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, (a) sem e (b) com 0,5% de cloreto de sódio, sujeitas a condições de molhagem e secagem.....	130
Figura 4.29 – Comportamento tensão-deformação para as misturas (a) sem sal e (b) com sal.....	133
Figura 4.30 – Espécimes após cisalhamento triaxial, misturas sem sal com tensões de confinamento efetivas de (a) 20 kPa, (b) 40 kPa e (c) 60 kPa e misturas com 0,5 % de NaCl, com tensões de confinamento efetivas de (d) 20 kPa, (e) 40 kPa e (f) 60 kPa.....	135
Figura 4.31 – Envoltórias de ruptura e trajetórias de tensão para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto (a) sem sal e (b) com sal e (c) comparação das envoltórias e dos parâmetros de resistência obtidos.....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção de cinzas em termelétricas brasileiras por ano.....	29
Tabela 2.2 – Propriedades médias das cales comercializadas no Brasil.....	33
Tabela 2.3 – Classificação de cinzas volantes segundo a ASTM C593 e a ASTM C618.....	34
Tabela 2.4 – Classificação de materiais pozolânicos (NBR 12563) e características das cinzas volantes do sul do Brasil.....	35
Tabela 2.5 – Concentração dos diversos constituintes de cinzas volantes mundiais..	35
Tabela 2.6 – Análise química da cal de carbureto produzida no Estado de São Paulo.....	38
Tabela 2.7 – Propriedades químicas da cal de carbureto e cal comercial.....	38
Tabela 3.1 – Propriedades do RAP e da CFA.....	70
Tabela 3.2 – Propriedades da cal hidratada dolomítica.....	71
Tabela 3.3 – Propriedades da cal de carbureto.....	72
Tabela 3.4 – Características das misturas estudadas.....	73
Tabela 3.5 – Ensaio realizados para cada tipo de mistura estudada.....	76
Tabela 4.1 – Peso específico e teor de cal analisados para a mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica.....	95
Tabela 4.2 – Comparação dos resultados de durabilidade, com 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo.....	102
Tabela 4.3 – Comparação dos resultados de durabilidade, com adição de 0,5% de fibras, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo.....	102
Tabela 4.4 – Comparação dos resultados de durabilidade, com adição de 0,5% de fibras e sal, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo.....	103
Tabela 4.5 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade, no referido ciclo máximo alcançado.....	104

Tabela 4.6 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade, no referido ciclo máximo alcançado.....	104
Tabela 4.7 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado.....	114
Tabela 4.8 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de fibras adicionadas, no referido ciclo máximo alcançado.....	115
Tabela 4.9 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de fibra e 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado.....	115
Tabela 4.10 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade (FT) obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, no referido ciclo máximo alcançado.....	116
Tabela 4.11 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade (FT), para temperaturas de cura de 23°C e 40°C, no referido ciclo máximo alcançado.....	116
Tabela 4.12 – Comparação dos resultados de durabilidade, com 0,5% de sal adicionado, para misturas com RAP.....	131
Tabela 4.13 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade, para misturas com RAP.....	131
Tabela 4.14 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade, para misturas com RAP.....	131
Tabela 4.15 – Parâmetros de resistência das misturas de RAP, com e sem sal.....	137

## LISTA DE SÍMBOLOS

B	parâmetro B de Skempton
$C_{iv}$	teor volumétrico de cimento
cm	centímetro
$cm^2$	centímetro quadrado
$cm^3$	centímetro cúbico
$D_{10}$	diâmetro efetivo
$D_{50}$	diâmetro médio
g	grama
$G_0$	rigidez inicial
GPa	gigapascal
kcal	quilocaloria
kg	quilo
kHz	quilohertz
kPa	quilopascal
kN	quilonewton
L	distância entre transdutores
$L_{iv}, C_{av}$	teor volumétrico de cal
m	metro
$m^2$	metro quadrado
$m^3$	metro cúbico
mm	milímetro
MPa	mega-pascal
p	onda de compressão
pH	potencial hidrogeniônico
$q, \sigma'_d$	tensão desvio
$q_u$	resistência à compressão simples
$q_t$	resistência à tração por compressão indireta
R	$Ca^{2+}$ ou $Mg^{2+}$
$R^2$	coeficiente de determinação
s	onda cisalhante
$s'$	eixo horizontal do diagrama de tensões de Cambridge

$t$	eixo vertical do diagrama de tensões de Cambridge
$t_s$	tempo de viagem da onda cisalhante
$V_s$	velocidade da onda cisalhante
$w$	teor de umidade
$\eta$	porosidade
$\phi'$	ângulo de atrito
$c'$	intercepto coesivo
$\rho$	peso específico do solo
$\gamma_d$	peso específico seco
$\sigma'_a$	tensão efetiva axial
$\sigma'_c$	tensão efetiva de confinamento
$\sigma'_r$	tensão radial
$\sigma'_c$	tensão confinante efetiva
$\epsilon_v$	deformação volumétrica
$\epsilon_a$	deformação total axial
$\epsilon_r$	deformação radial
$e$	índice de vazios

## LISTA DE SIGLAS

a.C.	Antes de cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Referente a cal
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CFA	Cinza volante de carvão
CID	Consolidado isotropicamente drenado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP's	Corpos de prova
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DF	Distrito Federal
DRX	Difracometria de raio-X
EUA	Estados Unidos da América
F	Referente a fibras de polipropileno
FA	Cinza volante
FHWA	Federal Highway Administration
FT	Freezing-thawing (Congelamento e Degelo)
ICL	Initial Consumption of Lime
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	Índice de plasticidade
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
PMA	Perda de massa acumulada
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PR	Paraná
RAP	Resíduo de pavimento de asfalto, fresado
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
S	Referente a sal

SP	São Paulo
TRB	Transportation Research Board
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UPV	Velocidade de pulso de ultrassom
URSS	Antiga União Soviética
WD	Wetting-drying (Molhagem e Secagem)



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Na prática da engenharia civil é comum se deparar com casos onde o local escolhido para a implantação de determinada obra não apresenta condições adequadas ou desejadas para realização de tal empreendimento, principalmente do ponto de vista geotécnico. Ao longo das últimas décadas, inúmeras metodologias vêm sendo estudadas e aprimoradas visando solucionar tal problema, como: a substituição parcial ou total do solo, a realocação da obra, o uso de soluções estruturais e o melhoramento do material, sendo este último o tema abrangido neste trabalho.

Dentro deste cenário, a indústria da construção é conhecida por usar quantidades significativas de recursos naturais e causar grandes impactos ao meio ambiente. O uso de materiais naturais em obras geotécnicas, tais como aterros, sub-bases e bases de pavimentos, é um aspecto particularmente importante a ser considerado, devido à enorme quantidade de recursos empregados em tais aplicações. Por outro lado, certas atividades industriais produzem grandes quantidades de resíduos que são frequentemente descartadas sem o devido tratamento. Particularmente no Brasil, são gerados anualmente 3.350.000 toneladas de cinzas volantes de carvão (CFA) como subproduto da produção de eletricidade (ROHDE, 2006), sendo incerta a porcentagem de CFA que é reutilizada no país.

Outro resíduo gerado em grandes quantidades é o resíduo de pavimentos de asfalto recuperado (RAP), também denominado de fresado. Uma das maneiras de corrigir defeitos nos pavimentos é através de sua restauração, onde o antigo pavimento de asfalto é cortado e as crateras formadas são revestidas com novas camadas de asfalto. Esta operação produz uma grande quantidade de resíduos nos trabalhos de restauração de rodovias (FHWA, 2011). Uma alternativa viável para a reutilização destes resíduos é através de sua estabilização com materiais cimentantes e posterior aplicação como camadas de base e sub-base de novos pavimentos (PUPPALA *et al.* 2011).

Tendo por base os dados apresentados anteriormente, é notável a importância de se realizar pesquisas que permitam a reutilização destes subprodutos em obras, reduzindo tanto o consumo de recursos naturais como eliminando a disposição destes resíduos em aterros sanitários e locais indevidos, evitando que chuvas acabem levando estes resíduos para rios e cursos de água. Sharma *et al.* (2008) destacam que o efeito da adição de apenas cinzas volantes em relação à resistência do solo não é suficiente a ponto de ser considerado como um bom material para fundações e, por esta razão, a adição de cal em conjunto com cinzas volantes geralmente é empregada para a estabilização do solo. Nesse sentido, Consoli *et al.* (2011) desenvolveram um procedimento de dosagem racional para misturas com resíduos industriais compactados, envolvendo o índice porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ), que mostrou ser um parâmetro adequado para prever a resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) de misturas solo-cinza volante-cal.

A técnica de adição de fibras como reforço para certos solos também foi analisada em misturas de solo-cinza volante-cal. Kumar *et al.* (2007) observaram que pequenas quantidades de fibras (1,0% a 1,5%) poderiam aumentar a resistência à compressão não confinada em até 100% e a resistência à tração em até 135% em solos expansivos estabilizados com cinza volante e cal.

Apesar dos estudos anteriores sobre a resistência das misturas mencionadas, poucos autores estudaram o efeito do sal na estabilização do solo. Drake e Haliburton (1972) foram os primeiros a observar que a inclusão de sal provoca um efeito catalítico nas reações cimentícias, causando uma redução significativa no tempo de cura. Recentemente, Saldanha *et al.* (2016) investigaram a adição de distintos sais ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{KMnO}_4$ ) em misturas de CFA-cal como ativadores de reações pozolânicas.

Até então, as pesquisas envolvendo os materiais geotécnicos mencionados acima abordam o comportamento mecânico (resistência à compressão não confinada, módulo de resiliência e módulo dinâmico). Sendo que a durabilidade e o desempenho a longo prazo de resíduos industriais tratados, estabilizados e compactados receberam atenção reduzida. Uma das poucas pesquisas sobre este tema foi realizada por Avirneni *et al.* (2016), que avaliaram a perda de massa após os ciclos de molhagem e secagem em misturas de RAP-CAF-cal.

Desta forma, avaliar a durabilidade deste material é fundamental antes de empregá-lo em trabalhos geotécnicos reais, onde estas misturas estarão submetidas a intempéries da natureza, como chuvas e secas (grande variação de umidade) e congelamento e degelo (grande variação

de temperatura). Este cenário é muito comum na região sul do Brasil que possui clima subtropical e temperado, onde as estações são bem definidas, com temperaturas de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  no inverno e acima de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  no verão (INPE, 2017).

Este estudo centra-se na durabilidade, resistência e rigidez inicial ( $G_0$ ) de misturas com cinza volante, proveniente da queima de carvão mineral, e cal com adição de fibras e cloreto de sódio, alterando a matriz da mistura (Areia de Osório ou RAP) sujeitas a condições climáticas severas (ciclos de molhagem-secagem e congelamento- degelo) sob cura de  $23^{\circ}\text{C}$  ou  $40^{\circ}\text{C}$ . Esta dissertação também avança na compreensão dos parâmetros que controlam a durabilidade e a resistência destes tipos de mistura, sendo uma de suas principais contribuições ao conhecimento a ampliação da aplicabilidade do índice porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ) em relação à resistência e durabilidade dos materiais estudados.

## 1.2 OBJETIVOS E METAS

De maneira sucinta o objetivo principal do trabalho proposto é:

- Análise do comportamento mecânico de misturas compactadas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica e misturas de RAP-CFA-cal de carbureto em relação aos efeitos de cada componente dos espécimes (% de cal, adição de fibra, adição de sal, grau de compactação).

De forma a complementar o objetivo principal do trabalho, existem objetivos secundários que serão observados:

- Comparação dos efeitos na durabilidade provenientes dos ciclos de molhagem-secagem em relação aos ciclos de congelamento- degelo;
- Aplicação do índice porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_{iv}$ ) para misturas compactadas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica e misturas de RAP-CFA-cal de carbureto em termos de perda de massa após ciclos de molhagem-secagem e congelamento- degelo;
- Avaliação da temperatura ( $23^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ ) na cura das misturas, em relação a resistência, rigidez inicial ( $G_0$ ) e durabilidade;

- Avaliação do comportamento tensão-deformação sob trajetórias drenadas (determinação da envoltória de ruptura) das misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, tendo por base ensaios triaxiais.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, de acordo com a evolução das pesquisas realizadas.

O primeiro capítulo compreende a introdução, onde é apresentado de forma sucinta a relevância e importância desta pesquisa e são definidos o objetivo principal e secundários a serem atingidos.

Já no segundo capítulo é realizada uma revisão minuciosa da literatura existente acerca dos aspectos relevantes do tema abordado, situando o leitor no cenário atual sobre os estudos de resistência, rigidez e durabilidade que envolvem as misturas a serem estudadas neste trabalho.

No terceiro capítulo é detalhado o programa experimental realizado no desenvolvimento desta pesquisa, enfatizando-se os materiais e métodos utilizados.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos na etapa experimental.

No capítulo 5 são expostas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas acerca do tema abordado.

No final são apresentados as Referências Bibliográficas e os Apêndices.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GENERALIDADES SOBRE A CINZA VOLANTE

#### 2.1.1 A produção de Carvão Mineral

Segundo a International Energy Agency (2015a), o carvão é composto por uma variedade de rochas orgânicas, sedimentares, sólidas e combustíveis que, através da combinação de pressão e calor ao longo de milhares de anos, consolidaram-se e alteraram-se, sendo seus principais componentes: carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e outras impurezas. As classificações deste tipo de mineral são baseadas na capacidade calorífica, na quantidade de cinza, no teor de umidade e no teor de enxofre.

Em geral, o carvão é a mais abundante fonte de energia primária disponível no planeta (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL, 2007), sendo a segunda principal fonte de energia mundial (29%), perdendo apenas para o petróleo (31%). Países como a China, Índia, Estados Unidos e Austrália possuem alto consumo de carvão para produção de eletricidade, respectivamente 57%, 71%, 92% e 90% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015b).

A produção mundial de carvão foi de 7,27 bilhões de toneladas em 2016 (WORLD COAL ASSOCIATION, 2017). Além disso, é importante ressaltar que a demanda de carvão ultrapassará os 9 bilhões de toneladas até 2019 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014).

Já no Brasil existem cerca de 6,63 bilhões de toneladas de carvão (0,7% da reserva mundial). Porém, a produção deste mineral em relação à sua reserva nacional é inferior à 0,6%, o que indica que há grandes quantidades disponíveis ainda a serem exploradas (BRITISH PETROLEUM, 2017). Do volume total das reservas nacionais, 89,25% estão localizados no Rio Grande do Sul, 10,41% em Santa Catarina, 0,32% no Paraná e 0,02% em São Paulo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008 *apud* DE PAULA, 2016).

O carvão brasileiro extraído da região sul é classificado como um carvão sub-betuminoso, com poder calorífico entre 2600 e 4200 kcal/kg, sendo responsável por 42 a 59% de geração de cinzas. O processo de geração de energia elétrica através do carvão mineral é dividido em 5 fases: extração e transporte, queima, produção de vapor, transformação de calor em energia

mecânica e transformação de energia mecânica em energia elétrica (ELETROBRAS, 2017; AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A etapa da queima do carvão mineral gera grandes quantidades de resíduos, que serão abordados no tópico a seguir.

### 2.1.2 A produção de Cinza Volante

Segundo Rohde (2006), no processo de combustão, ou seja, na queima do carvão, é gerado um material chamado de cinza. Este material pode ser dividido em três tipos:

- Cinzas de fundo ou Cinzas pesadas: possuem granulometria mais grosseira e são, por consequência, mais densas. São retiradas do fundo das fornalhas por um sistema de fluxo de água, possuindo 5 a 10% de carbono;
- Escórias: geradas na combustão de carvão granular em grelhas (sistema antigo, onde o carvão não é pulverizado, mas britado). São retiradas dos fundos das fornalhas por um sistema de resfriamento com água. Possui uma granulometria grosseira com altos teores de carbono (10 a 20%);
- Cinzas volantes: possuem granulometria extremamente fina (100% menor que 0,15 mm), aproximadamente esféricas e extremamente leves. Causam grande impacto caso sejam dispersadas na atmosfera, logo devem ser retiradas por um sistema de captação (filtros de tecido, ciclones e precipitadores eletrostáticos).

Rohde (2006) também destaca que o carvão brasileiro possui um teor de material inorgânico acima de 50% (valor superior aos carvões norte-americanos ou europeus), ou seja, o material possui altos teores de inertes, o que será transformado em maiores volumes de cinza após sua queima.

De acordo com a Eletrobras (2017) e Brown (2011) 1kg de carvão gera 500g de cinzas. Através da Tabela 2.1 é possível analisar a produção das diferentes cinzas nas usinas termelétricas da região sul do Brasil.

Tabela 2.1 – Produção de cinzas em termelétricas brasileiras por ano

	Resíduos (t)			Produção de Cinza Volante
	Cinza Volante	Cinza de Fundo	Escória	
<b>Termelétrica</b>				
Presidente Médici A, B e C	1.500.000	375.000	-	80%
São Jerônimo	5.000	-	50.000	9%
Charqueadas	295.058	126.453	-	70%
Jorge Lacerda I, II, III e IV	1.500.000	500.000	-	75%
Figueira	50.000	5.000	-	91%
<b>Indústria Geradora</b>				
Copesul (Braskem)	144.000	54.000	-	73%
Aracruz Celulose	50.400	14.400	-	78%

(fonte: adaptado de ROHDE, 2006 *apud* DE PAULA, 2016)

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), em relação a suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, como resíduos classe I (perigosos), classe II A (não perigosos não inertes) e classe II B (não perigosos inertes). Baseado nesta norma, é possível obter a maneira mais adequada de disposição, evitando assim danos ambientais. De acordo com Rohde (2006), a maioria das cinzas volantes brasileiras são classificadas como resíduos classe II A, logo, se não forem recicladas, devem ser dispostas em aterros sanitários.

A importância desta classificação deve-se pela presença na cinza de elementos químicos que são potencialmente nocivos para o meio ambiente. Swaine (2000) enfatiza que, além do grande potencial tóxico destes elementos, a maior preocupação ambiental é sua lixiviação para fontes de água subterrâneas ou superficiais, o que pode resultar em graves problemas de saúde pública. Como ocorreu em Bangladesh, onde os poços de água potável possuem altos níveis de arsênio, e em Charqueadas (RS - Brasil), onde a má disposição de resíduos das mineradoras e termelétricas acarretou a dispersão de poluentes, como Ni, Mn e Zn (BINOTTO, 1997).

Os principais elementos que formam a cinza são a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e o carbono (C) (MALLMANN, 1996). A quantidade de cada um destes elementos é influenciada pela fonte de extração do carvão, sendo suas concentrações inversamente proporcionais ao tamanho das partículas de cinza volante (ADRIANO *et al.* 1980).

Mehta e Monteiro (2008) analisaram como a composição do carvão queimado, o ambiente de armazenamento e as condições de calcinação afetam diretamente a mineralogia das cinzas. Os autores ainda dizem que o teor de cálcio é o fator predominante na composição mineralógica, pois as cinzas que possuem baixo teor de cálcio (valor inferior a 10% de CaO) geralmente são produto da combustão de carvões betuminosos e antracito e as com alto teor de cálcio (15 a 40% de CaO) da combustão de carvões sub-betuminosos e de lignita.

Rohde (2013) ressalta que a cinza possui inúmeras aplicações e por isso deveria deixar de ser considerada como um subproduto das termelétricas e se tornar um produto secundário. Particularmente no Brasil, são gerados anualmente 3,35 milhões de toneladas de cinzas volantes de carvão (CFA) através da produção de eletricidade (SALDANHA *et al.* 2016). No entanto, é incerto a porcentagem de CFA que é reutilizada.

Vários países empregam o CFA gerado para outros fins industriais. Nos EUA, 45% do CFA são reutilizados enquanto os outros 55% são temporariamente armazenados ou descartados (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION, 2013). Na Europa, 52% do CFA são reutilizados em atividades industriais, 36% são empregados na recuperação de minas e apenas 12% são descartados (EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION, 2010). Já a Argentina gera 45.000 toneladas de cinzas e utiliza toda a sua produção em aterros, preenchimentos e barragens. Outro exemplo a ser seguido é a Holanda, que tem uma produção de 833.000 toneladas ao ano e utiliza esse subproduto principalmente como matéria-prima de cimento e como agregado leve (MANZ, 1997).

Inúmeros estudos buscam analisar um possível emprego dos materiais estabilizados em aplicações como bases de pavimentos ou na produção de blocos destinados à construção civil, como as pesquisas de Nardi, 1975; Ceratti, 1979; Da Silva, 1982; Zwonok & Chies, 1989; Mallmann, 1996; Fogaça & Cerratti, 1995 e Carraro, 1997. Já Ferreira *et al.* (2003), considerando as propriedades físico-químicas das CFA e o seu impacto ambiental, apontam possíveis aplicações divididas em quatro áreas:

- Materiais de construção: produção de cimento, concreto, cerâmica e vidro;
- Agricultura: correção do solo;
- Geotecnia: pavimentação de estradas e aterros;
- Diversos: materiais absorventes e condicionamento de lodos.

Rohde (2006) aponta diversas vantagens da utilização da CFA como produto alternativo, dentre tais benefícios destacam-se: redução da emissão de dióxido de carbono, diminuição das áreas de aterros, conservação dos recursos naturais, redução significativa do custo final da geração de energia e impulso do desenvolvimento econômico.

De acordo com Núñez (2007), na década de 60 já se utilizavam cinzas volantes estabilizadas na Inglaterra, França, Estados Unidos, Alemanha, Polônia, na antiga URSS e nas antigas Tchecoslováquia e Iugoslávia. No Brasil, o primeiro registro da utilização da cinza volante ocorreu em 1964, com sua incorporação ao concreto para construção da hidrelétrica de Jupia, visando diminuir o calor de hidratação (substituindo parcialmente o cimento). Desde então as cinzas volantes têm sido empregadas pela indústria de cimento, em obras rodoviárias (trechos experimentais), na fabricação de pré-moldados e na constituição de argamassas pozolânicas, no entanto, em pequenas quantidades (NÚÑEZ, 2007).

## 2.2 GENERALIDADES SOBRE A CAL

A cal é um tipo de ligante extremamente difundido na engenharia contemporânea, porém há relatos da sua utilização nas grandes civilizações antigas. Segundo Núñez, 1991 (*apud* Quiñónez Samaniego, 2015) o uso da cal é o mais antigo método utilizado na estabilização química de solos. O autor ainda cita em seus estudos algumas obras onde a cal foi aplicada como estabilizante:

- A grande Muralha da China (3.000 a.C.);
- Teatro de Pompéia (55 a.C.);
- Panteão Romano;
- A cidade bíblica de Jericó;
- Construções romanas: Santuário de Fortuna (Palestina, 80 a.C.);
- Aquedutos em Roma, Segóvia, Constantinopla e França;
- Construções feitas pelos índios americanos pré-colombianos;
- No Brasil: cidades de Diamantina, Ouro Preto (MG) e Paraty (RJ).

Em geral, misturas com cal são comumente empregadas na construção de estradas, sendo geralmente utilizadas como base ou sub-base de pavimentos (INGLES e METCALF, 1972).

Guimarães, 1971 (*apud* Quiñónez Samaniego, 2015), cita exemplos de tais aplicações de sucesso em pistas experimentais no Brasil, são elas:

- Aeroporto de Congonhas (SP) – em uma área de aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup> foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada;
- Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-377/RS) – dois trechos em solo argiloso com 4% de cal.
- Rodovia Curitiba/PortoAlegre (PR) – próximo ao km 10, com 1000 metros de extensão. Foi utilizado em um solo siltoso, com 3% e 7% de cal;
- Avenida Sernambetiba – Guanabara (RJ) – trecho de 18 km, com base de 3% a 4% de cal;
- Rodovia Brasília/Fortaleza (DF) – proximidades de Sobradinho, foram construídos dois trechos de 150 metros cada, com uso de 1% e 3% de cal nas bases do pavimento;

Outras possíveis aplicações da cal são: na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas como no canal de irrigação de Friant-Kern (Califórnia – EUA), onde se utilizou cal virgem pulverizada (Guimarães, 2002); em fundações de construções de pequeno porte; em solos que apresentem baixa estabilidade volumétrica ou baixa capacidade de suporte (Ingles e Metcalf, 1972); em fundações superficiais (FOPPA, 2005).

No final do século XX, pesquisadores consolidaram os princípios básicos relativos à fabricação da cal virgem e hidratada, possibilitando o desenvolvimento industrial do produto.

Guimarães (2002) descreve a cal utilizada na estabilização de solos como sendo o produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000 °C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Já Núñez (2007) descreve a cal como calcário britado e calcinado a temperatura inferior à de fusão, ou seja, de 850 a 900°C. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da norma brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003). Na Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro (GRUIMARÃES, 2002).

Tabela 2.2 – Propriedades médias das cales comercializadas no Brasil

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
Cal Virgem Cálcica	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–3,8	0,1–0,6	96,0–98,5	–
Cal Hidratada Cálcica	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnesiana	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
Cal Virgem Dolomítica Ou Magnesiana	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

(fonte: adaptado de GUIMARÃES, 2002 *apud* DE PAULA, 2016)

## 2.3 MISTURAS CINZA VOLANTE-CAL

A seguir serão abordadas detalhadamente as características de cada elemento das misturas a serem analisadas neste trabalho, visando a compreensão das reações pozolânicas que serão discutidas no item 2.4.

### 2.3.1 Cinza volante

Segundo a ASTM C595 (2015), materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silico-aluminosos que, sozinhos, possuem nenhuma ou pouca capacidade de cimentação. No entanto, na presença de umidade reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalino terrosos formando compostos com propriedades cimentantes.

Tendo por base esta definição é possível compreender de forma geral as reações pozolânicas que ainda serão discutidas em posteriores tópicos deste trabalho: em geral as cinzas-volantes são materiais com alto índice de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina amorfa (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que em presença de água reage com a cal (material alcalino) formando produtos cimentícios. Em certos solos, como as argilas expansivas da região do Chaco (Paraguai) é dispensável a utilização de materiais silicosos para que a reação ocorra, ou seja, em certos casos, cal mais água reage por si só com o solo (CONSOLI *et al.* 2016a; NÚÑEZ, 2007).

As cinzas volantes podem ser classificadas em classes: N, F e C. As cinzas da classe N são as denominadas pozolanas naturais e as cinzas de classe F e C são esféricas, porém a classe F engloba cinzas com superfície limpa e a classe C compreende as que possuem depósitos aderidos à sua superfície, como álcalis e sulfatos (ASTM C618, 2012).

A ASTM C593 (2011), apresenta condições para que a cinza volante reaja de forma eficiente com cal para a estabilização de solos. Um resumo das duas normas americanas é exposto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação de cinzas volantes segundo a ASTM C593 e a ASTM C618

Propriedades		ASTM C618			ASTM C593
		Classe N	Classe F	Classe C	
<b>Químicas</b>					
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	min. %	70	70	50	-
SO <sub>3</sub>	máx. %	4	5	5	-
Teor de umidade	máx. %	3	3	3	-
Perda ao fogo	máx. %	10	6	6	-
<b>Físicas</b>					
Material retido na peneira 325	máx. %	34	34	34	-
Material retido na peneira 200	máx. %	-	-	-	30
Material retido na peneira 30	máx. %	-	-	-	2
Atividade pozolânica com cimento	min. %	76	75	75	-
Atividade pozolânica com cal (7 e 21 dias)	MPa	-	-	-	4
Água requerida	máx. %	115	105	105	-

(fonte: adaptado de ASTM C 593, 2011 e ASTM C 618, 2012)

A norma brasileira que classifica as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral é a NBR 12563: Materiais pozolânicos – Requisitos (2014). Esta classificação indica que as cinzas do sul do Brasil são compreendidas como Classe C, possuindo valores baixos de materiais amorfos. No entanto isto não significa que tal material não possua propriedades pozolânicas necessárias para sua utilização em obras (ROHDE, 2006). Desta forma, o pesquisador ressalta a necessidade de uma norma mais específica para a utilização de cinzas como produtos da queima do carvão e não apenas como resíduos sólidos. O autor também indica a importância da realização de ensaios laboratoriais preliminares para determinação das propriedades da cinza. A Tabela 2.4 apresenta as propriedades físicas e químicas de cada classe dos materiais pozolânicos descritos na NBR 12563 (2014) e também valores médios das cinzas da região sul analisadas por Rohde (2006).

Tabela 2.4 – Classificação de materiais pozolânicos (NBR 12563) e características das cinzas volantes do sul do Brasil

Propriedades		NBR 12563			Cinzas Volantes
		Classe N	Classe C	Classe E	
<b>Ouímicas</b>					
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	min. %	70	70	50	>90
SO <sub>3</sub>	máx. %	4	5	5	<1,0
Teor de umidade	máx. %	3	3	3	<1,0
Perda ao fogo	máx. %	10	6	6	<1,0
Álcalis disponíveis na Na <sub>2</sub> O	máx. %	1,5	1,5	1,5	<1,5
<b>Físicas</b>					
Material retido na peneira 45µm	máx. %	20	20	20	<34
Atividade pozolânica com cimento	min. %	90	90	90	>75
Atividade pozolânica com cal	MPa	6	6	6	>6

(fonte: adaptado da NBR 12563, 2014 *apud* ROHDE, 2006)

As cinzas volantes possuem uma fração amorfa (vítrea), silicosa ou silico-aluminosa e uma fração cristalina, contendo quartzo, hematita e mulita (Saldanha, 2014). Sendo as proporções destes elementos de extrema importância na capacidade de reação pozolânica. Rohde (2006) compara através da Tabela 2.5 os constituintes minerais de diversas cinzas volantes do sul do Brasil e de outros países.

Tabela 2.5 – Concentração dos diversos constituintes de cinzas volantes mundiais

Constituintes	Copesul (Braskem)	Charqueadas	Pres. Médici (Candiota)	EUA	Inglaterra
SiO <sub>2</sub>	64,40	62,20	65,70	44,11	46,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,20	26,00	20,30	20,81	26,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,50	2,90	4,6	17,49	10,44
TiO <sub>2</sub>	0,80	1,10	0,69	-	-
CaO	2,15	1,26	0,37	4,75	3,06
MgO	0,88	0,35	0,46	1,12	1,96
K <sub>2</sub> O	1,41	1,41	1,12	1,97	3,26
Na <sub>2</sub> O	0,34	0,18	0,10	0,73	0,90
SO <sub>3</sub>	-	-	0,1-0,7	1,19	1,59
C	0,14	1,09	0,05	-	-
S	0,09	<0,05	<0,05	-	-

(fonte: adaptado de ROHDE, 2006 *apud* DE PAULA, 2016)

Mallmann (1996) afirma que o crescimento das reações pozolânicas dependem dos seguintes fatores relativos as propriedades das CFA:

- Superfície específica: seu aumento leva à aceleração das reações pozolânicas;
- Porcentagem de estruturas amorfas: seu aumento implica na aceleração da solubilidade da sílica (até um valor limite de % de material amorfo);
- Porcentagem de sílica e alumina: reagem com o hidróxido de cal livre;
- Porcentagem de carbono orgânico.

Fischer *et al.* 1976 (*apud* De Paula, 2016), através de microscopia eletrônica (Figura 2.1) analisaram a microestrutura das CFA americanas e observaram que a estrutura do material é composta por partículas esféricas, denominadas cenosferas (Figura 2.1 A). Constatou-se também que algumas das maiores cenosferas continham outras cenosferas em seu interior e estas continham outras esferas de aproximadamente 1 µm dentro de sua estrutura (Figura 2.1 B, D, E e F). Adotou-se o termo “plerosfera” (plero – do grego e significa cheio) para estas esferas ocas, porém preenchidas por outras esferas. Observou-se também que cristais se formam na superfície das esferas, com exceção das esferas mais internas. Uma explicação possível para a formação destas estruturas é o processo de ebulição que ocorre na zona de combustão em altas temperaturas, sugerindo que a tensão superficial é a força predominante atuante nas partículas (FISCHER *et al.* 1976 *apud* DE PAULA, 2016).

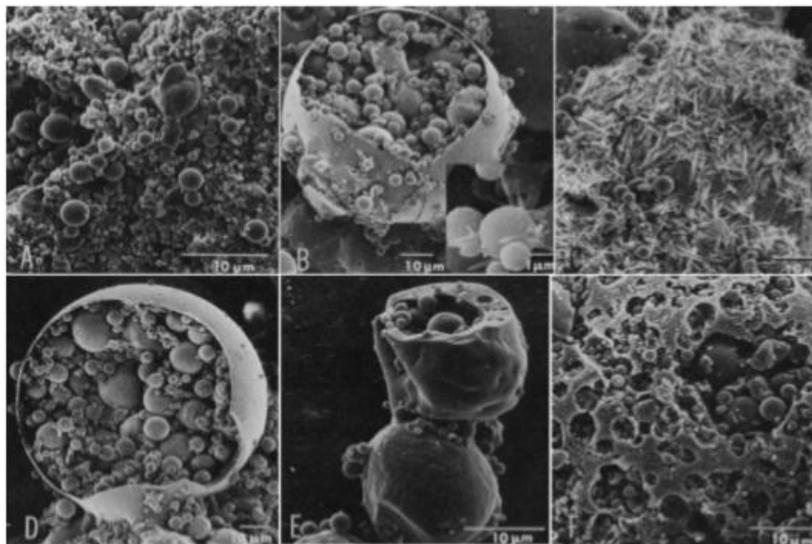
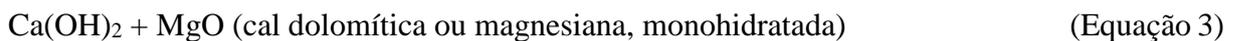
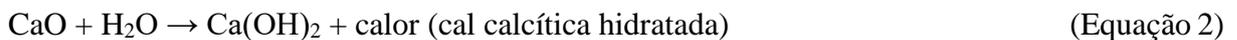


Figura 2.1 – Microscopia eletrônica de cinzas volantes americanas (FISCHER *et al.* 1976, *apud* DE PAULA 2016)

### 2.3.2 Cal

Em geral existem dois tipos de cal disponíveis no mercado: a hidratada e a de carbureto, sendo a cal hidratada subdividida em: calcítica, dolomítica e magnesiana (CARDOSO *et al.* 2009). A cal calcítica possui limites de óxido de magnésio (MgO) de até 12%, já a magnesiana possui valores de MgO entre 12% e 24% e as cales com valores superiores a 24% de MgO são classificadas como cal dolomíticas (CALTEC, 2017b). As reações e formulações químicas clássicas destas cales, apresentadas por Núñez (2007), são descritas a seguir (NÚÑEZ, 2007; MINNICK, 1967):



Já em relação a mineralogia, sabe-se que quando a rocha calcária possuir majoritariamente minerais calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a cal a ser obtida será calcítica. No entanto, se as porcentagens de minerais dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) forem altas, serão formadas cales magnesianas ou dolomíticas (CALTEC, 2017b).

As cales hidratadas possuem cor branca e são apresentadas em forma de pó (NÚÑEZ, 2007). A cal de carbureto (ou hidróxido de cálcio) é formada por meio da reação química entre o carbureto de cálcio e a água para a produção de gás acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE GASES, 2017), como demonstrado na Equação 5:



Este material possui alto potencial poluidor, devido a sua alcalinidade, no entanto também possui elevada reatividade quando misturado com cinzas, produzindo reações cimentantes (Thomé, 1999). Possui cor cinza com tom azulado e apresenta-se em forma pastosa (60 a 70% do material em fase líquida). Aproximadamente 80% dos produtores de gás acetileno armazenam a cal em reservatórios externos formando lagoas de sedimentação (RAMASAMY *et al.* 2002).

Wang e Handy (1966) compararam diversos tipos de cal disponíveis no mercado do estado de Iowa nos Estados Unidos e concluíram que a cal de carbureto se compara com a cal hidratada calcítica em relação a composição química, redução da plasticidade e aumento da resistência quando adicionadas em solos. Saldanha (2014) ainda exalta que, devido ao fato da cal de carbureto ficar exposta ao ar livre na empresa geradora, ocorre a diminuição de sua capacidade de reação com a cinza volante.

Já análises químicas, termogravimétricas e difrações de raios-X apontam que a cal de carbureto paulista possui uma estrutura mais fechada do que as cales hidratadas, apesar da cal de carbureto ter uma menor superfície específica e uma menor retenção de água que a cal hidratada comercial (CARDOSO *et al.* 2009; TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1976; MINNICK 1967). Porém, observou-se que a cal de carbureto se aglomera rapidamente com água após 90 minutos. A análise química realizada pelos pesquisadores encontra-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Análise química da cal de carbureto produzida no Estado de São Paulo

Componente	Cal Hidratada (%)	Cal de Carbureto (%)
CaO	70,90	71,20
MgO	0,31	0,06
FeO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68	0,68
SO <sub>2</sub>	0,16	0,12
CO <sub>2</sub>	5,29	4,54
Umidade	0,39	0,49
Perda ao fogo	26,90	26,40

(fonte: adaptado de CARDOSO *et al.* 2009)

Através da Tabela 2.7, Thomé (1999) compara quimicamente a cal de carbureto obtida no estado do Rio Grande do Sul com a cal dolomítica comercial do respectivo estado.

Tabela 2.7 – Propriedades químicas da cal de carbureto e cal comercial

Propriedade	Cal de carbureto	Cal comercial*
Oxido de cálcio (CaO)	95,1%	30,0%
Óxido de magnésio(MgO)	1,5%	54,3%
Resíduos insolúveis	0,7%	--
CaO + MgO (bases não voláteis)	96,6% (≥88%)**	84,3%
Carbono orgânico	0,1%	--

\*Fonte: Rocha Neto *et al.* (1991) \*\*Limite NBR 7175 (ABNT, 1994)

(fonte: THOMÉ, 1999)

### 2.3.3 Solo-Cinza Volante-Cal

Segundo Dalla Rosa (2009), uma opção para potencializar a estabilização com cal de um solo com baixo teor de argila (material fino) é a substituição parcial do solo por materiais pozolânicos, como a cinza volante de carvão mineral descrita anteriormente. A autora descreve ainda que, usualmente, solos arenosos com escassez de argila coloidal não reagem à cal. Logo, para a estabilização desses solos, quando a correção da granulometria não é possível ou quando a quantidade de cimento requerida é muito elevada (economicamente inviável), a adição de cinzas volantes pode tornar este solo arenoso reativo à cal. Neste caso, a cinza volante substitui a fração fina (argila) do solo.

O uso de cinza volante misturada com cal para estabilização de solos arenosos se iniciou na década de 40, em New Jersey (Estados Unidos), onde um trecho de uma auto-estrada foi executado com este tipo de mistura (Pinto, 1971 *apud* THOMÉ, 1994).

Em seus estudos, Kaniraj & Havanagi (1996) perceberam que, em misturas de solo-cinza volante-cal, à medida que o teor de cinza volante aumenta, ocorre a redução do peso específico máximo aparente seco e aumento da umidade ótima, reduzindo o peso específico real dos grãos das misturas e aumentando a porosidade e o índice de vazios.

Em 1999, Thomé pesquisou a viabilidade da utilização de misturas com solo residual arenoso de arenito Botucatu-cinza-cal de carbureto como camada de suporte para fundações superficiais e chegou à conclusão que a mistura ótima é 50% de solo 50% de cinza e 5% de cal. Após avaliar resistência, durabilidade, grau de lixiviação e solubilização, o autor considerou que a utilização destes subprodutos é adequada para a estabilização deste tipo de solo para fundações superficiais.

Já Ceratti (1979) e Pinto *et al.* (1983) estudaram, em relação à resistência, a aplicação de misturas compactadas de solo residual-CFA-cal como material de bases de pavimentos. Através dos resultados obtidos, o autor validou este tipo de estabilização para esse fim.

Segundo Rohde (2006) a Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC através do projeto CICASOL, iniciado em 1981 em parceria com o DAER-RS, analisou a viabilidade de misturas solo-cinza volante-cal hidratada com oito diferentes tipos de solos da região sul do Brasil para a utilização destas misturas como base de pavimentos. Chegou-se a conclusão, através da

construção de diversos trechos experimentais, que o tratamento do solo com cinza volante e cal resulta em um material rígido apto a exercer a função de base em rodovias de alto tráfego e cargas.

#### 2.3.4 Água necessária à mistura

A utilização de água potável é satisfatória para se obter os resultados desejados para se estabilizar quimicamente um solo por meio de misturas com cinza e cal. Desta forma, o volume de água a ser adicionado deve ser determinado pela compactação requerida, tomando-se extremo cuidado em misturas com cal virgem, as quais podem requerer maiores teores de água devido ao seu rápido processo de hidratação (INGLES e METCALF 1972; ANDRADE, 1999; SALDANHA, 2014).

De modo geral, a adição de água a mistura, gera o fenômeno conhecido como hidrólise, onde a molécula de cal é quebrada em íons (de cálcio ou de magnésio) e hidroxilas (QIAN *et al.* 2001). Esta reação será discutida com maiores detalhes no tópico a seguir.

### 2.4 REAÇÕES POZOLÂNICAS

Os primeiros indícios do uso de materiais pozolânicos datam de 2.000 a.C., na Ilha de Creta (Grécia), onde cerâmicas de argila calcinada foram utilizadas em argamassas (MEHTA, 1987 *apud* NOVAES, 2016). Seu emprego também foi evidenciado nas ruínas de obras do período romano, que suportam as intempéries climáticas até os dias atuais, comprovando a resistência e durabilidade do uso da pozolana como material cimentante (BAUER, 2008 *apud* NOVAES, 2016).

O termo pozolana faz referência à cidade de Pozzuoli, (Itália), local onde o emprego de cinza vulcânica na construção civil foi bastante difundido. Posteriormente, esta nomenclatura passou a incluir matérias de outras origens, mas que possuíam comportamento semelhante em presença de cal e água (KAEFER, 1998 *apud* NOVAES, 2016).

Devido ao aumento da produção de energia nas termelétricas e conseqüentemente geração de cinzas, entre os séculos XIX e XX, iniciaram-se diversos estudos sobre este material, resultando na criação do cimento Portland pozolânico de alta aceitação em todo o mundo, cimento este com propriedades superiores ao cimento sem a adição de cinza (DA SILVA, 1982).

As pozolanas podem ser divididas em naturais ou artificiais. As naturais são as de origem vulcânica (aproximadamente com 65% de SiO<sub>2</sub>) ou de origem sedimentar, como argilas, folhelhos calcinados, tufos vulcânicos e terras diatomáceas. Já as artificiais resultam de processos térmicos industriais, como a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Neste trabalho serão descritas apenas as reações pozolânicas referentes ao uso de cinza-volante.

Segundo Saldanha (2014), as cinzas volantes são formadas basicamente pela fração amorfa vítrea (natureza silicosa ou sílico-aluminosa) e pela fração cristalina (cristais de quartzo, mulita e hematita), sendo as reações pozolânicas, as reações químicas entre a fase amorfa do material pozolânico (cinza volante) com o hidróxido de cálcio (cal) na presença de umidade (MASSAZZA, 1998 *apud* NOVAES, 2016), como descrito a seguir:

Pozolana + Hidróxido de cálcio + água → Compostos hidratados (Equação 6)

Resultando na dissipação do hidróxido de cálcio em íons cálcio e hidroxila (Equação 7 e 8).

$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{++} + 2(\text{OH})^-$  (Equação 7)

$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca(OH)}^+ + \text{OH}^-$  (Equação 8)

Os cátions são então adsorvidos pelas superfícies das partículas de cinza volante, floculando a cinza e alterando sua granulometria (MASSAZZA, 1998 *apud* NOVAES, 2016). Em seguida, as hidroxilas quebram as ligações O-Al e O-Si da matriz vítrea anteriormente composta por óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), concentrando os íons SiO<sub>3</sub><sup>-2</sup> e AlO<sub>2</sub><sup>-</sup> (BERRY *et al.* 1994; FU *et al.* 2002; MALEK *et al.* 2005 *apud* SALDANHA, 2014).

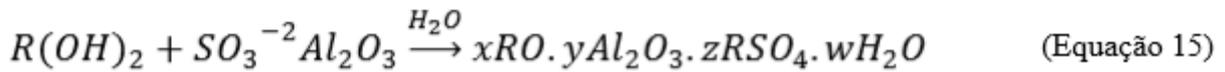
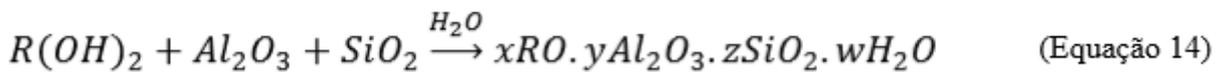
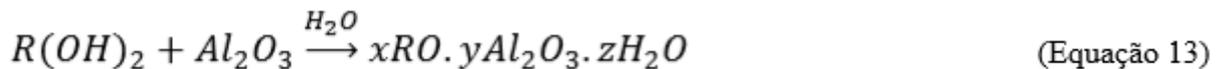
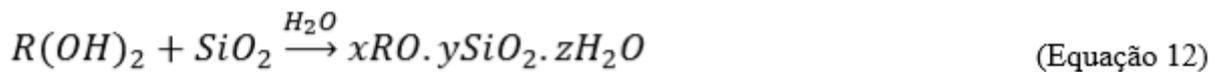
Brouwers e Van Eijk, (2003) descrevem a dissolução dos compostos amorfos da cinza volante, em pH superior a 12 (pH básico), por meios das Equações 9, 10 e 11.

