

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

Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados

Bruno dos Santos Teixeira

Porto Alegre
2014

BRUNO DOS SANTOS TEIXEIRA

**RESISTÊNCIA DE SOLOS MOLES ORGÂNICOS
ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS**

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia. Orientação Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli.

Porto Alegre

2014

BRUNO DOS SANTOS TEIXEIRA

**RESISTÊNCIA DE SOLOS MOLES ORGÂNICOS
ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS**

Esta Tese de Doutorado foi Julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de Junho de 2014

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

Prof. Armando Miguel Awruch
Dr. COPPE-UFRJ
Coordenador do PPGEC-UFRGS.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Thomé (UPF)
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Michéle Dal Toé Casagrande (PUC-RIO)
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

*Dedico este trabalho a minha família que sempre está
presente.*

AGRADECIMENTOS

Neste momento importante da tese, após longo trabalho experimental e extensa pesquisa bibliográfica, é necessário reconhecer como foi fundamental o trabalho em conjunto. Quantas pessoas e entidades envolvidas direta e indiretamente na pesquisa, coordenaram ações na busca de aperfeiçoamento científico, cabe a mim a tarefa de agradecer a todos como conhecimento do trabalho e do incentivo demonstrados:

Aos meus pais, Gilmar e Luciméri, e as irmãs, Ivi, Sara e Isabela pelo apoio e incentivo demonstrados ao longo da pesquisa.

A minha mulher Camila pela compreensão, paciência e incentivo a pesquisa.

Ao Professor Dr. Nilo Cesar Consoli pela orientação neste trabalho, e principalmente pela passagem do seu valioso conhecimento e tempo despendido em nossa pesquisa. Espero ter correspondido à altura com meu trabalho a tarefa a mim designada.

Aos colegas de doutorado, em especial ao amigo Daniel Winter pelo seu companheirismo e amizade.

Ao funcionário do Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais João.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos órgãos de fomento (CAPES e CNPq), pelo auxílio financeiro durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realização deste curso.

RESUMO

Teixeira, B. S. **Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados**. 2014. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A estabilização de solos é uma técnica através da qual se busca a melhoria das características de comportamento do solo, especialmente em termos de resistência, deformabilidade, durabilidade e permeabilidade (Ingles & Metcalf, 1972). A ágil e rápida determinação do ganho de resistência de solos artificialmente cimentados ainda não é precisa, e necessita de grande aprimoramento. Com esse objetivo se desenvolveu um equipamento para previsão da resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados que oferece rapidez nos ensaios e precisão nos resultados. O equipamento basicamente funciona com a cravação de uma haste com base circular alargada adaptada em um anel dinamométrico de nylon que penetra no solo e cujos resultados têm relação linear com a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples independente do tipo de solo, adição de agente cimentante, tipo de agente cimentante, teor de umidade da mistura e tempo de cura. Neste estudo também são mostrados resultados do melhoramento de solo com diferentes teores de cimento e cal, bem como os efeitos dos teores de turfa e resíduo de folhas de eucalipto moídas. Além disso, são avaliados os efeitos do pH baixo através da acidificação das amostras com ácido clorídrico e sulfúrico. O teor de umidade do solo apresenta grande influência nos resultados, pois quanto maior a umidade menor a resistência ou maior o consumo de cimento. A adição de ácido húmico em teores de 0,5%, 2,1% e 4,0% apresentou redução de resistência à compressão simples. As misturas com resíduo de folha de eucalipto moídas e turfa apresentaram redução de resistência e também retardo na atuação dos agentes cimentantes. As misturas com adições de cimento atingiram de uma forma geral resultados superiores comparados com adições de cal virgem. No entanto a combinação de cimento e cal virgem apresentou ótimo desempenho até mesmo superior às misturas com adição de cimento.

Palavras-chave: *Cravação, solo mole, matéria orgânica, turfa e cimentação artificial.*

ABSTRACT

Teixeira, B. S. **Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados**. 2014. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Soil stabilization is a technique which seeks to improve the performance characteristics of the soil, especially in terms of strength, deformability, durability and permeability (Ingles & Metcalf, 1972). The agile and rapid determination of the resistance gain of artificially cemented soils is still not accurate and needs major improvement. The main objective of present research was the development and testing, as well as the correlation with standard equipments results, of an apparatus for predicting the resistance of artificially cemented organic soft soils in a fast and accurate testing procedure. The equipment developed in present research basically works with the penetration of a rod with a circular base (adapted in the tip of a dynamometer ring made of nylon) into cement treated soft soils whose results have linear relationship with the tensile strength and compression strength regardless of soil type, addition of cementing agent, type of cementing agent, moisture content of the mixture and curing time. In this study are also shown results of soil improvement due to insertion of different amounts of cement and/or lime, and the effects of the amounts of peat and crushed eucalyptus leaves into soil strength. Furthermore, the effects are evaluated from low pH by acidifying the sample with specific acids. The moisture content of the soil has a major influence on the results, the higher the humidity the lower resistance or higher cement consumption. The addition of humic acid at levels of 0.5%, 2.1% and 4.0% showed a reduction of the compressive strength. Mixtures with waste ground eucalyptus leaf and peat showed a delayed action on cementing agents. Some combinations of cements (cement, lime and ash) showed excellent performance. Combinations of cements generally obtained higher results compared to lime addition. However combinations of cement and lime came up with results better than mixtures with only cement.

Keywords: *Penetration, soft soil, organic matter, peat and artificial cementation.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS	19
CAPÍTULO 1	20
1. INTRODUÇÃO	20
1.1. RELEVÂNCIA DA PESQUISA	20
1.2. OBJETIVOS	21
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	22
CAPÍTULO 2	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. MATÉRIA ORGÂNICA	23
2.1.1. Decomposição da matéria orgânica.....	23
2.1.2. Substâncias húmicas.....	24
2.1.3. Estrutura substâncias húmicas.....	25
2.1.4. Ácido húmico	29
2.1.5. Extração substâncias húmicas	30
2.1.6. Espectroscopia de infravermelho (IR).....	31
2.1.7. Efeitos dos componentes orgânicos no solo.....	34
2.1.8. Ácido tânico	39
2.2. MISTURAS SOLO-AGENTE CIMENTANTE	40
2.2.1. EFEITO MISTURA SOLO-CAL-MATÉRIA ORGÂNICA.....	41
2.2.2. Eficácia da mistura solo-cimento	46
2.2.3. Cal	48

2.3.	ARGILAS	50
2.4.	BENTONITA.....	51
2.5.	TURFA	52
2.6.	DEFINIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO MATÉRIA ORGÂNICA	53
2.6.1.	Determinação grau de humificação.....	55
2.6.1.1.	Classificação de Von Post	57
2.6.1.2.	Classificação de Radforth.....	59
	Método de determinação de carbono orgânico.....	61
2.6.2.	61
2.7.	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	62
2.8.	ADENSAMENTO E COMPRESSIBILIDADE	64
2.9.	COEFICIENTE DE TENSÃO LATERAL	67
2.10.	CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO	67
2.11.	CIMENTO.....	68
2.11.1.	Composição cimento Portland.....	69
2.11.2.	Hidratação