$\text{SiO}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{SiO}_3^{-2} + \text{H}_2\text{O}$  (Equação 9)

$\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{OH})^- \rightarrow 2\text{AlO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$  (Equação 10)

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^3 + 6(\text{OH})^-$  (Equação 11)

Posteriormente às reações descritas acima, ocorrem as reações da cal com a sílica e alumina formando géis de silicato (CS-H), ainda ligantes fracos, que serão cristalizados em silicatos hidratados de cálcio que possuem ligações mais fortes (INGLES E METCALF, 1972). De acordo com Malek *et al.* (2005), os íons de alumínio formarão aluminato de cálcio hidratado ( $C_4AH_{13}$ ) que se converterá em katoita ( $C_3ASH_4$ ) e hidrogranada ( $C_3AH_6$ ). Nestas equações têm-se que: C=CaO; S=SiO<sub>2</sub>; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e H=H<sub>2</sub>O (utilizou-se aqui a mesma combinação de símbolos, C, S, A e H que a bibliografia internacionalmente consagrada). Minnick (1967) aponta os compostos resultantes das reações entre a cal e os componentes amorfos das cinzas volantes através das Equações 12, 13, 14 e 15.



Nas equações descritas anteriormente, R representa os cátions Ca<sup>+2</sup> ou Mg<sup>+2</sup>, combinados ou separados.

Os principais compostos cimentantes nas reações pozolânicas com cinza são membros da família da tobermorita (silicato de cálcio hidratado) e da etringita (sulfato de cálcio e alumínio hidratado), este último é nocivo por ser potencialmente expansivo. É válido considerar que caso o óxido de ferro esteja em sua fase vítrea, na cinza volante, é possível que haja reação com cátions de magnésio e cálcio, formando sulfo-aluminatos com teores de sulfato baixos (MINNICK, 1976).

Conforme Fraay *et al.* 1989 (*apud* Saldanha, 2014), para que ocorra uma solubilização próxima de 100% é necessário um pH superior a 13,3. A explicação para este valor é dada por Antihos & Tsimas, 2004 (*apud* Saldanha 2014), estes autores definiram que a velocidade de solubilização da estrutura amorfa é estável e lenta, pois o pH da solução saturada é equivalente a 12,6 quando a temperatura é 25°C, sendo que para uma velocidade de solubilização maior é requerido um pH de pelo menos 13,3. Vale ressaltar que, além da sílica, a alumina também tem

sua solubilidade aumentada para valores elevados de pH (Transportation Research Board, 1987 *apud* Saldanha, 2014).

Harty & Thompson, 1973 (*apud* Saldanha, 2014) relatam que um problema ao se utilizar a cal é a possibilidade de reação dos hidróxidos de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  da cal com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) existente no ar. Esta interação é denominada de carbonatação, sendo o produto destes reagentes os carbonatos, cimentos fracos que inviabilizam as reações pozolânicas.

## 2.5 PRINCIPAIS VARIÁVEIS INFLUENTES NAS MISTURAS CINZA VOLANTE-CAL

### 2.5.1 Cal

A cal pode ter seu desempenho afetado pelo seu tipo, produção comercial, granulometria e teor de material reativo (MINNICK, 1967, *apud* SALDANHA, 2014). Assim, a primeira consequência da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade do solo e melhoria na trabalhabilidade, seguida do ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES e METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987). Guimarães (1971, *apud* Silvani, 2013), afirma que a cal sempre altera favoravelmente certas propriedades dos solos, principalmente em relação a granulometria, expansão, plasticidade, contração, retração, resistência, densidade, trabalhabilidade, desintegração, compactação e permeabilidade. Baseados em estudos com solo arenoso-CFA-cal de carbureto, Consoli *et al.* (2001, *apud* Dalla Rosa, 2009) descobriram que, para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal desencadeia o aumento da resistência de pico e diminuição da deformação deste pico.

### 2.5.2 Moagem

Ravina (1980) observou uma relação linear entre a superfície específica da cinza volante de carvão mineral e sua atividade pozolânica (Figura 2.2b). Por outro lado, para a porcentagem retida pela peneira 45  $\mu\text{m}$ , a relação é linear apenas na parte intermediária e não-linear quando a quantidade retida era muito alta ou baixa (Figura 2.2a). O autor afirma que menores partículas de cinza equivalem a maiores superfícies de contato entre grãos, ou seja, maior resistência, devendo controlar, além da superfície específica, a granulometria e porcentagem de material passante para se atingir uma atividade pozolânica ideal da mistura (ANDRADE, 1991).

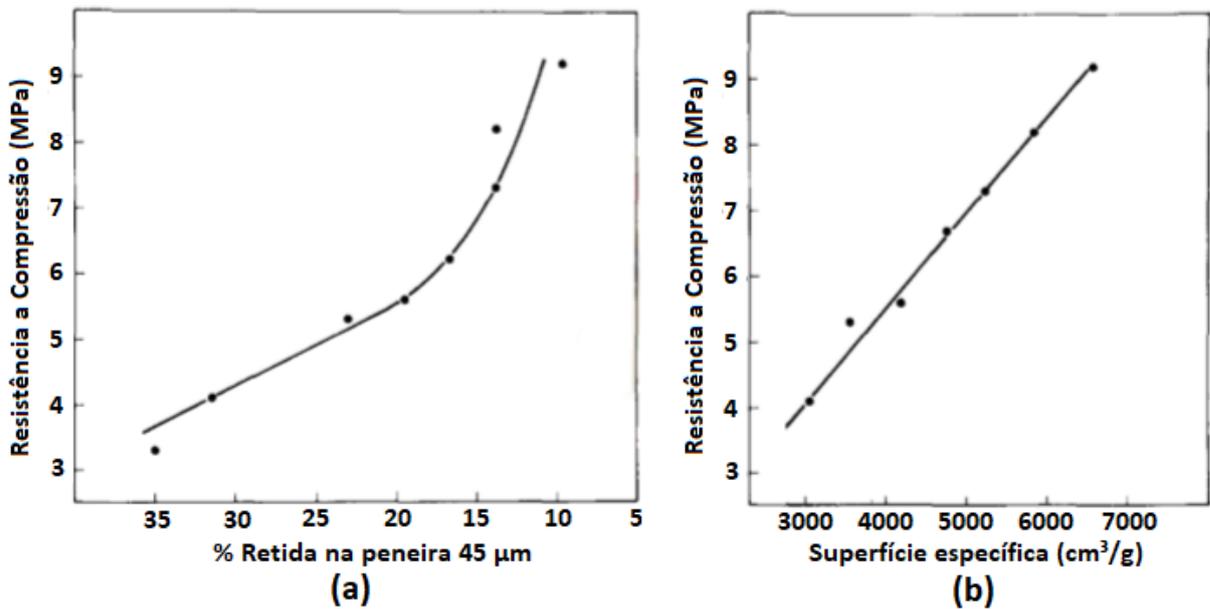


Figura 2.2 – Resistência à compressão em relação a (a) porcentagem retida na peneira 45 µm e (b) superfície específica (adaptado de RAVINA, 1980)

De acordo com De Paula (2016), o tempo de moagem da cinza volante influencia na resistência à compressão simples da mistura compactada devido ao aumento de sua superfície específica, elevando a quantidade de silicatos e aluminatos disponíveis para que ocorra reações pozolânicas com a cal. Além disso, a autora observou que a moagem da cinza volante proporcionou ganhos significativos de resistência até 2h de moagem, sendo que 4h de moagem não proporcionaram ganhos de  $q_u$  para 7 dias de cura a 23°C.

### 2.5.3 Porosidade, Densidade e Compactação

Através de suas pesquisas, Ingles e Metcalf (1972) observaram que, com o aumento da densidade, a resistência aumenta e a condutividade hidráulica diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois esta começa a aumentar novamente.

O aumento da compactação diminui os vazios da estrutura da mistura, tornando-a menos suscetível à variação de volume devido ao aumento do contato entre grãos. Inúmeros autores observaram que misturas solo-cal com uma mesma energia de compactação apresentam peso específico aparente máximo ( $\gamma_d$ ) próximo ao do solo natural. No entanto, à medida que o teor de cal aumenta, o  $\gamma_d$  continua diminuindo e a umidade ótima continua aumentando (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987). O fenômeno anteriormente descrito

ocorre devido a flocculação das partículas de solo que, em contato com a cal, aumentam a resistência da estrutura em relação aos esforços de compactação, resultando em um índice de vazios mais elevado e reduzindo o  $\gamma_d$  do solo. Porém, desta forma mais água será necessária para preencher os vazios, resultando em uma umidade ótima maior e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.* 1998 *apud* LOPES JUNIOR 2007).

Kennedy *et al.* (1987, *apud* BHATTACHARJA *et al.* 2003) analisaram a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) de solos argilosos com IP de 36, compactados na energia de Proctor normal e modificada e concluíram que aumento do esforço de compactação quadriplica  $q_u$ . Já Saldanha (2014) afirma que grande parte deste aumento ocorre devido a um maior número de cimentações que ocorrem com o maior número de contatos entre partículas devido ao aumento da energia de compactação. Outros estudos com solos graníticos com diferentes matrizes, concluem que solos mais densos possuem maiores resistências (CRISTELO, 2001).

Silvani (2013) observou que, em misturas de areia-cinza volante-cal, maiores valores de resistência à tração por compressão diametral e compressão simples podem ser alcançados pela diminuição da porosidade, sendo este aumento exponencial, como explicitado nas Figuras 2.3 e 2.4.

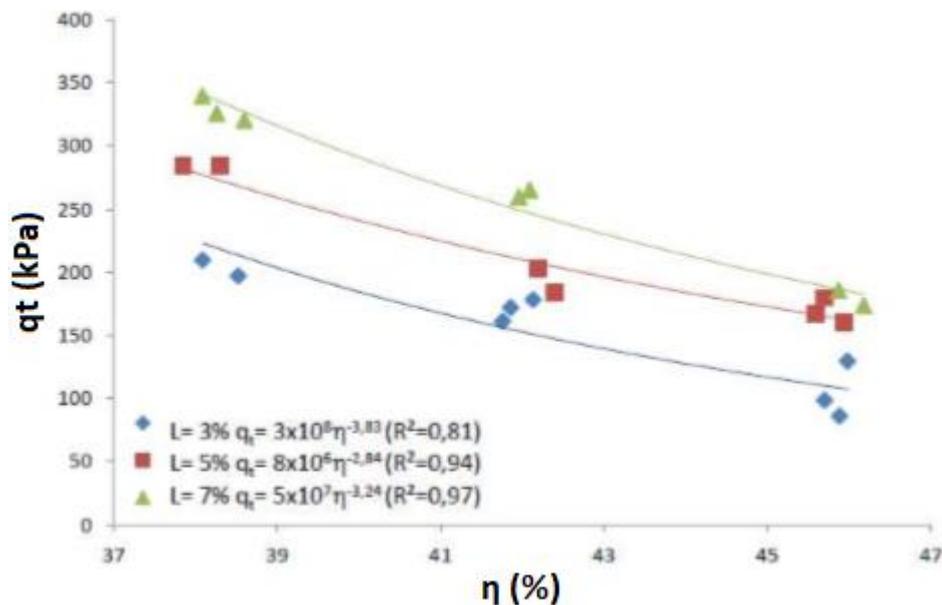


Figura 2.3 – Variação da resistência à compressão diametral em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C (adaptado de SILVANI, 2013 *apud* NOVAES, 2016)

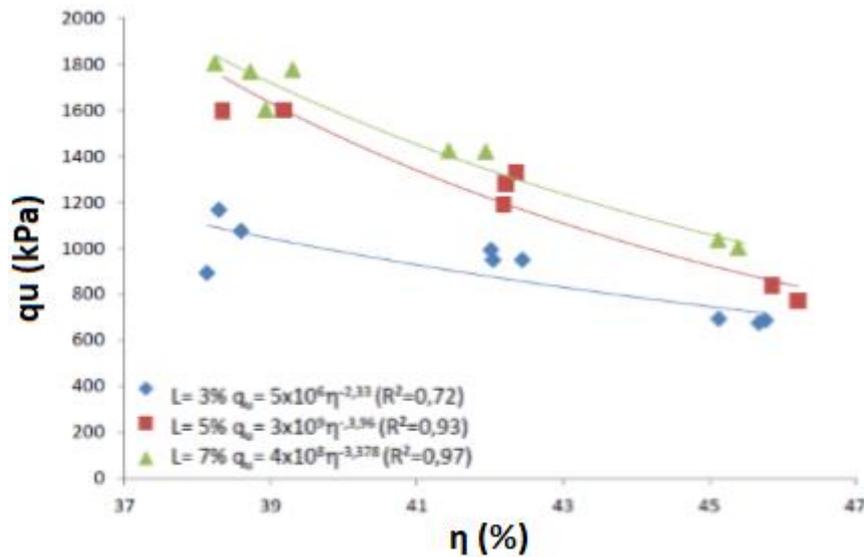


Figura 2.4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras curadas a 20°C (adaptado de SILVANI, 2013 apud NOVAES, 2016)

Baseado em estudos com blocos de solo-cinza-cal com diferentes esforços de compactação, Rushad *et al.* (2011) observaram que a resistência à compressão simples para os blocos compactados com um esforço de 10 kN obtiveram resultados quatro vezes inferiores ( $q_u = 1$  MPa) quando comparados aos moldados com esforço de 50 kN ( $q_u = 4$  MPa).

Consoli *et al.* (2001) salientam que a compactação deve ser realizada cerca de 2% no ramo seco do teor de umidade ótimo obtido no ensaio de Proctor com energia normal.

#### 2.5.4 Tempo de Cura

Ingles e Metcalf (1972) exploraram a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos (areia, argilas e pedregulho), concluindo que a maior taxa de ganho de resistência ocorre para pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.5.

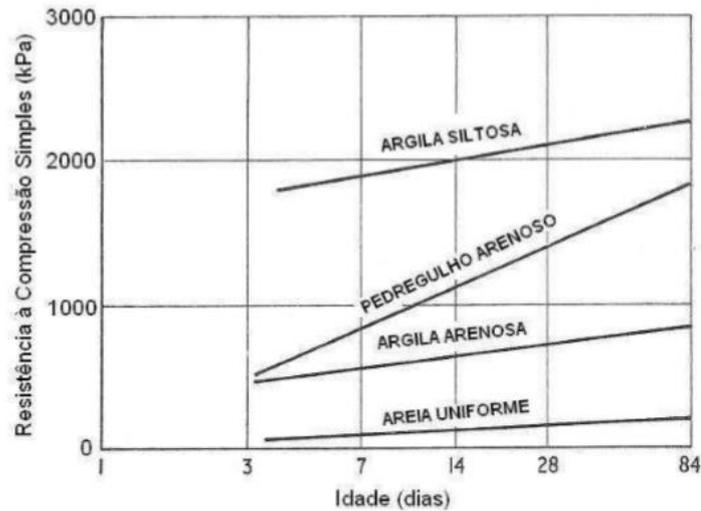


Figura 2.5 – Resistência à compressão simples x tempo (INGLES E METCALF, 1972)

Já Lopes Junior (2007) observou que, para misturas com arenito mais rocha basáltica e cal, a resistência do material é 50% maior para um período de cura de 90 dias do que para 28 dias, independentemente da quantidade de cal e da relação volume de vazios/volume de cal. Esta ocorrência se deve ao fato das reações pozolânicas serem lentas, estendendo-se por anos e só se iniciando após certo tempo da compactação.

Através da análise do ganho de resistência de misturas solo-cinza volante-cal para tempos de cura de 28, 60 e 90 dias, Dalla Rosa (2009) conclui que o efeito do tempo de cura sobre o ganho de resistência à compressão simples não é constante, mas exponencial, como demonstrado na Figura 2.6.

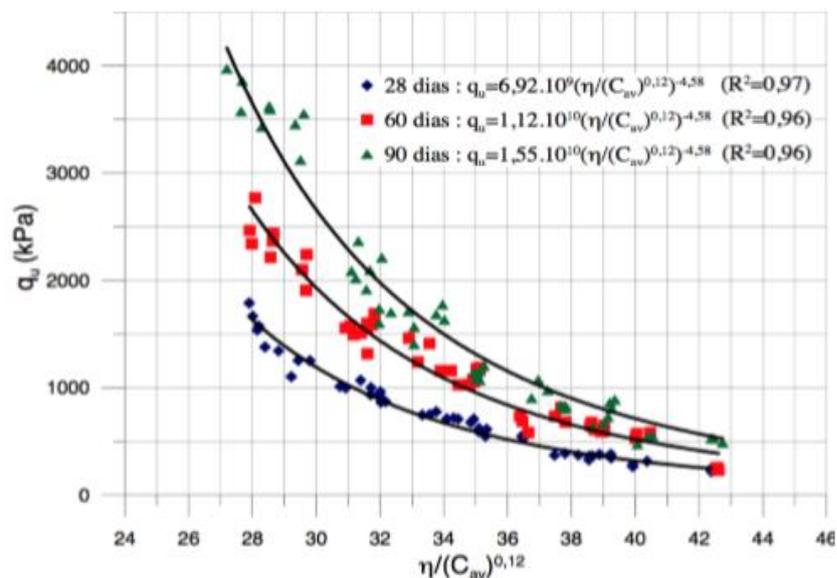


Figura 2.6 – Efeito do tempo de cura (28, 60 e 90 dias) nas amostras com 12,5% de cinza (DALLA ROSA, 2009)

Thomé (1994) afirma que em certos casos a resistência pode não apresentar variações significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. Isso pode ocorrer por diversos fatores, como falta de água a mistura, temperatura de cura baixa, teor de cal insuficiente e presença de matéria orgânica.

### 2.5.5 Temperatura de Cura

Como as reações pozolânicas são reações endotérmicas, a taxa de crescimento da resistência será maior quanto maior a temperatura de cura. Assim, o aumento da temperatura promove um acréscimo da velocidade das reações pozolânicas (SALDANHA, 2014).

Thompson (1966) observou a resistência em corpos de prova curados por horas a 48,9 °C e corpos de prova curados por 30 dias a 21,1 °C e os valores de resistência obtidos foram os mesmos. Mateos (1964) e Arabi e Wild (1989) encontraram resultados semelhantes utilizando diferentes tipos de solo tratados com cal e cinza volante. Já Dumbleton and Ross (1960, *apud* Bhattacharja *et al.* 2003) encontraram uma reação linear entre o aumento da temperatura de cura e o aumento da resistência à compressão simples para misturas de areia-cinza volante-cal. Dalla Rosa e Thomé (2002) observaram que temperaturas muito baixas limitam as reações pozolânicas, no caso argilas muito plásticas com adição de cal e resíduo da rolagem de pedras preciosas curadas a temperaturas de 5°C, 20°C, 30°C e 40°C (Figura 2.7). Outros autores obtiveram resultados semelhantes com outros tipos de solos (MARCIALIS *et al.* 1983; ROJAS e CABRERA, 2001, SERRAFANI, 2002; MORSY, 2005; AL-MUKHTAR *et al.* 2010; CRONST, 2010).

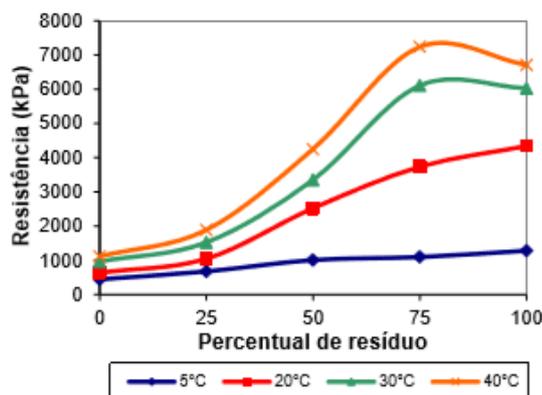


Figura 2.7 – Resistência à compressão simples de resíduos de pedras preciosas e cal, para diferentes temperaturas de cura (DALLA ROSA e THOMÉ, 2002)

Consoli *et al.* (2001) alegam que embora a resistência à compressão simples de misturas solo-cinza volante-cal, com temperatura de cura de 22°C, seja satisfatória aos 90 dias de cura, sua aplicação fica comprometida, uma vez que este tempo é considerado inviável para a maioria dos projetos de engenharia. Neste cenário, é possível perceber a viabilidade de se utilizar temperaturas mais elevadas de cura, diminuindo o tempo necessário para se atingir a resistência necessária, já que várias regiões tropicais e subtropicais apresentam temperaturas bastantes altas durante grande parte do ano.

Por meio de ensaios de resistência à compressão simples e de tração na compressão diametral em misturas com peso específico aparente seco de 14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup>; 3, 5 e 7% de cal; e 25% de cinza volante, curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias, Silvani (2013), analisou a influência da temperatura para uma mistura de areia de Osório-cinza volante-cal. A pesquisadora concluiu que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade. Observou-se que a resistência à tração na compressão diametral amplia-se 1,6 vezes quando a temperatura de cura passa de 20°C para 27°C e 1,4 vezes quando a temperatura de cura é elevada de 27°C para 35°C, porém não há acréscimo relevante quando a temperatura varia de 35°C para 50°C. O comportamento da resistência à compressão simples é diferente, pois quando a temperatura de cura é elevada de 20°C para 27°C há um aumento de cerca de 2 vezes. No entanto, a partir desta temperatura não há crescimento significativo da resistência à compressão simples, isto se deve, possivelmente, à extinção das reações entre a cal e a cinza volante.

Ao estudar o efeito de altas temperaturas de cura (22, 40, 60 e 80°C) para 1, 3 e 7 dias de cura, em misturas de cinza volante com cal de carbureto, Saldanha (2014) concluiu que, para o período de cura de 1 dia, a taxa de crescimento da resistência normalizada pelo índice porosidade/teor volumétrico de cal é linear para todas as temperaturas. Porém, a linearidade é observada até 50°C para 7 dias de cura e 60°C para 3 dias de cura. Após este ponto, é cessado o ganho de resistência pelo aumento da temperatura de cura. Tal fenômeno é indicado na Figura 2.8. O pesquisador afirma que há um limite de capacidade de aceleração das reações pozolânicas através do aumento da temperatura, onde a energia disponível é excedente e não altera a cinética das reações pozolânicas, o que não significa que as reações tenham cessado, uma vez que o tempo de cura continua aumentando a resistência à compressão.

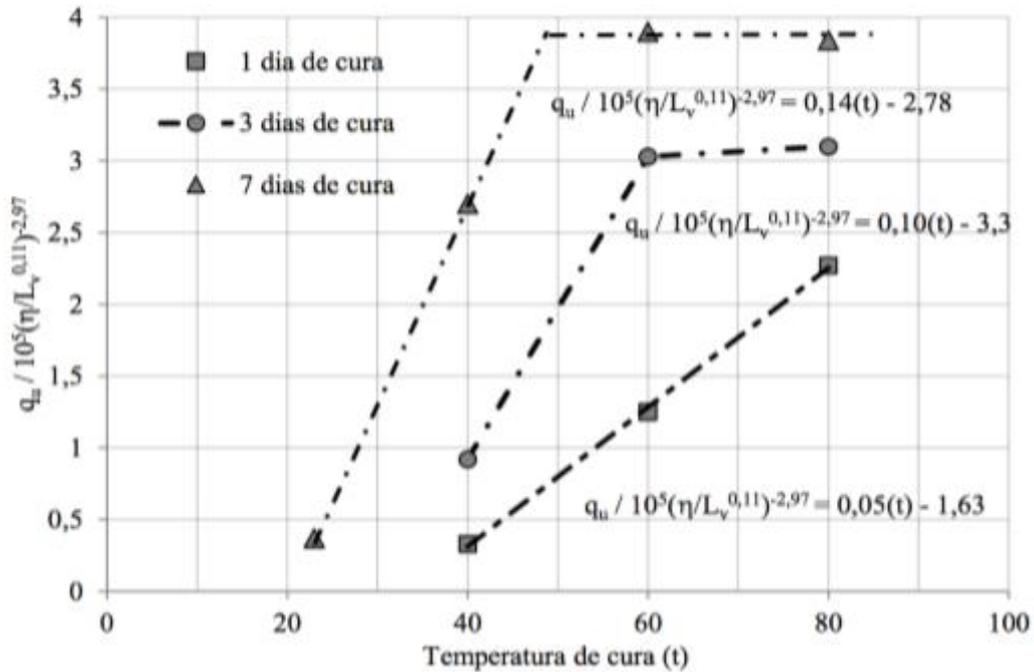


Figura 2.8 – Comportamento da resistência da mistura cinza volante e cal, em relação à temperatura de cura (adaptado de SALDANHA, 2014)

## 2.6 ÍNDICE POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL ( $\eta/L_{iv}$ )

A primeira tentativa de se conciliar o volume de vazios de um material e o teor volumétrico de um agente cimentante surgiu pela necessidade de se obter um método de dosagem para misturas solo-agente cimentante aplicáveis na prática da engenharia, pois no campo não há como se garantir o preenchimento de todos os vazios por água. Como pode ser visto na Equação 16, Larnach (1960 apud FOPPA, 2005) exhibe uma expressão, aplicada a argamassas. Tendo por base a Figura 2.9, é possível perceber que esta equação possui um bom ajuste para os corpos de prova curados por 7 dias e rompidos à compressão simples.

$$\frac{V_V}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar+água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (\text{Equação 16})$$

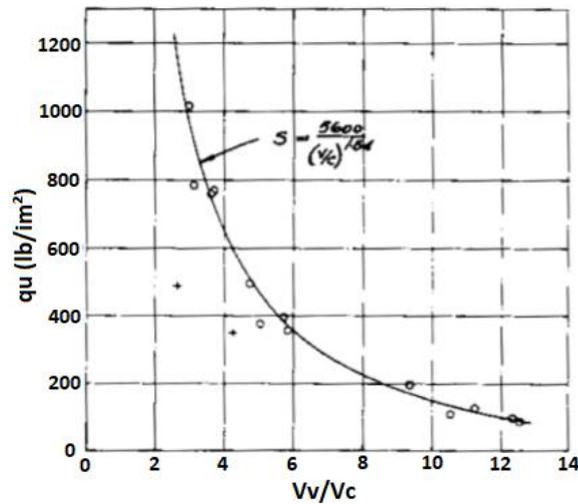


Figura 2.9 – Volume de vazios/teor de cimento x resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960 *apud* FOPPA, 2005)

Foppa (2005), através de análises criteriosas sobre a equação descrita por Larnach (1960) aplicadas em solo residual de arenito Botucatu artificialmente cimentados com cimento Portland, concluiu que a relação vazios/cimento indica que, para uma determinada variação no volume de vazios, uma variação proporcional do volume de cimento ocorrerá, o que não é de fato real. Devido a este fato descrito, o autor sugere uma potência de valor 0,28 sobre o volume de material cimentante afim de ajustar a relação, utilizando também a porosidade em substituição ao volume de vazios (Figura 2.10).

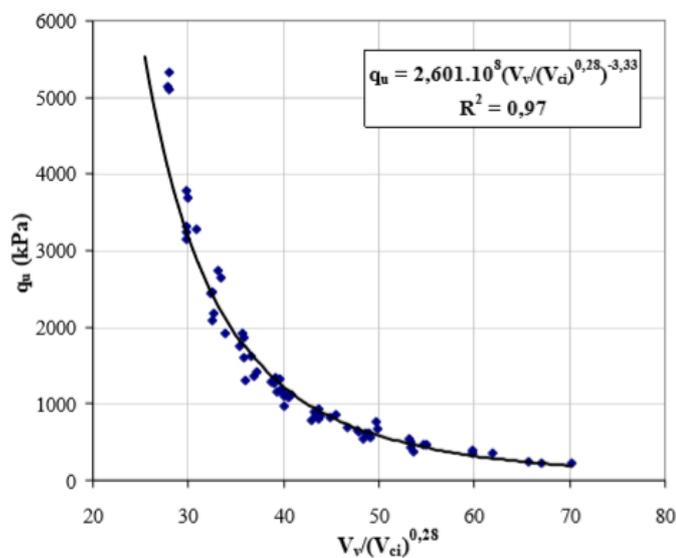


Figura 2.10 – Volume de vazios/teor de cimento ajustado x resistência à compressão simples (FOPPA, 2005)

Diversos pesquisadores buscaram aplicar potências de certo valor para ajustar a relação entre volume de vazios e o teor volumétrico de material cimentante em misturas compostas por material pozzolânico e cal (LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI *et al.* 2007; RIGHETTO, 2008, DALLA ROSA, 2009; SILVANI, 2013; SALDANHA, 2014).

Lopes Junior (2007) aplicou a relação porosidade/teor volumétrico de material cimentante em solo arenoso com resíduo de britagem tratado com cal (2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%), em comparação com misturas de mesmo solo tratado com cimento (2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%). Foram obtidos pelo autor, para as amostras estabilizadas com cal com 28 dias de cura, um expoente de  $L_{iv}$  de 0,06 e, para as amostras com cimento curadas por 7 dias, um expoente de  $C_{iv}$  de 0,35.

Visando verificar o comportamento tensão-deformação de misturas com solo residual de arenito Botucatu e cimento Portland, tendo por base a relação vazios/cimento, Consoli *et al.* (2007) realizaram ensaios triaxiais não drenados com tensões de confinamento de 20kPa. Os autores concluíram que a relação vazios/cimento permite prever a tensão desvio dos ensaios triaxiais não-drenados e que a curva de ajuste dos ensaios triaxiais fica um pouco acima da curva de ajuste dos ensaios de compressão simples devido ao confinamento (Figura 2.11).

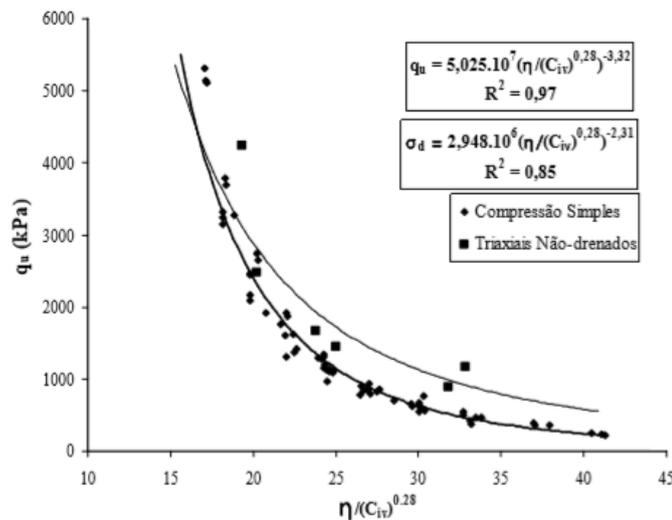


Figura 2.11 – Resultados de compressão simples e triaxiais tendo por base a relação ajustada de  $\eta/C_{iv}$  (Consoli *et al.* 2007)

Já Dalla Rosa (2009) estabilizou um solo residual de arenito Botucatu com diversas porcentagens de cinza volante e cal para com diferentes tempos de cura. Tal pesquisadora

encontrou um expoente de ajuste para a relação  $\eta/C_{av}$  igual a 0,12 para todas as amostras analisadas. A Figura 2.12 indica os resultados obtidos para a amostra com 25% de CFA, curada a 28 dias.

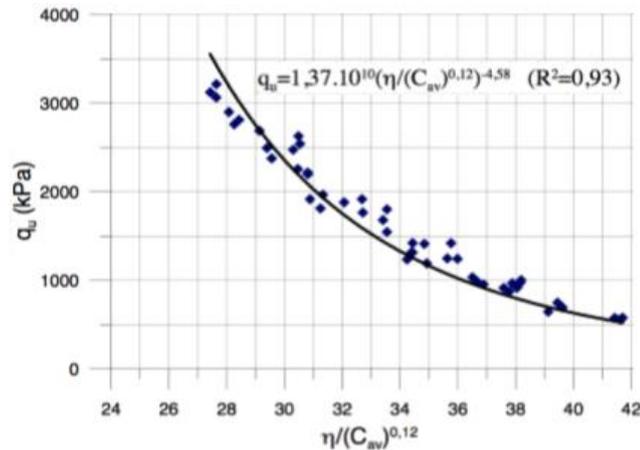


Figura 2.12 – Resultados de compressão simples de amostras com 25% de CFA e 28 dias de cura em função da relação  $\eta/C_{av}$  (adaptado de DALLA ROSA, 2009)

Analisando os efeitos de diferentes temperaturas de cura em relação ao expoente de ajuste do índice anteriormente descrito, em misturas de areia-CFA-cal, Silvani (2013) conclui que um coeficiente de 0,3 demonstrou-se adequado na previsão da resistência à tração (Figura 2.13).

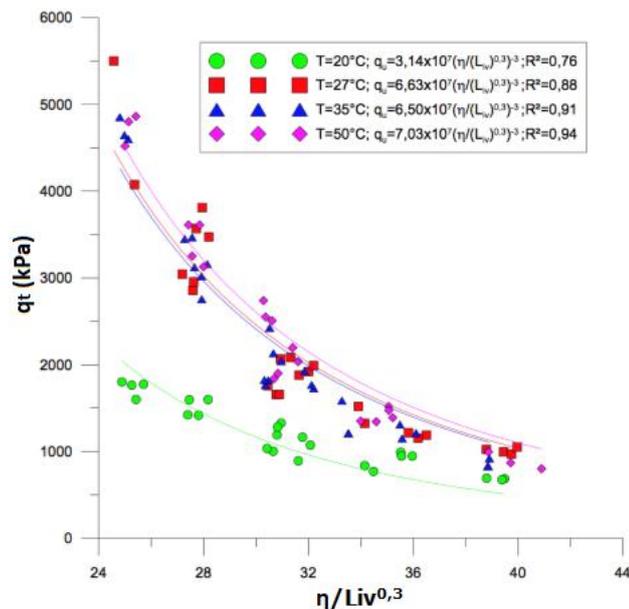


Figura 2.13 – Resistência à tração  $\times \eta/L_{iv}^{0,3}$  para misturas de areia-CFA-cal curadas a 20, 27, 35 e 50°C (adaptado de SILVANI, 2013)

Já Saldanha (2014), analisando o desempenho de misturas de cinza volante com cal de carbureto com cura acelerada submetidas a diversas temperaturas de cura, obteve um expoente de ajuste de 0,11 para todas as combinações deste tipo de mistura (Figura 2.14).

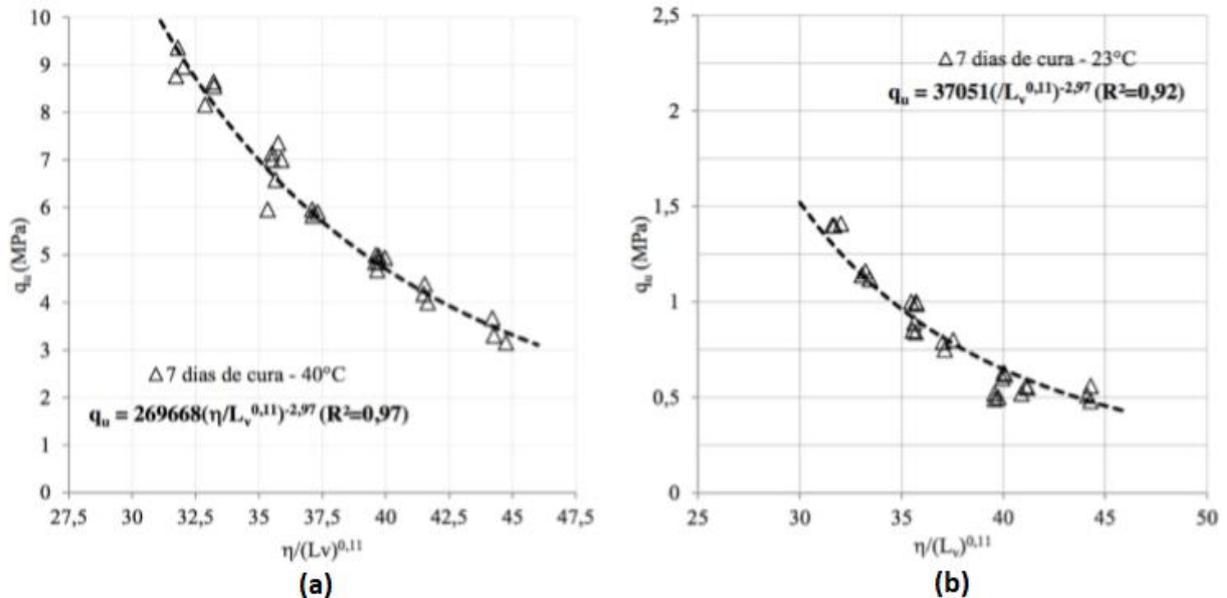


Figura 2.14 – Resistência à compressão simples x  $\eta/L_{iv}^{0,11}$  para misturas de CFA-cal curadas a 7 dias com (a) 40 °C e (b) 23°C (adaptado de SALDANHA, 2014)

## 2.7 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS CINZA-CAL

### 2.7.1 Resistência

A ocorrência de cargas de tração em pavimentos é comum devido a variações térmicas (TRB, 1987; DALLA ROSA, 2009). Thompson (1975, *apud* Núñez, 1991) e Ceratti (1979) constataram que a relação da resistência à tração pela resistência à compressão simples de misturas solo-cal varia de 0,10 a 0,15. Já Consoli *et al.* (2012), ao comparar a resistência à tração com os resultados de resistência à compressão simples de Dalla Rosa (2009), constatou que os valores de resistência à tração equivalem a 15% dos resultados de resistência à compressão simples.

Silvani (2013) observou que para misturas areia-CFA-cal a relação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples é equivalente a 0,18 para uma temperatura de cura de 20°C (Figura 2.15). Porém esta relação varia com a variação da

temperatura, sendo 0,14 para as amostras curadas a 27°C; 0,20 para uma temperatura de 35°C; e 0,19 para temperatura uma de 50°C.

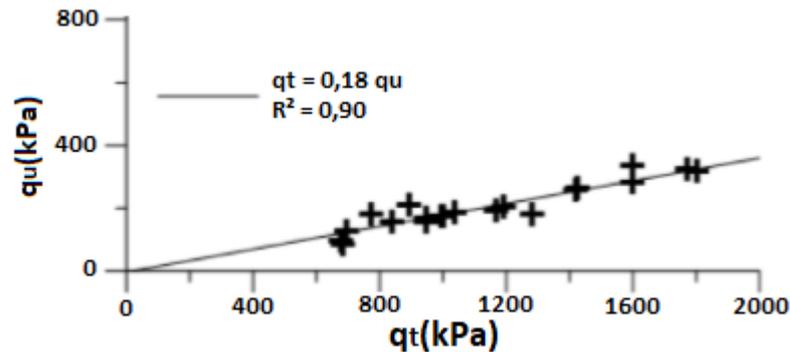


Figura 2.15 – Resistência à tração por compressão diametral x resistência à compressão simples para 20°C durante a cura (adaptado de SILVANI, 2013)

De acordo com Ingles e Metcalf (1972), a resistência à compressão simples tende a aumentar linearmente com a adição de cal. Porém, a partir de um teor específico para cada tipo de solo tratado, o acréscimo de resistência reduz (Figura 2.16). No entanto, Dalla Rosa (2009) demonstra que com maiores períodos de cura o aumento do teor de cal aumenta a resistência de forma linear. Os resultados apresentados por Ingles e Metcalf (1972) divergem dos resultados de Dalla Rosa (2009), provavelmente, pelos baixos tempos de cura.

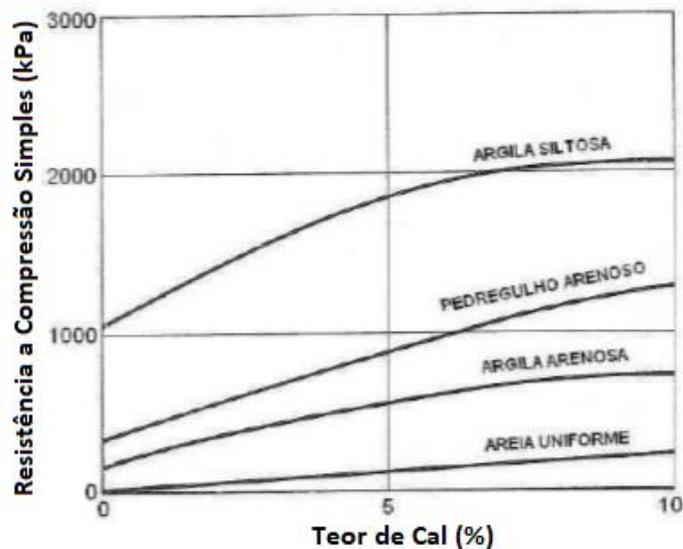


Figura 2.16 – Efeito do teor de cal na resistência à compressão simples de diversos solos, com cura de 7 dias (adaptado de INGLES E METCALF, 1972, *apud* BENETTI, 2015)

A análise das características de tensão-deformação é essencial no estudo do comportamento de uma estrutura de pavimento ou fundações superficiais assentes sobre camadas de solos melhorados. Estes tipos de estruturas possuem um comportamento inicialmente rígido, aparentemente linear até um ponto de plastificação bem definido, e, além deste ponto, o solo sofre aumento nas deformações plásticas até a ruptura. A ruptura de solos cimentados apresenta marcante fragilidade na formação de planos de ruptura. Tal fragilidade aumenta com o acréscimo da quantidade de agente estabilizante e diminui com o aumento da tensão efetiva média (SCHNAID *et al.* 2001).

Akoto & Singh (1986) afirmam que, com o aumento de teor de cal em solos finos e reativos, a tensão de ruptura aumenta significativamente, enquanto que a deformação para ruptura diminui, sendo as tensões de tração elevadas e os corpos de prova se deformam notavelmente antes de romperem, no caso de laterita estabilizada com cal. Já Thompson (1966) afirma que o estudo da curva tensão-deformação revela o comportamento frágil das misturas solo-cal.

Thomé (1994), através de seus estudos com solo Gley Húmico, observou que o módulo secante, entre a origem e 75% da tensão de ruptura, aumenta com o teor de cal. Este aumento chegou a 2,63 vezes para as amostras curadas a 7 dias, com 9% de cal, quando comparado ao solo natural.

Consoli *et al.* (2001), através de ensaios triaxiais com misturas de silte-arenoso e cal de carbureto, verificaram um comportamento frágil na ruptura e que a deformação axial nesta etapa diminui com a cimentação e com o aumento da compactação, sendo que o módulo secante decresce de forma acentuada com o aumento das deformações axiais.

Posteriormente, Consoli *et al.* (2003), analisando solos arenosos tratados com 7% de cimento Portland e 0,5 % de fibras de polipropileno, observaram significativa melhora da coesão e do módulo de elasticidade, tanto para as misturas só com cimento, quanto para as misturas com cimento e fibras. Além disso, tendo por base os ensaios triaxiais realizados, foi possível perceber um comportamento marcadamente frágil para as amostras de areia-cimento e comportamento mais dúctil nas amostras de areia-cimento-fibra, ou seja, com pequena queda de resistência depois de atingido o pico.

## 2.7.2 Durabilidade

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de um determinado material de manter sua integridade estrutural nas condições as quais é submetido. No caso de materiais estabilizados pozolanicamente aplicados como base e sub-base de pavimentos, as condições de exposição que desestruturam a integridade do material são basicamente a ação de cargas repetidas de tráfego (fadiga) e variações de umidade e temperatura (MARCON 1977, *apud* KANAZAWA, 2015).

Dentre os métodos de avaliação de durabilidade estão: perda de peso por abrasão, absorção de água, velocidade de propagação de pulsos, variação de volume e medidas de resistência. No caso do solo-cimento, a avaliação da durabilidade por perda de peso com escovagens friccionais é realizada tendo por base normas para perdas máximas em ciclos de molhagem e secagem em função do tipo de solo. Entretanto, não há critérios específicos de avaliação por norma de durabilidade com ciclos de molhagem e secagem e nem durabilidade com escovagens para misturas solo-CFA-cinza.

Mateos (1961, *apud* Kanazawa 2015), Robnett e Thompson (1969, *apud* Kanazawa 2015) recomendam uma razão mínima de 80% da resistência de corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, gelo e degelo ou vácuo-saturação, em relação à resistência de corpos de prova curados normalmente. Já Herrin e Mitchell (1961) recomendam um teor mínimo de cal de 5%, mesmo que teores menores possam produzir as resistências especificadas. Os autores ainda afirmam que a durabilidade aumenta também com o tempo de cura e com a energia de compactação.

Tendo por base que prolongados períodos de exposição à água produzem pouco efeito nocivo à durabilidade, resultando em menores perdas de massa e resistência (TRB, 1987), Kanazawa (2015) analisou a durabilidade de solos dispersivos estabilizados com cal após ciclos de molhagem e secagem. Tal pesquisador observou que, para o caso de misturas com mesmo peso específico aparente seco e mesmo teor de cal, as perdas de massa decrescem com o aumento do tempo de cura, não existindo uma diferença apreciável entre as perdas de massa após 28 e 60 dias, como pode ser visto na Figura 2.17.

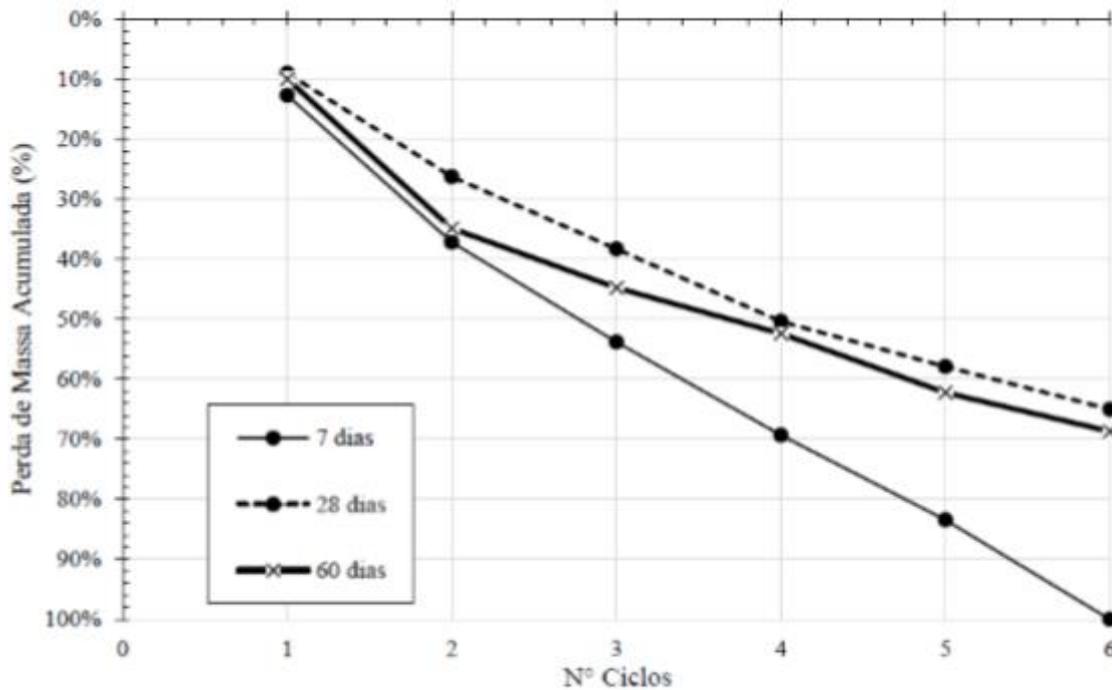


Figura 2.17 – Perda de Massa acumulada x ciclos de molhagem e secagem – Misturas de solo e 5% de cal, com  $\gamma_d$  de 16,0 kN/m<sup>3</sup>, para 7, 14, 28 e 60 dias de cura (KANAZAWA, 2015)

Em 1952, Whitehurst e Yoder relataram que a adição de cal aumenta acentuadamente a durabilidade de solos submetidos a ciclos de congelamento e degelo. Em 1953, Ardamen (*apud* Núñez, 2007) sugeriu que a máxima durabilidade para misturas solo-cal pode ser obtida por meio da compactação a altas densidades e baixos teores de umidade.

Parker (2008) observou que ciclos de congelamento- degelo são mais severos que ciclos de molhagem e secagem (por saturação a vácuo) para misturas de argila ou areia tratadas com cinza volante-cal ou cimento. O autor também sugere que misturas com resistência à compressão simples inferiores a, aproximadamente, 1,38 MPa após 7 dias de cura não sobrevivem a 12 ciclos de congelamento- degelo.

Após ciclos de congelamento- degelo ou molhagem-secagem, Parker (2008) afirma que a estabilização de solos (argila ou areia) com CFA-cal apresentam maiores valores de resistência à compressão simples e menores perdas de massa do que aqueles tratados apenas com cal, cinza volante ou cimento Portland (PARKER, 2008). A Figura 2.18 exhibe os corpos de prova ensaiados por este pesquisador após ciclos de congelamento e degelo para misturas de areia-20% CFA-5% cal.

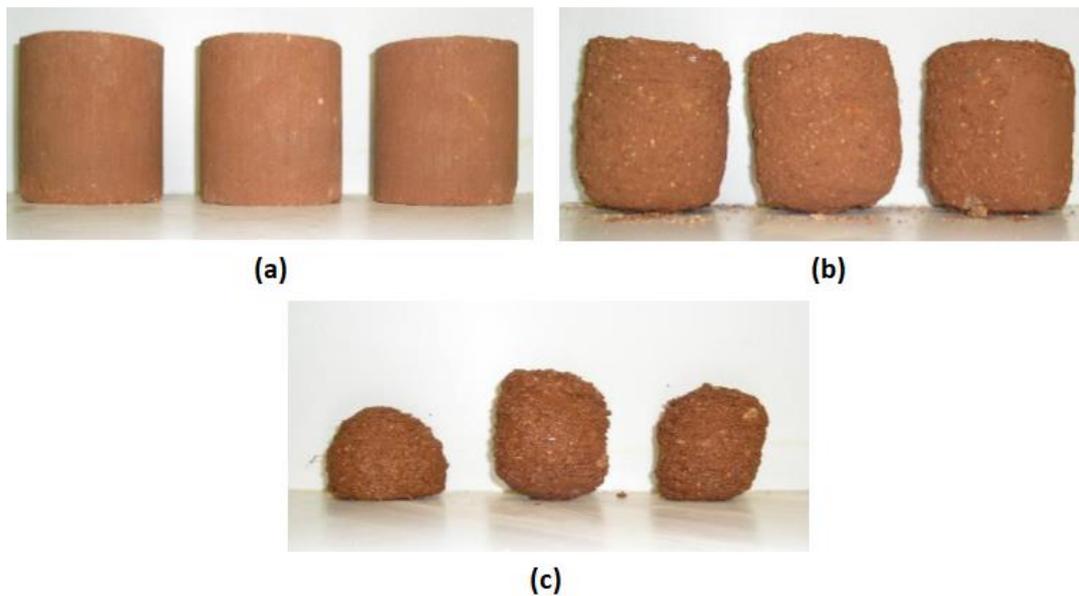


Figura 2.18 – Corpos de prova de areia-20% CFA-5% cal após (a) 0, (b) 6 e (c) 12 ciclos de congelamento e degelo (PARKER, 2008)

### 2.7.3 Rigidez Inicial

O aumento da rigidez inicial em relação às pequenas deformações é a consequência mais pronunciada em solos cimentados (CLOUGHT *et al.* 1981; CHANG e WOODS, 1992; HIGH e JARDINE, 1993; TATSUOKA *et al.* 1999; SCHNAID *et al.* 2001; CONSOLI *et al.* 2010).

Lopes Junior (2011) verificou que a adição de cal em solo residual de arenito Botucatu, mesmo em pequenas quantidades, promove o aumento substancial da rigidez inicial, sendo que o módulo cisalhante tende a aumentar não linearmente com o aumento do teor de cal. Além disso, a redução na porosidade provoca um aumento considerável da rigidez.

Em 2011, Galaa *et al.* compararam misturas de solo-cimento submersos e não submersos em água. Os autores observaram que a rigidez inicial aumentou para ambos os conjuntos de amostras, no entanto o aumento foi maior para os espécimes que não foram imersas em água.

Tendo por base diferentes tempos de cura, Fonini (2012) afirma que o aumento do tempo de cura proporcionou o aumento das medidas de rigidez inicial de amostras de solo-cimento. Já Dalla Rosa (2013) para solos siltosos estabilizados com cal, observou que a rigidez inicial aumenta, linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da porosidade.

## 2.8 FRESADO (RAP)

De acordo com Bonfim (2011), o termo fresagem faz referência ao processo de corte de uma ou mais camadas de determinado pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, geralmente utilizado na restauração de pavimentos. O estado final de um pavimento após sua fresagem pode ser visto na Figura 2.19.

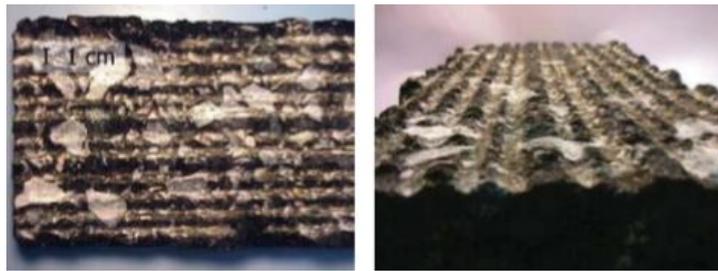


Figura 2.19 – Superfície de asfalto após o procedimento de fresagem (BONFIM, 2011)

Até a década de 70, todo o material da pista era extraído por escarificação. No entanto, a partir desta década, com a crise do petróleo e a escassez de materiais asfálticos, optou-se pelo processo de fresagem de pavimentos deteriorados como meio de se restaurar tais camadas (BONFIM 2011).

### 2.8.1 Classificação

Pode se dividir a técnica em relação às espessuras de corte: superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial é aplicada apenas para correção de defeitos superficiais da pista, sendo opcional posterior recapeamento do pavimento, pois a textura resultante garante rolamento de forma segura. A fresagem rasa atinge camadas superiores, em torno de 5 cm de profundidade. Já a profunda atinge camadas de ligação, base e sub-base, visando alterar a estrutura da pista (BONFIM, 2011).

Além deste tipo de classificação, Bonfim (2011) afirma que a técnica pode ser dividida em relação à temperatura da fresagem, realizada a frio ou a quente. Na fresagem a frio (temperatura ambiente), ocorre quebra de parte dos agregados, havendo alteração da curva granulométrica do material. Já na fresagem a quente, o revestimento é pré-aquecido, diminuindo a resistência ao corte, preservando a integridade do agregado e conservando sua curva granulométrica original.

## 2.8.2 Equipamento Utilizado

No Brasil existem inúmeros tipos de modelos e tamanhos de máquinas de fresagem. Abaixo serão descritas as características gerais que compreendem todos os modelos. Bonfim (2011) subdivide os equipamentos de acordo com seu tamanho. As máquinas de pequeno porte possuem cilindro com largura entre 300 a 600 mm, sendo utilizadas na execução de pequenas intervenções em pontos localizados como remendos e acabamentos ao redor de tampões de ferro (Figura 2.20).



Figura 2.20 – Fresadora de pequeno porte (BONFIM, 2011)

As máquinas de porte médio possuem cilindro fresador de largura entre 100 a 1500 mm, podendo ser usada tanto em pequenas quanto grandes áreas. Geralmente possuem uma correia transportadora para o carregamento de material fresado em caminhões (Figura 2.21).



Figura 2.21 – Fresadora de médio porte (BONFIM, 2011)

Já os equipamentos de grande porte possuem cilindro fresador de 2000 mm a 2200 mm de largura. Seu uso ocorre em grandes áreas de fresagem (Figura 2.22).



Figura 2.22 – Fresadora de grande porte (BONFIM, 2011)

Todos os equipamentos anteriormente descritos possuem um cilindro fresador que nada mais é que um tambor rígido construído em aço especial, com dentes de corte fixos em forma de “V” para conduzir o material fresado para dentro do cilindro, que gira em alta rotação (Figura 2.23). É importante ressaltar que a direção de giro do cilindro, pode alterar a granulometria do material resultante, mas em geral resulta em material de dimensões menores, logo é desfavorável para o corte em grandes espessuras do pavimento (BONFIM, 2011).



Figura 2.23 – Cilindro fresador do modelo W1900 com troca rápida (BONFIM, 2011)

Os dentes de corte fixos no cilindro são forjados em aço com pontas de material mais duro, como carboneto de tungstênio e cobalto. Essas peças são fixadas em posições e ângulos de ataque definidos, visando a obtenção de uma superfície rugosa, plana e sem desníveis.

A Figura 2.24 exibe a operação completa de fresagem de um equipamento de grande porte.

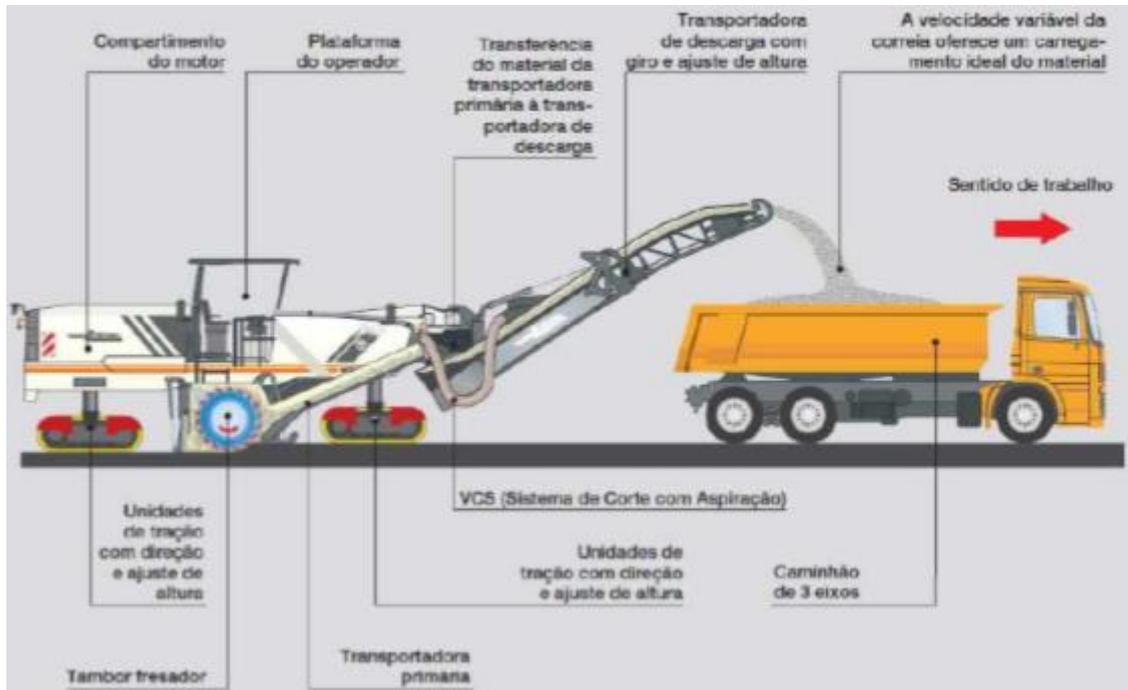


Figura 2.24 – Procedimento de fresagem de um equipamento de grande porte (WIRTGEN, 2018 apud PASCHE, 2016)

### 2.8.3 Tipos de reciclagem asfáltica

Após o processo de fresagem, o material obtido (RAP) é conduzido para a reciclagem asfáltica, onde reutiliza-se as misturas asfálticas antigas na produção de novas, aproveitando os agregados e o ligante de um pavimento asfáltico deteriorado, com o acréscimo de novos materiais, seja o cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou a emulsão asfáltica de petróleo (EAP). Este tipo de reciclagem pode ser a quente (utilizando CAP, agregados quentes e/ou agentes rejuvenescedores), ou a frio (utilizando EAP, agregados a temperatura ambiente e agentes rejuvenescedores emulsionados).

Segundo a Ciber (2016), na reciclagem a quente, em usinas, o material é inserido em um tambor-secador para retirada da umidade e posteriormente é transportado para uma torre de dosagem, que possui um conjunto de peneiras vibratórias para classificação granulométrica, sendo, em seguida, realizada a dosagem do material seco. O Asphalt Institute (1987) define que a quantidade de material fresado a ser adicionada à mistura depende do teor de umidade, da

temperatura desejada para a mistura asfáltica e da temperatura dos agregados novos. Em certos casos é possível utilizar até 50% de material fresado na nova mistura asfáltica reciclada.

Já o processo de reciclagem a quente *in situ* consiste na remoção mecânica da superfície asfáltica através do seu aquecimento e amolecimento, sendo então o RAP misturado ao ligante asfáltico, agregados virgens e agentes rejuvenescedores. Por fim, a mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento remanescente (LIMA, 2003). A reciclagem a quente *in situ* pode ser subdividida em: escarificação com aquecimento (o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado), repavimentação (adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada) e remixing (revestimento mais espesso).

A reciclagem a frio é a técnica que utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, permitindo a correção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações no revestimento asfáltico (ASPHALT INSTITUTE, 1987). O processo consiste na execução da fresagem do antigo revestimento a uma determinada profundidade (até 100 mm) adicionando-se emulsão asfáltica e aditivos, espalhando-os e compactando-os em seguida (LIMA, 2003). Esta técnica é mais econômica que as demais, uma vez que elimina a necessidade de aquecimento da mistura e diminui o custo com o transporte do material.

## 2.9 FIBRAS COMO REFORÇO DE SOLOS

O solo reforçado com fibras não só tem a capacidade de assumir uma forma irregular, como também elimina a necessidade de ancoragem em relação a problemas de inclinação em pé de encostas e aterros com riscos de ruptura (Daniel e Wu, 1993; Albrecht *et al.* 2001).

Inúmeros autores (como, por exemplo Maher e Ho, 1994; Casagrande, 2001; Lovisa *et al.* 2010; Consoli *et al.* 2012; Correia *et al.* 2015; Diambra e Ibraim, 2015; Botero *et al.* 2015; Festugato *et al.* 2015; Festugato *et al.* 2017) estudaram os efeitos benéficos da inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente às massas de solo, sejam estas sintéticas (como fibras de vidro e de polipropileno) ou naturais.

Outros autores verificaram a eficácia das fibras sintéticas em misturas de solo-CFA-cal, como Kumar *et al.* (2007) que adicionaram quatro tipos de fibras de poliéster a um solo expansivo estabilizado com cinza volante e cal. Os pesquisadores observaram que pequenas quantidades

dessas fibras (1,0% a 1,5%) poderiam aumentar a resistência à compressão não confinada em até 100% e a resistência à tração em até 135%.

A inclusão de fibras de vidro em solos arenosos tratados com cimento aumenta consideravelmente a tensão desvio e reduz a fragilidade deste tipo de mistura (CONSOLI *et al.* 2004). Já Maher e Ho (1994) analisaram que a adição de 1% a 4% de fibra de vidro a areia tratada com cimento resultou em um aumento de resistência à compressão simples de 50% em comparação com amostras não reforçadas.

Casagrande (2001), através da adição de fibras de polipropileno a um solo residual de arenito compactado percebe que a mistura formada possui um comportamento elasto-plástico de enrijecimento, sendo que um acréscimo de resistência do material foi percebido em aproximadamente 2,5% de deformação axial. A autora também divide o comportamento resistente do solo reforçado em três etapas: uma etapa inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo; uma etapa intermediária, na qual o comportamento é comandado conjuntamente pela matriz e pelas fibras; e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado essencialmente pelas fibras. Isso se deve ao fato de as fibras proporcionarem um emaranhado que envolve e “vincula” os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem, que se traduz no aumento da coesão do solo residual (cerca de 46%). Além disso, maior a resistência quanto maior for o comprimento das fibras. Porém, para altas tensões confinantes, o comportamento resistente do solo reforçado com fibras é praticamente inalterado.

Em 2008, Festugato afirma que, sob condições de compressão triaxial no interior da massa de solo, as fibras não rompem por tração. Quando a ruptura do compósito ocorre no trecho inicial da envoltória de resistência, a interação entre a matriz de solo e as fibras se dá através do deslizamento e do alongamento das fibras.

Festugato (2011), analisando misturas de resíduos de mineração cimentados com reforço de fibras, percebeu que a evolução da rigidez inicial ( $G_0$ ) segue tendência logarítmica com o tempo, sendo que a inclusão de fibras não afeta a rigidez inicial das misturas de resíduo de mineração cimentadas. O pesquisador também afirma que a incorporação de fibras ao resíduo de mineração cimentado confere ao material um comportamento de endurecimento bastante pronunciado, pois a desestruturação da matriz cimentada é compensada pela existência das

fibras que absorvem e redistribuem os esforços. Em comparação ao material não reforçado, a inclusão de fibras proporciona o aumento da capacidade do compósito de resistir a ciclos de esforços.

Hejazi *et al.* (2012) mostraram que as fibras em geral impedem o processo efetivo de compactação, o que resultou na redução da densidade seca máxima de espécimes reforçadas. Os autores também perceberam que as fibras evitam a formação de fissuras de tração, restringindo a tendência de expansão e diminuindo a fragilidade dos solos reforçados.

## 2.10 SAIS COMO CATALISADORES DE REAÇÕES

Apesar dos estudos descritos anteriormente sobre o acréscimo de resistência em relação à adição de fibras a misturas de solo-CFA-cal, poucos autores estudaram o efeito do sal na estabilização de solos. Drake e Haliburton (1972) foram os primeiros a observar que a inclusão de sal provoca um efeito catalítico nas reações solo-cal, causando uma redução significativa no tempo de cura. Recentemente, Saldanha *et al.* (2016a) investigaram a adição de distintos sais (NaCl, MgO e  $\text{KMnO}_4$ ) em misturas de CFA-cal de carbureto como ativadores de reações pozolânicas. Verificou-se que o cloreto de sódio (NaCl) é o sal mais eficaz para aumentar a resistência à compressão não confinada das misturas acima mencionadas. Os pesquisadores mostraram que a adição de 1,0% de NaCl à mistura de CFA-cal proporciona, após 28 dias de cura, maior resistência do que aquela observada para CFA-cal sem aditivos após 90 dias de cura. O efeito catalítico das inclusões de  $\text{KMnO}_4$  também foi observado, proporcionando, após 28 dias de cura, uma resistência semelhante à das misturas de CFA-cal sem sal após 90 dias de cura.

Consoli *et al.* (2017c) analisaram a influência da incorporação de NaCl na resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) de misturas de CFA-cal de carbureto através de análises de difractometria de raio-X (DRX) com e sem sal. Os testes sem sal detectaram os seguintes componentes:  $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}$  (tobermorita),  $\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$  (hillebrandita) e  $\text{SiO}_2$  (quartzo). Já os testes para as misturas com sal, indicaram a formação das seguintes fases:  $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}$  (tobermorita),  $\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$  (hillebrandita) e  $\text{SiO}_2$  (quartzo), como encontrado em misturas sem NaCl, e também  $\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_4\text{O}_{20}(6\text{H}_2\text{O})$  (thomsonita), um mineral cuja dureza é comparável à do feldspato, vidro e cobalto (Schumann, 2008). Logo, pode-se inferir que a thomsonita é responsável pelo ganho de resistência proveniente da adição de NaCl.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa visa avaliar o desempenho de misturas de cinza volante-cal submetidas a condições climáticas extremas, através da análise do impacto do teor de cal, grau de compactação, adição de 0,5% de cloreto de sódio (NaCl) como catalisador e adição de 0,5% de fibras de polipropileno como reforço, em relação a resistência por compressão, rigidez e durabilidade (comparando ciclos de molhagem-secagem com congelamento- degelo), em misturas de cinza volante (25%) com areia de Osório (matriz principal da mistura). Posteriormente é definida a perda de massa acumulada (PMA) após os referidos tipos de ciclos em função do índice de porosidade ( $\eta$ ) / teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ). Além disso, é estudada também a influência da variação de temperatura (23°C e 40°C) em um período de 7 dias de cura.

Visando ampliar esta pesquisa em relação ao efeito das severas mudanças climáticas em outros tipos de misturas que possuem como base a cinza volante e a cal, é proposto a troca da matriz da mistura (areia de Osório) por fresado (RAP) e a cal dolomítica hidratada pela cal de carbureto. Para esse novo tipo de mistura, além da análise de resistência e durabilidade, também são realizados ensaios triaxiais para definir o comportamento de tensão-deformação do material com e sem a adição de NaCl.

A seguir serão especificados com maiores detalhes os materiais e métodos empregados nesta Dissertação de Mestrado, assim como os fatores controláveis e constantes ao experimento.

#### 3.2 MATERIAIS

##### 3.2.1 Areia de Osório

A areia utilizada neste estudo é proveniente do Município de Osório, Rio Grande do Sul (Brasil), sendo classificada como areia fina uniforme não plástica, com forma de partículas arredondadas, sem presença de matéria orgânica (CONSOLI *et al.* 2017a; NBR 6502, 1995). O peso específico real dos grãos é de 26,5 kN/m<sup>3</sup>. A análise mineralógica mostrou que as partículas de areia são predominantemente quartzosas (99%) e o restante é glauconita, ilmenita,

turmalina e magnetita, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico da região costeira do estado do Rio Grande do Sul, pertencendo ao Sistema Laguna-Barreira III (SPINELLI, 1999, *apud* SILVANI, 2013). Os grãos da areia puramente fina (S) possuem diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 0,16 mm e diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) de 0,09 mm, sendo os coeficientes de uniformidade e curvatura de 2,1 e 1, respectivamente. Os índices de vazio mínimo e máximo são de 0,6 e 0,9 (CASAGRANDE, 2005).

A Figura 3.1 apresenta a curva granulométrica da areia de Osório obtida por Silvani (2013), o mesmo lote deste material adquirido por esta pesquisadora foi empregado nesta pesquisa.

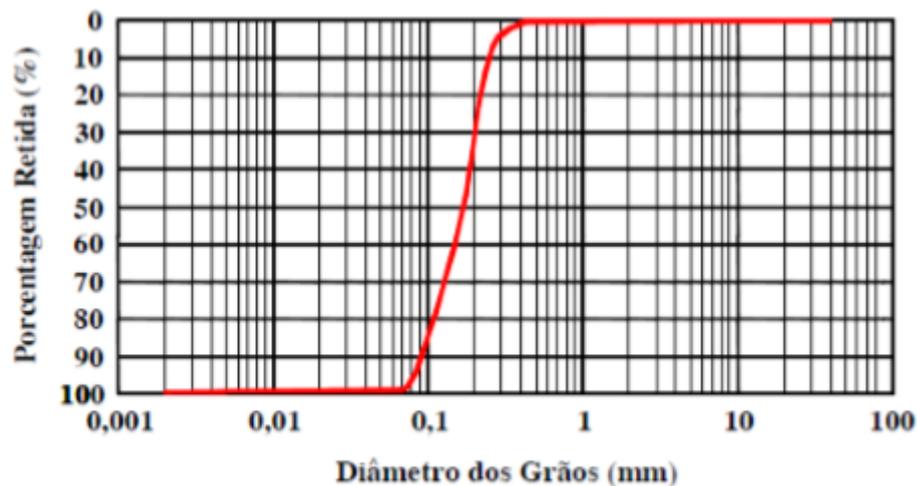


Figura 3.1 – Curva Granulométrica da Areia de Osório (SILVANI, 2013)

### 3.2.2 Fresado (RAP)

A distribuição dos tamanhos de grãos do RAP e suas características gerais são apresentadas na Tabela 3.1 e na Figura 3.4, apresentadas no tópico a seguir. Este agregado foi recuperado da BR 290, sendo que o RAP foi coletado em quantidade suficiente para completar todos os testes. O conteúdo de betume (SBS Modified - PG 70-22S) encontrado no RAP foi de cerca de 5,0%, tendo sido determinado de acordo com a ASTM C 593 (2011). A densidade do RAP, em relação ao agregado grosseiro, foi determinada de acordo com a NBR NM 53 (2009a) e, para o agregado fino, utilizou-se a NBR NM 52 (2009b). A Figura 3.2 mostra o material em (a) seu depósito provisório na cidade de Porto Alegre e (b) estocado em laboratório.



Figura 3.2 – Fresado em (a) seu depósito provisório na cidade de Porto Alegre e (b) estocado em laboratório

### 3.2.3 Cinza Volante

A cinza volante de carvão [tipo F de acordo com a ASTM C618 (1998)], utilizada no presente estudo, é oriunda da Braskem, empresa gaúcha fabricante de resinas termoplásticas, sendo classificada (ASTM D 2487, 2006) como silte não plástico com areia (ML). A Figura 3.3 mostra o aspecto do material.

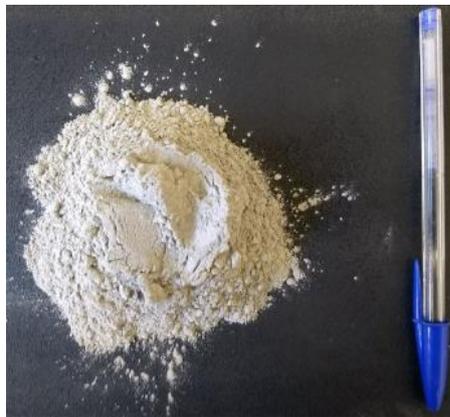


Figura 3.3 – Cinza volante de carvão utilizada neste trabalho

A massa específica real dos grãos é de  $2,09 \text{ g/cm}^3$ . Através de ensaios de difractometria de raio-X, obteve-se a composição do material, predominantemente minerais amorfos. A distribuição granulométrica é de 12% de areia fina, 87% de silte e 1% de argila, com um diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 0,02 mm. A análise de espectrometria de fluorescência de raio X (XRF) destacou os principais componentes da FA:  $\text{SiO}_2$  (64,8%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20,4%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4,8%) e  $\text{CaO}$  (3,1%). Esta cinza volante é classificada como não perigosa e não inerte (NBR NM 10004, 2004), uma

vez que alguns componentes podem solubilizar em água. A distribuição dos tamanhos de grãos da cinza utilizada e suas características gerais são apresentadas na Tabela 3.1 e na Figura 3.4.

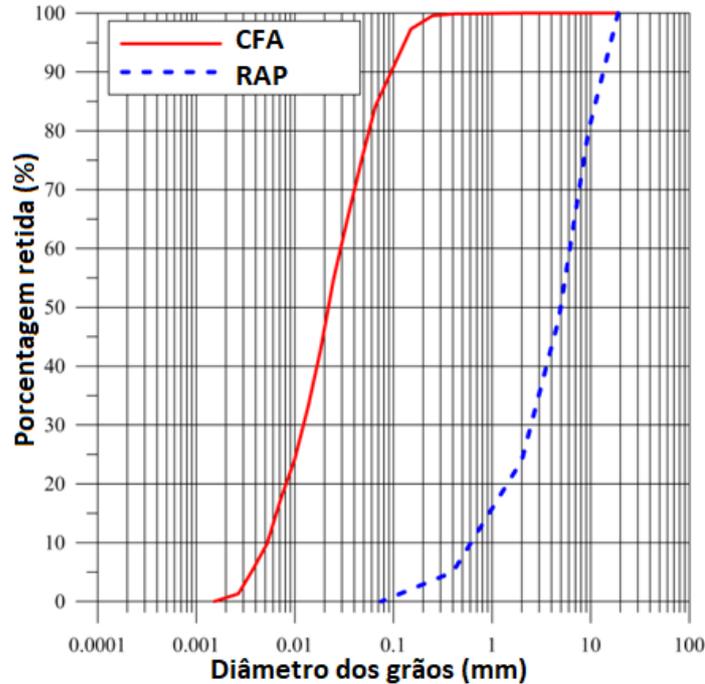


Figura 3.4 – Curva Granulométrica do RAP e da cinza volante de carvão

Tabela 3.1 – Propriedades do RAP e da CFA

PROPRIEDADES	RAP	CFA
Limite de Liquidez (%)	-	-
Limite de Plasticidade (%)	-	-
Índice de Plasticidade (%)	Não Plástico	Não Plástico
Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,18
Cascalho (4,75 mm < diâmetro) (%)	52	-
Areia Grosseira (2,00 mm < diâmetro < 4,75 mm) (%)	24	-
Areia Média (0,475 mm < diâmetro < 2,00 mm) (%)	19	0,1
Areia Fina (0,075 mm < diâmetro < 0,425 mm) (%)	5	13,5
Silte (0,002 mm < diâmetro < 0,075 mm) (%)	-	84,1
Argila (diâmetro < 0,002 mm) (%)	-	2,3
Diâmetro Médio, D <sub>50</sub> (mm)	5	0,022
Classificação USCS	GW (Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino)	ML (Siltos orgânicos e areias muito finas, alterações de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade)

### 3.2.4 Cal Hidratada

A cal utilizada nesta pesquisa é do tipo hidratada dolomítica  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Os ensaios de massa específica real da cal seguiram as recomendações da NBR NM 23 (ABNT, 2001). Obteve-se, a partir de três determinações, o valor médio de  $2,49 \text{ g/cm}^3$ . A Tabela 3.2 apresenta as principais propriedades da cal, fornecidas pelo fabricante, e as exigências limites impostas pela NBR 7175 (ABNT, 1986).

Tabela 3.2 – Propriedades da cal hidratada dolomítica

PROPRIEDADES	Limites da NBR 7175	Análise
Densidade	$0,6 \text{ g/cm}^3$	$0,51 \text{ g/cm}^3$
Perda ao Fogo	-	23,3%
Resíduo Insolúvel	-	4,7%
CO <sub>2</sub> (anidrido carbônico)	5%	2,2%
Óxidos Totais	88%	94,8%
Óxidos não Hidratados	15%	11%
CaO	-	44,8%
MgO	-	27,9%
Umidade	1,5%	0,6%
Resíduo na peneira 0,600 mm	0,5%	0,0%
Resíduo na peneira 0,075 mm	15%	8,0%

\*Dados do Fabricante

### 3.2.5 Cal de Carbureto

A cal de carbureto, subproduto da fabricação de gás acetileno, utilizada neste trabalho foi obtida da empresa White Martins Gases Industriais S.A., localizada no município de Esteio, Rio Grande do Sul. Neste local são produzidas em torno de 2160 toneladas/ano de cal de carbureto úmida. A determinação dos óxidos de cálcio estabeleceu 96% deste tipo de óxido, sendo que a cal de carbureto é formada basicamente por óxido de cálcio e, portanto, possui pureza de cálcio maior do que a cal dolomítica comercializada no RS. A Figura 3.5 exhibe a aparência da cal de carbureto durante (a) sua armazenagem e (b) após sua secagem. Já a Tabela 3.3 indica as propriedades deste material.

Tabela 3.3 – Propriedades da cal de carbureto

Propriedade	Valores
Óxido de cálcio (CaO)	70,02%
Óxido de magnésio (MgO)	0,3%
Resíduos insolúveis	1,5%
Perda ao fogo	27%
CaO disponível	64,6%
Massa específica real dos grãos	2,12 g/cm <sup>3</sup>

(fonte: Saldanha, 2014)

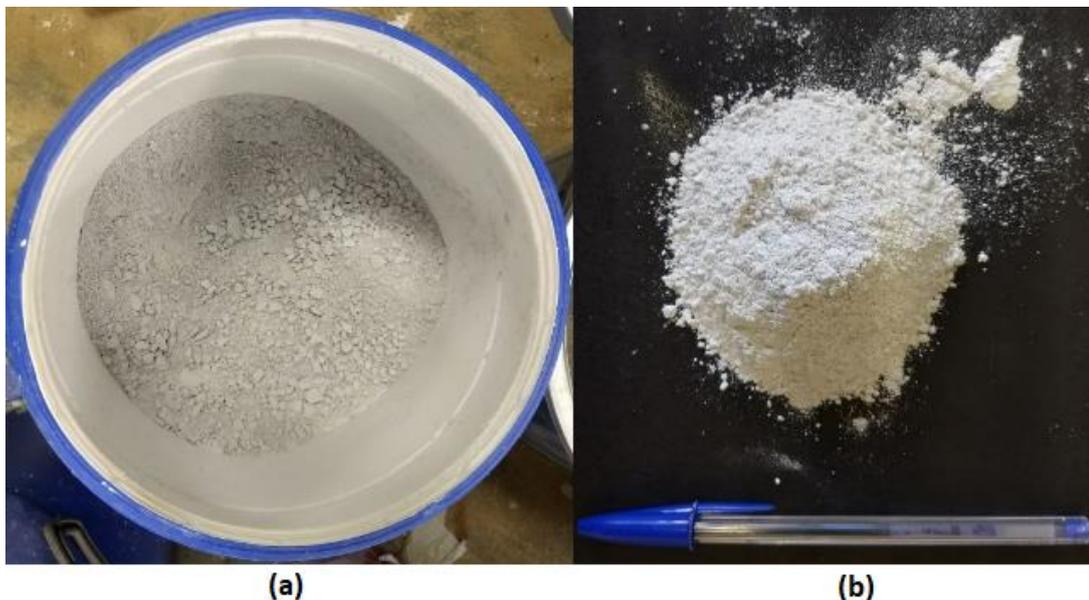


Figura 3.5 – Cal de carbureto utilizada neste trabalho

### 3.2.6 Fibra de Polipropileno

As fibras de polipropileno com 24 mm de comprimento foram adicionadas às misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica em um teor de 0,5%. Este material possui massa específica real dos grãos de 0,09 g/cm<sup>3</sup>. As fibras possuem uma resistência à tração na ruptura de 120 MPa, alongamento de ruptura de 80% e o módulo 2,3 GPa (dados fornecidos pela empresa Fitesa Fibras e Filamentos S/A). A Figura 3.6 exibe o aspecto das fibras de polipropileno utilizadas.



Figura 3.6 – Fibra de polipropileno utilizada neste trabalho

### 3.2.7 Sal (NaCl)

O sal adicionado às misturas é composto essencialmente de cloreto de sódio (NaCl) e iodo. Utilizou-se sal grosso moído, sendo o tamanho dos grãos igual ao tamanho dos grãos de areia de Osório após o processo de moagem, com peso específico real dos grãos de 27,2 kN/m<sup>3</sup>. Por fim o sal moído era diluído na água de moldagem.

### 3.2.8 Água

A água utilizada é oriunda da rede hidráulica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e é considerada potável. No entanto, para determinados ensaios de caracterização, onde se fez necessário, utilizou-se água destilada.

## 3.3 MÉTODOS

De forma sucinta a Tabela 3.4 demonstra as características particulares de cada mistura a ser estudada.

Tabela 3.4 – Características das misturas estudadas

MISTURA	CARACTERÍSTICAS						
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CFA (%)	CAL (%)	Fibra (%)	Sal (%)	Umidade (%)	Temperaturas de cura (°C)
Areia de Osório - CFA - cal dolomítica	14 - 15 - 16	25	3 - 5 - 7	0 - 0,5	0 - 0,5	14	23 - 40
RAP - CFA - cal de carbureto	17 - 18 - 19	25	3 - 5 - 7	-----	0 - 0,5	9	23

Os teores de cal aplicados às misturas foram baseados nas experiências anteriores de diversos autores, como Rogers *et al.* (1997), Dalla Rosa (2009), Silvani (2013), Saldanha (2014), De Paula (2016) e Novaes (2016). Todos os pesquisadores anteriormente descritos se basearam no método ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers *et al.* (1997). Tal método executa medições de pH da mistura com diferentes teores de cal. O valor mínimo indicado a ser utilizado na mistura é o percentual no qual o pH atinge um valor máximo e constante, ou seja, o mínimo teor para que as trocas catiônicas ocorram. Todos os autores mencionados encontraram um valor de 3% de cal como sendo o mínimo necessário para 25% de CFA, independentemente do tipo de cal analisado, como pode ser visto na Figura 3.7. Adotou-se então os valores de 3; 5 e 7% para este trabalho.

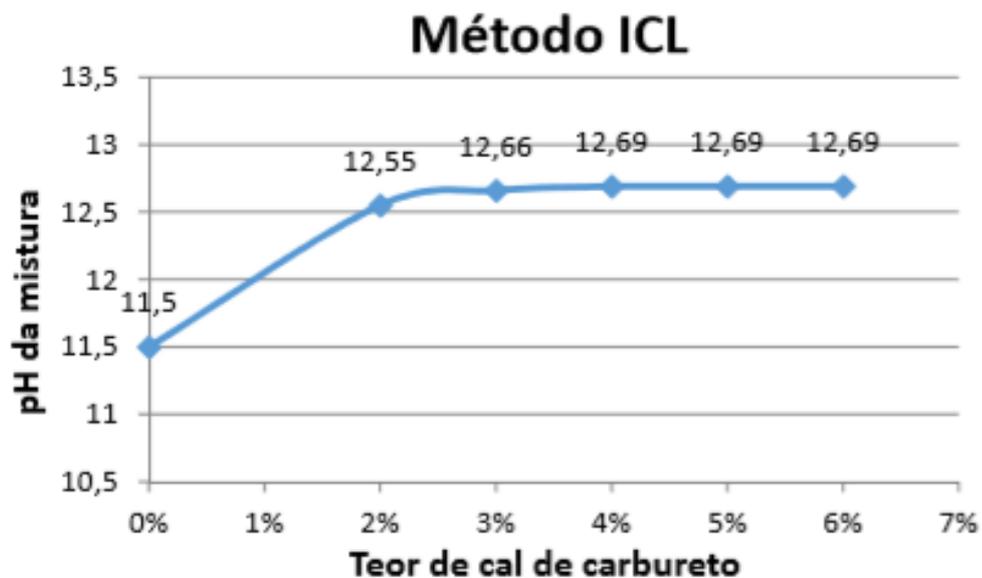


Figura 3.7 – Definição do teor de cal mínimo pelo método ICL (adaptado de NOVAES, 2016)

Os pesos específicos utilizados foram baseados nas curvas de compactação obtidas por ensaios de proctor (Figura 3.8) para misturas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica (SILVANI, 2013). Esta pesquisadora adotou os valores de 14, 15 e 16 kN/m<sup>3</sup> em relação a uma umidade previamente estabelecida de 14%.

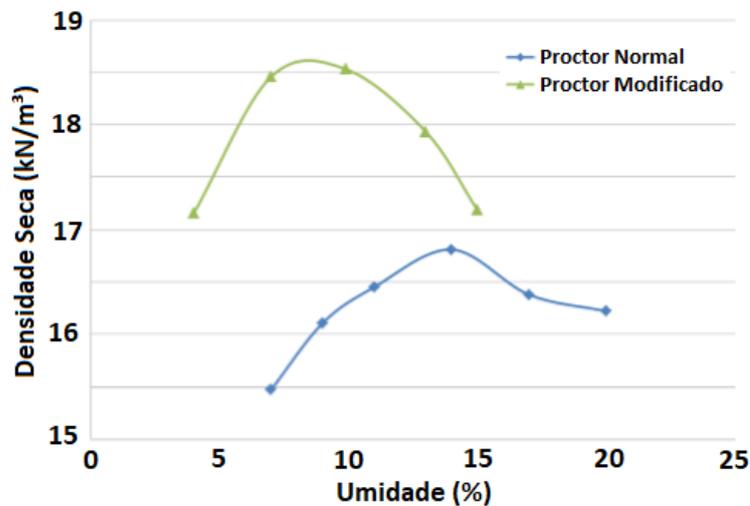


Figura 3.8 – Curvas de Compactação da mistura com areia de Osório (adaptado de SILVANI, 2016)

Pasche (2016), também baseado em ensaios de proctor, obteve valores de pesos específicos de 20 kN/m<sup>3</sup>, 21 kN/m<sup>3</sup> e 22 kN/m<sup>3</sup>, para um teor de 8% de umidade em relação às pesquisas de RAP-CFA-cal de carbureto. A prensa disponível para esta pesquisa não possuía capacidade para moldar corpos de prova com esse nível de compactação. Dessa forma, adotou-se o valor máximo de peso específico comportado pela capacidade de compactação da prensa e dois valores de unidade inferiores, 17 kN/m<sup>3</sup>, 18 kN/m<sup>3</sup> e 19 kN/m<sup>3</sup>, para uma umidade de 9 % (valor máximo para que não ocorresse exsudação durante a moldagem).

Conforme os estudos de Pasche (2016), houve um controle da granulometria do fresado selecionado, sendo constituído de 70% do material retido na peneira de 4" (4,75 mm de abertura) e 30% do material passante nesta mesma peneira.

Para as misturas com adição de fibras de polipropileno, adotou-se uma porcentagem de 0,5% deste material a ser adicionado em relação ao peso seco da mistura, baseado em experiências internacionais (PRAKBAR e SRIDHAR, 2002; IBRAIM e FOURMONT, 2006; AHMAD *et al.* 2010; FESTUGATO *et al.* 2017). Esta mesma porcentagem foi utilizada para a adição de cloreto de sódio, conforme os estudos de Saldanha (2017).

Adotou-se um tempo de cura de 7 dias a uma temperatura de 23°C (para todas as misturas), sendo este valor a temperatura ambiente do local de moldagem. Também foram realizados corpos de prova com Areia de Osório, curados a uma temperatura de 40°C, temperatura

considerada praticável para obras de geotecnia em certas regiões tropicais (CONSOLI *et al.* 2001).

No Apêndice A estão expostas as planilhas de moldagem dos corpos de prova de ambas as misturas.

Nos próximos tópicos serão descritos os procedimentos de ensaio realizados na presente pesquisa. A Tabela 3.5 mostra de forma resumida os ensaios realizados para cada tipo de mistura e a quantidade de corpos de prova ensaiados.

Tabela 3.5 – Ensaio realizados para cada tipo de mistura estudada

MISTURA	ENSAIOS REALIZADOS				
	Compressão Simples	Compressão Diâmetral	Rígidez	Durabilidade	Triaxial
Areia de Osório - CFA - cal dolomítica	72	0	72	96	0
RAP - CFA - cal de carbureto	20	16	0	20	6

### 3.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para as misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Devido a maior granulometria do RAP, foram utilizados corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto. Os procedimentos de moldagem incluem: pesagem da mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

A quantidade de solo, cinza volante e cal constituem a massa seca total, sendo as quantidades de água, sal e fibra foram calculadas em relação à soma das massas de solo, cinza volante e de agente cimentante. Após a pesagem dos materiais com resolução de 0,01 g, ocorreu a mistura dos materiais até uma coloração uniforme e, em seguida, foi adicionada a água.

A moldagem foi realizada estaticamente em três camadas iguais, utilizando-se para isto um molde de ferro fundido tripartido de maneira que cada camada atingisse o peso específico aparente seco previamente definido, escarificando os topos acabados da primeira e da segunda camada para que ocorresse a integração entre as camadas. Ao final do processo, três pequenas

porções da mistura foram retiradas para determinação do teor de umidade (média dos três valores).

Posteriormente à moldagem, os corpos de prova foram extraídos do molde e, com uso de balança de precisão e paquímetro, obteve-se a massa e medidas (diâmetro e altura) com resolução de 0,01 g e 0,1 mm, respectivamente. Após, foi feito o acondicionamento em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

A cura ocorreu em um período de 7 dias. Para as misturas de areia de Osório-CFA-cal de carbureto curadas a  $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , utilizou-se uma câmara de controle de temperatura construída no LEGG, como pode ser visto na Figura 3.9. Já para as misturas curadas a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , foi medida a temperatura ambiente no local de armazenagem dos corpos de prova todos os dias de cura.



Figura 3.9 – Câmara de controle de temperatura

Os corpos de prova, no último dia de cura, foram submersos em água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação, minimizando efeitos de sucção.

Tolerou-se uma variação do grau de compactação de até 2% do valor teórico. Já para o teor de umidade, foi aceita uma variação de até 0,5% do valor especificado. Foram moldados corpos de prova em duplicata para este ensaio, obtendo-se uma maior confiabilidade dos resultados, uma vez que, caso houvesse grande dispersão entre os resultados (acima de 10% do valor médio

obtido), um terceiro corpo de prova seria moldado posteriormente, o que não ocorreu ao longo da pesquisa.

A prensa automática utilizada possui capacidade máxima de 100 kN, com anel dinamométrico calibrado com capacidade de 10 kN, e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. Os procedimentos seguiram a norma americana ASTM D 5102 (1996) e ASTM C 39 (2010).

A Figura 3.10 exibe as duas dimensões de corpos de prova moldados [(a) mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica e (b) RAP-CFA-cal de carbureto] posicionados na prensa utilizada no ensaio de compressão simples.

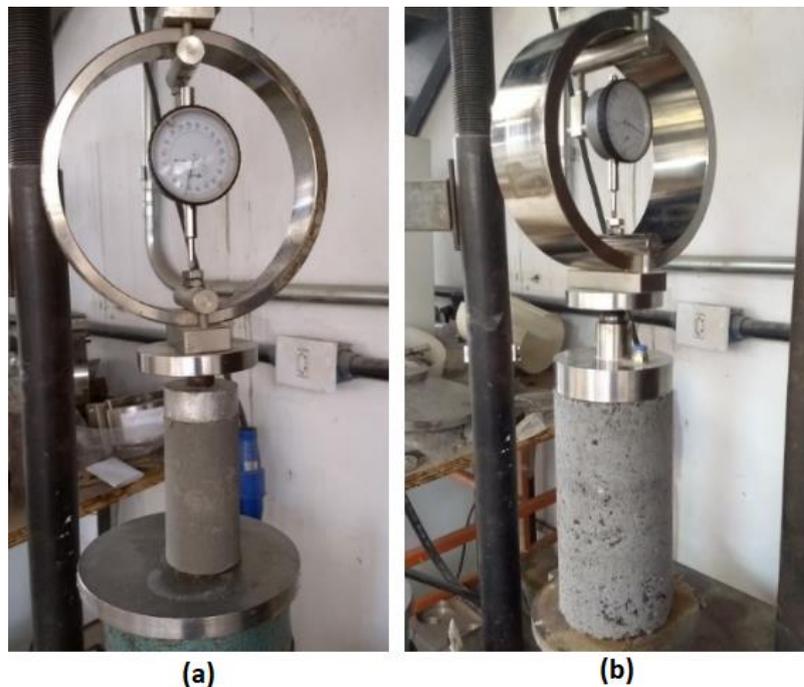


Figura 3.10 – Corpos de prova [(a) mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica e (b) RAP-CFA-cal de carbureto] sobre a prensa de compressão simples

### 3.3.2 Ensaio de Resistência à Tração na Compressão Diametral

Os ensaios de tração na compressão diametral foram realizados apenas para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto e seguiram a norma NBR NM 8 (1994). A ruptura típica deste tipo de ensaio é apresentada na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Ruptura típica dos corpos de prova nos ensaios de tração por compressão diametral

Os mesmos procedimentos, equipamentos e critérios de controle utilizados na moldagem e ruptura dos ensaios de compressão simples foram aplicados neste ensaio, alterando apenas a posição do corpo de prova durante o ensaio e suas dimensões (6 cm de altura e 10 cm de diâmetro). A Figura 3.12 mostra um corpo de prova moldado para o ensaio de compressão diametral.



Figura 3.12 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração por compressão diametral

### 3.3.3 Medições de Rigidez Inicial

As medições de rigidez inicial a pequeníssimas deformações foram realizadas através de medidas de ondas cisalhantes com equipamentos de ultrassom. O equipamento utilizado para este ensaio foi o Pundit Lab Plus, um instrumento de teste de velocidade de pulso de ultrassom, UPV (Figura 3.13). Este equipamento possibilita a aquisição de dados, análise da forma da onda

e controle remoto total de todos os parâmetros de transmissão, permitindo a medição do tempo de transmissão, da velocidade de pulso e de superfície.



Figura 3.13 – Equipamento Pundit Lab (adaptado de PROCEQ, 2016 *apud* HOCH, 2016)

Por se tratar de um ensaio não destrutivo, foram utilizados para as medições das ondas “p” (de compressão) e das ondas “s” (cisalhantes) os mesmos corpos de prova dos ensaios de compressão simples. Antes das realizações das medições, o equipamento foi calibrado com uma peça acrílica (Figura 14).



Figura 3.14 – Calibração do equipamento Pundit Lab

O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova entre o transdutor e o receptor de ondas. Foi utilizado o gel acoplador da marca Mercur para facilitar o envio das ondas ultrassônicas dos transdutores de ondas “p” e um gel acoplador de alta viscosidade da marca Magnaflux para envio das ondas de cisalhamento dos transdutores de ondas “s”. Inicialmente, foram realizadas as leituras das ondas de compressão, a 54 kHz e, posteriormente, das ondas cisalhantes, a 250 kHz. As ondas de compressão foram medidas para que o valor da onda de cisalhamento fosse

conferido, uma vez que o tempo de propagação da onda p equivale a aproximadamente metade do tempo da onda s (para coeficientes de Poisson de 0,15 a 0,2).

A Figura 3.15 mostra um exemplo das leituras obtidas pelo equipamento. Foi tomado como tempo de propagação da onda cisalhante a diferença de tempo entre a emissão do sinal e o ponto de maior amplitude do vale antes do maior pico. Foram utilizadas ondas do tipo senoidal, pois resultam em uma resposta mais clara para as frequências utilizadas.

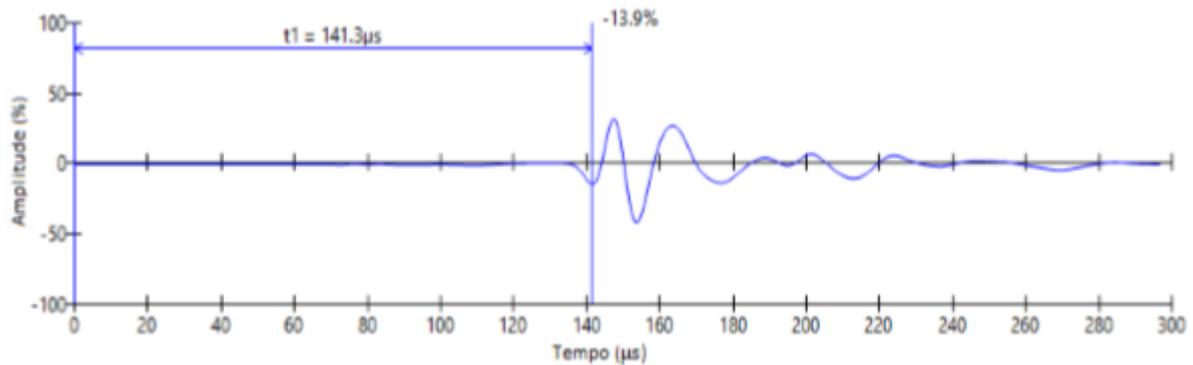


Figura 3.15 – Exemplo de leitura obtida pelo Pundit Lab

Através da medição de tais ondas foi possível obter o módulo cisalhante elástico ( $G_0$ ) das misturas, através da Equação 17:

$$G_0 = \rho * V_s^2 = \rho * L / t_s \quad (\text{Equação 17})$$

Onde  $V_s$  é a velocidade da onda cisalhante,  $\rho$  é o peso específico do solo,  $L$  é a distância entre os transdutores e  $t_s$  é o tempo de viagem da onda cisalhante.

### 3.3.4 Ensaios de Durabilidade por Molhagem e Secagem

Os testes de durabilidade através de ciclos de molhagem e secagem foram realizados de acordo com a ASTM D 559 (2015), tal norma determina a perda de massa, variação de umidade e volume após ciclos de raspagens para misturas solo-cimento.

Foram moldados corpos de prova de 12,7 cm de altura e 10 cm de diâmetro, sendo os procedimentos adotados para confecção dos corpos de prova os mesmos aplicados para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples e compressão diametral. A Figura 3.16 mostra um corpo de prova de RAP-CFA-cal de carbureto após sua retirada do molde.



Figura 3.16 – Corpo de prova de RAP-CFA-cal de carbureto após retirada do molde

Os procedimentos de teste determinam as perdas de massa produzidas por 12 ciclos de molhagem e secagem, após um período de cura de 7 dias. Cada ciclo possui duração de 48 horas, sendo 5 horas de imersão em água ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 42 horas de secagem em estufa a  $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e 1 hora de intervalo para escovagem, pesagem do corpo de prova e retirada de amostras para umidade). A norma determina que os espécimes devem ser escovados verticalmente através de 18 a 20 passadas de uma escova de aço na lateral do corpo de prova, cobrindo-o duas vezes e 4 passadas em cada face, com uma força de 13,3 N em cada escovada. É importante ressaltar a dificuldade em se garantir a efetiva aplicação desta força nas áreas dos espécimes, uma vez que este processo é realizado através de balanças de precisão onde são apoiados os corpos de prova e posteriormente a escovação é iniciada, durante esta etapa deve-se atingir o valor equivalente a 13,3 N em kg, como o processo de escovagem é contínuo, há grande variação nas leituras da balança. Além disso, ao se escovar os espécimes com fibra, muitas vezes, o processo é interrompido pelo fato da escova se prender no emaranhado de fibras.

A Figura 3.17 exhibe a escova de aço de fio zero utilizada nas escovagens e a Figura 3.18 exhibe os corpos de prova das misturas com RAP dentro da estufa (primeira prateleira) para o processo de secagem.



Figura 3.17 – Escova de aço de fio zero



Figura 3.18 – Corpos de prova das misturas com RAP dentro da estufa para o processo de secagem.

### 3.3.5 Ensaio de Durabilidade por Congelamento e Degelo

Os ensaios de durabilidade através de ciclos de congelamento e degelo foram realizados de acordo com a ASTM D 560 (2016). Os procedimentos adotados para confecção dos corpos de prova são os mesmos aplicados para a moldagem dos corpos de prova para a durabilidade por molhagem e secagem, com as mesmas dimensões e período de cura de 7 dias.

Este ensaio determina as perdas em massa produzidas após 12 ciclos de congelamento e degelo. A norma ASTM D 560 (2016) define que todo ciclo inicia através do congelamento dos corpos de prova a uma temperatura inferior a  $-23^{\circ}\text{C}$ . Para isso foram utilizados um congelador de  $-26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , conforme a Figura 3.19.



Figura 3.19 – Corpos de prova das misturas com RAP dentro do freezer para o processo de congelamento

Após 24 horas de congelamento, os corpos de prova foram descongelados em temperatura ambiente de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente, ocorriam as escovagens da mesma forma descrita no tópico anterior, para molhagem e secagem. Por fim, inicia-se um novo ciclo.

Tanto a temperatura ambiente quanto a temperatura do freezer foram medidas e verificadas ao longo de cada ciclo.

### 3.3.6 Ensaio Triaxiais

A preparação e a moldagem dos corpos de prova para os ensaios triaxiais seguiram os mesmos procedimentos que a moldagem dos corpos de prova com RAP na compressão simples, ou seja, possuem dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Todos os ensaios triaxiais são consolidados isotropicamente drenados (CID). A Figura 3.20 ilustra o molde e o corpo de prova após a moldagem.



Figura 3.20 – Molde e corpo de prova das misturas com RAP para ensaios triaxiais e de compressão simples.

Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram os princípios descritos por Bishop & Henkel (1962), Head (1980 a, b e c) e as instruções de utilização do equipamento descrito por Festugato (2008).

O equipamento (Figura 3.21) possui duas interfaces ar/água (*Bladder*), indicado na Figura 3.22a, para a eficiente aplicação de contrapressão e pressão confinante, controlando a pressão enviada das válvulas para o sistema, sendo estas pressões medidas por três transdutores (confinante, contrapressão da base e contrapressão do topo), da marca ASHCROFT (Figura 3.22b). Dois reguladores de pressão ajustam a pressão do ar proveniente de um compressor, que incide na parte interna das membranas das interfaces (Figura 3.22c). A pressão é, então, transmitida à água que envolve as membranas das interfaces e, por fim, a água é direcionada à câmara triaxial (FESTUGATO, 2008).



Figura 3.21 – Equipamento triaxial utilizado

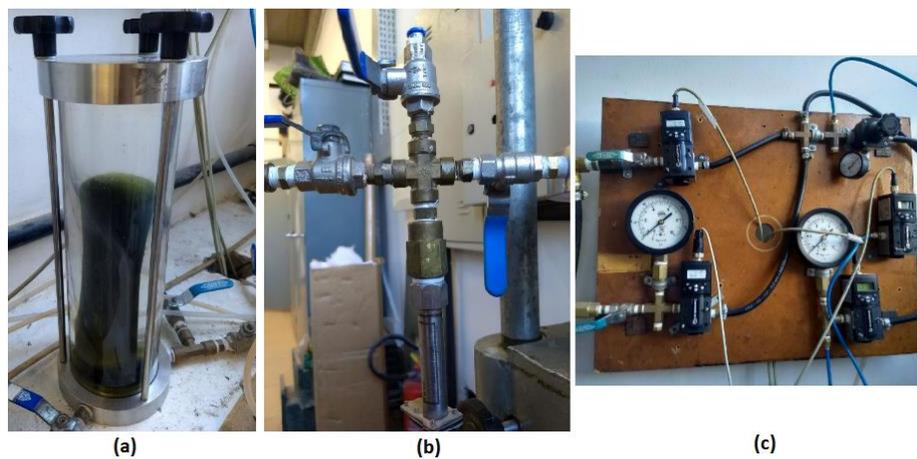


Figura 3.22 – Constituintes do equipamento triaxial: (a) Interface ar/água (*Bladder*), (b) transdutor da marca ASHCROFT e (c) reguladores de pressão

As deformações axiais são medidas interna e externamente, através de sensores de efeito Hall aderidos à membrana e de um transdutor de deslocamento linear da marca GEFTRAN, fixado à parte superior da câmara. A variação de volume durante a consolidação isotrópica é obtida

através de um medidor externo do tipo Imperial College (Figura 3.23a). O carregamento é aplicado com uma taxa de deformação constante por uma prensa e a medida de carga imposta pelo pistão é realizada externamente por uma célula de carga (Figura 3.23b).

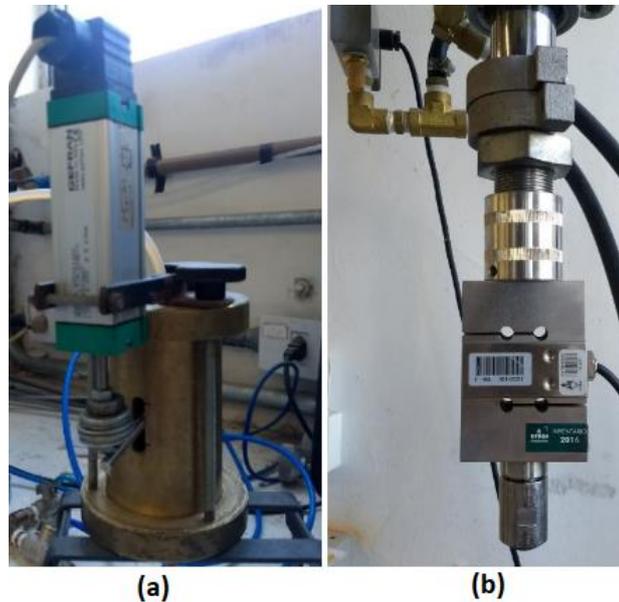


Figura 3.23 – (a) Medidor externo do tipo Imperial College e (b) célula de carga

No sexto dia de cura é posicionado a pedra porosa e o papel filtro saturados na base do equipamento e o corpo de prova sobre o sistema. Devido ao formato irregular do RAP, com algumas extremidades pontiagudas, colocou-se duas membranas ao redor do corpo de prova, com aplicação de látex líquido na acentuação dos pedregulhos. Argolas de vedação foram fixadas no pedestal e no top-cap. Em seguida, os sensores de efeito Hall, que permitem medidas de deslocamentos para pequenas deformações, são colados na membrana de acordo com sua calibração (Figura 3.24). Foram utilizados um sensor axial (medição de deformação lateral) e um sensor radial (medição de deformação vertical).



Figura 3.24 – Preparação do corpo de prova para o início do ensaio triaxial

Por fim, a câmara triaxial é fechada, o pistão e a célula de carga são conectados, o sistema de reação e a instrumentação externa são então instalados e, por último, a câmara é preenchida com água.

Posteriormente ao processo de montagem do equipamento, é iniciado a saturação do espécime. Este processo busca dissolver as bolhas de ar contidas no interior dos vazios do corpo de prova (HEAD, 1998), sendo dividido em três etapas: percolação de gás Carbônico (CO<sub>2</sub>), percolação de água e aplicação de contrapressão. Como o CO<sub>2</sub> é mais compressível que o oxigênio, ele é usado para ocupar os vazios do material, facilitando a saturação. O CO<sub>2</sub> é percolado da base para o topo do corpo de prova, entre 30 a 50 minutos. Em seguida, ocorre a percolação de água até que o volume de água passado no espécime seja equivalente ao dobro do volume de vazios do corpo de prova, processo realizado com uma pressão efetiva de aproximadamente 23 kPa, impedindo o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana. Por fim, é aplicado incrementos equivalentes de tensão confinante e contrapressão, mantendo constante a tensão efetiva (20 kPa) até atingir o valor máximo de contrapressão adotado de 380 kPa (valor limitado devido à tensão total máxima suportada pela câmara triaxial).

A saturação é monitorada através do parâmetro B de Skempton (1954), sendo considerados 100% saturados os corpos de prova com  $B \geq 0,9$ , equivalente a solos muito rígidos ou cimentados (HEAD, 1998).

A consolidação isotrópica visa simular o comportamento do material em relação à condição a que este estará sujeito em uma aplicação prática. Como este estudo visa o emprego de misturas como base e sub-base de pavimentos, adotou-se valores de tensão efetiva inicial relativamente baixos (20, 40 e 60 kPa). Tais valores são alcançados através da aplicação de incrementos de tensão de confinamento (400, 420 e 440 kPa) em intervalos de tempo pré-determinados, mantendo-se o valor de contrapressão (380 kPa). É importante ressaltar que, durante essa etapa, as drenagens da base e topo permanecem abertas, medindo-se a variação volumétrica.

No sétimo dia de cura do corpo de prova (após a consolidação isotrópica) é realizado o cisalhamento do espécime. O carregamento é aplicado com taxa de deformação constante (0,06 mm/min), sendo a medida de carga imposta pela prensa realizada externamente através de uma célula de carga. No cálculo da tensão desvio, a correção de área é aplicada, conforme a abordagem proposta por La Rochelle *et al.* (1988).

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir serão apresentados os resultados e análises obtidos nesta pesquisa. Visando um melhor entendimento do leitor, os resultados estão divididos em relação às misturas estudadas. Todas as planilhas de moldagens dos corpos de prova estão contidas no Apêndice A.

A nomenclatura dos espécimes foi definida da seguinte forma: Peso específico seco / % de Cal / % de Sal / % de Fibra (sigla em inglês do tipo de ensaio de durabilidade: WD-molhagem e secagem; FT – congelamento e degelo). Exemplo: para uma mistura com peso específico seco de 15 kN/m<sup>3</sup>, 5% de cal, 0 % de sal e 0% de fibras, submetida a ciclos de congelamento e degelo, a nomenclatura do espécime será:  $\gamma_d14/C5/S0/F0$  (FT).

### 4.1 MISTURAS DE AREIA DE OSÓRIO-CFA-CAL DOLOMÍTICA

#### 4.1.1 Curadas a 23°C

O índice porosidade / teor volumétrico de cal foi mostrado por Consoli *et al.* (2014a, b, 2016a, b) como um meio de se normalizar a resistência dos solos tratados com cal. Os autores mostraram que a variação da resistência com a porosidade ( $\eta$ ) é inversamente proporcional ao teor volumétrico de cal ( $1 / L_{iv}$ ), sendo que esta variação não é a mesma para  $\eta$  e  $L_{iv}$ . Portanto, a aplicação de um expoente como 0,11 (Consoli *et al.* 2014a) para  $L_{iv}$  é necessário para que as taxas de  $\eta$  e  $1/L_{iv}$  sejam compatíveis.

A Figura 4.1 exhibe os resultados para a resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) dos espécimes em termos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , para o período de cura estudado (7 dias) a 23°C. A Figura 4.1 (a) apresenta os resultados para a mistura de controle, isto é, areia de Osorio-CFA-cal dolomítica sem fibras e sem sal. A Figura 4.1 (b) retrata os resultados das misturas com sal, enquanto a Figura 4.1 (c) mostra os resultados para misturas com fibra. A Figura 4.1 (d), por outro lado, apresenta os resultados para a mistura reforçada com fibra e com sal. Em todos os casos, o índice ajustado de porosidade / teor de cal se demonstrou útil na normalização dos resultados de resistência. Bons coeficientes de determinação ( $R^2$  entre 0,80 e 0,89) podem ser percebidos em relação a  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  e  $q_u$  para as misturas estudadas. A Figura 4.2 compara as quatro curvas anteriormente descritas. Pode-se observar que tanto as fibras de polipropileno quanto o sal são eficazes no aumento da resistência à compressão não confinada das misturas

de areia de Osório-CFA-cal dolomítica. No entanto, o ganho de resistência devido às inclusões de fibras é mais pronunciado para valores mais baixos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ . Este aumento na resistência de materiais granulares - cimentados ou não - foi relatado por diversos autores (Michalowski e Zhao 1996, Michalowski e Cermak 2002 e Diambra *et al.* 2013), que afirmaram que as fibras orientadas mobilizam os esforços de tração e, portanto, contribuem para a resistência ao cisalhamento total dos materiais. Uma vez que essas misturas com valores mais baixos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  apresentam maior confinamento, a ancoragem entre fibras e grãos de areia é mais efetivo, de tal forma que uma maior resistência é adquirida (Diambra e Ibraim 2014).

O sal, por sua vez, proporcionou um aumento de resistência em todo o intervalo de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  apresentado na Figura 4.1 (entre 32 e 43). Além disso, percebe-se que a adição de fibras às misturas com sal provocaram um aumento de resistência para índices de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  menores que 40, porém ocorre uma ligeira diminuição de resistência para índices superiores a 40.

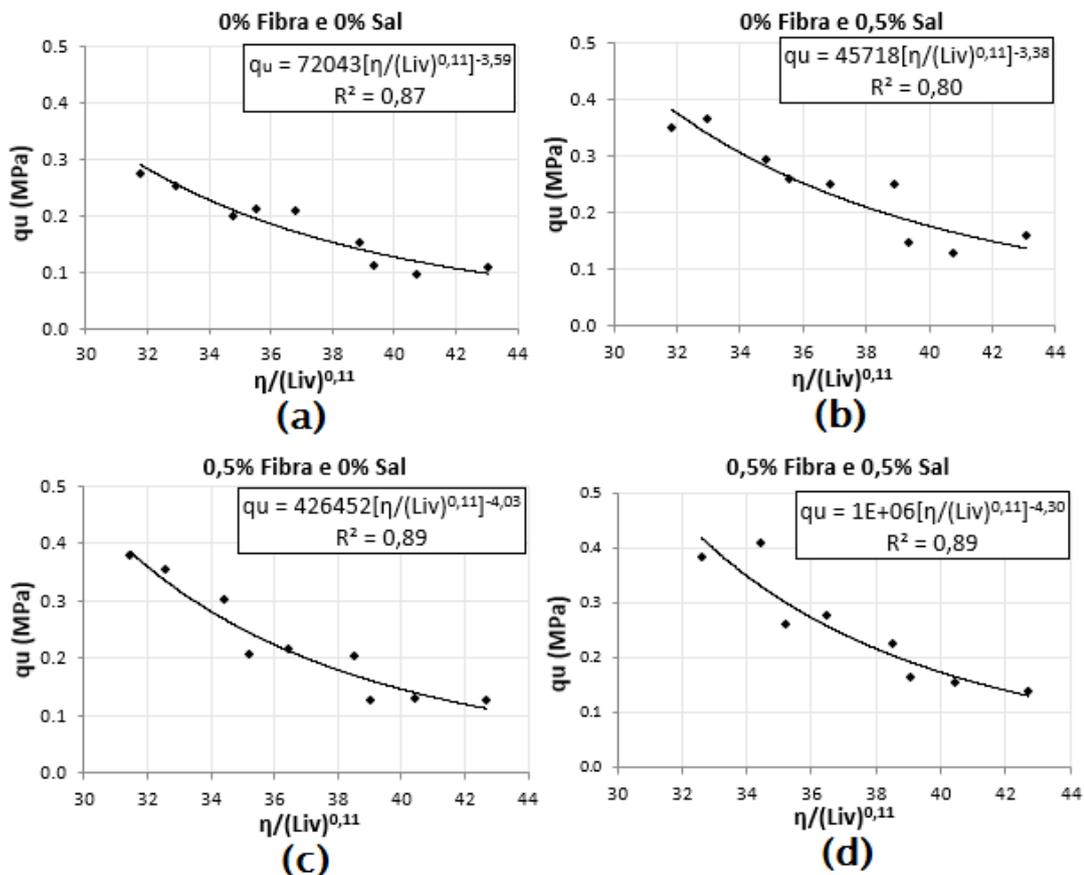


Figura 4.1 –  $q_u \times \eta/(L_{iv})^{0,11}$  para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C

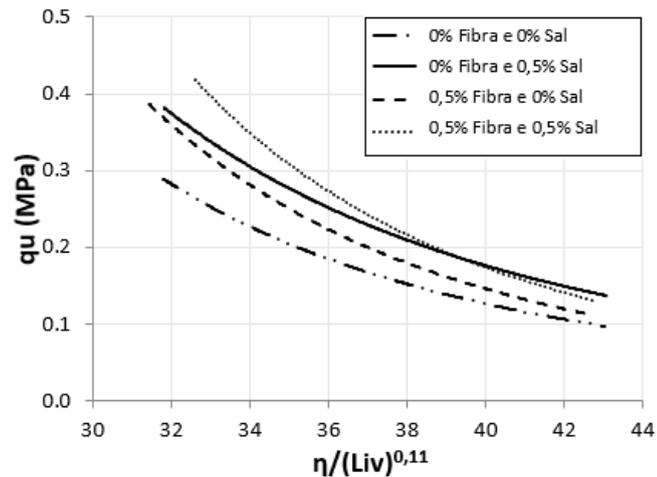


Figura 4.2 – Comparação de  $q_u$  entre as misturas com ou sem aditivos, curadas a 23°C

É importante ressaltar também a diferença entre os planos de ruptura formados em relação aos corpos de prova com e sem fibras. Para as misturas sem fibras a ruptura ocorreu por cisalhamento lateral, ou seja, o plano de ruptura é inclinado em relação à direção da força cortante que o gera, logo, a linha de fratura atravessa na diagonal do corpo de prova. Já para as misturas com fibras não ocorreu um plano de ruptura bem definido. O corpo de prova apresentou fissurações (majoritariamente verticais) ao longo de toda sua área externa. A Figura 4.3 ilustra os corpos de prova após o processo de rompimento.

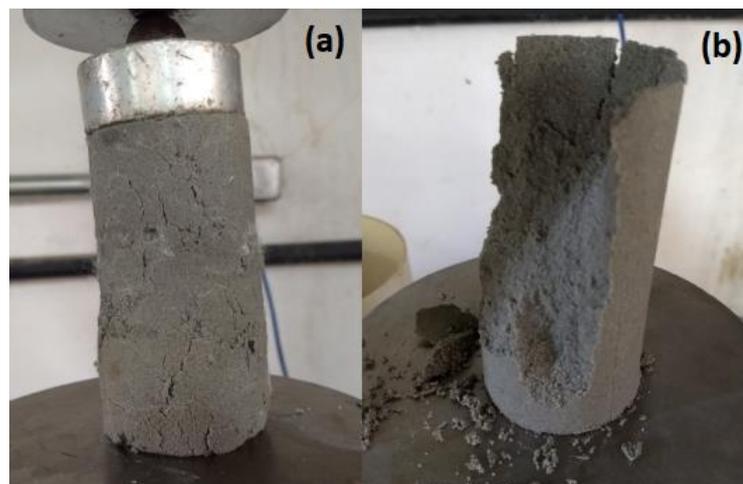


Figura 4.3 – Ruptura típica dos CP's (a) com fibras e (b) sem fibras, curados a 23°C

Em relação à rigidez, é importante destacar a dificuldade de se obter leituras claras das ondas para as misturas com fibra, não sendo possível obter valores confiáveis de ondas de compressão (“p”). Provavelmente isso se deve ao fato das fibras redistribuírem os sinais emitidos pelo

ultrassom ao longo do corpo de prova. No entanto elevados coeficientes de determinação, entre 0,84 e 0,95, foram obtidos e a linha de tendência adequou-se bem aos pontos.

A Figura 4.4 exibe os resultados de rigidez inicial ( $G_0$ ) para os espécimes (a) sem fibra e sem sal, (b) com sal, (c) com fibra e (d) com fibra e com sal, em termos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ . É possível perceber que as fibras diminuem significativamente a rigidez inicial da mistura e o sal aumenta tal propriedade, sendo possível analisar este comportamento no momento da ruptura dos espécimes. Para as misturas sem fibra, a ruptura ocorreu de forma brusca, típica de materiais rígidos, ou seja, o corpo de prova perde completamente sua estrutura. Já as misturas com fibras possuíam ruptura mais suave, dúctil, sendo que após o rompimento a estrutura dos corpos de prova ainda resistiam a esforços menores. Isso se deve ao efeito de redistribuição de tensões das fibras já mencionado anteriormente no tópico 3.2.6 deste trabalho. Por fim, a Figura 4.5 compara de forma simples o comportamento das misturas curadas a 23°C em relação à rigidez inicial ( $G_0$ ).

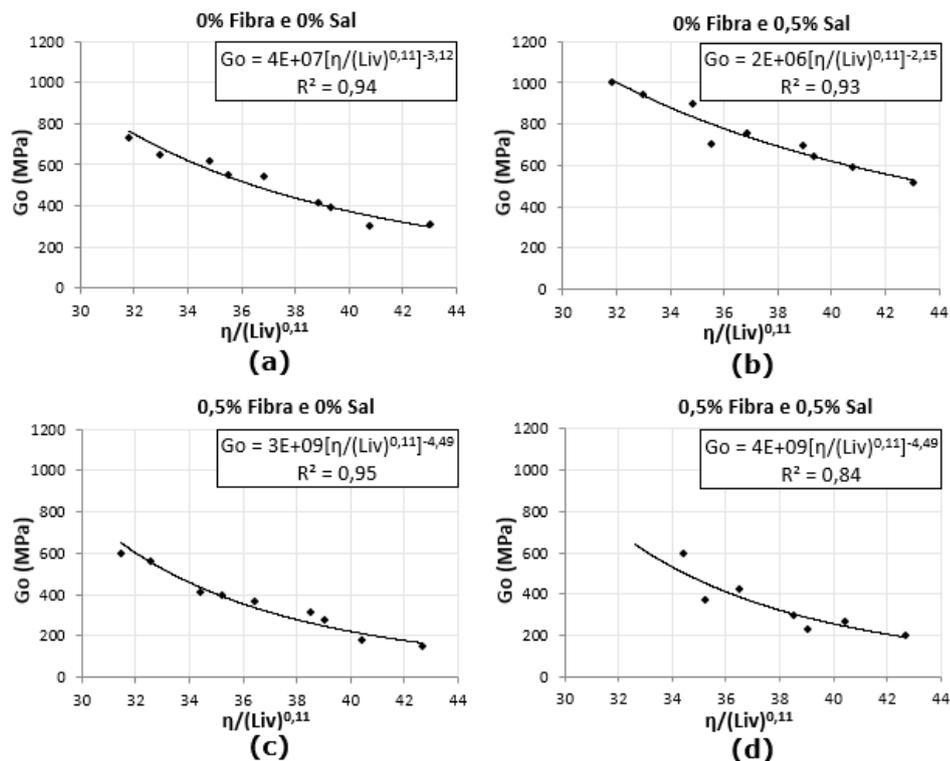


Figura 4.4 –  $G_0 \times \eta/(L_{iv})^{0,11}$  para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C.

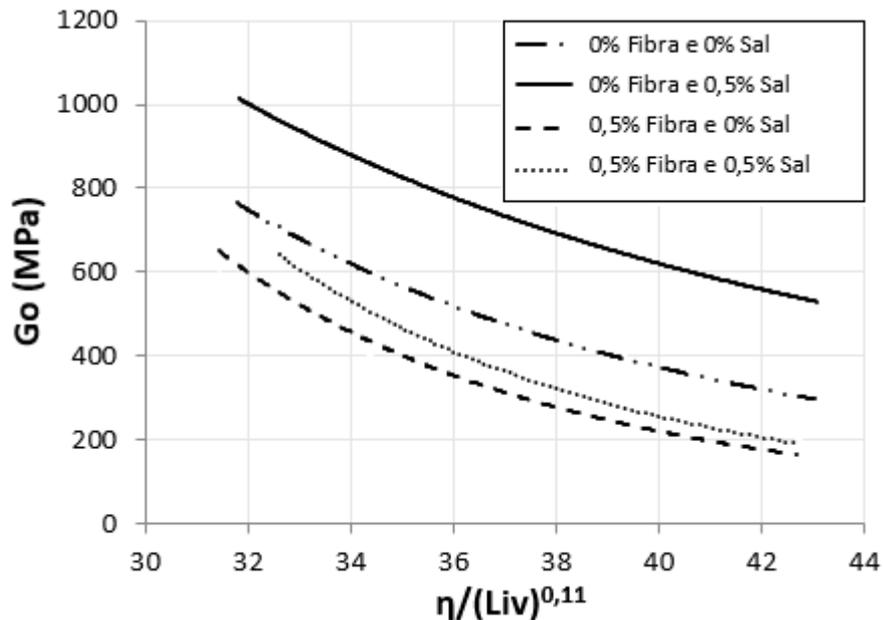


Figura 4.5 – Comparação de  $G_0$  entre as misturas com areia de Osório, curadas a 23°C.

Os ensaios de durabilidade com ciclos de congelamento e degelo seguiram as orientações da norma ASTM D560 (2016). Esta norma recomenda que todas as áreas do espécime sejam cobertas duas vezes por escovagens, lateralmente seriam necessários de 18 a 20 escovadas. Este padrão foi originalmente desenvolvido para misturas solo-cimento, para o qual a perda de massa em cada escovada é geralmente muito pequena em relação ao peso total dos corpos de prova. A relação entre a perda de massa acumulada e o número de ciclos para experimentos com tais misturas é aproximadamente linear (Consoli *et al.* 2017b). No entanto, em misturas com cinza volante e cal, a perda de massa em cada ciclo é muito mais significativa, de tal forma que, após um certo número de ciclos, os espécimes se tornam significativamente menores e o número total de escovadas necessárias para cobrir duas vezes a área lateral são consideravelmente inferiores ao especificado por norma. Essa redução no número de escovadas resulta em menores perdas de massa nos últimos ciclos que pode ser interpretada incorretamente como um ganho de durabilidade à medida que os espécimes perdem massa. Logo, para este trabalho, adotou-se um número fixo de 19 escovadas em cada ciclo, independente se eram escovadas mais de duas vezes cada área do corpo de prova. A Figura 4.6 compara os resultados de misturas com fibra e sem sal, obtidos através (a) de duas escovadas por área e (b) mantendo-se um número fixo de 19 escovadas por ciclo.

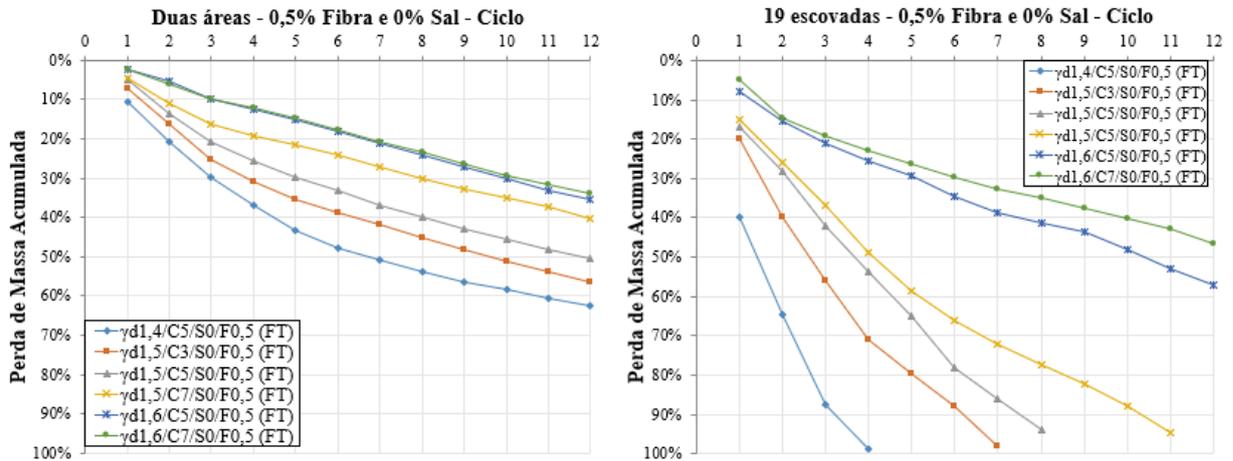


Figura 4.6 – Comparação da perda de massa acumulada obtida através de (a) duas escovadas por área e (b) mantendo-se 19 escovadas fixas.

Foram ensaiados para durabilidade com areia de Osório-CFA-cal dolomítica, tanto molhagem e secagem quanto congelamento e degelo. As combinações de misturas são expressas na Tabela 4.1, sendo realizadas sem fibra e sem sal, com sal, com fibra, com fibra e com sal, resultando assim em 24 corpos de prova para cada ensaio de durabilidade.

Tabela 4.1 – Peso específico e teor de cal analisados para a mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica

		PESO ESPECÍFICO (kN/m <sup>3</sup> )		
		14	15	16
CAL (%)	3		X	
	5	X	X	X
	7		X	X

A Figura 4.7 expressa os resultados de perda de massa acumulada após 12 ciclos de molhagem e secagem (linhas vermelhas) e ciclos de congelamento e degelo (linhas em azul) para misturas (a) sem fibra e sem sal, (b) com sal, (c) com fibra e (d) com sal e com fibra.

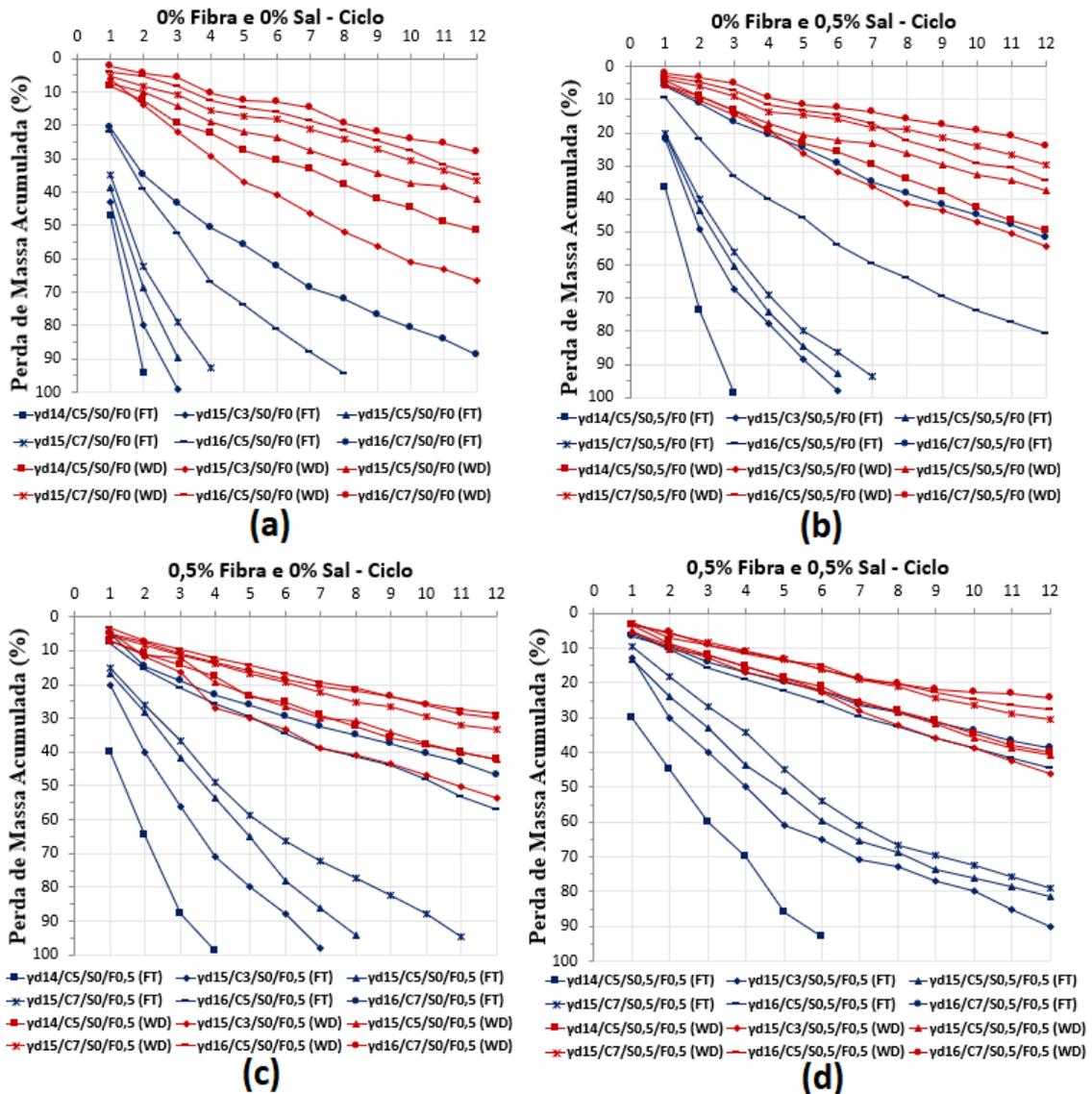


Figura 4.7 – PMA após ciclos de molhagem e secagem (linhas vermelhas) e ciclos de congelamento e degelo (linhas em azul) para misturas (a) sem fibra e sem sal, (b) com sal, (c) com fibra e (d) com sal e com fibra, curadas a 23°C.

A realização de uma análise de sensibilidade se mostrou necessária para avaliar a influência individual de cada componente adicionado às misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (sal e fibras), bem como a influência da compactação e da porcentagem de cal. Portanto, a seguir são avaliados como esses componentes afetam a durabilidade das misturas estudadas e quais deles influenciam mais o desempenho das mesmas. Inicialmente foi realizada a análise da durabilidade por ciclos de congelamento e degelo (FT) e, posteriormente, uma comparação entre os resultados dos ciclos de congelamento e degelo (FT) em relação aos ciclos de molhagem e secagem (WD).

- Análise da durabilidade com ciclos de Congelamento e Degelo (FT)

Comparando o comportamento dos espécimes sem sal [Figura 4.7 (a)] para aqueles com sal [Figura 4.7 (b)], pode-se observar que o ganho mais significativo na durabilidade ocorre para o corpo de prova  $\gamma d16/C7/S0,5/F0$  (FT), cuja perda de massa acumulada (PMA) após 12 ciclos é de 51,6%. Para a mesma mistura sem sal [ $\gamma d16/C7/S0,5/F0$  (FT)], a PMA após 12 ciclos é de 88,9%, o que significa uma melhoria de 37,3% na durabilidade após a adição de uma pequena quantidade de NaCl (0,5%). O segundo maior ganho de durabilidade causado pela adição de sal foi observado para a espécime  $\gamma d15/C3/S0,5/F0$  (FT). O espécime sem qualquer quantidade de sal apresentou PMA de 99,0% após 3 ciclos, desintegrando-se depois disso. A PMA para a mistura com sal, por sua vez, foi de 67,1% após o mesmo número de ciclos - uma diferença de 31,9%. Este espécime resistiu 6 ciclos sem desintegrar, 3 ciclos a mais do que a mistura sem sal. O terceiro maior ganho (+30,4%) verificado de durabilidade pela inclusão de sal ocorreu para o corpo de prova  $\gamma d16/C5/S0,5/F0$  (FT), resistindo 4 ciclos a mais que a mistura equivalente sem NaCl. Essas descobertas revelam que a adição de uma pequena quantidade de sal é altamente efetiva para aumentar a durabilidade das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica submetidas a congelamento e degelo.

A adição de fibras também proporcionou às misturas um ganho significativo de durabilidade. Para o espécime  $\gamma d16/C5/S0/F0,5$  (FT), por exemplo, a PMA após 8 ciclos reduziu de 94,4% para 41,2% com a adição de 0,5% de fibras de polipropileno - uma diferença de 53,2%. Além disso, o espécime  $\gamma d16/C5/S0/F0,5$  (FT) resistiu a 12 ciclos de exposição ao congelamento e degelo antes de se desintegrar, enquanto o espécime com 0,5% de fibra resistiu 12 ciclos e a respectiva mistura com 0,5% de sal apresentou um ganho de 30,4%. Já para o copor de prova  $\gamma d15/C5/S0/F0,5$  (FT), a PMA reduziu de 89,7% para 42,0% após 3 ciclos, uma redução de 47,7%, enquanto que a adição de sal à mesma mistura, sem fibra, provocou uma redução de 29,4%, sendo que as misturas com adição de fibra resistiram 5 ciclos a mais e as misturas com adição de sal resistiram apenas 3 ciclos a mais. Essas descobertas sugerem que a inclusão de fibras é mais eficaz para melhorar a durabilidade das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica em relação à adição da mesma porcentagem de sal.

O efeito benéfico na durabilidade causada pelas inclusões de fibras pode ser explicado pelas propriedades expansivas bem conhecidas da água durante o processo de congelamento, para temperaturas inferiores a 4 °C. Quando submetido a -23 ° C durante ciclos de congelamento e

degelo, a água interna dos espécimes se expande e tenta quebrar as ligações de cal. Essas rupturas podem ser evitadas pela presença de fibras de polipropileno, o que pode explicar o aumento da durabilidade proporcionada pela inclusão de fibras.

Entre todos os tipos de adições à mistura analisada, a adição de 0,5% de fibra de polipropileno e 0,5% de sal apresentou o maior ganho de durabilidade. O espécime  $\gamma d16/C5/S0,5/F0,5$  (FT), por exemplo, apresentou PMA igual a 94,4% após 8 exposições a ciclos de congelamento e degelo. Isto representa uma melhoria na durabilidade de 61,6% em relação à mesma mistura sem inclusão de sal e fibra, e, além disso, os corpos de prova passaram a resistir 4 ciclos a mais. O segundo maior ganho de durabilidade (59,1%) com adição de 0,5% de sal e 0,5% de fibras ocorreu para o espécime  $\gamma d15/C3/S0,5/F0,5$  (FT). Esta adição fez com que o corpo de prova passasse a se desintegrar apenas no 12º ciclo, 9 ciclos a mais que a mistura equivalente sem aditivos. Tais análises sugerem que a inclusão de fibras + NaCl é a maneira mais eficaz de se melhorar este tipo de mistura entre as possíveis melhorias analisadas.

Quanto ao aumento da compactação ( $\gamma d$ ), um ganho de durabilidade foi nitidamente percebido. Para os espécimes com 5% de cal, por exemplo, PMA após 2 ciclos foi de 39,0% para  $\gamma d = 16$  kN/m<sup>3</sup> enquanto que, para  $\gamma d = 14$  kN/m<sup>3</sup>, a PMA foi de 94,2% para o mesmo número de ciclos. Vale ressaltar que o espécime com  $\gamma d = 14$  kN/m<sup>3</sup> [ $\gamma d14/C5/S0/F0$  (FT)] desintegrou-se após 2 ciclos de exposição enquanto o corpo de prova com  $\gamma d = 16$  kN/m<sup>3</sup> [ $\gamma d16/C5/S0/F0$  (FT)] resistiu a todos os 8 ciclos de exposição ao congelamento e degelo sem desintegração. Um aumento relevante na durabilidade causada pela compactação também pode ser notado para o espécime  $\gamma d16/C7/S0/F0$  (FT) quando comparado ao espécime  $\gamma d15/C7/S0/F0$  (FT). Uma diminuição de 41,8% na PMA após 4 ciclos de exposição foi verificada, o que representa um importante ganho de durabilidade. Ainda assim, o espécime com  $\gamma d = 16$  kN/m<sup>3</sup> resistiu a todos os 12 ciclos de teste, sendo que o espécime com  $\gamma d = 15$  kN/m<sup>3</sup> desmoronou após 4 ciclos. É possível perceber que um alto aumento da energia de compactação (como de  $\gamma d = 14$  kN/m<sup>3</sup> para  $\gamma d = 16$  kN/m<sup>3</sup>) pode apresentar maiores ganhos de durabilidade que a adição de fibras de polipropileno, mas para aumentos sensíveis do grau de compactação (como de  $\gamma d = 14$  kN/m<sup>3</sup> para  $\gamma d = 15$  kN/m<sup>3</sup>) as fibras de polipropileno possuem melhores resultados de durabilidade.

O efeito do aumento do teor de cal também foi verificado. O maior aumento de durabilidade foi observado para o espécime  $\gamma d16/C7/S0/F0$  (FT), com PMA = 72,2% em relação ao corpo de prova  $\gamma d16/C5/S0/F0$  (FT), com PMA = 94,4%, uma diminuição de PMA na ordem de

22,2%. Além disso, o espécime com 7% de cal resistiu a 12 ciclos de exposição ao congelamento e degelo, enquanto o espécime com 5% de cal desintegrou-se após 8 ciclos. O efeito benéfico do aumento do teor de cal também foi verificado entre os espécimes  $\gamma$ d15/C7/S0/F0 (FT) e  $\gamma$ d15/C3/S0/F0 (FT). Um aumento de 4% no teor de cal causou uma diminuição de PMA na ordem de 20,0%.

A análise das descobertas acima mencionadas sugere que a adição de sal e fibras em conjunto é a maneira mais efetiva de aumentar a durabilidade das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica, já que os espécimes com NaCl e fibras apresentaram a maior diminuição de PMA em comparação com espécimes sem fibras e sal. As inclusões de fibra (sem sal) parecem ser a segunda técnica mais útil para reduzir a PMA e, portanto, melhorar a durabilidade. O aumento do  $\gamma$ d através da compactação foi o terceiro método mais eficaz para aumentar a durabilidade, enquanto a adição de cloreto de sódio separadamente das fibras foi o quarto melhor desempenho entre os tipos de adições analisados. O aumento do teor de cal, por sua vez, provocou o aumento menos efetivo da durabilidade dos espécimes. Embora o conteúdo de cal empregado fosse muito maior do que os teores de fibras e sais, a diminuição da PMA observada não era tão significativa quanto a verificada para as outras misturas.

Assim, para as proporções dos materiais analisados na presente pesquisa, pode-se afirmar a seguinte ordem de eficácia em termos de maior durabilidade por congelamento e degelo, com cura de 23°C:

NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno > Compactação > NaCl > Cal

Um aspecto adicional a se considerar é que não parece haver uma relação direta entre resistência e durabilidade para as misturas estudadas. Embora as misturas com fibras e sal conjuntamente apresentem o melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade, o mesmo não pode ser dito ao comparar o comportamento das misturas com fibras e sal separadamente. Os espécimes com 0,5% de sal e 0% de fibras apresentaram melhor desempenho em termos de resistência, enquanto espécimes com 0,5% de fibras e 0% de sal apresentam melhor desempenho em termos de durabilidade. Vale ressaltar, no entanto, que tanto as fibras como o sal - separadamente ou em conjunto - têm um efeito benéfico sobre a resistência e a durabilidade das misturas estudadas, mesmo que a magnitude/intensidade desse efeito seja diferente entre resistência e durabilidade.

A influência do índice ajustado de porosidade / teor volumétrico de cal  $[\eta/(L_{iv})^{0,11}]$  na durabilidade de certos materiais pode ser avaliada através da sua relação com a perda de massa acumulada (PMA). Consoli *et al.* (2017b) foram os primeiros a revelar uma relação entre PMA e  $\eta/(C_{iv})^{0,28}$  para rejeitos de ouro cimentados reforçados com fibra submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Os pesquisadores também mostraram que uma normalização de PMA com o número de ciclos (NC) também possui uma relação com  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ . Consoli *et al.* (2017a) confirmaram que esta normalização também pode ser aplicada a misturas de cinza volante e cal sujeitas a congelamento e degelo e exposição a molhagem e secagem, relacionando PMA/NC a  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ .

A Figura 4.8 retrata a normalização acima mencionada para os diversos materiais estudados na presente pesquisa. Boas correlações ( $R^2$  variando entre 0,85 e 0,93) podem ser percebidas para as misturas com areia de Osório, com ou sem a presença de fibras de polipropileno e NaCl. As parcelas confirmam que a inclusão de fibras é mais eficaz no aumento da durabilidade do que a adição de sal. Além disso, pode-se inferir que a redução da PMA devido ao reforço de fibras e à adição de sal é mais pronunciada para valores mais elevados de  $\eta/L_{iv}$ , isto é, para misturas com maior porosidade (menor compactação) e menor teor de cal.

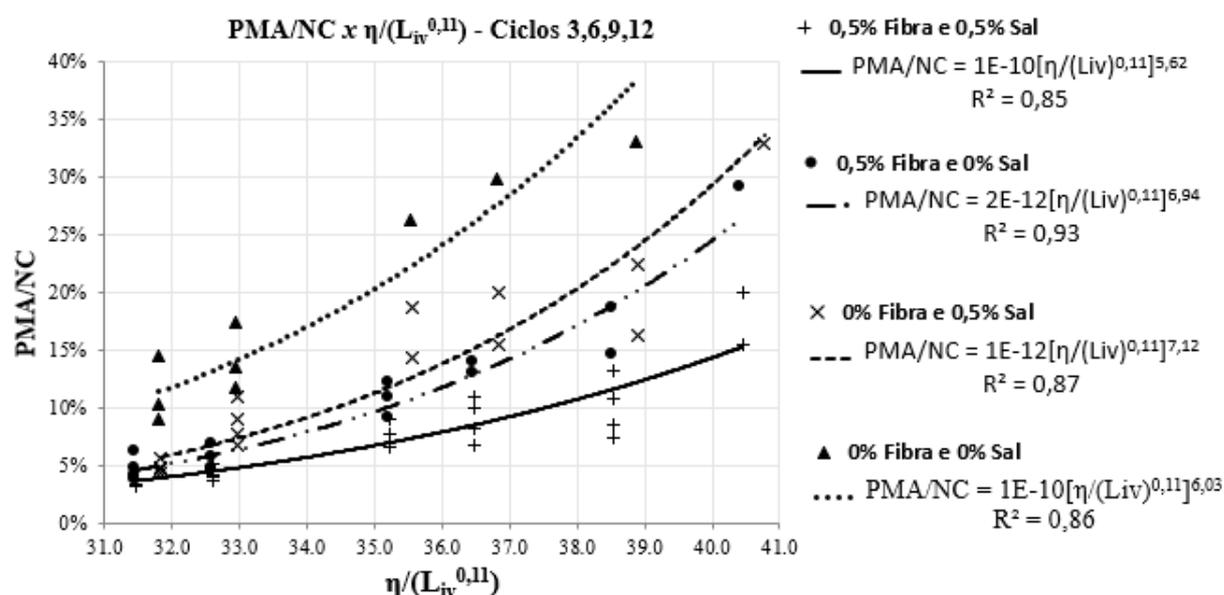


Figura 4.8 – PMA normalizada pelo número de ciclos de congelamento e degelo versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para 3, 6, 9 e 12 ciclos da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica, em vista de diferentes pesos específicos e teores de cal, fibra e NaCl, curadas a 23°C.

- Comparação entre ciclos de Congelamento e Degelo (FT) em relação aos ciclos de Molhagem e Secagem (WD)

Em condições de molhagem e secagem, após cura de 7 dias a uma temperatura de cerca de 23 °C, as reações pozolânicas são aceleradas durante a secagem a uma temperatura de 71 °C, o que não ocorre nas condições de congelamento e degelo, onde as reações pozolânicas são interrompidas durante o congelamento, a uma temperatura abaixo de -23 °C (Consoli *et al.*, 2014a). Assim, os espécimes submetidos a ciclos de molhagem e secagem têm ligações mais fortes e, portanto, menores perdas de massa do que ciclos de congelamento e degelo (Consoli *et al.* 2017a).

Comparando o comportamento dos espécimes sem sal, Figura 4.7 (a), para aqueles com sal, Figura 4.7 (b), pode-se observar que o ganho mais significativo de durabilidade ocorre para o corpo de prova  $\gamma$ d15/C3/S0.5/F0 (WD) nos ciclos de molhagem e secagem (PMA após 12 ciclos é de 54,3%). Já a PMA para a mesma mistura sem sal,  $\gamma$ d15/C3/S0.5/F0 (WD), é de 66,6%, após 12 ciclos, o que significa uma melhoria de 12,3% na durabilidade. O segundo maior ganho após a adição de uma pequena quantidade de NaCl (0,5%) nos espécimes ensaiados com ciclos de molhagem e secagem ocorreu para as misturas  $\gamma$ d15/C7/S0,5/F0 (WD), sendo o aumento de durabilidade de 6,9%.

O ciclo máximo alcançado pelo teste de congelamento e degelo é menor do que o de molhagem e secagem (todos os corpos de prova resistiram aos 12 ciclos de WD, mas nem todos resistiram aos 12 ciclos de FT). Logo, para se comparar ambos ensaios de durabilidade, são analisados os valores de perda de massa acumulada no referido ciclo máximo do teste de congelamento e degelo. Exemplo: um corpo de prova que apresenta um ganho X de durabilidade ao final de 3 ciclos de congelamento e degelo (após isso o corpo de prova é desintegrado) será comparado com o respectivo corpo de prova que sobrevive aos 12 ciclos de molhagem e secagem, sendo que o valor a ser comparado é referente ao ganho de durabilidade do 3º ciclo e não do 12º ciclo. Um resumo dessa comparação é exposto na Tabela 4.2. É notável que o cloreto de sódio é muito mais efetivo na durabilidade de congelamento e degelo (FT). A baixa eficiência da adição deste catalisador nos ciclos de molhagem e secagem (WD) pode ser explicada pelo processo de imersão do espécime durante 5 horas em cada ciclo, o que pode resultar na dissolução do NaCl na água.

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados de durabilidade com 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo.

Nomenclatura do Corpo de Prova	Congelamento - Degelo	Molhagem - Secagem	Ciclo de comparação
$\gamma$ d14/C5/S0,5/F0	+20,2 %	+3,4 %	2°
$\gamma$ d15/C3/S0,5/F0	+31,9 %	+7,4 %	3°
$\gamma$ d15/C5/S0,5/F0	+29,4 %	+1,4 %	3°
$\gamma$ d15/C7/S0,5/F0	+23,6 %	+2,0 %	4°
$\gamma$ d16/C5/S0,5/F0	+30,4 %	0 %	8°
$\gamma$ d16/C7/S0,5/F0	+37,3 %	+3,9 %	12°

A adição de fibras proporcionou às misturas um aumento de durabilidade em ambos os testes. O maior efeito das fibras de polipropileno sobre a durabilidade para os ciclos de molhagem e secagem ocorreu no espécime  $\gamma$ d15/C3/S0/F0,5 (WD), com um aumento de 13,2% após 12 ciclos. O segundo maior ganho (+9,2%) percebido ocorreu para a mistura  $\gamma$ d14/C5/S0/F0,5 (WD). Vale ressaltar, que para a mesma mistura, sem adição de fibra e com adição de sal, os ganhos de durabilidade foram inferiores aos obtidos das misturas sem sal e com fibra. Essas descobertas sugerem que as inclusões de fibras são mais eficazes para melhorar a durabilidade das misturas de areia de Osório, se comparado à adição de apenas NaCl. Além disso, vale ressaltar que os maiores ganhos de durabilidade com ciclos de molhagem e secagem ocorreram nos últimos ciclos, não sendo significativo no início do ensaio. Esta baixa eficiência inicial pode ser observada na Tabela 4.3, que compara os resultados dos dois testes de durabilidade.

Tabela 4.3 – Comparação dos resultados de durabilidade, com adição de 0,5% de fibras, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo

Nomenclatura do Corpo de Prova	Congelamento - Degelo	Molhagem - Secagem	Ciclo de comparação
$\gamma$ d14/C5/S0/F0,5	+29,4 %	+1,7 %	2°
$\gamma$ d15/C3/S0/F0,5	+43,0 %	+5,9 %	3°
$\gamma$ d15/C5/S0/F0,5	+47,7 %	+2,5 %	3°
$\gamma$ d15/C7/S0/F0,5	+43,6 %	+1,6 %	4°
$\gamma$ d16/C5/S0/F0,5	+53,2 %	+0,6 %	8°
$\gamma$ d16/C7/S0/F0,5	+42,2 %	0 %	12°

Para as misturas com 0,5% de fibras de polipropileno e 0,5% de sal submetidas a ciclos de molhagem e secagem, o espécime  $\gamma$ d15/C3/S0,5/F0,5 (WD) apresentou PMA igual a 46,0%

após 12 ciclos. Isso representa uma melhoria na durabilidade de 20,6% em relação à mesma mistura sem inclusões de sais ou de fibras de polipropileno. Além disso, a adição de 0,5% de sal e 0,5% de fibras ao espécime  $\gamma d14/C5/S0,5/F0,5$  (WD) causou um aumento de durabilidade de 11,4%. Isso sugere que a inclusão de fibras + NaCl é uma maneira eficaz de melhorar a mistura se comparada à adição destes elementos de forma separada. A Tabela 4.4 mostra um resumo de cada comparação de ganho entre os dois tipos de ciclo, para as misturas com adição de fibras e sal.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados de durabilidade, com adição de 0,5% de fibras e sal, no referido ciclo máximo alcançado pelo ciclo de congelamento e degelo

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>Congelamento - Degelo</b>	<b>Molhagem - Secagem</b>	<b>Ciclo de comparação</b>
$\gamma d14/C5/S0,5/F0,5$	+49,2 %	+3,8 %	2°
$\gamma d15/C3/S0,5/F0,5$	+59,1 %	+9,1 %	3°
$\gamma d15/C5/S0,5/F0,5$	+56,6 %	+2,5 %	3°
$\gamma d15/C7/S0,5/F0,5$	+58,5 %	+4,7 %	4°
$\gamma d16/C5/S0,5/F0,5$	+61,6 %	+1,4 %	8°
$\gamma d16/C7/S0,5/F0,5$	+50,0 %	+3,5 %	12°

O aumento de durabilidade por molhagem e secagem mais pronunciado, ocorrido com o aumento da compactação ( $\gamma d$ ), ocorreu para a mistura com 5% de cal quando o peso específico aparente seco era elevado de 14 kN/m<sup>3</sup> para 16kN/m<sup>3</sup>, resultando em um ganho de 16,7% de durabilidade (WD). No entanto, esse valor é representativo de um alto aumento no grau de compactação. Analisando uma elevação do peso específico de 14 kN/m<sup>3</sup> para 15kN/m<sup>3</sup> para as misturas com 5% de cal, tem-se um ganho de durabilidade de 9,5%. A Tabela 4.5 resume cada comparação de ganho entre o efeito da compactação em relação aos estudos de durabilidade realizados.

Tabela 4.5 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade, no referido ciclo máximo alcançado

Nomenclatura do Corpo de Prova	Congelamento - Degelo	Molhagem - Secagem	Ciclo de comparação
$\gamma d16/C5/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d15/C5/S0/F0$	+37,3 %	+7,0 %	3°
$\gamma d16/C5/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d14/C5/S0/F0$	+55,2 %	+7,3 %	2°
$\gamma d15/C5/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d14/C5/S0/F0$	+25,4 %	+2,3 %	2°
$\gamma d16/C7/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d15/C7/S0/F0$	+22,2 %	+4,7 %	8°

O aumento do teor de cal possui grande influência no comportamento e durabilidade das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica. O maior aumento de durabilidade, para molhagem e secagem, foi observado para o espécime de 15 kN/m<sup>3</sup> em relação ao corpo de prova com 3% de cal dolomítica (PMA = 66,6%) em comparação ao espécime com 7% de cal dolomítica (PMA = 36,4%), resultando em um ganho de 30,2%. Já um aumento de 2% no teor de cal [ $\gamma d15/C5/S0/F0$  (WD)  $\Leftrightarrow$   $\gamma d15/C3/S0/F0$  (WD)], pode causar uma diminuição de PMA na ordem de 24,7%. A diferença de eficiência da adição de cal em relação a ciclos de molhagem-secagem (WD) e congelamento-degelo (FT) pode ser observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade, no referido ciclo máximo alcançado

Nomenclatura do Corpo de Prova	Congelamento - Degelo	Molhagem - Secagem	Ciclo de comparação
$\gamma d15/C7/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d15/C3/S0/F0$	+20,0 %	+11,3 %	3°
$\gamma d15/C7/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d15/C5/S0/F0$	+10,7 %	+3,6 %	3°
$\gamma d15/C5/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d15/C3/S0/F0$	+9,3 %	+7,7 %	3°
$\gamma d16/C7/S0/F0 \Leftrightarrow \gamma d16/C5/S0/F0$	+22,2 %	+2,2 %	8°

A análise dos dados acima apresentados sugere um comportamento diferente entre os testes de durabilidade relativos à eficiência de cada componente na mistura. Como mencionado anteriormente, os principais motivos para essas diferenças se devem ao processo de molhagem e variação de temperatura de cada ensaio. Assim a seguinte ordem de eficácia em termos de maior durabilidade pode ser indicada para os testes de congelamento-degelo, com corpos de prova curados a 23°C:

NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno > Compactação > NaCl > Cal

Para as proporções dos mesmos materiais analisados, a seguinte ordem de eficácia em termos de maior durabilidade pode ser indicada para os ensaios de molhagem e secagem, com corpos de prova curados a 23°C:

Cal > NaCl + Fibras de polipropileno > Compactação > Fibras de polipropileno > NaCl

Para os ensaios de molhagem e secagem, também não foi percebido uma relação direta entre resistência e durabilidade para as misturas estudadas.

A Figura 4.9 retrata a normalização da perda de massa média acumulada pelo número de ciclos (3, 6, 9 e 12), para as distintas misturas estudadas nesta pesquisa: (a) sem fibra e sem sal [ $R^2 = 0,80$  – Equação 18, para WD], (b) sem fibra e com sal [ $R^2 = 0,81$  – Equação 19, para WD], (c) com fibra e sem sal [ $R^2 = 0,59$  – Equação 20, para WD] e (d) com fibra e com sal [ $R^2 = 0,60$  – Equação 21, para WD]. As equações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das curvas de congelamento e degelo o são as mesmas descritas na Figura 4.8.

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 3E - 08 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,11}} \right]^{3,92} \quad (\text{Equação 18})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 1E - 07 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,11}} \right]^{3,44} \quad (\text{Equação 19})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 2E - 05 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,11}} \right]^{2,09} \quad (\text{Equação 20})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 5E - 05 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0,11}} \right]^{1,80} \quad (\text{Equação 21})$$

Analisando a Figura 4.9, é possível confirmar que a inclusão de fibras parece ser mais eficaz no aumento da durabilidade por congelamento e degelo do que por molhagem e secagem. Além disso, pode-se inferir que a redução de PMA devido ao reforço de fibras e à adição de sal é mais pronunciada para valores mais elevados de  $\eta/L_{iv}$ , isto é, para misturas com maior porosidade (menos compactação) e menores conteúdos de cal, sendo que este comportamento é muito pronunciado nos ciclos de congelamento e degelo se comparado aos ciclos de molhagem e secagem. Também pode ser vista uma maior variação de durabilidade para os testes de congelamento- degelo em comparação com os testes de secagem quando se adicionou cloreto de sódio e fibras, o que pode confirmar a ideia de que o sal se dissolve na água nos ciclos de molhagem e a fibra de polipropileno é mais efetiva quando sujeito a congelamento (tensões de tração).

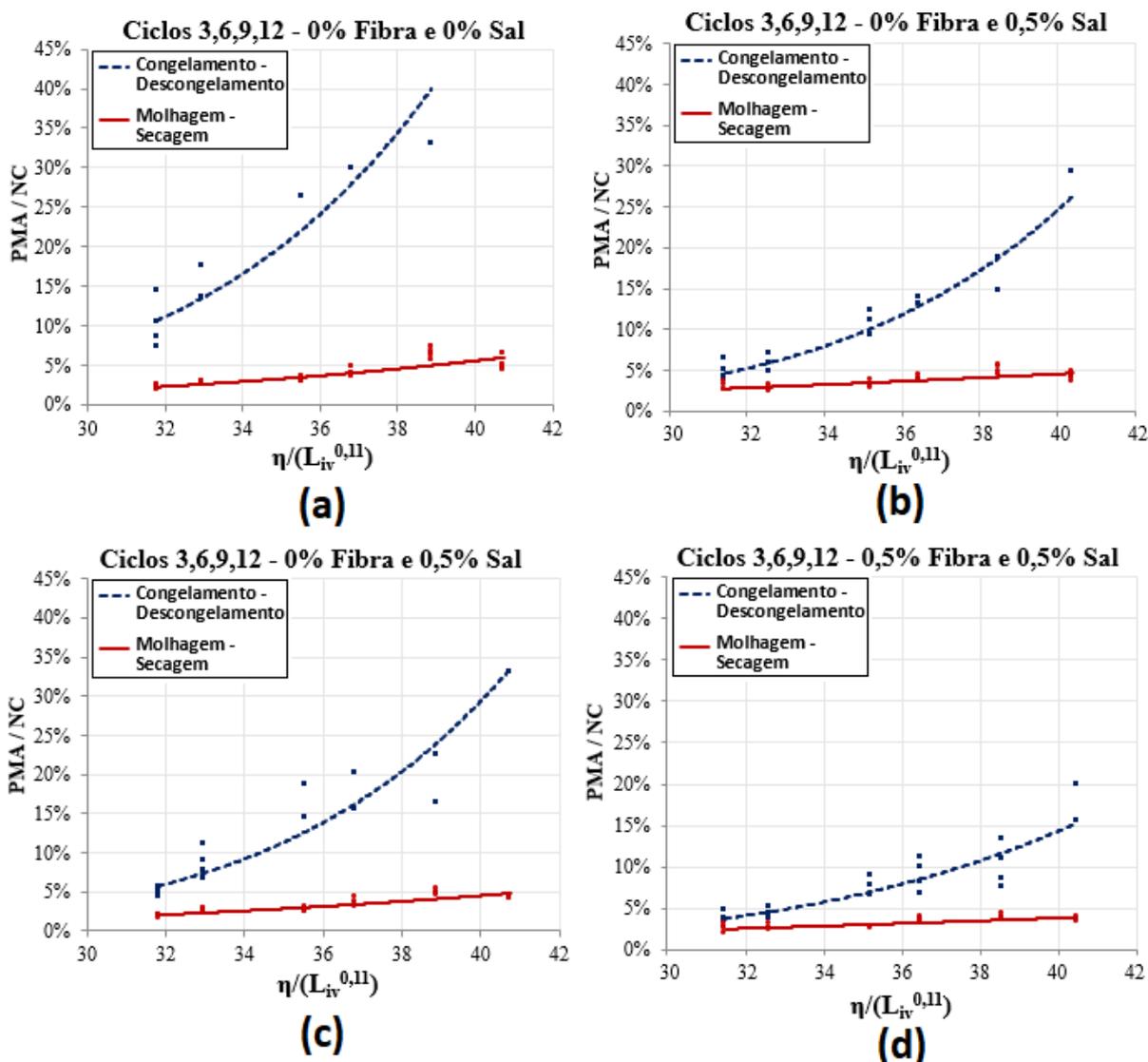


Figura 4.9 – PMA dividida pelo número de ciclos de durabilidade versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para 3, 6, 9 e 12 ciclos, da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibras e sem cloreto de sódio; (b) com fibras; (c) com cloreto de sódio; (d) com cloreto de sódio e fibras

#### 4.1.2 Curadas a 40°C

A Figura 4.10 compara os resultados de resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) dos espécimes em relação ao índice  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , com temperaturas de cura de 23°C e 40°C, das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibras e sem sal, (b) com sal, (c) com fibra e (d) reforçadas com fibra e com sal. Já a Figura 4.11 compara todas as curvas anteriormente descritas no mesmo gráfico.

Em geral, os espécimes curados a 40°C apresentaram um aumento consideravelmente maior de resistência se comparado aos corpos de prova curados a 23°C, no entanto a mistura se comportou de forma diferente para cada temperatura de cura. Como citado no tópico anterior, para as misturas curadas a 23°C, a adição de fibras de polipropileno são mais eficazes que o sal, sendo esse ganho mais pronunciado para valores mais baixos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ . No entanto, os maiores ganhos de resistência foram obtidos com a adição de fibras às misturas com sal, havendo uma ligeira diminuição de resistência para índices superiores a 40.

Já para as misturas curadas a 40°C, a adição de fibras não conferiu grandes alterações de resistência ao corpo de prova. Tal comportamento já foi registrado anteriormente por Consoli *et al.* (2009) para misturas de areia com cimento reforçadas com fibra. Os autores perceberam que, após certo valor de ganho de resistência, a adição de fibras diminui a resistência das misturas, criando “caminhos internos” no corpo de prova e favorecendo a formação de planos de ruptura. Logo, as misturas com 0,5% de sal apresentaram os maiores ganhos de resistência.

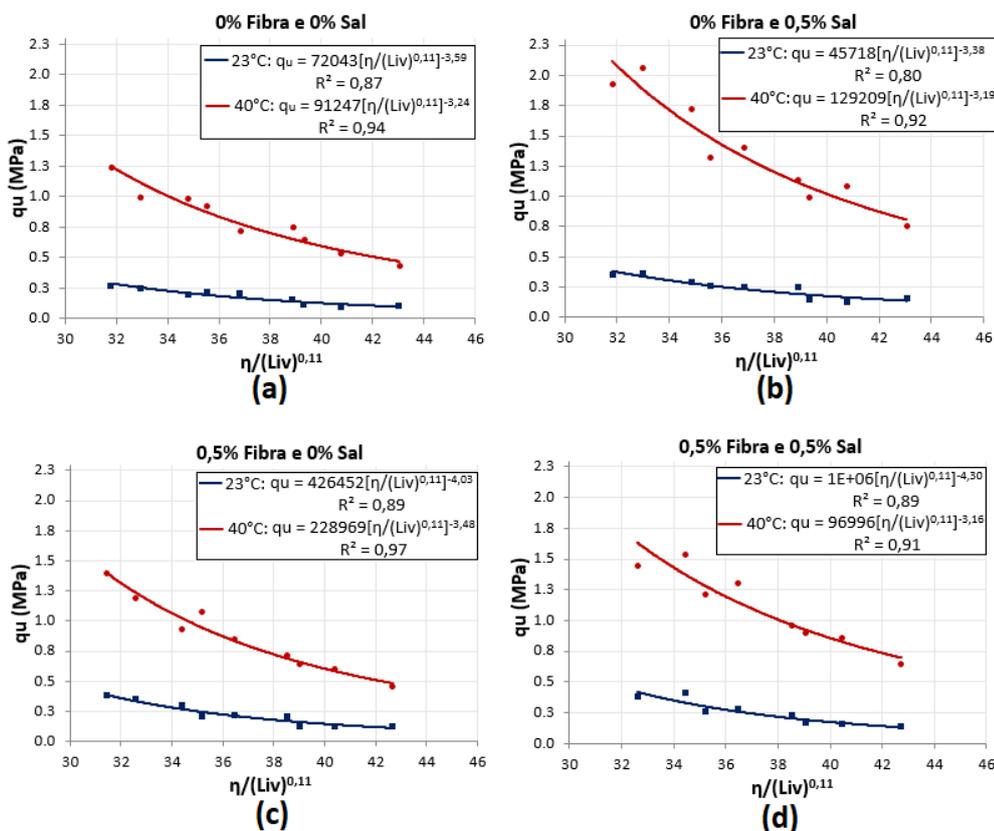


Figura 4.10 – Variação de  $q_u$  em relação a  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para misturas de areia de Osório -CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, curadas a 23 e 40°C

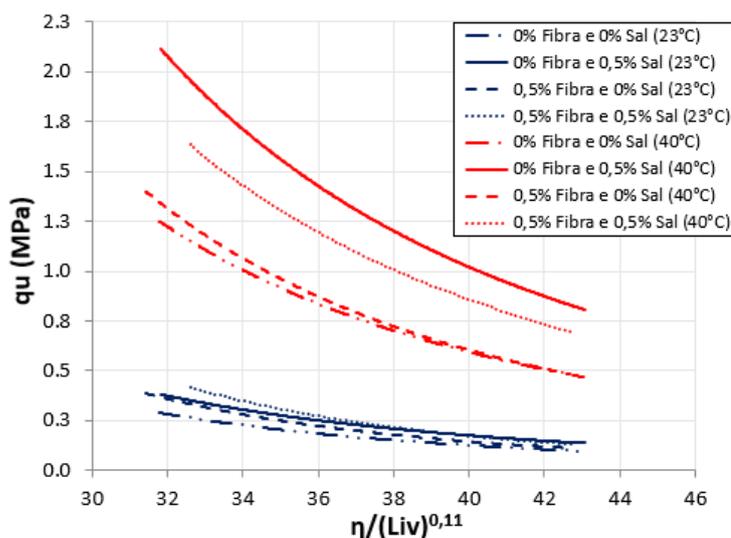


Figura 4.11 – Comparação de  $q_u$  entre as misturas sem sal e sem fibra, com sal, com fibra, com sal e com fibra

Uma forma de se analisar numericamente a influência de cada elemento da mistura e da alteração da temperatura de cura, é forçando as curvas expressas na Figura 4.11 para um mesmo expoente da equação. Para isso utilizou-se o software Grapher v.12, obtendo-se um expoente comum às curvas de -3,5. Este expoente foi obtido alterando-se aleatoriamente os valores da potência até se obter um valor que representa o máximo coeficiente de determinação para cada curva possível. O resultado deste ajuste está exposto na Figura 4.12. Dividindo-se as equações umas pelas outras é possível se determinar em porcentagem a influência de cada aditivo à mistura.

Para as misturas curadas a 23°C tem-se um aumento de resistência à compressão simples de 35,6% com a adição de sal, 24,6% com adição de fibras e 49,5% com adição conjunta de fibras e sal.

Já no caso das misturas curadas a 40°C tem-se um aumento de resistência à compressão simples de 71,0% com a adição de sal, 0,5% com adição de fibras e 43,6% com adição conjunta de fibras e sal.

Analisando o aumento da temperatura de cura de 23°C para 40°C, os ganhos de resistência à compressão não confinada foram de 344,5% para os corpos de prova sem fibra e sem sal, 460,8% para as misturas com sal, 276% para os espécimes com fibras e 327,0% para os corpos de prova com fibras e sal.

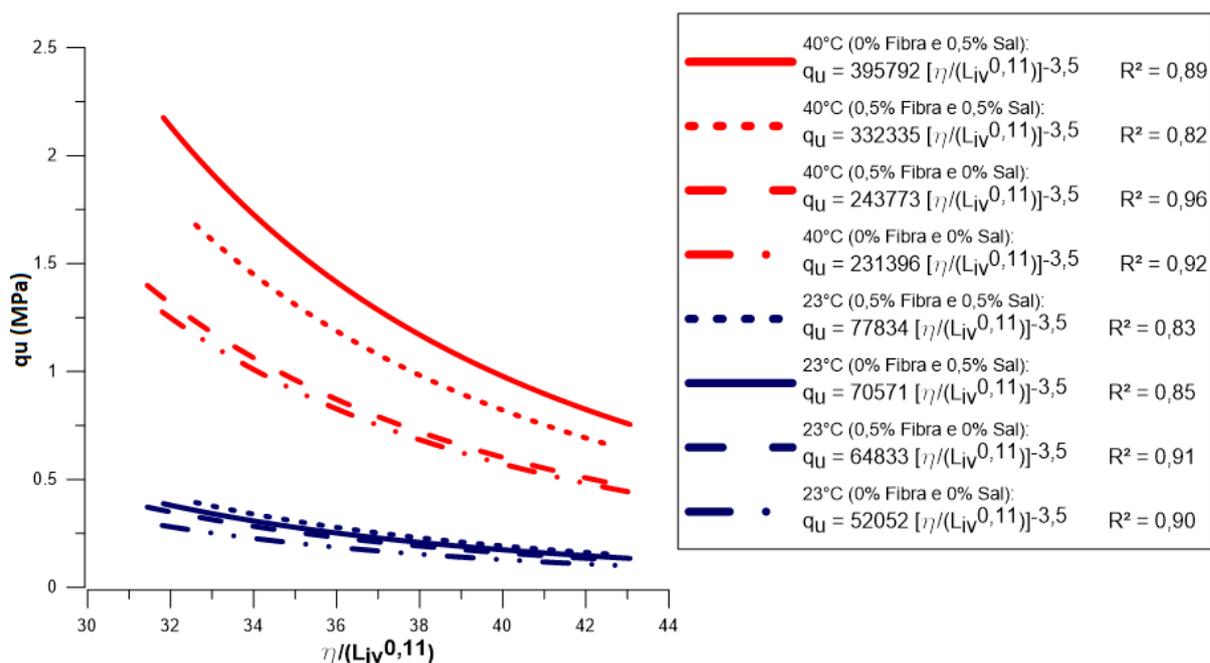


Figura 4.12 – Comparação de  $q_u$  entre as misturas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica com aditivos ou não, curadas a 23°C e a 40°C, em relação a  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , forçando os expoentes das curvas para um valor comum

A mesma dificuldade em se obter claras leituras de ondas nos ensaios de rigidez para os corpos de prova curados a 23°C com fibras foi percebida para os espécimes curados a 40°C, com coeficientes de determinação relativamente baixos ( $R^2$  entre 0,57 e 0,65). Logo os dados de rigidez das misturas com fibra são analisados de forma criteriosa e com caráter qualitativo e não quantitativo.

A Figura 4.13 exibe os resultados de rigidez inicial ( $G_0$ ) dos espécimes curados a 23°C e 40°C (a) sem fibra e sem sal, (b) com sal, (c) com fibra e (d) com fibra e com sal, em termos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ . Já a Figura 4.14 compara de forma sucinta todos os dados de  $G_0$  obtidos neste estudo. Não serão apresentados novamente as equações e coeficientes de determinação que definem as curvas das misturas curadas a 23°C. Tais dados estão expostos no tópico anterior.

É perceptível que independente da temperatura de cura os espécimes possuem um comportamento típico: as fibras diminuem significativamente a rigidez inicial da mistura e o sal aumenta tal propriedade, sendo notável que o aumento da temperatura de cura em 17°C aumenta consideravelmente a rigidez inicial dos corpos de prova, havendo um aumento maior com a adição de sal como catalisador das reações pozolanicas.

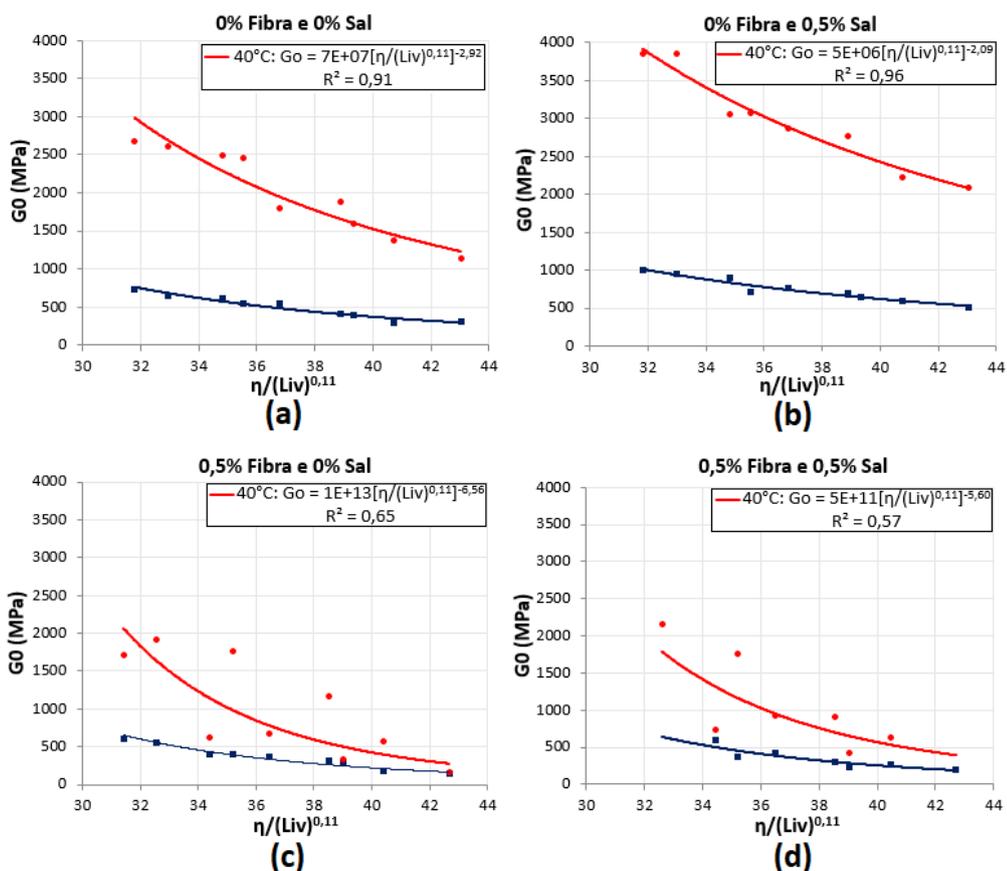


Figura 4.13 – Variação da rigidez inicial ( $G_0$ ) em relação ao índice porosidade / teor volumétrico de cal para misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra, para cura a 23°C e 40°C

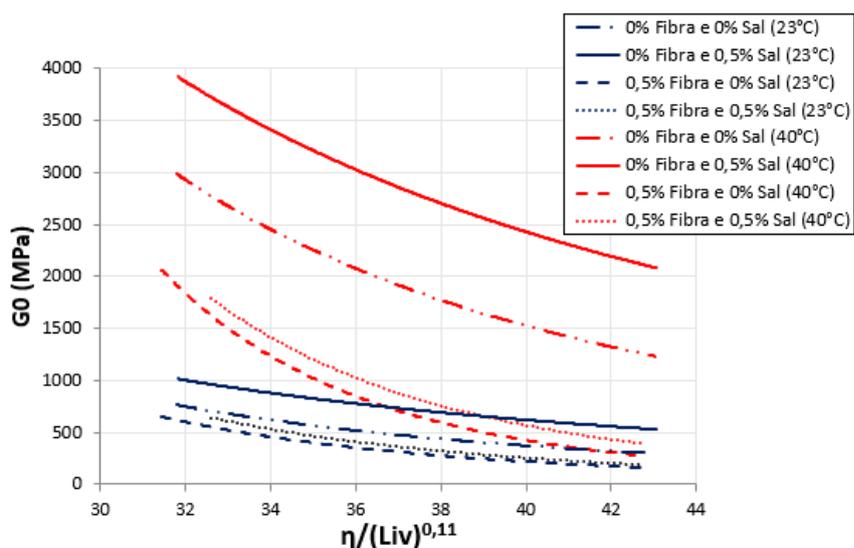


Figura 4.14 – Comparação de  $G_0$  entre as misturas sem sal e sem fibra, com sal, com fibra, com sal e com fibra, para cura a 23°C e 40°C

Em relação aos ensaios de durabilidade, foram realizados apenas ensaios de congelamento e degelo para as misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica curados a 40°C, seguindo as orientações da norma ASTM D560 (1996) e adotando um número fixo de 19 escovadas em cada ciclo. A Figura 4.15 expressa os resultados de perda de massa acumulada após 12 ciclos de congelamento e degelo para corpos de prova curados a 23°C (linhas em azul) e curadas a 40°C (linhas em vermelho).

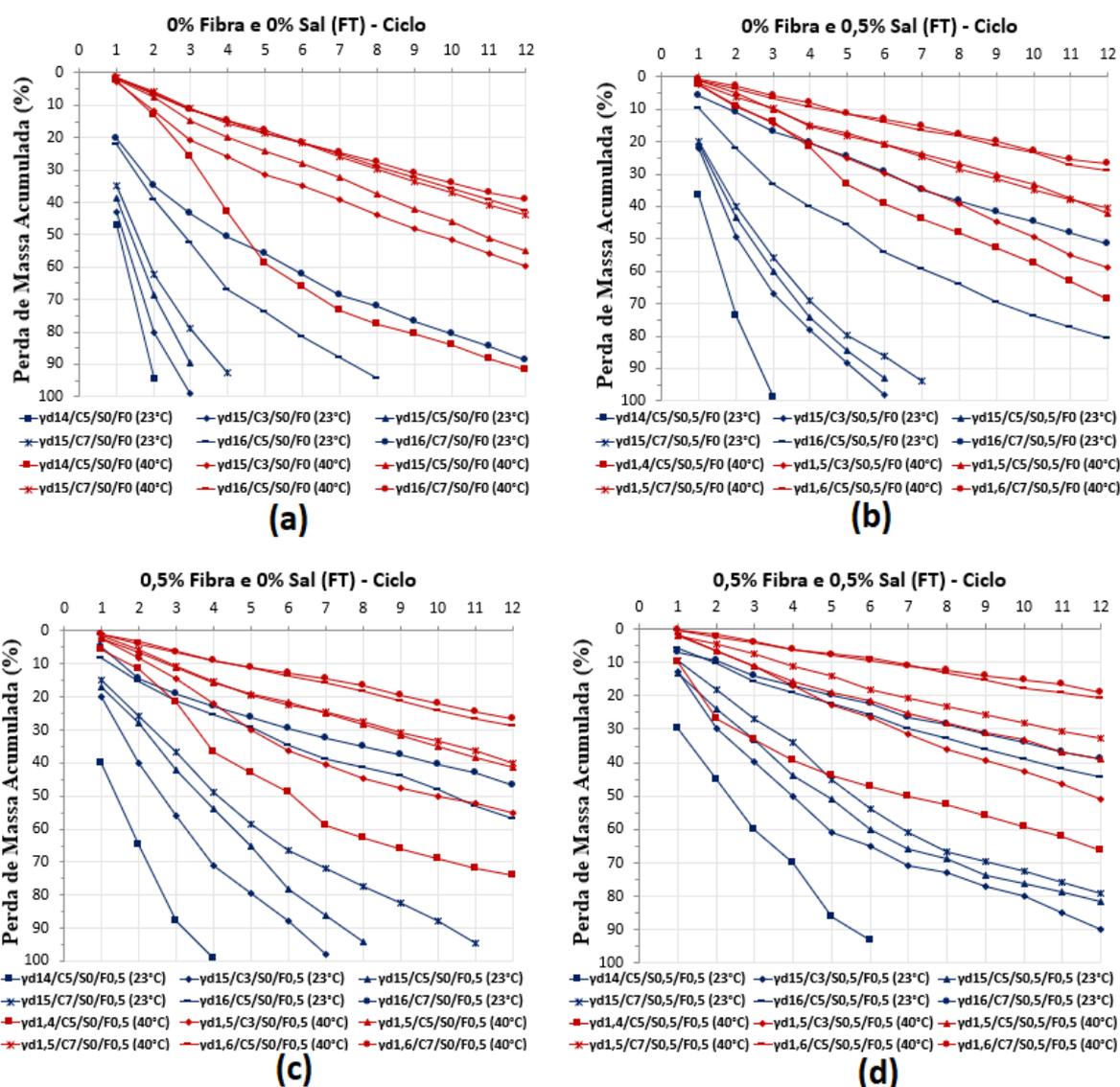


Figura 4.15 – PMA com ciclos de congelamento e degelo, cura de 23°C (linhas em azul) e cura a 40°C (linhas em vermelho), para misturas (a) sem fibra e sem sal; (b) com sal; (c) com fibra; (d) com sal e com fibra

É realizado a seguir uma análise sensibilística da durabilidade por ciclos de congelamento e degelo (FT) dos espécimes curados a 40°C e, posteriormente, uma comparação entre os resultados dos ciclos de congelamento e degelo (FT) dos corpos de prova curados a 23°C e 40°C.

- Análise da durabilidade por ciclos de Congelamento e Degelo (FT) para corpos de prova curados a 40°C

Inicialmente é necessário ressaltar que todos os espécimes com temperatura de cura elevada resistiram aos 12 ciclos de durabilidade, logo serão utilizados os valores do 12º ciclo nas análises a seguir.

A adição de 0,5% de sal proporcionou um ganho mais significativo na durabilidade (FT) para o corpo de prova  $\gamma d14/C5/S0,5/F0$  (40°C), cuja PMA é de 68,4%. Para a mesma mistura sem sal [ $\gamma d14/C5/S0/F0$  (40°C)] a PMA é de 91,6%, o que significa uma melhoria de 23,2% na durabilidade após a adição de uma pequena quantidade de NaCl (0,5%). O segundo maior ganho foi observado para o corpo de prova  $\gamma d16/C5/S0,5/F0$  (40°C). O espécime sem qualquer quantidade de sal apresentou PMA de 42,8%. Já a PMA para a mistura com sal foi de 28,9% após o mesmo número de ciclos - uma diferença de 13,9%. Essas descobertas revelam que a adição de 0,5% de sal é efetiva no aumento da durabilidade das misturas estudadas submetidas a ciclos de congelamento e degelo.

A adição de fibras também proporcionou às misturas um ganho de durabilidade para o espécime  $\gamma d14/C5/S0/F0,5$  (40°C), onde a PMA reduziu de 91,6% para 74,2%, um ganho de 17,4%. Já para o espécime  $\gamma d16/C5/S0/F0,5$  (40°C) a PMA reduziu de 42,8% para 28,8%, uma redução de 14,0%.

Como ocorrido nas duas análises anteriores, a adição de 0,5% de fibra de polipropileno e 0,5% de sal apresentou o maior ganho de durabilidade (FT) para o espécime de menor grau de compactação:  $\gamma d14/C5/S0,5/F0,5$  (40°C), com uma melhoria na durabilidade de 25,2% em relação à mesma mistura sem inclusão de sal e fibra. O segundo maior ganho de durabilidade (21,9%) com a inclusão dos dois materiais ocorreu para o corpo de prova  $\gamma d16/C5/S0,5/F0,5$  (40°C). Esta adição fez com que o corpo de prova passasse a se desintegrar apenas no 12º ciclo, 9 ciclos a mais que a mistura equivalente sem aditivos.

Tendo por base as análises anteriores, afirma-se que a inclusão de fibras + NaCl apresenta os melhores resultados para durabilidade com ciclos de congelamento e degelo em relação a este tipo de mistura. No entanto, não ficou claro qual dos dois componentes, fibra de polipropileno ou cloreto de sódio, proporcionam maiores ganhos de durabilidade.

O maior ganho de durabilidade (FT) proveniente do aumento da compactação ( $\gamma_d$ ) ocorreu para os espécimes com 5% de cal, onde a PMA foi de 42,8% para  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ , enquanto que, para  $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$ , a PMA foi de 91,6%, representando um ganho de 48,8%. Um aumento relevante de 36,6% na durabilidade (FT) causada pela compactação também pode ser notado para o espécime  $\gamma_{d15/C5/S0/F0}$  (40°C) quando comparado ao espécime  $\gamma_{d14/C5/S0/F0}$  (40°C). Percebe-se que para altos graus de compactação (como de  $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ) e baixos graus (como de  $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$ ), esta forma de melhoramento apresentou melhores resultados que a adição de sal e fibras.

Já em relação ao aumento do teor de cal, as maiores mudanças de durabilidade foram percebidas para o espécime  $\gamma_{d15/C7/S0/F0}$  (40°C), com PMA = 59,6%, em relação ao corpo de prova  $\gamma_{d15/C3/S0/F0}$  (40°C), com PMA = 43,9%, com uma diminuição de PMA na ordem de 15,7%. No entanto, vale ressaltar que este aumento de durabilidade é proveniente de um aumento de 4% no teor de cal. O efeito benéfico do aumento do teor de cal também foi verificado entre os espécimes  $\gamma_{d15/C7/S0/F0}$  (40°C) e  $\gamma_{d15/C5/S0/F0}$  (40°C) com uma diminuição de PMA na ordem de 11,1%.

Logo, para as proporções dos materiais analisados, afirma-se a seguinte ordem de eficácia em termos de maior durabilidade por congelamento e degelo, com cura de 40°C:

Compactação > NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno  $\cong$  NaCl > Cal

Para as misturas curadas a 40°C também não foi possível perceber uma relação direta entre resistência e durabilidade. Embora as misturas com fibras e sal ou somente com fibras apresentem bom desempenho em termos de durabilidade, não apresentaram alto desempenho em relação à resistência, se comparado a mistura com adição de apenas 0,5% de NaCl.

- Comparação entre ciclos de Congelamento e Degelo (FT) em relação aos ciclos de Molhagem e Secagem (WD)

Em geral, o aumento de temperatura, de 23°C para 40°C durante o tempo de cura, proporcionou elevados ganhos de durabilidade em relação às misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica com adição ou não de NaCl e fibras de polipropileno. Uma prova disso é que todos os corpos de prova curados a 40°C sobreviveram aos 12 ciclos de congelamento e degelo, mas nem todos os espécimes curados a 23°C sobreviveram à mesma quantidade de ciclos. Como mencionado por Silvani (2013), a elevação da temperatura de cura acelera as reações pozolânicas, aumentando a resistência e durabilidade.

A mesma forma de comparação realizada no tópico anterior em relação a ciclos de molhagem e secagem para com ciclos de congelamento e degelo será realizada aqui, mas comparando-se os resultados de cura a 23°C e 40°C, tendo por base o ciclo máximo alcançado nos ciclos de congelamento e degelo dos espécimes curados a 23°C.

Um resumo dessa comparação em relação à adição de 0,5% NaCl é exposto na Tabela 4.7. É notável que a adição de cloreto de sódio é muito mais efetiva para os corpos de prova curados a 23°C, quando submetidos a ciclos de congelamento e degelo (FT). Acredita-se que a menor eficiência da adição deste catalisador nos corpos de prova curados a 40°C ocorre devido à estrutura dos espécimes já estarem consolidadas, proveniente da aceleração pela temperatura das reações entre a cal dolomítica e a cinza volante de carvão.

Tabela 4.7 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado

Nomenclatura do Corpo de Prova	23°C	40°C	Ciclo de comparação
$\gamma$ d14/C5/S0,5/F0 (FT)	+20,2 %	+3,7 %	2°
$\gamma$ d15/C3/S0,5/F0 (FT)	+31,9 %	+6,4 %	3°
$\gamma$ d15/C5/S0,5/F0 (FT)	+29,4 %	+4,6 %	3°
$\gamma$ d15/C7/S0,5/F0 (FT)	+23,6 %	+0,4 %	4°
$\gamma$ d16/C5/S0,5/F0 (FT)	+30,4 %	+10,6 %	8°
$\gamma$ d16/C7/S0,5/F0 (FT)	+37,3 %	+12,7 %	12°

Comparando os resultados obtidos para os espécimes curados a 40°C com adição de sal (Tabela 4.7) em relação aos espécimes com adição de fibra (Tabela 4.8) é possível perceber que ambos

possuem valores semelhantes de aumento de durabilidade (FT), o que confirma a análise realizada no tópico anterior. Além disso, tendo por base a Tabela 4.8, também fica ainda mais nítido que a adição de fibras de polipropileno é muito mais efetiva para os corpos de prova curados a 23°C, quando submetidos a ciclos de congelamento e degelo (FT). Acredita-se que a mesma explicação da menor eficiência da adição de NaCl à mistura pode ser aplicada ao caso da menor eficiência da adição de fibras, quando comparado aos corpos de prova curados a 23°C.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de fibras adicionadas, no referido ciclo máximo alcançado

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>23°C</b>	<b>40°C</b>	<b>Ciclo de comparação</b>
$\gamma$ d14/C5/S0/F0,5 (FT)	+29,4 %	+1,5 %	2°
$\gamma$ d15/C3/S0/F0,5 (FT)	+43,0 %	+6,1 %	3°
$\gamma$ d15/C5/S0/F0,5 (FT)	+47,7 %	+3,5 %	3°
$\gamma$ d15/C7/S0/F0,5 (FT)	+43,6 %	+0,1 %	4°
$\gamma$ d16/C5/S0/F0,5 (FT)	+53,2 %	+10,7 %	8°
$\gamma$ d16/C7/S0/F0,5 (FT)	+42,2 %	+12,6 %	12°

Como mencionado anteriormente, é possível perceber, tendo por base a Tabela 4.9, que a adição de 0,5% de fibras e 0,5% de sal proporciona maiores ganhos de durabilidade para os espécimes curados a 23°C, sendo que os valores obtidos nos espécimes de 40°C em relação ao ciclo máximo alcançado pelos corpos de prova 23°C confirmam que a inclusão de fibras e sal possuem melhores resultados de durabilidade em relação à adição apenas de fibras ou só de sal para 40°C.

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados de durabilidade (FT), obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, com 0,5% de fibra e 0,5% de sal adicionado, no referido ciclo máximo alcançado

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>23°C</b>	<b>40°C</b>	<b>Ciclo de comparação</b>
$\gamma$ d14/C5/S0,5/F0,5 (FT)	+49,2 %	+0 %	2°
$\gamma$ d15/C3/S0,5/F0,5 (FT)	+59,1 %	+9,3 %	3°
$\gamma$ d15/C5/S0,5/F0,5 (FT)	+56,6 %	+3,5 %	3°
$\gamma$ d15/C7/S0,5/F0,5 (FT)	+58,5 %	+4,4 %	4°
$\gamma$ d16/C5/S0,5/F0,5 (FT)	+61,6 %	+15,7 %	8°
$\gamma$ d16/C7/S0,5/F0,5 (FT)	+50,0 %	+20,4 %	12°

A Tabela 4.10 apresenta um resumo que compara cada ganho de durabilidade (FT) em relação ao aumento do grau de compactação em relação às misturas estudadas, sendo notável um maior ganho de durabilidade em relação aos corpos de prova curados a 23°C.

Tabela 4.10 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade (FT) obtidos a temperaturas de cura de 23°C e 40°C, no referido ciclo máximo alcançado

Nomenclatura do Corpo de Prova	23°C	40°C	Ciclo de comparação
$\gamma_{d16/C5/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d15/C5/S0/F0}$ (FT)	+37,3 %	+3,6 %	3°
$\gamma_{d16/C5/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d14/C5/S0/F0}$ (FT)	+55,2 %	+6,9 %	2°
$\gamma_{d15/C5/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d14/C5/S0/F0}$ (FT)	+25,4 %	+5,5 %	2°
$\gamma_{d16/C7/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d15/C7/S0/F0}$ (FT)	+22,2 %	+2,1 %	8°

O aumento do teor de cal possui pequena influência no comportamento de durabilidade (FT) das misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica, quando curadas a 40°C, se comparadas aos valores de 23°C, como pode ser observado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade (FT), para temperaturas de cura de 23°C e 40°C, no referido ciclo máximo alcançado

Nomenclatura do Corpo de Prova	23°C	40°C	Ciclo de comparação
$\gamma_{d15/C7/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d15/C3/S0/F0}$ (FT)	+20,0 %	+11,3 %	3°
$\gamma_{d15/C7/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d15/C5/S0/F0}$ (FT)	+10,7 %	+3,6 %	3°
$\gamma_{d15/C5/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d15/C3/S0/F0}$ (FT)	+9,3 %	+7,7 %	3°
$\gamma_{d16/C7/S0/F0}$ (FT) $\Leftrightarrow$ $\gamma_{d16/C5/S0/F0}$ (FT)	+22,2 %	+2,2 %	8°

A análise dos dados acima apresentados sugere um comportamento diferente entre os testes de durabilidade relativos à eficiência de cada componente na mistura. De forma resumida, têm-se que o grau de compactação possui muito mais influência na durabilidade por congelamento e degelo (FT) para as misturas curadas a 40°C do que para as curadas a 23°C. É importante ressaltar que os ganhos de durabilidade com adição de sal, fibras e ambos adicionados conjuntamente possuem maiores efeitos benéficos nas misturas com cura a 23°C e as misturas curadas a 40°C possuem valores muito menores de PMA (FT). Assim como mencionado anteriormente, a seguinte ordem de eficácia em termos de maior durabilidade com ciclos de congelamento- degelo, com 23°C de cura, pode ser definida:

NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno > Compactação > NaCl > Cal

Para as proporções dos mesmos materiais analisados, mas com uma temperatura de cura de 40°C, tem-se que:

Compactação > NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno  $\cong$  NaCl > Cal

Para os corpos de prova curados a 40°C, também não foi percebido uma relação direta entre resistência e durabilidade para as misturas estudadas.

A Figura 4.16 retrata a normalização da perda de massa média acumulada (PMA/NC) para as distintas misturas estudadas nesta pesquisa: (a) sem fibra e sem sal [ $R^2 = 0,80$  – Equação 22, para 40°C], (b) sem fibra e com sal [ $R^2 = 0,95$  – Equação 23, para 40°C], (c) com fibra e sem sal [ $R^2 = 0,94$  – Equação 24, para 40°C] e (d) com fibra e com sal [ $R^2 = 0,77$  – Equação 25, para 40°C]. As equações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das misturas curadas a 23°C submetidas a ciclos de congelamento e degelo são as mesmas descritas na Figura 4.8.

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 5E - 07 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.11}} \right]^{3,18} \quad (\text{Equação 22})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 2E - 08 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.11}} \right]^{4,07} \quad (\text{Equação 23})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 5E - 11 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.11}} \right]^{5,65} \quad (\text{Equação 24})$$

$$\frac{ALM}{NC} (\%) = 3E - 06 \left[ \frac{\eta}{(L_{iv})^{0.11}} \right]^{2,64} \quad (\text{Equação 25})$$

Analisando a Figura 4.16, fica ainda mais nítido que os espécimes curados a 23°C perdem mais massa ao longo dos ciclos de congelamento e degelo (FT) do que as curadas a 40°C, sendo que não há grandes variações destas perdas com a adição de fibras e/ou sal (NaCl) aos espécimes curados a 40°C. Mas tais aditivos possuem grandes efeitos de ganho de durabilidade (FT) quando incluídos aos corpos de prova curados a 23°C.

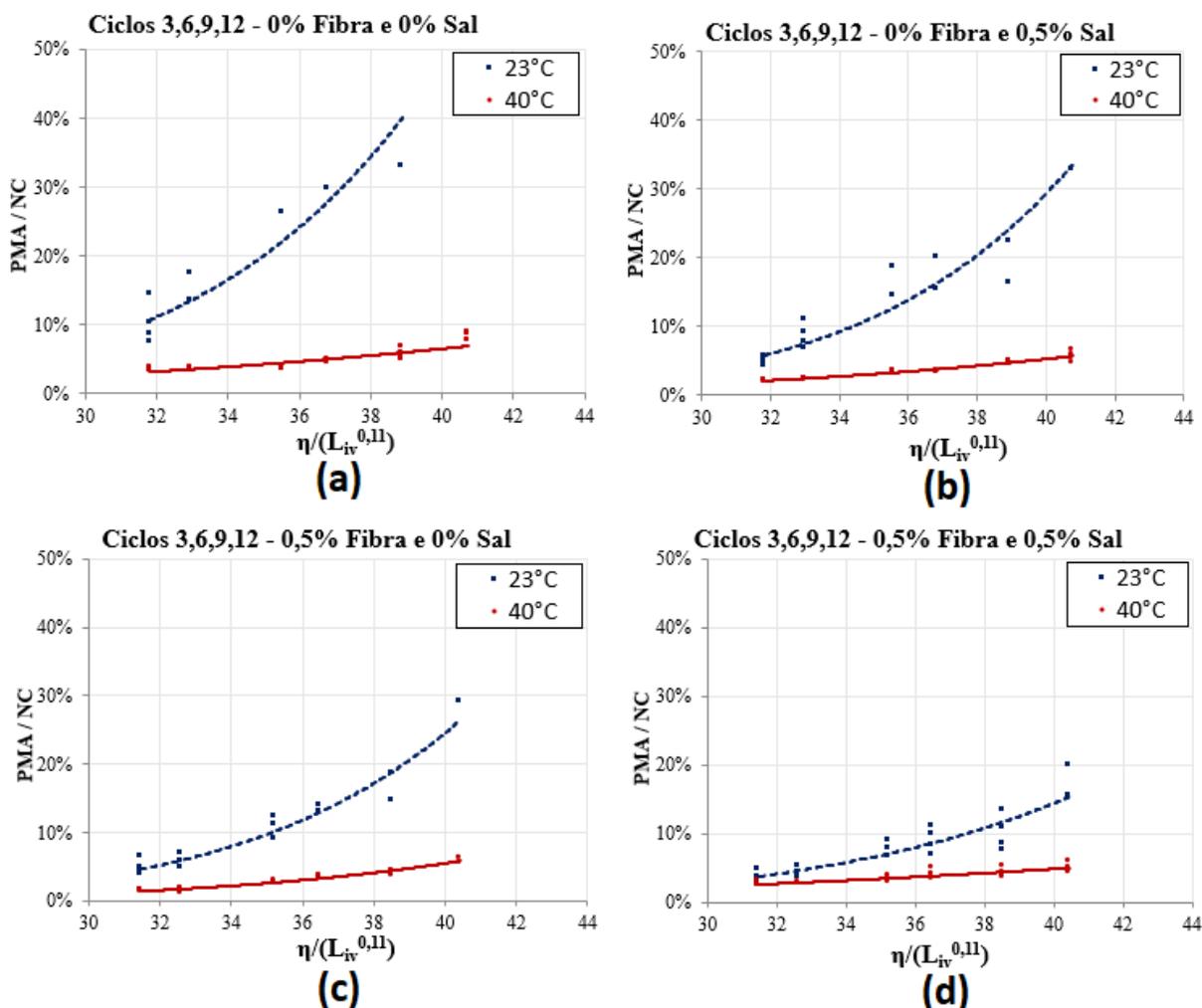


Figura 4.16 – PMA dividida pelo número de ciclos congelamento e degelo versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para 3, 6, 9 e 12 ciclos da mistura de areia de Osório-CFA-cal dolomítica (a) sem fibras e sal: (b) com fibras; (c) com sal; (d) com sal e fibras, curadas a 23°C e 40°C

## 4.2 MISTURAS DE RAP-CFA-CAL DE CARBURETO

### 4.2.1 Compressão Simples

A Figura 4.17 exhibe os resultados para a resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) dos espécimes de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro das misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com e sem a adição de 0,5% de NaCl, em termos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , para o período de cura estudado (7 dias) a 23°C. Bons coeficientes de determinação ( $R^2$  entre 0,93 e 0,98) podem ser percebidos em relação às curvas obtidas. Através desta figura é possível se comparar os efeitos da adição de sal em relação a resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ). Percebe-se nitidamente que

para as misturas com RAP o sal também aumenta consideravelmente este tipo de resistência, para todo o intervalo de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , sendo mais perceptível para valores menores deste índice (misturas com menores teores de cal e/ou menores graus de compactação). Vale ressaltar também que o uso de RAP e cal de carbureto aumentaram a resistência se comparado às misturas com areia de Osório e cal dolomítica, para a mesma temperatura de cura.

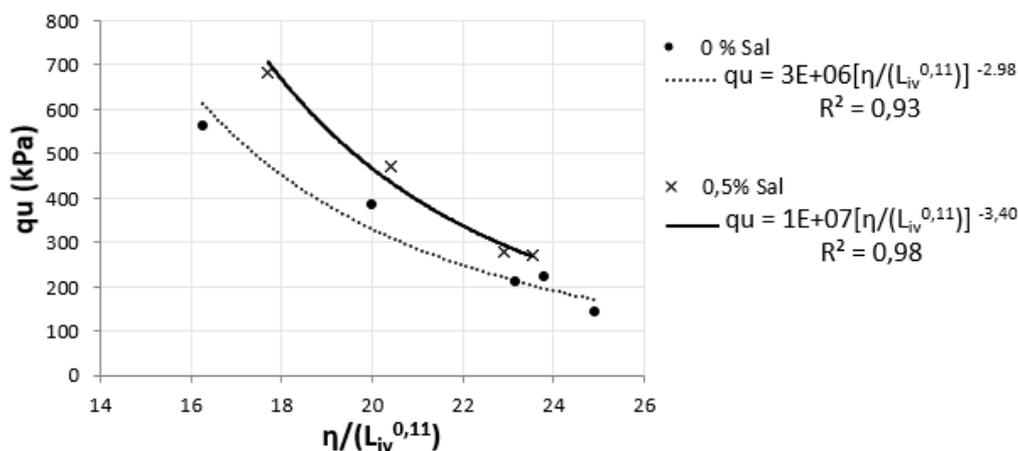


Figura 4.17 – Comparação de  $q_u$  entre as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C

Já a Figura 4.18 ilustra os corpos de prova após o processo de rompimento. Não se percebeu grandes alterações dos planos de ruptura entre as misturas com e sem sal, sendo que ambas rupturas ocorreram com planos relativamente verticais bem definidos.

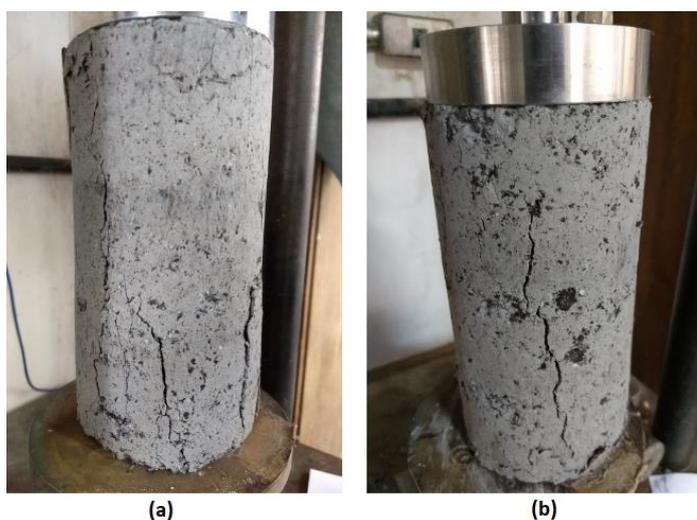


Figura 4.18 – Ruptura típica dos corpos de prova (a) sem sal e (b) com sal, curados a 23°C, ensaiados a compressão simples

Afim de se comparar numericamente as duas curvas do gráfico 4.17, foram forçados os expoentes destas curvas por meio do software Grapher v.12. Desta forma obteve-se um expoente comum de -2,7, como demonstrado na Figura 4.19. Logo, pode-se afirmar que um aumento de 43,1% em relação a resistência à compressão simples ocorre para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com adição de 0,5% de NaCl, curadas a 23°C.

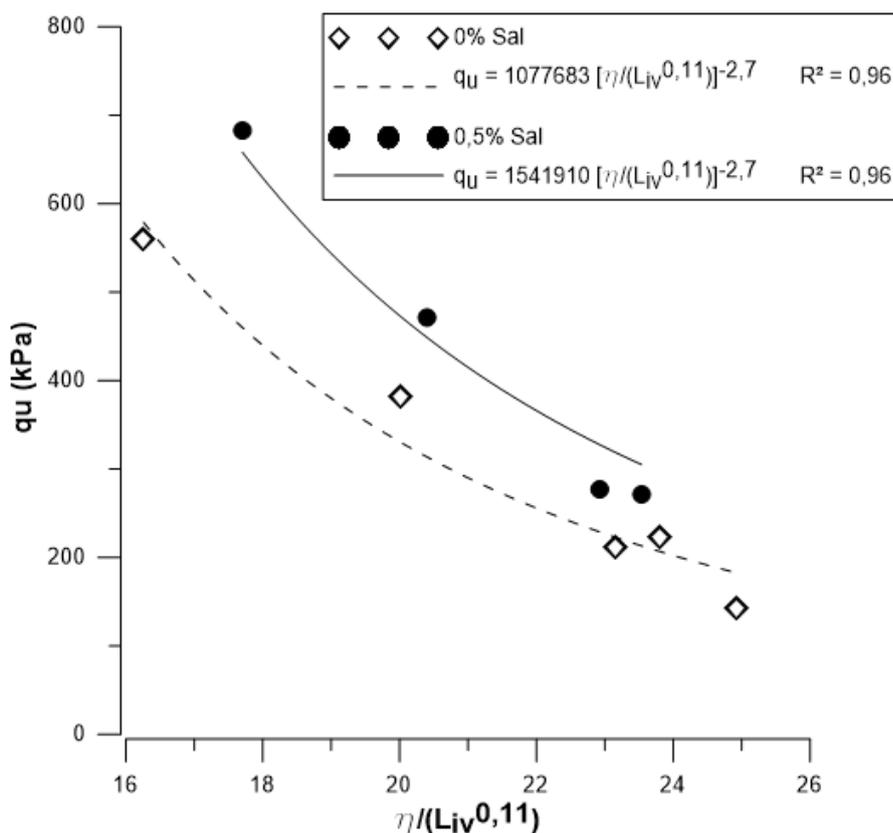


Figura 4.19 –  $q_u \times \eta/(L_{iv})^{0,11}$  para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, forçando os expoentes das curvas para um valor comum

#### 4.2.2 Compressão Diametral

É possível analisar os resultados obtidos para a resistência à compressão diametral das misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com e sem a adição de 0,5% de NaCl, em termos de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , para o período de cura estudado (7 dias) a 23°C, através da Figura 4.20. Para este tipo de compressão também foram encontrados bons coeficientes de determinação ( $R^2$  entre 0,89 e 0,95). Comparando os efeitos da adição de sal em relação à resistência diametral ( $q_d$ ), percebe-se nitidamente que o sal aumenta consideravelmente este tipo de resistência, para todo o intervalo de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , sendo mais perceptível para valores maiores deste índice (misturas com

maiores teores de cal e/ou maiores graus de compactação), comportamento diferente do citado anteriormente para resistência à compressão simples.

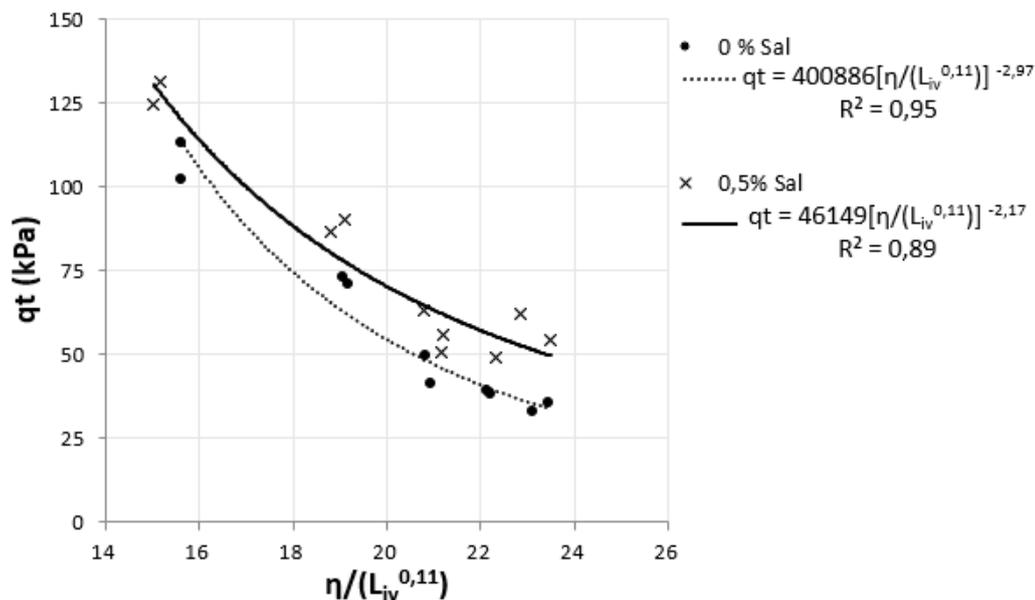


Figura 4.20 – Comparação de  $q_t$  entre as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, em relação a  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$

Já em relação ao processo de rompimento, não se percebeu alterações dos planos de ruptura entre as misturas com e sem sal. Ambas rupturas ocorreram com planos verticais bem definidos, como é ilustrado na Figura 4.21.



Figura 4.21 – Ruptura típica dos corpos de prova com e sem sal, curados a 23°C, ensaiados a compressão diametral

Tendo por base os resultados anteriormente expostos de resistência à compressão diametral, a Figura 4.22 exibe os mesmos resultados, mas forçando as equações das curvas a um expoente comum a ambas, no caso, -2,7 (mesmo valor obtido para as curvas de compressão simples). Dividindo ambas equações obteve-se um aumento de  $q_t$ , com adição de 0,5% de NaCl, de 17% para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, curadas a 23°C.

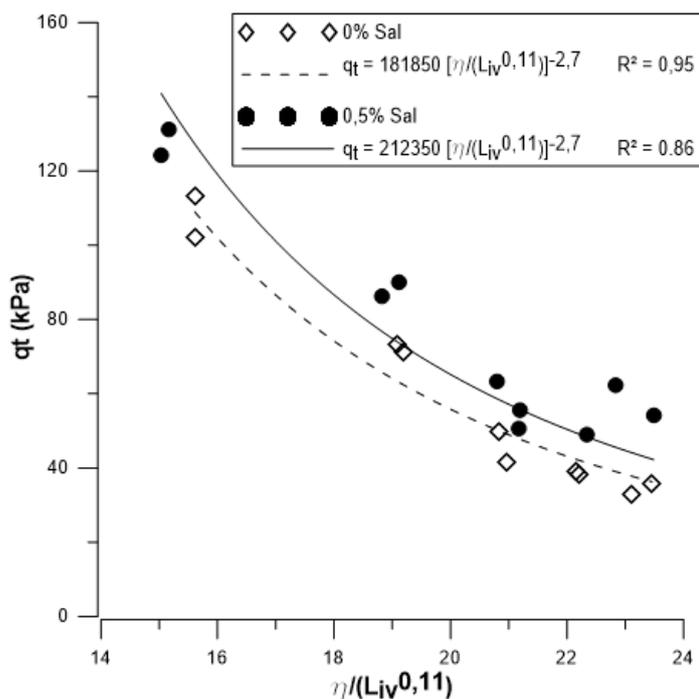


Figura 4.22 –  $q_t \times \eta / (L_{iv})^{0,11}$  para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com e sem sal, curadas a 23°C, forçando os expoentes das curvas para um valor comum

Dividindo-se as equações com expoente ajustado entre si, é possível obter uma relação de  $q_t / q_u$  de 0,17 e 0,14 para os espécimes sem sal e com sal, respectivamente, valores próximos aos encontrados por Pasche (2016) em misturas com RAP e cimento.

### 4.2.3 Durabilidade

As mesmas análises sensibilísticas realizadas para as misturas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica serão realizadas para os corpos de prova de RAP sujeitos a ciclos de durabilidade. Inicialmente é realizada a análise da durabilidade por ciclos de congelamento e degelo (FT) e, posteriormente, uma comparação entre os resultados dos ciclos de congelamento e degelo (FT) em relação aos ciclos de molhagem e secagem (WD).

- Análise da durabilidade com ciclos de Congelamento e Degelo (FT)

A Figura 4.23 expressa os resultados de perda de massa acumulada após 12 ciclos de congelamento e degelo para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com ou sem adição de sal.

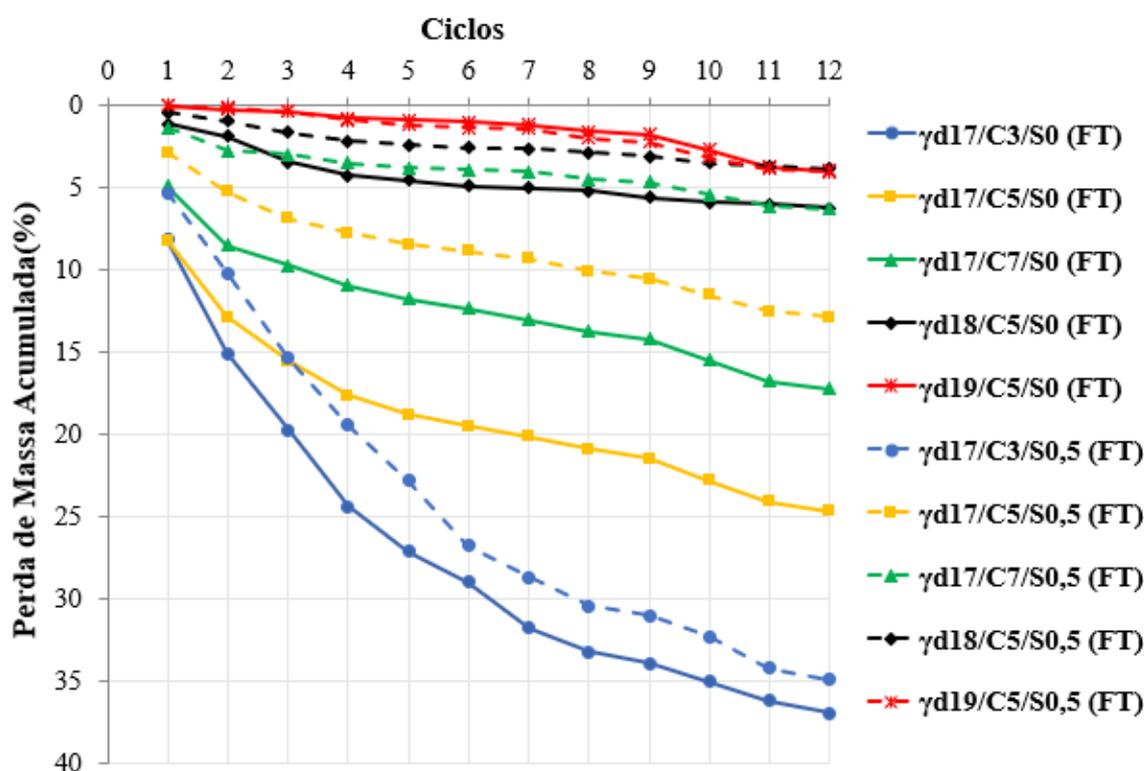


Figura 4.23 – Resultados de durabilidade após ciclos de congelamento e degelo para misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com e sem sal, curadas a 23°C

Comparando o comportamento dos espécimes sem sal com aqueles em que o sal é adicionado à mistura, pode-se observar que o ganho mais significativo de durabilidade ocorre para os corpos de prova  $\gamma d17/C5/S0,5$  (FT) e  $\gamma d17/C7/S0,5$  (FT), cuja melhora é de 11,8% e 10,9%, respectivamente. Vale ressaltar que não há um ganho considerável na durabilidade de congelamento- degelo para as misturas mais compactadas  $\gamma d18/C5/S0,5$  (FT) e  $\gamma d19/C5/S0,5$  (FT) cujas melhorias foram de 2,4% e 0,1%, respectivamente. Também não houve melhora considerável para o espécime  $\gamma d17/C3/S0,5$  (FT), que apresentou ganho de apenas 2,0%. Essas descobertas revelam que a adição de 0,5% de NaCl é altamente efetiva para aumentar a durabilidade de misturas com peso específico de 18 kN/m<sup>3</sup> nas misturas de RAP-CFA-cal dolomítica quando submetidas à exposição de congelamento e degelo.

Quanto ao aumento da energia de compactação, conseqüentemente aumento de  $\gamma_d$ , um ganho de durabilidade foi em geral percebido. Utilizou-se para estas análises os espécimes com 5% de cal sem NaCl. Um aumento relevante de 20,6% na durabilidade causada pela compactação pode ser notado para a mistura de  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$  quando comparado ao espécime com  $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$ . No entanto, para se atingir este valor de melhoria, necessita-se de um grande aumento no grau de compactação. Comparando os corpos de prova de  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$ , há um ganho de 18,4%, com um baixo aumento do grau de compactação e em relação a  $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$  com  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ , um ganho de 2,2% foi obtido.

Analisando-se o efeito do teor de cal de carbureto a mistura, encontra-se um aumento de durabilidade (FT) de 19,7% para  $\gamma_{d17/C7/S0}$  (FT) em relação aos corpos de prova  $\gamma_{d17/C3/S0}$  (FT), vale ressaltar que para que esta melhoria ocorra é necessário o aumento de 4% do teor de cal. Comparando as misturas  $\gamma_{d17/C5/S0}$  (FT) e  $\gamma_{d17/C3/S0}$  (FT) obteve-se um aumento de 12,2%, e por fim, analisando as misturas  $\gamma_{d17/C7/S0}$  (FT) e  $\gamma_{d17/C5/S0}$  (FT) um aumento de 7,5% foi percebido na durabilidade (FT).

A análise das descobertas acima descritas sugere que o aumento da compactação é a maneira mais efetiva de se aumentar a durabilidade (FT) das misturas de RAP-CFA-cal de carbureto. Em relação a comparação dos efeitos provenientes da cal de carbureto e do NaCl, vale ressaltar que para o espécime de  $\gamma_{d17C3}$  a adição de cal se mostrou muito mais vantajosa que a adição de NaCl, o que não segue as tendências das outras misturas. Uma possível explicação para este fato é que a adição de apenas 3% de cal de carbureto não conferiu a mistura as reações pozolânicas para que se houvesse ligações mínimas entre as partículas. Logo a adição de NaCl como catalisador não iria acelerar tais reações, pois não há reagentes (cal de carbureto) necessários. Tendo por base essa explicação, as misturas com apenas 3% de cal de carbureto serão excluídas das próximas análises.

Por fim, para as proporções dos materiais analisados na presente pesquisa, pode-se afirmar a seguinte ordem de eficácia em termos de maiores ganhos de durabilidade (FT):

Compactação > NaCl > Cal de Carbureto

Tal comportamento é parecido com o exibido pelas misturas de Areia de Osório-CFA-cal dolomítica curadas a 40°C (Compactação > NaCl > Cal Dolomítica). No entanto, a mistura com

RAP apresentou PMA muito inferiores às misturas com areia de Osório, tanto para curas a 23°C quanto para 40°C, quando submetidos a ciclos de congelamento e degelo.

A Figura 4.24 (a) exibe a perda de massa acumulada da mistura sem adição de 0,5% de NaCl versus o índice ajustado porosidade / teor volumétrico de cal após 3 ( $R^2 = 0,98$ ), 6 ( $R^2 = 0,99$ ), 9 ( $R^2 = 0,99$ ) e 12 ( $R^2 = 0,98$ ) ciclos de congelamento e degelo, comparando o efeito do sal sobre o comportamento da mistura. Da mesma forma, a Figura 4.24 (b) exibe a PMA da mistura de RAP-CFA-cal de carbureto com adição de sal, versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  após 3 ( $R^2 = 0,95$ ), 6 ( $R^2 = 0,96$ ), 9 ( $R^2 = 0,95$ ) e 12 ( $R^2 = 0,88$ ) ciclos de congelamento e degelo.

Tendo por base a Figura 4.24, pode-se afirmar que a PMA é controlada por  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para todos os ciclos de congelamento e degelo, sendo esta relação expressa pela primeira vez neste trabalho para a mistura de RAP-CFA-cal de carbureto com ou sem 0,5% de NaCl. Pode-se observar também que, para os espécimes com  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  entre, aproximadamente 16 e 18, a PMA é praticamente a mesma (cerca de 0,1% a 4%) tanto para misturas com ou sem sal sob condições de congelamento e degelo após 3 e 12 ciclos. Por outro lado, para os corpos de prova com  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  entre 18 e 23,5 a PMA varia cerca de 15,5% a 24,7% para misturas sem NaCl, enquanto varia apenas de 6,8% a 12,8% para misturas com NaCl, o que indica que este material é mais durável, sob condições de congelamento e degelo, com adição de 0,5% de sal.

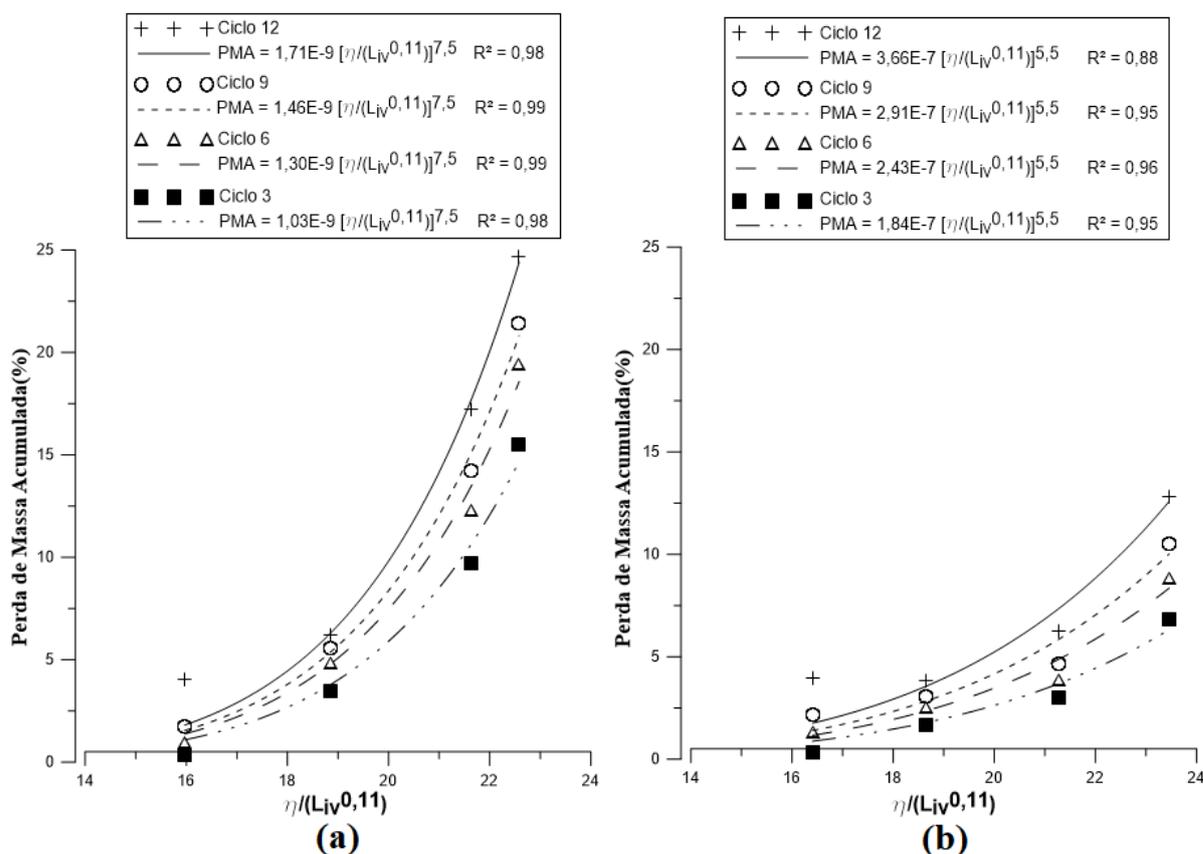


Figura 4.24 – PMA para 3, 6, 9 e 12 ciclos x  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, (a) sem e (b) com 0,5% de sal, sujeitas a congelamento e degelo

A Figura 4.25 retrata a normalização da perda de massa acumulada pelo número de ciclos para os materiais estudados nesta pesquisa. Elevadas correlações (com  $R^2$  variando entre 0,89 e 0,90) podem ser percebidas para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com ou sem NaCl. As parcelas confirmam que a adição de sal aumenta a durabilidade (FT) para este tipo de mistura. Além disso, pode-se inferir que a redução na PMA devido à adição de sal é mais pronunciada para valores mais elevados de  $\eta/L_{iv}$ , isto é, para misturas com porosidades mais altas (menos compactação) e menores teores de cal.

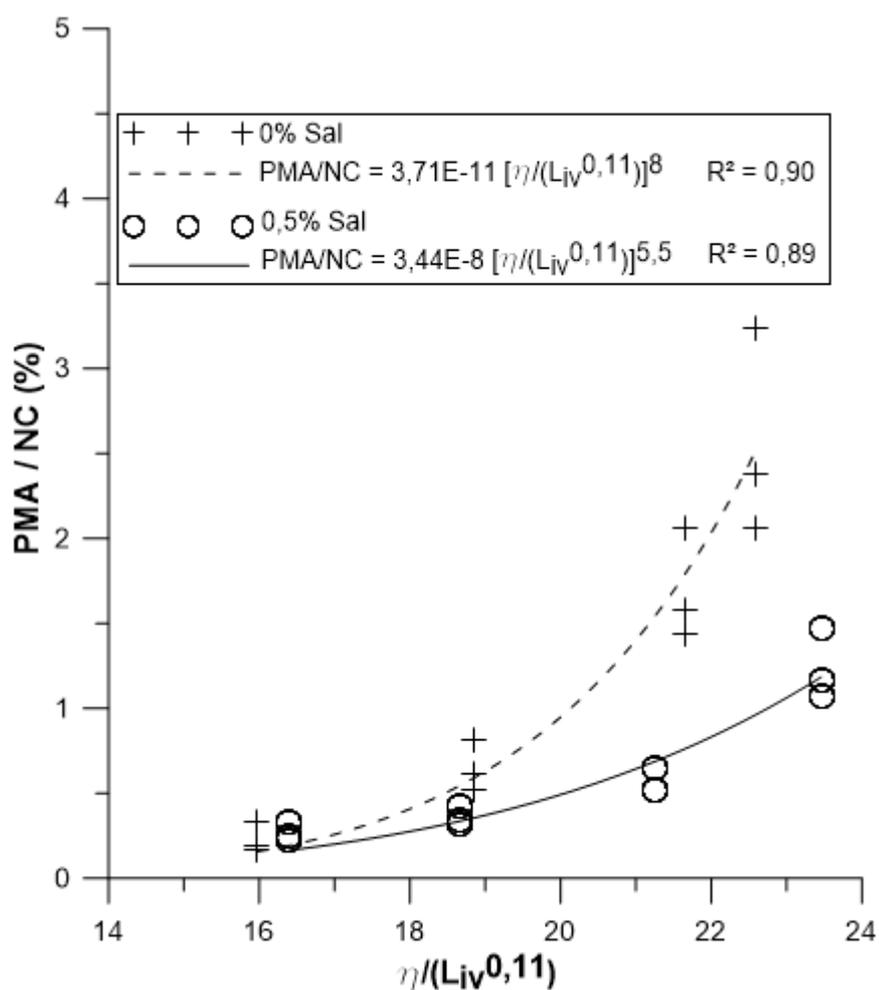


Figura 4.25 – Perda de massa acumulada dividida pelo número de ciclos de durabilidade versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para 6, 9 e 12 ciclos de misturas de RAP-CFA-cal de carbureto

- Comparação entre ciclos de Congelamento e Degelo (FT) em relação aos ciclos de Molhagem e Secagem (WD)

A Figura 4.26 apresenta relações de perda de massa acumulada (PMA) em relação ao número de ciclos de molhagem e secagem para as misturas com RAP (para um período de cura de 7 dias a 23°C) com base em distintos pesos específicos secos (17, 18 e 19 kN/m<sup>3</sup>) e teores de cal de carbureto (3, 5 e 7%). Já a Figura 4.27 compara os ciclos de congelamento e degelo com ciclos de molhagem e secagem, para as mesmas misturas.

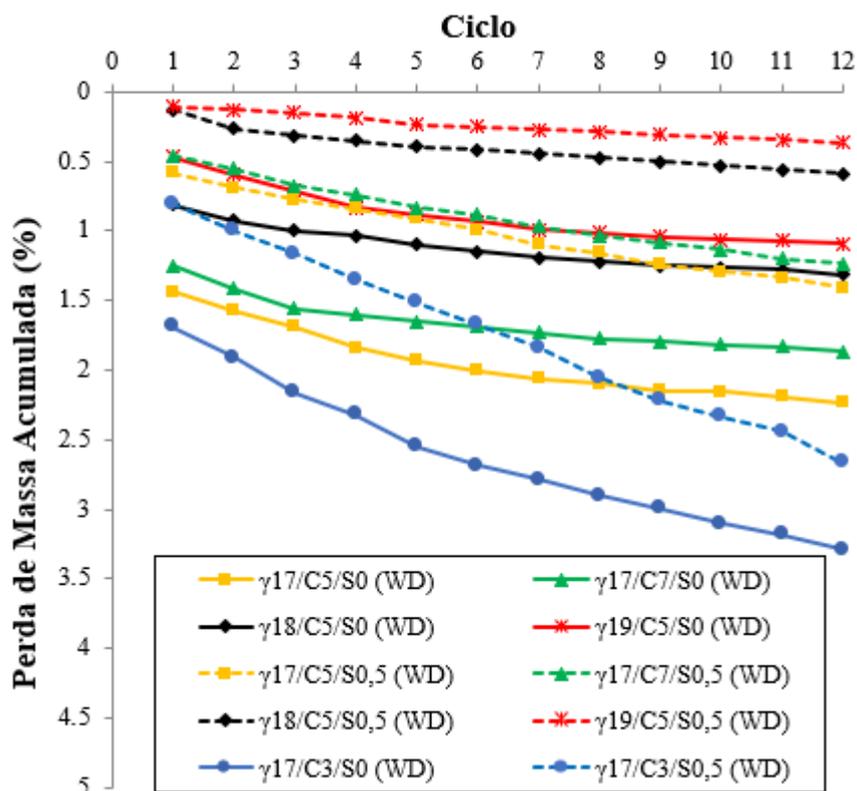


Figura 4.26 – PMA após ciclos de molhagem e secagem para misturas com RAP, curadas a 23°C

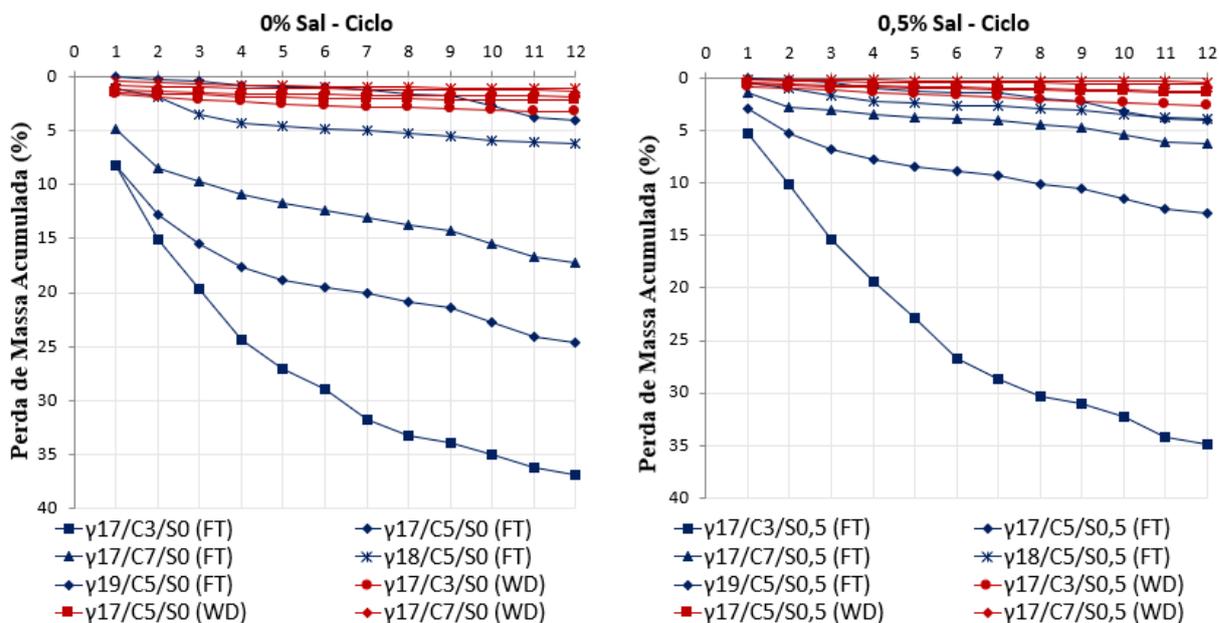


Figura 4.27 – PMA após ciclos de molhagem e secagem (linhas vermelhas) e congelamento e degelo (linhas em azul) para misturas com RAP, com e sem sal, curadas a 23°C

Para as misturas com RAP também é perceptível que os espécimes submetidos a ciclos de molhagem e secagem têm ligações mais fortes e, portanto, menores perdas de massa do que os corpos de prova submetidos a ciclos de congelamento e degelo, sendo que a PMA é reduzida com o aumento do teor de cal de carbureto e com o aumento do peso unitário seco.

Comparando os espécimes sem sal com aqueles com sal, observa-se que o ganho mais significativo de durabilidade ocorre para os corpos de prova  $\gamma_{17/C5/S0}$  (WD), cuja melhora é de 0,83%. Já os corpos de prova  $\gamma_{18/C5/S0,5}$  (WD) e  $\gamma_{19/C5/S0,5}$  (WD) apresentaram o mesmo ganho de durabilidade (WD) de 0,72%. Por fim, os espécimes  $\gamma_{17/C7/S0,5}$  (WD) e  $\gamma_{17/C3/S0,5}$  (WD) apresentaram ganhos de 0,63% e 0,62%, respectivamente. Percebe-se nitidamente que a adição de 0,5% de NaCl possui efeitos mais pronunciados nos ciclos de congelamento e degelo que nos ciclos de molhagem e secagem.

Já em relação ao aumento da compactação, percebeu-se uma melhoria de durabilidade (WD) de 1,15% para a mistura de  $\gamma_{d17/C5/S0}$  (WD) quando comparada ao espécime  $\gamma_{d19/C5/S0}$  (WD). No entanto para se atingir este valor de melhoria, necessita-se de um grande aumento no grau de compactação. Comparando os corpos de prova de  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$  com  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$  há um ganho de 0,92%, com um baixo aumento do grau de compactação, e em relação a  $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$  com  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$  um ganho de 0,22% é obtido.

Analisando-se o efeito do teor de cal de carbureto à mistura, encontra-se um aumento de durabilidade (WD) de 1,42% para  $\gamma_{d17/C7/S0}$  (WD) em relação ao espécime  $\gamma_{d17/C3/S0}$  (WD). É importante ressaltar que para que esta melhoria ocorra é necessário o aumento de 4% do teor de cal de carbureto. Comparando as misturas  $\gamma_{d17/C5/S0}$  (WD) e  $\gamma_{d17/C3/S0}$  (WD) obteve-se um aumento de 1,05% e, por fim, analisando as misturas  $\gamma_{d17/C7/S0}$  (WD) e  $\gamma_{d17/C5/S0}$  (WD), um aumento de 0,37% foi percebido na durabilidade (WD).

Tendo por base as análises realizadas acima, para misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, pode-se afirmar que tanto a adição de 0,5% de NaCl quanto o aumento do teor de cal e também o aumento da energia de compactação aumentam a durabilidade (molhagem e secagem) da mistura analisada. No entanto, a porcentagem de ganho de durabilidade é muito próxima para as três formas de melhoramento descritas, o que impossibilita dizer com precisão qual forma se sobressai a outra em termos de ganho de durabilidade (WD).

Tendo por base a Figura 4.28, que exibe a PMA da mistura (a) sem adição de 0,5% de NaCl e da mistura (b) com adição de sal versus o índice porosidade / teor volumétrico de cal após 3, 6, 9 e 12 ciclos de molhagem e secagem, percebe-se que também para este tipo de durabilidade a relação  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  controla a PMA. Observa-se também que, para os espécimes com  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  entre, aproximadamente, 15 e 17, a PMA é praticamente a mesma tanto para misturas com (cerca de 0,2% a 0,6%) ou sem sal (cerca de 0,7% a 0,9%) sob condições de molhagem e secagem após três e doze ciclos. Por outro lado, para os corpos de prova com  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  entre 17 e 22, a PMA varia cerca de 0,8% a 2,2% para misturas sem NaCl, enquanto varia apenas de 0,3% a 1,4% para misturas com NaCl, o que indica que este material é mais durável, sob condições de molhagem e secagem, com adição de 0,5% de sal.

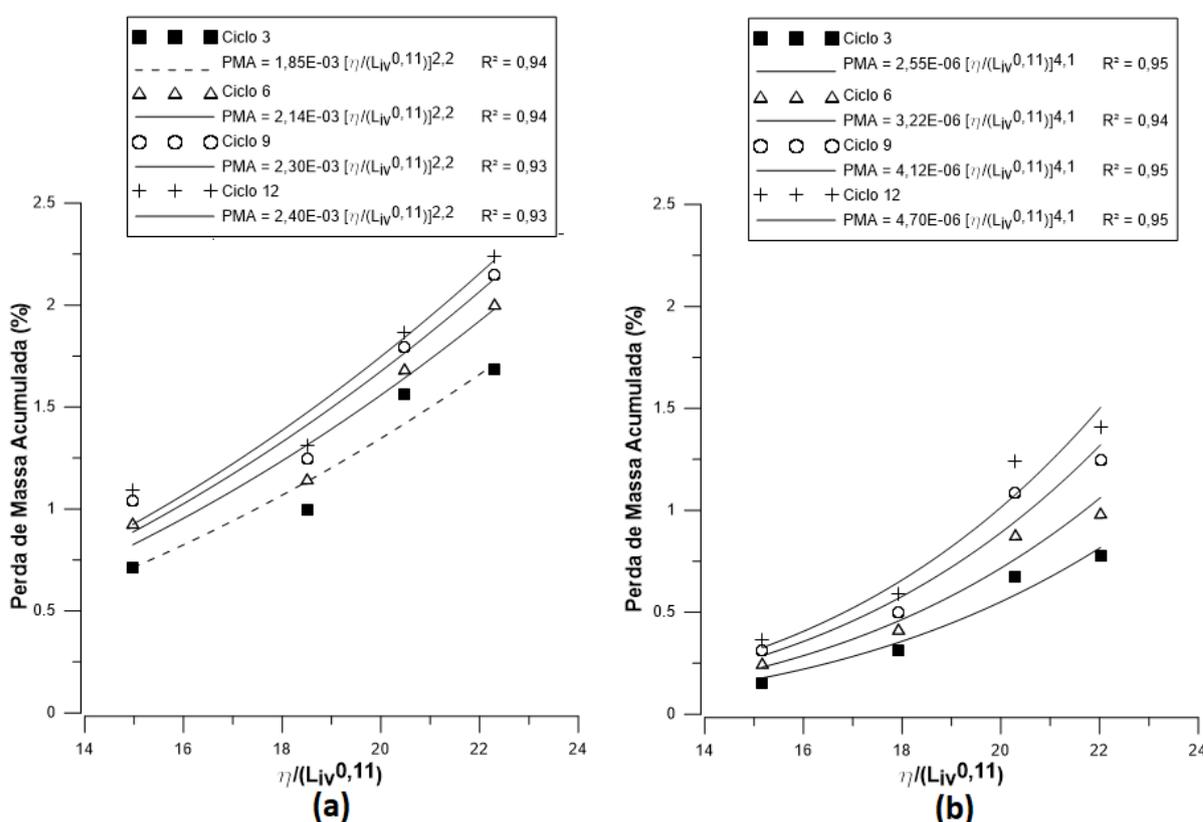


Figura 4.28 – Perda de massa acumulada para 3, 6, 9 e 12 ciclos versus  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  de misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, (a) sem e (b) com 0,5% de cloreto de sódio, sujeitas a condições de molhagem e secagem

A comparação das melhorias provenientes da adição de sal à mistura, em relação aos dois tipos de durabilidade analisados, é exposta na Tabela 4.12. É notável que o cloreto de sódio é muito mais efetivo na durabilidade de congelamento e degelo (FT). A baixa eficiência da adição deste

catalisador nos ciclos de molhagem e secagem (WD) pode ser explicada pelo processo de imersão do corpo de prova durante 5 horas em cada ciclo, o que pode resultar na dissolução do NaCl na água.

Tabela 4.12 – Comparação dos resultados de durabilidade, com 0,5% de sal adicionado, para misturas com RAP

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>Congelamento - Degelo</b>	<b>Molhagem - Secagem</b>
$\gamma_{d17/C3/S0,5}$	+2,0 %	+0,62 %
$\gamma_{d17/C5/S0,5}$	+11,8 %	+0,83 %
$\gamma_{d17/C7/S0,5}$	+10,9 %	+0,63 %
$\gamma_{d18/C5/S0,5}$	+2,4 %	+0,72 %
$\gamma_{d19/C5/S0,5}$	+0,1 %	+0,72 %

Já a Tabela 4.13 mostra um resumo da comparação dos efeitos da compactação em relação aos estudos de durabilidade realizados para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto.

Tabela 4.13 – Comparação do efeito de compactação nos resultados de durabilidade, para misturas com RAP

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>Congelamento - Degelo</b>	<b>Molhagem - Secagem</b>
$\gamma_{d19/C5/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d18/C5/S0}$	+2,2 %	+0,2 %
$\gamma_{d18/C5/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d17/C5/S0}$	+18,4 %	+0,9 %
$\gamma_{d19/C5/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d17/C5/S0}$	+20,6 %	+1,2 %

A grande diferença de eficiência da adição de cal em relação a ciclos de molhagem-secagem (WD) e congelamento- degelo (FT) pode ser observado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Comparação do efeito do teor de cal nos resultados de durabilidade, para misturas com RAP

<b>Nomenclatura do Corpo de Prova</b>	<b>Congelamento - Degelo</b>	<b>Molhagem - Secagem</b>
$\gamma_{d17/C7/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d17/C3/S0}$	+19,7 %	+1,42 %
$\gamma_{d17/C7/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d17/C5/S0}$	+7,5 %	+0,37 %
$\gamma_{d17/C5/S0} \Leftrightarrow \gamma_{d17/C3/S0}$	+12,2 %	+1,05 %

A análise dos dados acima apresentados sugere um comportamento diferente entre os ensaios de durabilidade relativos à eficiência de cada componente na mistura. Como mencionado anteriormente, os principais motivos para essas diferenças se devem ao processo de molhagem e variação de temperatura de cada ensaio. Para os ensaios de molhagem e secagem, também não foi percebido uma relação direta entre resistência e durabilidade para as misturas estudadas.

#### 4.2.4 Triaxial

Os ensaios de compressão triaxial realizados neste trabalho foram cisalhados de forma drenada, sob trajetórias de tensões convencionais e tensões de confinamento de 20, 40 e 60 kPa, simulando o estado em que se encontram bases e sub-bases de pavimentos. Em geral, são comparados os efeitos da adição de 0,5% de NaCl às misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, com peso específico aparente seco de 17 kN/m<sup>3</sup> e 7% de cal de carbureto, em relação ao comportamento tensão-deformação dos espécimes.

Para análise dos resultados obtidos de tensão-deformação utilizou-se o invariante de tensão  $q$  (tensão desvio) e o parâmetro de deformabilidade  $\varepsilon_v$  (deformação volumétrica), sendo definidos como:

$$q = (\sigma'_a - \sigma'_r) \quad \text{(Equação 26)}$$

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_a + 2\varepsilon_r) \quad \text{(Equação 27)}$$

Onde:

$\sigma'_a$  e  $\sigma'_r$  são as tensões efetivas axial e radial, respectivamente;

$\sigma'_c$  é a tensão confinante efetiva;

$\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_r$  são as deformações totais axial e radial, respectivamente;

$e$  é o índice de vazios.

A Figura 4.29 indica o comportamento tensão-deformação para as misturas (a) sem sal e (b) com sal, de acordo com as diferentes tensões confinantes efetivas (20, 40 e 60 kPa). Esta Figura apresenta as curvas de resistência ( $q$ ) em função da deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) e também à deformação volumétrica ( $\varepsilon_v$ ) em relação a deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) do corpo de prova.

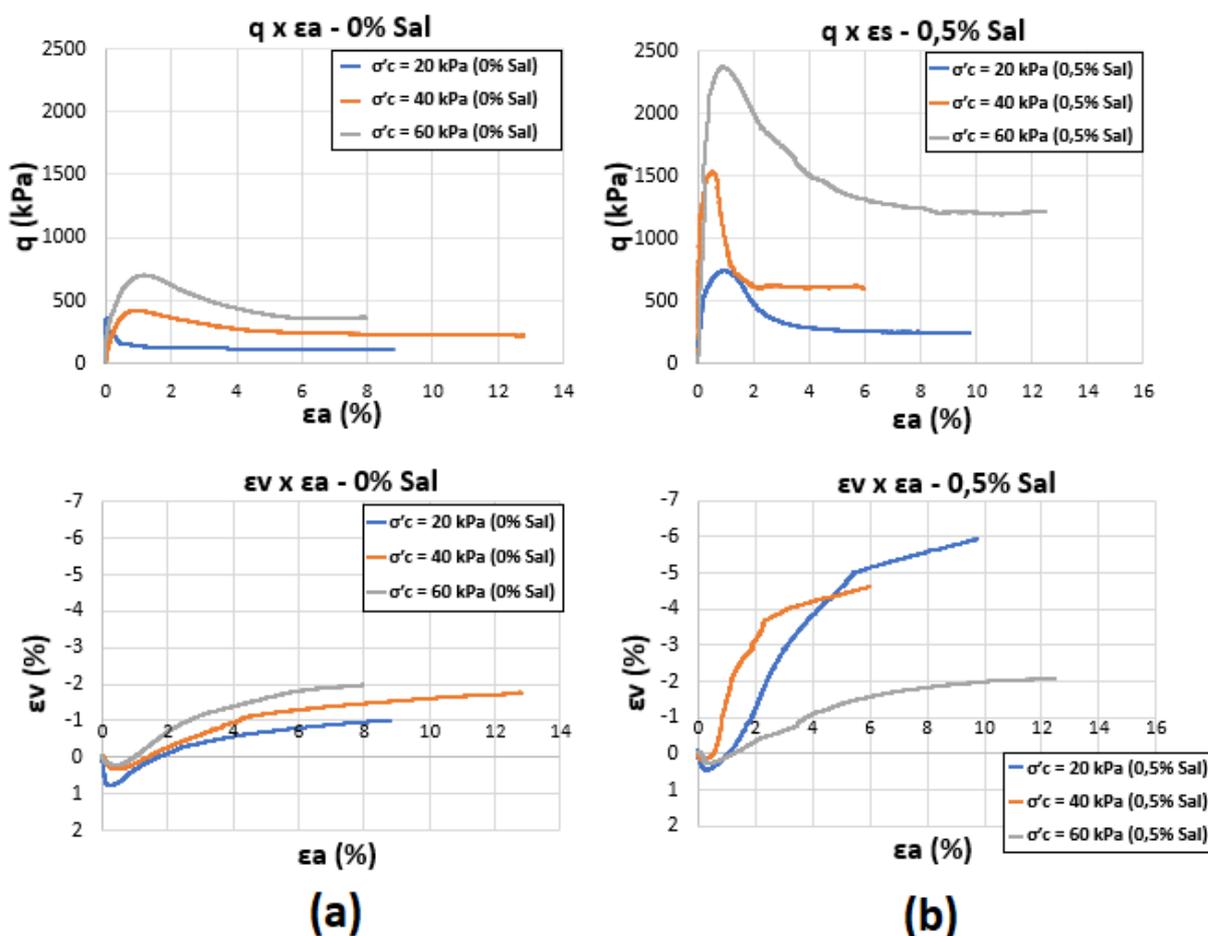


Figura 4.29 – Comportamento tensão-deformação para as misturas (a) sem sal e (b) com sal

Os corpos de prova quando cisalhados apresentaram picos de resistência ( $q$ ) bem definidos. É possível perceber que, com o aumento da tensão confinante efetiva, aumenta-se a resistência das misturas, tanto para os espécimes sem adição de NaCl quanto para os com adição, sendo nítido o aumento do pico de resistência com a adição de sal, como catalisador das reações.

O comportamento inicial das misturas se demonstrou rígido e aparentemente linear até um ponto de plastificação bem definido, onde ocorreu aumento das deformações plásticas até uma ruptura frágil do espécime, resultado similar ao de solos melhorados com agentes cimentantes (SCHNAID *et al.* 2001; CONSOLI *et al.* 2001). Em geral, o módulo de elasticidade, a rigidez inicial e a fragilidade pós-pico são maiores com a adição de NaCl e diminuem com o aumento da tensão efetiva média.

Infelizmente, as curvas de deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) em relação à deformação axial ( $\epsilon_a$ ) não demonstraram o comportamento de misturas cimentadas registrado na literatura (SCHNAID *et*

*al.* 2001; CONSOLI *et al.* 2001; COOP e ATKINSON, 1993; CUCOVILLO E COOP, 1999; COOP, 1999; FESTUGATO, 2008; MARQUES, 2016; entre outros). Esperava-se que para menores tensões de confinamento o corpo de prova comprimisse menos e expandisse mais, uma vez que o confinamento é baixo e não suficiente para quebrar a estrutura de cimentação da mistura, sendo que esta se manteria intacta, comportamento semelhante ao de uma areia densa ou de uma argila pré-adensada. Já com o aumento do confinamento, o efeito da cimentação seria inibido pelo acréscimo do nível de tensões, tendo uma maior compressão inicial e posteriormente uma menor expansão.

O comportamento anteriormente descrito não foi verificado para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto analisadas. Uma das possíveis explicações para isto é que o ruído gerado durante a coleta dos dados dos ensaios realizados com valores baixos de tensão confinante efetiva não possibilitaria a adequada aquisição dos resultados, proveniente da variabilidade inerente ao ensaio. Este fato também foi verificado por Festugato (2008) em corpos de prova cisalhados com uma tensão efetiva de 20 kPa. Outro fato que pode ter contribuído pela não verificação do comportamento descrito é a não garantia de homogeneidade dos corpos de prova ensaiados, uma vez que as dimensões do RAP (aproximadamente 19 mm) não permitem uma perfeita distribuição dos grãos no interior de espécime, o que pode favorecer a ocorrência de deformações atípicas, tanto axiais quanto volumétricas. Indica-se para verificação do real comportamento da mistura a realização de ensaios com tensões de confinamento efetivas superiores a 60 kPa e triplicatas de todas as configurações dos espécimes ensaiados.

Todos os ensaios apresentaram uma tendência contrativa no início do cisalhamento, seguidos por uma expansão do espécime ensaiado, conforme relatado por Coop e Wilson (2003), Cruz (2008), Alvarado *et al.* (2012), Consoli *et al.* (2012b) e Marques (2016).

A Figura 4.30 indica os espécimes após o cisalhamento do ensaio triaxial para as misturas sem sal com tensões de confinamento efetivas de (a) 20 kPa, (b) 40 kPa e (c) 60 kPa e também para as misturas com adição de 0,5 % de NaCl, com tensões de confinamento efetivas de (d) 20 kPa, (e) 40 kPa e (f) 60 kPa.

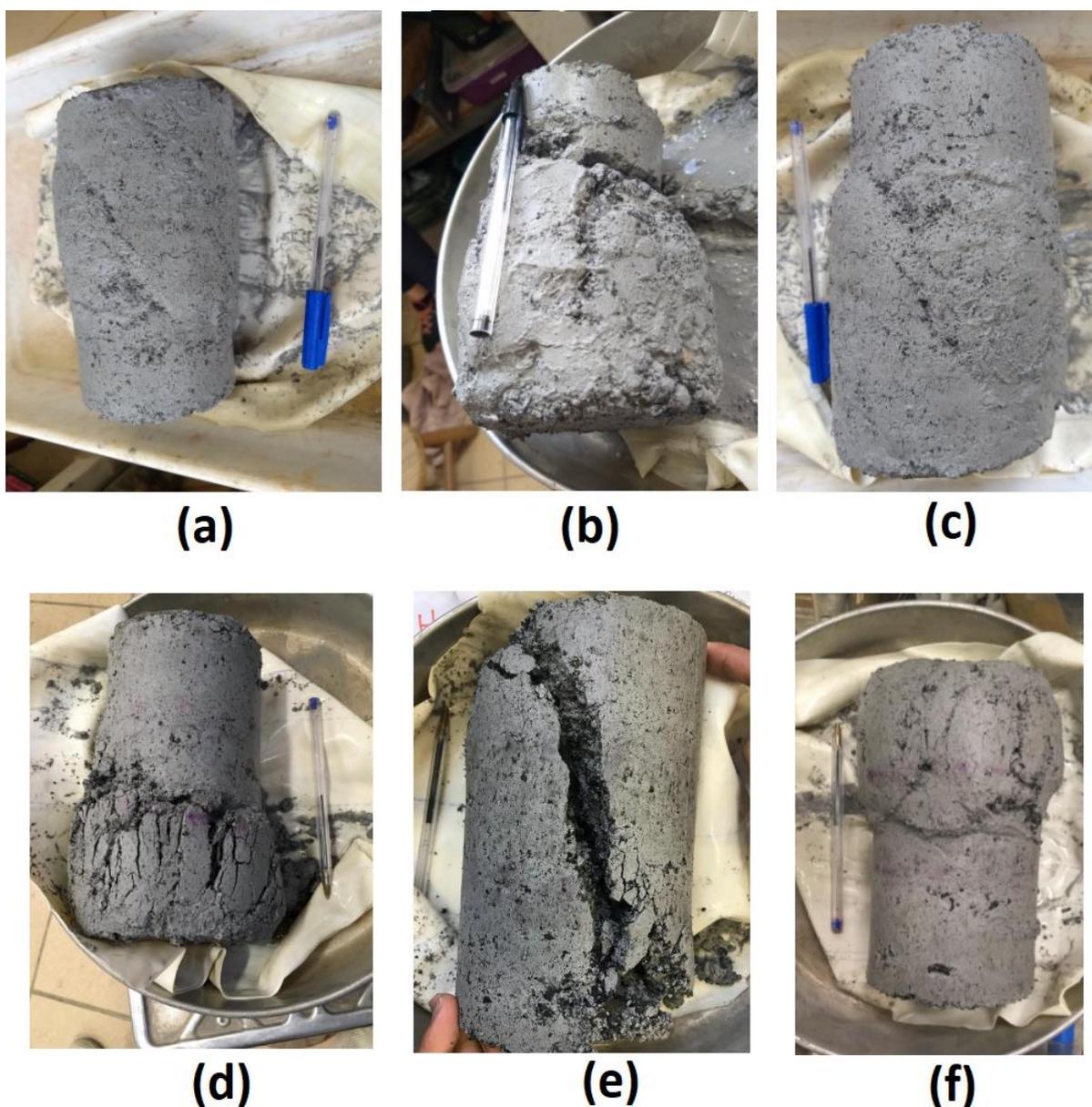


Figura 4.30 – Espécimes após cisalhamento triaxial, misturas sem sal com tensões de confinamento efetivas de (a) 20 kPa, (b) 40 kPa e (c) 60 kPa e misturas com 0,5 % de NaCl, com tensões de confinamento efetivas de (d) 20 kPa, (e) 40 kPa e (f) 60 kPa

A determinação da coesão e ângulo de atrito (parâmetros de resistência ao cisalhamento) se deu através do ajuste de envoltórias de resistência no espaço  $s' \times t$ , definidas como:

$$t = \frac{1}{2}(\sigma'a - \sigma'r) \quad \text{(Equação 28)}$$

$$s' = \frac{1}{2}(\sigma'a + \sigma'r) \quad \text{(Equação 29)}$$

A Figura 4.31 apresenta as envoltórias de ruptura e trajetórias de tensão para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto (a) sem sal e (b) com sal. A mesma figura apresenta também (c) uma comparação das envoltórias obtidas e os parâmetros de resistência encontrados.

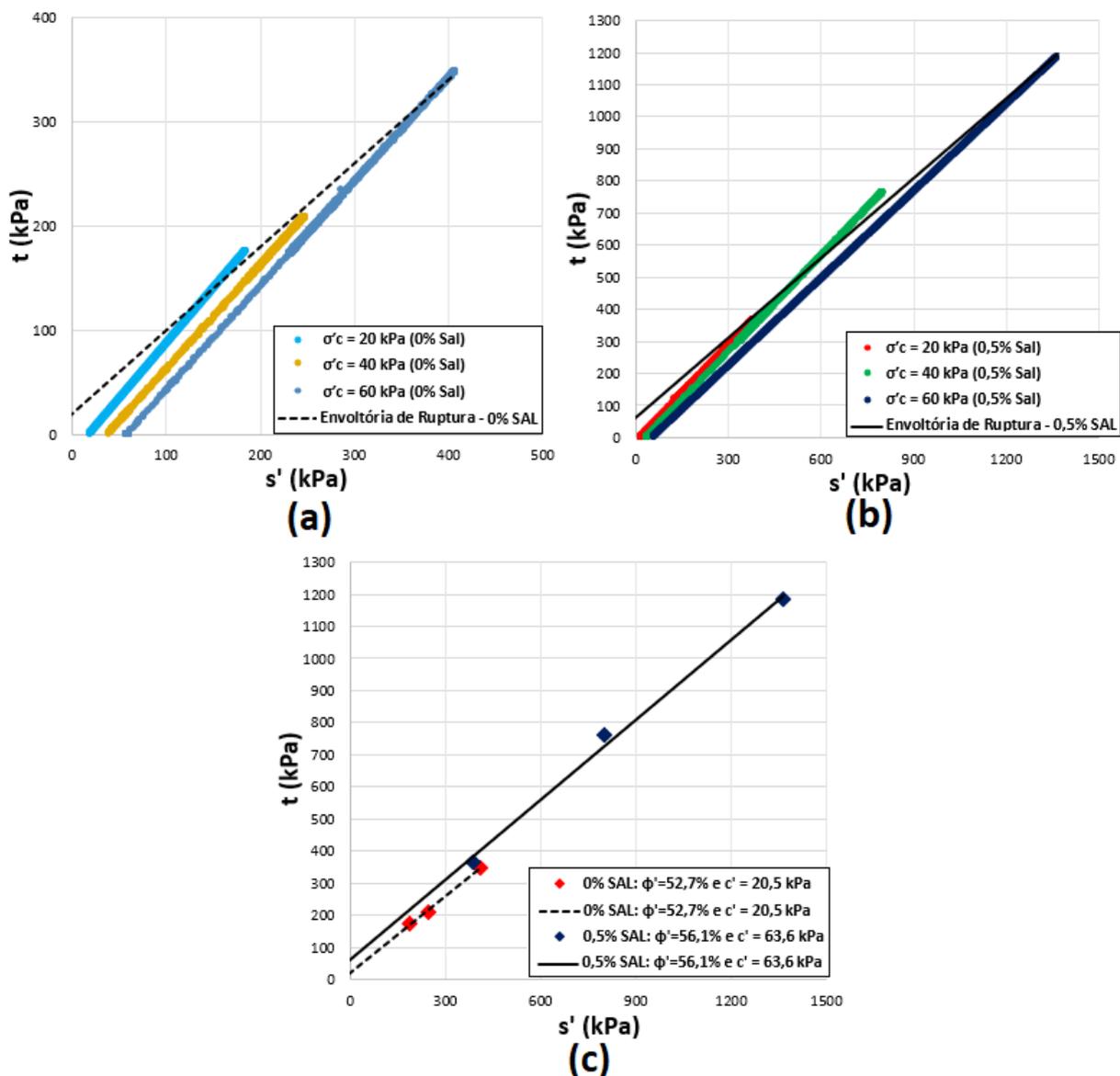


Figura 4.31 – Envoltórias de ruptura e trajetórias de tensão para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto (a) sem sal e (b) com sal e (c) comparação das envoltórias e dos parâmetros de resistência obtidos

Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) e intercepto coesivo ( $c'$ ), foram obtidos através das envoltórias de ruptura anteriormente apresentadas, sendo o coeficiente de determinação destas envoltórias lineares de 0,99 para ambas. Na Tabela 4.15 a seguir são apresentados os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais.

Tabela 4.15 – Parâmetros de resistência das misturas de RAP, com e sem sal

<b>Parâmetros de Resistência</b>		
	<b>Ângulo de atrito (°)</b>	<b>Intercepto Coesivo (kPa)</b>
<b>0% Sal</b>	52,7	20,5
<b>0,5% Sal</b>	56,1	63,3

Observa-se um pequeno aumento de 3,4° no ângulo de atrito com a adição de 0,5% de NaCl. Já o intercepto coesivo teve um aumento de 42,8 kPa, ou seja, a envoltória praticamente se deslocou para cima, aumentando assim a resistência da mistura através da aceleração das reações pozolânicas com adição de um catalisador (cloreto de sódio).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Em geral, constatou-se que a perda de massa acumulada após os referidos tipos de ciclos é controlada pelo índice de porosidade ( $\eta$ ) / teor volumétrico de cal ( $L_{iv}$ ). Além disso, percebeu-se que o aumento de temperatura de cura de 23°C para 40°C proporcionou elevados ganhos de rigidez, resistência e durabilidade (após ciclos de congelamento e degelo) assim como a adição de sal e fibras de polipropileno para os espécimes curados a 23°C (tanto para molhagem e secagem quanto congelamento e degelo). Para todos os corpos de prova ensaiados percebeu-se menores perdas de massa acumulada para os ciclos de molhagem e secagem, comparado aos ciclos de congelamento e degelo, sendo que as misturas de RAP e cal de carbureto obtiveram melhores resultados de resistência e durabilidade do que as misturas com areia de Osório e cal dolomítica, para a mesma temperatura de cura.

Tendo por base os resultados dos ensaios apresentados no capítulo anterior, serão abordados de forma resumida as principais e mais relevantes conclusões provenientes desta dissertação. Tais informações estão subdivididas em relação ao tipo de mistura analisada.

#### 5.1.1 Misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica

##### a) Cura a 23°C:

- Tanto as fibras de polipropileno quanto o sal são eficazes no aumento de  $q_u$ , para as misturas curadas a 23°C, sendo que a adição de fibras as misturas com sal provocaram um aumento de resistência para  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  menores que 40, mas ocorreu uma ligeira diminuição de resistência para índices superiores a 40;
- Para as misturas curadas a 23°C tem-se um aumento de resistência à compressão simples de até 35,6% com a adição de sal, 24,6% com adição de fibras e 49,5% com adição conjunta de fibras e sal;
- A adição de 0,5% de sal resultou em ganhos de durabilidade (ciclos de congelamento e degelo) de até 37,3% e a adição de fibras proporcionou ganhos de até 53,2%. A adição de 0,5% de fibra e sal apresentou o maior ganho de

durabilidade, de 61,6%. O aumento da compactação resultou em ganhos de até 55,2% ( $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ). Já o aumento do teor de cal proporcionou melhora na durabilidade (FT) de até 22,2% (teor de 3% para 7%);

- Ordem de eficácia em termos de maior durabilidade por congelamento e degelo, com cura a 23°C: NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno > Compactação > NaCl > Cal;
- A adição de 0,5% de sal resultou em ganhos de durabilidade (ciclos de molhagem e secagem) de até 12,3% e a adição de fibras proporcionou ganhos de até 13,2%. A adição de 0,5% de fibra de polipropileno e 0,5% de sal apresentou ganho de durabilidade (WD) de 20,6%. O aumento da compactação resultou em ganhos de até 16,7% ( $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ). Já o aumento do teor de cal dolomítica proporcionou melhora na durabilidade (WD) de até 30,2 % (teor de 3% para 7%);
- Ordem de eficácia em termos de maior durabilidade por molhagem e secagem, com cura a 23°C: Cal > NaCl + Fibras de polipropileno > Compactação > Fibras de polipropileno > NaCl;

#### b) Cura a 40°C:

- Os espécimes curados a 40°C apresentaram um aumento maior de resistência se comparadas aos corpos de prova curados a 23°C. A adição de fibras não conferiu grandes alterações em  $q_u$ , com a mudança de temperatura de cura, mas foi percebido um aumento de  $q_u$  de 71,0% com a adição de sal, 0,5% com adição de fibras e 43,6% com adição conjunta de fibras e sal;
- Analisando o aumento da temperatura de cura, de 23°C para 40°C, os ganhos de resistência à compressão não confinada foram de 344,5% para os corpos de prova sem fibra e sem sal, 460,8% para as misturas com sal, 276% para os espécimes com fibras e 327,0% para os corpos de prova com fibras e sal.
- Independentemente da temperatura de cura, os espécimes possuem um comportamento típico em relação à rigidez: as fibras diminuem

significativamente a rigidez inicial da mistura e o sal aumenta tal propriedade. Para as misturas sem fibra a ruptura ocorreu de forma rígida e, para as misturas com fibra, ocorreu de forma dúctil;

- A adição de 0,5% de sal resultou em ganhos de durabilidade (ciclos de congelamento e degelo) de até 23,2% e a adição de fibras proporcionou ganhos de até 17,4%. A adição de 0,5% de fibra de polipropileno e 0,5% de sal apresentou ganho de durabilidade (FT) de 25,2%. O aumento da compactação resultou em ganhos de até 48,8% ( $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ). Já o aumento do teor de cal dolomítica proporcionou melhora na durabilidade (FT) de até 15,7 % (teor de 3% para 7%);
- Ordem de eficácia em termos de maior durabilidade por congelamento e degelo, com cura a 40°C: Compactação > NaCl + Fibras de polipropileno > Fibras de polipropileno  $\cong$  NaCl > Cal;
- O aumento de temperatura de cura proporcionou elevados ganhos de durabilidade (misturas de areia de Osório-CFA-cal dolomítica). Uma prova disso é que todos os corpos de prova curados a 40°C sobreviveram aos 12 ciclos de congelamento e degelo, mas nem todos os espécimes curados a 23°C sobreviveram a mesma quantidade de ciclos;
- A adição de fibras de polipropileno é muito mais efetiva para os corpos de prova curados a 23°C, quando submetidos a ciclos de congelamento e degelo (FT);

### 5.1.2 Misturas de RAP-CFA-cal de carbureto

- A adição de 0,5% de sal aumenta consideravelmente  $q_u$ , para todo o intervalo de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , sendo mais perceptível para valores menores deste índice;
- O uso de RAP e cal de carbureto aumentaram  $q_u$  se comparado às misturas com areia de Osório e cal dolomítica, para a mesma temperatura de cura;
- Um aumento de 43,1% em relação a resistência à compressão simples ocorre para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto com adição de 0,5% de NaCl, curadas a 23°C;

- Comparando os efeitos da adição de sal em relação a  $q_t$ , percebe-se que o sal aumenta consideravelmente este tipo de resistência, para todo o intervalo de  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$ , sendo mais perceptível para valores maiores deste índice, comportamento diferente do analisado para  $q_u$ ;
- Constatou-se um aumento de  $q_t$ , com adição de 0,5% de NaCl, de 17% para as misturas de RAP-CFA-cal de carbureto, curadas a 23°C;
- O ganho mais significativo de durabilidade (FT) com adição de sal foi de 11,8%. Um aumento de 20,6% na durabilidade (FT) proveniente do aumento da energia de compactação (de  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$ ) foi percebido. Já um aumento do teor de cal de carbureto (de 3% para 7%) ocasionou uma melhora máxima de 19,7%;
- A adição de apenas 3% de cal de carbureto aparenta não conferir à mistura as reações pozolânicas necessárias para haver ligações mínimas entre as partículas. Logo, a adição de NaCl como catalisador não acelera tais reações, pois não há reagentes (cal de carbureto) necessário;
- Ordem de eficácia em termos de maiores ganhos de durabilidade (FT): Compactação > NaCl > Cal de Carbureto;
- A perda de massa é controlada por  $\eta/(L_{iv})^{0,11}$  para os dois tipos de mistura analisadas submetidas aos dois tipos de ciclos de durabilidade analisados;
- O ganho mais significativo de durabilidade (WD) com adição de sal é de 0,83%. Um aumento de 1,15% na durabilidade (WD) proveniente do aumento da energia de compactação (de  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$  para  $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$ ) foi percebido. Já um aumento do teor de cal de carbureto (de 3% para 7%) ocasionou uma melhora máxima de 0,37%;
- Através de ensaios de compressão triaxial drenados, com tensões de confinamento de 20, 40 e 60 kPa, nos espécimes com peso específico aparente seco de  $17 \text{ kN/m}^3$  e 7% de cal de carbureto, obteve-se um pequeno aumento de

3,4° no ângulo de atrito com a adição de 0,5% de NaCl. Já o intercepto coesivo teve um aumento de 42,8 kPa;

- Em relação ao comportamento tensão-deformação, todos os ensaios apresentaram uma tendência contrativa no início do cisalhamento, seguidos por uma expansão do espécime ensaiado. Os corpos de prova quando cisalhadas apresentaram picos de resistência ( $q$ ) bem definidos. Foi possível perceber que, com o aumento da tensão confinante efetiva, aumentou-se a resistência das misturas, tanto para os espécimes sem adição de NaCl quanto para os com adição, sendo nítido o aumento do pico de resistência com a adição de sal, como catalisador das reações;

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação dos efeitos do uso de cal dolomítica em relação a cal de carbureto, em termos de resistência, rigidez e durabilidade;
- Realização de ensaios triaxiais para análise do efeito da adição de cloreto de sódio em relação às misturas de areia de Osório;
- Realização de novos ensaios triaxiais para análise mais profunda do comportamento tensão-deformação das misturas de RAP com adição de cloreto de sódio;
- Reprodução dos ensaios realizados nesta dissertação para as misturas com RAP com peso específico aparente seco de 20 kN/m<sup>3</sup>, 21 kN/m<sup>3</sup> e 22 kN/m<sup>3</sup> (conforme Pasche 2016);
- Reprodução dos mesmos ensaios realizados, tanto para as amostras de areia de Osório quanto de RAP, mas com tempo de cura de 28, 56 e 90 dias, para análise dos efeitos da adição de sal a longo prazo.

## REFERÊNCIAS

ADRIANO, D.C.; PAGE, A.L.; ELSEEWI, A.A.; CHANG, A.C. **Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review**. Journal of Environmental Quality, v. 9, n. 3, p. 333-334, Jul 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica no Brasil: carvão mineral**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876463/atlas3ed\\_2008.pdf/268ddfdb-e65e-4956-ba1f-99de67b85dab?version=1.0](http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876463/atlas3ed_2008.pdf/268ddfdb-e65e-4956-ba1f-99de67b85dab?version=1.0)>. Acesso em: dezembro de 2017.

AHMAD, F.; BATENI, F.; AZMI, M. **Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres**. Geotextiles and Geomembranes, 28(1), 93-99, 2010.

AKOTO, B. K. A.; SINGH, G. **Behaviour of Lime Stabilized Laterite Under Repeated Loading**. Australian Road Research, Victoria. v.16, p.259-267, 1986.

AL- MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. **Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C**. Applied Clay Science, n.50, p. 191-198. 2010(a).

AL- MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. **Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C**. Applied Clay Science, n.50, p. 199-203. 2010(b).

ALVARADO, G.; COOP, M. R.; WILLSON, S. **On the role of bond breakage due to unloading in the behaviour of weak sandstones**. Géotechnique. v. 62, n. 4, p.303-316, 2012.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey Report**. Farmington Hills: ACAA, 2013. Disponível em: < <https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/2013ReportFINAL.pdf> >. Acesso em: dezembro de 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens**. Philadelphia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 593: Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use with Lime for Soil Stabilization**. Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 595: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements**. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.** Philadelphia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 559/ D 559 M: Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures.** Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 560/ D 560 M: Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures.** Philadelphia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2172: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Baving Mixtures.** Philadelphia, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2487: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes.** Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102: Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures.** Philadelphia, 1996.

ANDRADE, A. C. **Tijolos de cinza volante e cal: estudo do desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

ANTIOHOS, S.; TSIMAS, S. **Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime. Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate.** Cement and Concrete Research, Vol. 34, Issue 5, p.769-779, 2004.

ARABI, M.; WILD, S., 1989. **Property changes induced in clay soils when using lime stabilization.** Mun. Engr., 6:85 99.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: **Rochas e solos – Terminologia,** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7175: **Cal hidratada para argamassa - Especificação.** Rio de Janeiro, 4p, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2° ed. 71 p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653: **Materiais Pozolânicos - Especificações.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 8: **Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 23: **Cimento Portland e outros Materiais em pó – Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 53: **Agregado graúdo - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água**. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente**. Rio de Janeiro, 2009b.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook Manual series nº 4**. Lexington, KY, USA, 1987. Versão traduzida, 2002.

ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited**. Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287. 1995.

AVIRNENI, D.; PEDDINTI, P. R. T. and SARIDE, S. (2016). **Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses**. Construction and Building Materials, 121, 198-209.

BERRY, E.E.; HEMMINGS, R.T.; ZHANG, M.H.; CORNELIUS, B.J.; GOLDEN, D.M. **Hydration in high-volume fly ash concrete binders**. ACI Materials Journal, Vol. 91, N°4, p.382-389, 1994.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H., **Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime - A Critical Review of Literature**, PCA R&D Serial No. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois USA, 2003, 60 pages.

BINOTTO, R.B. **Avaliação do grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas de influência de resíduos do processamento do carvão**. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

BISHOP, A.W.; HENCKEL, D.J. **The measurements of soil properties in triaxial test**. London: Edward Arnold, 2ed., 277p., 1962.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

BOTERO, E.; OSSA, A.; SHERWELL, G.; OVANDO, S. **Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)**. *Geotextiles and Geomembranes* 43 (2015) 363–369, 2015.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy: Coal**. Key Documents London, United Kingdom, jun. 2017. Disponível em: < <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Acesso em: dezembro de 2017.

BROUWERS, H. J. H.; VAN EIJK, R. J. **Chemical reaction of fly ash**. 11TH International Congress on the chemistry of cement (ICCC). p.791-800. Durban, South Africa, 2003.

BROWN, M. T. **Caracterização petrológica e química dos carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CALTEC. **Sobre a Caltec**. Curitiba, Brasil, 2017a. Disponível em: < <http://caltec.com.br/sobre-a-caltec/>>. Acesso em: dezembro de 2017.

CALTEC. **Cal Dolomítica x Cas Calcítica x Cal Magnesiana**. Curitiba, Brasil, 2017b. Disponível em: < <http://caltec.com.br/cal-dolomitica-cal-calcitica-vs-cal-magnesiana/> > Acesso em: dezembro de 2017.

CARDOSO, F. A.; FERNANDES, H. C.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Carbide lime and industrial hydrated lime characterization**. *Powder Technology*, v. 195, n. 2, p. 143-149, 2009.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito**. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno Visando o Uso Como Base de Fundações Superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 243p, 2005.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

CHANG, T.; WOODS, R.D. **Effect of particle contact bond on shear modulus**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.118, n.8, p.1216-1233, 1992.

CIBER, **Usina de asfalto gravimétrica**. Disponível em <  
<https://www.ciber.com.br/pt/tecnologias/usina-de-asfalto-gravimetrica/> > Acesso em:  
 janeiro de 2018.

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, n.GT6, p.799-817, 1981.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; PRIETTO, P. D. M.; THOMÉ, A. **Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.129, n.10, p. 951-955. 2003.

CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C.; DA FONSECA, A. V.; COOP M. R. **Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 138, n. 1, p.100-109, 2012b.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R.C.; FLOSS, M.F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.136, p.759-763, 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, 23(4), 432-440, 2011.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N. C.; JONANN, A.D. R.; GAUER, E.A.; SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. **Key Parameters for Tensile and Compressive Strength of Silt-Lime Mixtures**. Géotechnique Letters, v. 2, p. 81-85fi, 2012.

CONSOLI, N. C.; MARQUES, S. F. V.; SAMPA, N. C.; BORTOLOTTI, M. S.; SIACARA, A. T.; NIERWINSKI, H. P.; PEREIRA, F.; FESTUGATO, L. A. **A general relationship to estimate strength of fibre-reinforced cemented fine-grained soils**. Geosynthetics International, 24(4), 435-441, 2017a.

CONSOLI, N.C.; NIERWINSKI, H.P.; PECCIN DA SILVA, A.P.; SOSNOSKI, J. **Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends**. Geotextiles and Geomembranes, 45, 98-102, 2017b.

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, New York: ASCE, v.127, n.9, p.774-782, 2001.

CONSOLI, N.C.; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R.A.; MARQUES, S.F.V., VENSON, G.I., PASCHE, E. & GONZÁLEZ VELÁZQUEZ, L.E. **A single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders.** Canadian Geotechnical Journal 53(12), 2072-2079 (DOI: 10.1139/cgj-2015-0606), 2016b.

CONSOLI, N.C.; QUIÑÓNEZ, R.A.S.; VILLALBA, N.M.K. DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. **Durability, Strength, and Stiffness of Dispersive Clay–Lime Blends.** Journal of Materials in Civil Engineering, 28(11), 2016a.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, P.; DONATO M.; DONATO, M., PRIETTO M. **Effect of material properties on the behavior of sand–cement–fiber composites.** Ground Improvement 8: pp 77–90, 2004.

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

CONSOLI, N. C., ROCHA, C. G. & SILVANI, C. **Effect of curing temperature on the strength of sand, coal fly ash, and lime blends.** J. Mater. Civ. Eng. 26(8), 06014015, 2014b.

CONSOLI, N.C.; SALDANHA, R. B.; MALLMANN, J. E. C.; DE PAULA, T. M.; HOCH, B. Z.; **Enhancement of strength of coal fly ash-carbide lime blends through chemical and mechanical activation.** Construction and Building Materials, 157 pp 65-74, 2017c.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; FONINI, A.; DALLA ROFA, F. **Fiber Reinforcement Effects on Sand Considering a Wide Cementation Range.** Geotextiles and Geomembranes 27 pp 196 – 203, 2009.

COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. **The mechanics of cemented carbonate sands.** Géotechnique, v. 1, n. 43, p.53-67, 1993.

COOP, M., & WILLSON, S. **Behavior of Hydrocarbon Reservoir Sands and Sandstones.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (129), pp. 1010-1019, 2003.

CORREIA, A. A. S.; OLIVEIRA, P. J. V.; DIONE G.; CUSTÓDIO, D. G. **Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders.** Geotextiles and Geomembranes Volume Issue 2, Pages 97–106., 2015.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Cabo Verde. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2001.

CRONST, F. **Estudo das Variáveis que Influenciam a Estabilização Química de um Solo Residual de Basalto Encontrado na Região de Ijuí-RS.** 2010. Trabalho de Conclusão – Curso de Engenharia Civil, UNIJUÍ, Ijuí. 2010.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada.** 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CUCCOVILLO, T., & COOP, M. **Automated Triaxial Apparatus for Elevated Pressures.** Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock (1350), pp. 231-246, 1999.

DA SILVA, M. A. M. **Efeito da Estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando a sua utilização em construção civil e em pavimentação.** 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

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

DALLA ROSA, A. **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura.** 273p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013

DALLA ROSA, F. THOMÉ, A. **Análise da temperatura de cura como fator de influência na resistência de um solo estabilizado com resíduo industrial e cal.** In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia e Feira de Protótipos, 16, 2001, Ijuí, Anais... Ijuí;CD-Rom. 2002.

DE PAULA, T. M. **Misturas de Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples frente à Moagem da Cinza.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DIAMBRA A.; IBRAIM, E. **Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale.** Geotechnique 65, 296-308, 2015.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. **Modelling of fibre-cohesive soil mixtures.** Acta Geotechnica, 9(6), 1029-1043, 2014.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; RUSSEL, A. R.; MIR WOOD, D. **Fibre reinforced sands: from experiments to modelling and beyond.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 37, 2427-2455, 2013.

DRAKE, J. A.; HALIBURTON, T. A. **Accelerated curing of salt-treated and lime-treated cohesive soils.** Highway Research Record, 381, 10-19, 1972.

ELETOBRAS CGTEE. Companhia de Geração de Energia Elétrica. **O carvão.** Porto Alegre, Brasil, 2017. Disponível em: <<http://cgtee.gov.br/COMUNICACAO/IMPRESA/GERACAO-TERMELETRICA/>>. Acesso em: dezembro de 2017.

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION. Production. Essen, Alemanha, 2010. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>> Acesso em: dezembro de 2017

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) - **American Department of Transportation** (2011). Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2011/>> Acesso em: outubro de 2017.

FERREIRA, C.; RIBEIRO, A.; OTTOSEN, L. **Possible applications for municipal solid waste fly ash.** Journal of Hazardous Materials, v. 96, n. 2, p. 201-216, 2003.

FESTUGATO, L., **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Microreforçado com Fibras de Distintos Índice Aspecto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L., **Comportamento de Hidratação e Resposta Cisalhante Cíclica de Resíduo de Mineração Cimentado Reforçado com Fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. **Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings.** Geosynthetics International, 22(2), pp. 196–206, 2015.

FESTUGATO, L.; MENDER, E.; BENEZRA, F.; KIPPER, E.A.; CONSOLI, N. C. **Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length.** Geotextiles and Geomembranes 45 (2017) 77-82 15, 2017.

FISHER, G. L.; CHANG, D. P. Y.; BRUMMER, M. **Fly ash collected from electrostatic precipitators: microcrystalline structures and the mystery of the spheres.** Science, v. 192, n. 4239, p. 553-555, 1976.

FOGAÇA, B.C.; CERATTI, J.A.P. **Estudo do comportamento mecânico e de deformabilidade de misturas de cinza volante, cal e areia do litoral do Rio Grande do**

**Sul.** In: 29º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá. Anais de Eventos, p.347-360, 1995.

FONINI, A. **Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada: Análise Experimental e Micromecânica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FRAAY, A.L.A.; BIJEN, J.M.; deHAAN, Y.M. **The reaction of fly ash in concrete. A critical examination.** Cement and Concrete Research, Vol. 19, Issue 2, p.235-246, 1981.

FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; YANG, C.; HOU, W.; DONG, Y.; WU, X. **Studies on blended cement with a large amount of fly ash.** Cement and Concrete Research, Vol. 32, Issue 7, p.1153-1159. 2002.

GALAA, A. M.; THOMPSON, B. D; GRABINSKY, M. W., BAWDEN, W. F. **Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements.** Canadian Geotechnical Journal, v.48, n.8, p. 1174-1187, 2011.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens.** Boletim nº1. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

HARTY, J.R.; THOMPSON, M.R. **Lime reativity of tropical and subtropical soil.** Highway Research Recird, Washington, n. 442, p.102-112, 1973.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 1, Soil Classification and Compaction Tests.** London: Prentech Press, 339 p., 1980a.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 2, Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests.** London: Prentech Press, 402 p., 1980b.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing, Vol 3, Effective Stress Tests.** London: Prentech Press, 495 p., 1980c.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing: Effective stress tests.** 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 425 p. 3 v, 1998.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. **A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers.** Construction and Building Materials 30, pp 100–116, 2012.

HERRIN, M. i MITCHELL, H. **Lime-soil-mixtures.** Highway Research Board Bulletin, Washington, n.304, p.99-121, 1961.

HIGHT, D.W.; JARDINE, R.J. **Small-strain stiffness and strength characteristics of hard London tertiary clays.** Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, p.533-552, 1993.

HOCH, B. Z. **Misturas de chalk com cimento: estudo da rigidez, resistência e durabilidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017

IBRAIM, E.; FOURMONT, S. **Behaviour of sand reinforced with fibres.** In: Ling, H.I.; Callisto, L.; Leshchinsky, D.; Koseki, J. (eds.) Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modelling and Analysis, v. 146, Springer, Dordrecht, 2006.

INDÚTRIA BRASILEIRA DE GASES (IBG). Acetileno. Jundiaí, Brasil, 2017. Disponível em: <<http://www.ibg.com.br/acetileno.htm>> Acesso em: dezembro de 2017.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: principles and practice.** Sydney: Butterworths, 1972.

INPE (2017). **Brazilian Institute of Spatial Research.** Brasília, Brazil. Disponível em: <<http://www.inpe.br>> Acesso em: março de 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global coal demand to reach 9 billion tonnes per year by 2019.** Paris, França, 15 dec. 2014. Disponível em: <<https://www.iea.org/newsroom/news/2014/december/global-coal-demand-to-reach-9-billion-tonnes-per-year-by-2019.html>>. Acesso em: dezembro de 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Coal.** Paris, França, jan. 2015a. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/coal>>. Acesso em: dezembro de 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Atlas.** Paris, França, feb. 2015b. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/?subject=2020991907>>. Acesso em: dezembro de 2017.

KANAZAWA, N. M. **Durabilidade, rigidez e análise do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V. **Fly ash and fly ash-soil mixture for embankment construction.** In.: Environmental Geotechnics, Osaka. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. v.2, p.757-762, 1996.

KUMAR, A.; WALIA, B. S.; BAJAJ, A. **Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil**. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(3), 242-248, 2007.

LA ROCHELLE, P.; LEROUEIL, S.; TRAK, B.; BLAIS-LEROUX, L. TAVENAS, F. **Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests**. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1988.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 553 p, 1969.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOVISA, J.; SHUKLA, S.K.; SIVAKUGAN, N. **Shear strength of 34 randomly distributed moist fibre-reinforced sand**. Geosynthetics 35 International, 17(2), pp. 100–106, 2010.

MAHER, H., Ho, C. **Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite**. Journal Geotechnical Eng. 120:1381–93, 1994.

MALLMAN, J.E.C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 1996. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MALEK, R.I.; KHALIL, Z. H.; IMBABY, S.S.; ROY, D.M. **The contribution of class-F fly ash to the strength of cementitious mixtures**. Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue6, p.1152-1154, 2005.

MANZ, O. E. **Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products**. Fuel, v. 76, n. 8, p. 691-696, 1997.

MARCIALIS, A.; MASSIDDA, L.; SANNA, U. **Low temperature steam curing hydration of lime-fly-ash compacts**. Cement and Concrete Research, v. 13, n. 6, p. 887-894, 1983.

MARCON, A. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areis-cal-cinza volante.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1977.

MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada até Altas Tensões de Confinamento.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash.** Ames, 247 p. Tese (Ph. D.) – Iowa State University Of Science and Technology, 1961.

MATEOS, M. **Soil Lime Research at Iowa State University.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions. ASCE, New York, v.90, p.127-153, 1964.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

MICHALOWSKI, R. L.; CERMAK, J. **Strength anisotropy of fiber-reinforced sand.** Computers and Geotechnics, 29, p. 279-299, 2002.

MICHALOWSKI, R. L.; ZHAO, A. **Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils.** Journal Geotechnical Engineering, 122(3), 226-234, 1996.

MINNICK, L. J. **Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash.** In: Proc., Fly Ash Utilization Conf., American Public Power Association, Bureau of Mines, Pittsburgh. p. 287-315, 1967.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL. colaboração Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030.** Publicações. Brasília, 2007. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest>> Acesso em: dezembro de 2017.

MORSY, M. S. **Effect of temperature on hidration kinetics and stability of hidration phases of metakaolin-lime sludge-silica fume system.** Ceramics – Silikáty, Munich n.49, p. 225-229. 2005.

NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal; Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

NOVAES, J. F. **Misturas cinza volante - cal de carbureto: Durabilidade, resistência à tração e compressão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

NÚÑEZ, W. P. **Notas de Aula de Estabilização de Solos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

PASCHE, E. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PARKER, J. W. **Evaluation of Laboratory Durability Tests for Stabilized Subgrade Soils**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Brigham Young University, Estados Unidos, Utah, 2008.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S.; GONÇALVES, J.V.S. **Método de projeto de pavimentação semi-rígido: aplicação para caso de base pozolânica**. Rio de Janeiro: DNER, 1983.

PRAKBAR, J.; SRIDHAR, R.S. **Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil**. Construction and Building Materials, 16(2), 123-131, 2002.

PUPPALA, A.J.; HOYOS, L.R. and POTTURI, A.K. **Resilient moduli response of moderately cement treated reclaimed asphalt pavement aggregates**. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(7), 990-998, 2011.

QIAN, J.; SHI, C.; WANG, Z. **Activation of blended cements containing fly ash**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 8, p. 1121-1127, 2001.

QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R.A. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RAMASAMY, P.; PERIATHAMBY, A.; IBRAHIM, S. **Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration**. Waste management and research, v. 20, n. 6, p. 536-540, 2002.

RAVINA, D. **Optimized determination of PFA (fly ash) fineness with reference to pozzolanic activity**. Cement and Concrete Research, v. 10, n. 4, p. 573-580, 1980.

RIGHETTO, G. L. **Validação do Fator Vazios/Agente Cimentante na Análise da Resistência Mecânica de um Solo Tratado com Cal, Cimento e Resíduo de Britagem de Rocha**. 91p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROBNETT, Q. L. e THOMPSON, M. R. **Soil stabilization literature reviews**. Civil Engineering Studies. Highway Engineering Series N° 34, Urbana, Illinois. 1969.

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., AND ROFF, T. E. J. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 125, p. 242-249, 1997.

ROHDE, G. M., ZWONOK, O., CHIES, F. & SILVA, N. I. W. **Coal ash fossil in Brazil–technical and environmental aspects**. Porto Alegre, Brazil: CIENTEC, 2006.

ROHDE, G.M. **Cinzas, a outra metade do carvão fóssil – nova estratégia para a termelétricidade**. In: IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Gramado: 2013.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. **The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems**. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 1, p. 133-138, 2002.

RUSHAD, TABIN S.; KUMAR, ABHISHEK; DUGGAL S. K; MEHTA P. K. **Experimental studies on lime-soil-fly ash bricks**. International Journal of Civil and Structural Engineering.v.1, n.4, 2011.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. 2014. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R.B.; FILHO, H. C. S.; RIBEIRO, J. L. D.; CONSOLI, N.C. **Modelling the Influence of Density, Curing Time, Amounts of Lime and Sodium Chloride on the Durability of Compacted Geopolymers monolithic walls**. Construction and Building Materials 136, pp 65-72, 2017.

SALDANHA, R.B.; MALLMANN, J.E.C.; CONSOLI, N.C. **Salts accelerating strength increase of coal fly ash-carbide lime compacted blends**. Géotechnique Letters, 6, 1-5, 2016.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. **Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.10, p.857-868, 2001.

SCHUMANN, W. **Minerals of the world**. Sterling Publishing Company Inc., 232 p, 2008.

SHARMA, R. S., PHANIKUMAR, B. R., and VARAPRASADA RAO, B. **Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride and rice-husk ash**. Journal of Materials in Civil Engineering, 20(8), 509–515, 2008.

SERAFINI, L. **Estabilização de Solos com o Uso da Cal Hidratada**. Trabalho de Conclusão – Curso de Engenharia Civil, UPF, Passo Fundo, 2002.

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

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil**. Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

SKEMPTON, A.W. **The pore-pressure coefficients A and B.** Géotechnique, London, v.4, p.143-147, 1954.

SPINELLI, L.F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 133p, 1999.

SWAINE, D.J. **Why trace elements are important.** Fuel Processing Technology, v.65-66, p. 21-33, 2000.

TATSUOKA, F.; JARDINE, R.J.; LO PRESTI, D.; DI BENEDETTO, H.; KODAKA, T. **Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials – theme lecture.** In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 14., Hamburg, Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, p. 2129-2164, 1999.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais.** 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais.** 1999. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.92, p.67-92.1966.

THOMPSON, M.R. **Soil-lime mixtures for construction of low-volume roads.** Transportation Research Board Special Report, n. 160, pp. 149-165, Washington, D.C., 1975.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases.** Washington, D.C. 66p, 1976.

THOMPSON, M. R. **Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils.** Highway Research Record, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1965.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington D.C., 58p. (State of the art report, 5), 1987.

ZWONOK, O.; CHIES, F. **Projeto CICASOL – Pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal.** Cientec. Publicação interna, Porto Alegre, 1989.

WANG, J. W. H.; HANDY, R. L. **Evaluation of carbide waste lime for soil stabilization. Engineering Experiment Satation.** Iowa State University. Ames, United States, 1966.

WHITEHURST, E. A., YODER, E. J. **Durability Tests on Lime Stabilized Soils.** Proceeding, Highway Research Board, 1952.

WIRTGEN. **Products.** Disponível em <<http://www.wirtgen.de/en/products/>>. Acesso em: janeiro de 2018.

WORLD COAL ASSOCIATION. **World Coal Information 2017**. Londres, Inglaterra, 2017. Disponível em: <<https://www.worldcoal.org>>. Acesso em: dezembro de 2017.

## **APÊNDICE A**

# **DADOS DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS**

Moldagem de cp's de Areia de Osório-CFA-Cal dolomítica Sal e Fibras, para qu																			
								Moldagem para 1 cp. * Considerado 25 % a mais para análise de umidade											
Cinza (%)	Fibra (%)	Sal (%)	Cal (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$	Massa de solo (g)	Massa de cinza (g)	Massa de água (g)	Massa de fibra (g)	Massa de sal (g)	Massa de cal (g)	Massa por camada (g)	Peso real (g)	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Varição $\gamma_d$ (%)
25	0	0	5	1.4	14	0.80	40.74	264.32	66.08	48.11	0.00	0.00	13.22	104.46	314.93	9.90	194.4	1.42	1.56
25	0.5	0	5	1.4	14	0.78	40.41	263.30	65.83	48.11	1.32	0.00	13.17	104.46	315.95	10.00	196.3	1.41	0.81
25	0	0.5	5	1.4	14	0.80	40.77	263.30	65.83	48.11	0.00	1.32	13.17	104.46	315.30	9.90	194.4	1.42	1.47
25	0.5	0.5	5	1.4	14	0.79	40.44	262.30	65.57	48.11	1.31	1.31	13.11	104.46	315.11	9.95	195.4	1.42	1.28
25	0	0	3	1.5	14	0.68	38.88	287.62	71.91	51.54	0.00	0.00	8.63	111.92	336.29	10.00	196.3	1.51	0.95
25	0.5	0	3	1.5	14	0.67	38.50	286.50	71.63	51.54	1.43	0.00	8.60	111.92	337.25	9.95	195.4	1.52	1.14
25	0	0.5	3	1.5	14	0.68	38.91	286.50	71.63	51.54	0.00	1.43	8.60	111.92	336.11	10.00	196.3	1.51	0.87
25	0.5	0.5	3	1.5	14	0.67	38.54	285.39	71.35	51.54	1.43	1.43	8.56	111.92	336.32	9.95	195.4	1.51	0.78
25	0	0	5	1.5	14	0.68	36.81	283.20	70.80	51.54	0.00	0.00	14.16	111.92	336.22	9.95	195.4	1.52	1.58
25	0.5	0	5	1.5	14	0.67	36.46	282.11	70.53	51.54	1.41	0.00	14.11	111.92	336.50	10.00	196.3	1.51	0.55
25	0	0.5	5	1.5	14	0.68	36.84	282.11	70.53	51.54	0.00	1.41	14.11	111.92	336.60	9.95	195.4	1.52	1.55
25	0.5	0.5	5	1.5	14	0.67	36.49	281.03	70.26	51.54	1.41	1.41	14.05	111.92	336.10	9.95	195.4	1.52	1.08
25	0	0	7	1.5	14	0.68	35.52	278.91	69.73	51.54	0.00	0.00	19.52	111.92	336.00	9.90	194.4	1.52	1.66
25	0.5	0	7	1.5	14	0.67	35.19	277.85	69.46	51.54	1.39	0.00	19.45	111.92	336.37	10.00	196.3	1.51	0.97
25	0	0.5	7	1.5	14	0.68	35.55	277.85	69.46	51.54	0.00	1.39	19.45	111.92	336.51	9.90	194.4	1.53	1.95
25	0.5	0.5	7	1.5	14	0.67	35.22	276.81	69.20	51.54	1.38	1.38	19.38	111.92	336.73	9.90	194.4	1.52	1.28
25	0	0	5	1.6	14	0.57	32.95	302.08	75.52	54.98	0.00	0.00	15.10	119.38	361.11	9.95	195.4	1.63	1.75
25	0.5	0	5	1.6	14	0.56	32.57	300.92	75.23	54.98	1.50	0.00	15.05	119.38	359.46	9.90	194.4	1.63	1.80
25	0	0.5	5	1.6	14	0.57	32.98	300.92	75.23	54.98	0.00	1.50	15.05	119.38	361.42	9.95	195.4	1.63	1.75
25	0.5	0.5	5	1.6	14	0.56	32.61	299.77	74.94	54.98	1.50	1.50	14.99	119.38	358.26	9.95	195.4	1.61	0.84
25	0	0	7	1.6	14	0.57	31.80	297.50	74.37	54.98	0.00	0.00	20.82	119.38	361.22	9.90	194.4	1.64	1.96
25	0.5	0	7	1.6	14	0.56	31.44	296.38	74.09	54.98	1.48	0.00	20.75	119.38	359.80	9.90	194.4	1.64	1.97
25	0	0.5	7	1.6	14	0.57	31.83	296.38	74.09	54.98	0.00	1.48	20.75	119.38	361.66	9.90	194.4	1.64	1.99
25	0.5	0.5	7	1.6	14	0.56	31.47	295.26	73.82	54.98	1.48	1.48	20.67	119.38	359.30	9.95	195.4	1.61	0.75
25	0	0	3	1.4	14	0.80	43.03	268.45	67.11	48.11	0.00	0.00	8.05	104.46	317.14	9.95	195.4	1.43	1.96
25	0.5	0	3	1.4	14	0.78	42.68	267.40	66.85	48.11	1.34	0.00	8.02	104.46	314.71	9.95	195.4	1.41	0.68
25	0	0.5	3	1.4	14	0.80	43.06	267.40	66.85	48.11	0.00	1.34	8.02	104.46	318.40	9.90	194.4	1.44	1.99
25	0.5	0.5	3	1.4	14	0.79	42.71	266.37	66.59	48.11	1.33	1.33	7.99	104.46	314.92	9.90	194.4	1.42	1.17
25	0	0	7	1.4	14	0.80	39.32	260.31	65.08	48.11	0.00	0.00	18.22	104.46	316.72	9.95	195.4	1.43	1.99
25	0.5	0	7	1.4	14	0.78	39.01	259.33	64.83	48.11	1.30	0.00	18.15	104.46	315.42	9.95	195.4	1.42	1.15
25	0	0.5	7	1.4	14	0.80	39.35	259.33	64.83	48.11	0.00	1.30	18.15	104.46	315.70	9.95	195.4	1.42	1.60
25	0.5	0.5	7	1.4	14	0.79	39.04	258.35	64.59	48.11	1.29	1.29	18.08	104.46	314.74	9.90	194.4	1.41	1.06
25	0	0	3	1.6	14	0.57	34.80	306.80	76.70	54.98	0.00	0.00	9.20	119.38	360.80	10.00	196.3	1.61	0.73
25	0.5	0	3	1.6	14	0.56	34.40	305.60	76.40	54.98	1.53	0.00	9.17	119.38	359.85	10.00	196.3	1.60	0.27
25	0	0.5	3	1.6	14	0.57	34.84	305.60	76.40	54.98	0.00	1.53	9.17	119.38	361.71	9.95	195.4	1.62	1.53
25	0.5	0.5	3	1.6	14	0.56	34.44	304.42	76.10	54.98	1.52	1.52	9.13	119.38	359.83	10.00	196.3	1.60	-0.06

Moldagem de cp's de Areia de Osório-CFA-Cal dolomítica Sal e Fibras, para durabilidade																			
								Moldagem para 1 cp. * Considerado 10 % a mais para análise de umidade											
Cinza (%)	Fibra (%)	Sal (%)	Cal (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$	Massa de solo (g)	Massa de cinza (g)	Massa de água (g)	Massa de fibra (g)	Massa de sal (g)	Massa de cal (g)	Massa por camada (g)	Peso real (g)	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Varição $\gamma_d$ (%)
25	0	0	5	1.4	14	0.80	40.74	1181.60	295.40	215.05	0.00	0.00	59.08	530.65	1594.70	12.70	997.5	1.41	0.67
25	0.5	0	5	1.4	14	0.78	40.41	1177.07	294.27	215.05	5.89	0.00	58.85	530.65	1599.50	12.80	1005.3	1.40	-0.18
25	0	0.5	5	1.4	14	0.80	40.77	1177.07	294.27	215.05	0.00	5.89	58.85	530.65	1593.80	12.70	997.5	1.40	-0.06
25	0.5	0.5	5	1.4	14	0.79	40.44	1172.58	293.15	215.05	5.86	5.86	58.63	530.65	1598.70	12.80	1005.3	1.39	-0.76
25	0	0	3	1.5	14	0.68	38.88	1285.78	321.45	230.41	0.00	0.00	38.57	568.55	1710.40	12.60	989.6	1.52	1.07
25	0.5	0	3	1.5	14	0.67	38.50	1280.78	320.19	230.41	6.40	0.00	38.42	568.55	1717.60	12.80	1005.3	1.49	-0.58
25	0	0.5	3	1.5	14	0.68	38.91	1280.78	320.19	230.41	0.00	6.40	38.42	568.55	1709.10	12.65	993.5	1.51	0.74
25	0.5	0.5	3	1.5	14	0.67	38.54	1275.82	318.95	230.41	6.38	6.38	38.27	568.55	1719.00	12.80	1005.3	1.50	-0.17
25	0	0	5	1.5	14	0.68	36.81	1266.00	316.50	230.41	0.00	0.00	63.30	568.55	1710.00	12.70	997.5	1.50	0.14
25	0.5	0	5	1.5	14	0.67	36.46	1261.15	315.29	230.41	6.31	0.00	63.06	568.55	1718.60	12.85	1009.2	1.49	-0.79
25	0	0.5	5	1.5	14	0.68	36.84	1261.15	315.29	230.41	0.00	6.31	63.06	568.55	1708.70	12.65	993.5	1.51	0.86
25	0.5	0.5	5	1.5	14	0.67	36.49	1256.34	314.08	230.41	6.28	6.28	62.82	568.55	1717.20	12.85	1009.2	1.49	-0.59
25	0	0	7	1.5	14	0.68	35.52	1246.82	311.70	230.41	0.00	0.00	87.28	568.55	1708.00	12.70	997.5	1.50	-0.08
25	0.5	0	7	1.5	14	0.67	35.19	1242.11	310.53	230.41	6.21	0.00	86.95	568.55	1717.60	12.70	997.5	1.50	0.30
25	0	0.5	7	1.5	14	0.68	35.55	1242.11	310.53	230.41	0.00	6.21	86.95	568.55	1706.30	12.65	993.5	1.51	0.62
25	0.5	0.5	7	1.5	14	0.67	35.22	1237.45	309.36	230.41	6.19	6.19	86.62	568.55	1722.60	12.80	1005.3	1.50	0.01
25	0	0	5	1.6	14	0.57	32.95	1350.40	337.60	245.77	0.00	0.00	67.52	606.45	1818.50	12.55	985.7	1.62	1.16
25	0.5	0	5	1.6	14	0.56	32.57	1345.23	336.31	245.77	6.73	0.00	67.26	606.45	1823.70	12.80	1005.3	1.58	-0.96
25	0	0.5	5	1.6	14	0.57	32.98	1345.23	336.31	245.77	0.00	6.73	67.26	606.45	1803.20	12.60	989.6	1.60	0.16
25	0.5	0.5	5	1.6	14	0.56	32.61	1340.09	335.02	245.77	6.70	6.70	67.00	606.45	1825.30	12.80	1005.3	1.59	-0.52
25	0	0	7	1.6	14	0.57	31.80	1329.94	332.49	245.77	0.00	0.00	93.10	606.45	1817.50	12.70	997.5	1.60	0.10
25	0.5	0	7	1.6	14	0.56	31.44	1324.92	331.23	245.77	6.62	0.00	92.74	606.45	1822.00	12.75	1001.4	1.59	-0.45
25	0	0.5	7	1.6	14	0.57	31.83	1324.92	331.23	245.77	0.00	6.62	92.74	606.45	1818.00	12.50	981.7	1.63	1.65
25	0.5	0.5	7	1.6	14	0.56	31.47	1319.94	329.99	245.77	6.60	6.60	92.40	606.45	1825.50	12.85	1009.2	1.58	-1.06

### Moldagem de cp's de RAP-CFA-Cal de carbureto, Sal, para qu

		Quantidade de material												
$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	cal (%)	Cinza(g)	Cal(g)	RAP(g)	ÁGUA(g)	Camada(g)	Peso real	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Varição $\gamma_d$ (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$	
1.7	3%	745.37	89.44	2236.10	276.38	970.23	2909.43	19.90	1562.9	1.71	0.46	0.38	24.92478	
1.7	5%	731.17	146.23	2193.50	276.38	970.23	2911.00	19.80	1555.1	1.72	1.02	0.37	23.152	
1.7	7%	717.50	200.90	2152.50	276.38	970.23	2942.14	20.30	1594.4	1.69	-0.41	0.40	23.802701	
1.8	5%	774.18	154.84	2322.53	292.64	1027.30	3080.33	20.00	1570.8	1.80	-0.05	0.30	20.006877	
1.9	5%	817.19	163.44	2451.56	308.90	1084.37	3246.31	20.00	1570.8	1.90	-0.21	0.24	16.25721	

			Quantidade de material												
$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	cal (%)	sal(%)	Cinza(g)	Cal(g)	RAP(g)	ÁGUA(g)	SAL(g)	Camada(g)	Peso real	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Varição $\gamma_d$ (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$
1.7	3%	0.50%	741.64	89.00	2224.92	276.38	15.35	970.23	2912.26	19.90	1562.9	1.71	0.56	0.38	24.982779
1.7	5%	0.50%	727.51	145.50	2182.54	276.38	15.35	970.23	2911.84	19.90	1562.9	1.71	0.54	0.38	23.537365
1.7	7%	0.50%	713.91	199.90	2141.74	276.38	15.35	970.23	2912.10	20.00	1570.8	1.70	0.05	0.38	22.924358
1.8	5%	0.50%	770.31	154.06	2310.92	292.64	16.26	1027.30	3079.70	20.10	1578.7	1.79	-0.57	0.31	20.400766
1.9	5%	0.50%	813.10	162.62	2439.31	308.90	17.16	1084.37	3247.66	20.40	1602.2	1.86	-2.13	0.26	17.704063

Estes corpos de prova foram também moldados para os ensaios triaxiais

<b>Moldagem de cp's de RAP-CFA-Cal de carbureto, Sal, para qt</b>									
$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	Cal (%)	Peso real (g)	Altura (cm)	Diâmetro real (cm)	V( $\text{cm}^3$ )	w médio(%)	$\gamma_d$ real ( $\text{g/cm}^3$ )	Varição $\gamma_d$ (%)	$\eta/\text{Liv}^{0,11}$
1.7	3	877.18	5.98	10.01	470.61	9.3	1.71	0.31	23.11956722
1.7	3	876.93	6.01	10.01	472.97	9.3	1.70	-0.22	23.4635558
1.7	5	877.19	6.01	10.00	472.08	9.7	1.69	-0.36	22.1532935
1.7	5	876.76	6.01	10.00	472.29	9.7	1.69	-0.45	22.21074527
1.7	7	880.68	6.01	10.01	473.23	9.3	1.70	0.16	20.95677771
1.7	7	876.73	5.99	10.00	470.14	10.2	1.69	-0.46	20.83382056
1.8	5	928.95	6.01	10.02	473.91	10.2	1.78	-1.18	19.07921117
1.8	5	928.63	6.03	10.01	474.54	10.2	1.78	-1.35	19.18442034
1.9	5	980.68	6.03	10.01	474.23	10.1	1.88	-1.14	15.61386601
1.9	5	979.34	5.99	10.03	473.54	10.1	1.88	-1.14	15.60910908

### Moldagem de cp's de RAP-CFA-Cal de carbureto, Sal, para durabilidade

		Quantidade de material												
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	cal (%)	Cinza(g)	Cal(g)	RAP(g)	ÁGUA(g)	Camada(g)	Peso real (g)	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Variação $\gamma_d$ (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$	
1.7	3%	473.31	56.80	1419.92	175.50	616.10	1853.60	12.75	1001.4	1.68	-1.22	0.39	25.54	
1.7	5%	464.29	92.86	1392.88	175.50	616.10	1851.60	12.70	997.5	1.69	-0.72	0.38	23.81	
1.7	7%	455.61	127.57	1366.84	175.50	616.10	1849.40	12.70	997.5	1.69	-0.69	0.38	22.87	
1.8	5%	491.60	98.32	1474.81	185.83	652.34	1955.40	12.68	995.9	1.79	-0.43	0.30	19.90	
1.9	5%	518.91	103.78	1556.74	196.15	688.58	2063.00	12.85	1009.2	1.83	-3.56	0.25	17.08	

			Quantidade de material												
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	cal (%)	sal(%)	Cinza(g)	Cal(g)	RAP(g)	ÁGUA(g)	SAL(g)	Camada(g)	Peso real (g)	Altura (cm)	V real (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Variação $\gamma_d$ (%)	e	$\eta/Lv^{0,11}$
1.7	3%	0.50%	470.94	56.51	1412.82	175.50	9.75	616.10	1850.60	12.75	1001.4	1.69	-0.40	0.39	25.60
1.7	5%	0.50%	461.97	92.39	1385.91	175.50	9.75	616.10	1859.00	12.85	1009.2	1.66	-2.64	0.40	24.63
1.7	7%	0.50%	453.34	126.93	1360.01	175.50	9.75	616.10	1848.10	12.80	1005.3	1.67	-1.82	0.39	23.42
1.8	5%	0.50%	489.15	97.83	1467.44	185.83	10.32	652.34	1957.40	12.65	993.5	1.79	-0.65	0.30	19.79
1.9	5%	0.50%	516.32	103.26	1548.96	196.15	10.90	688.58	2065.20	12.85	1009.2	1.85	-2.50	0.25	17.14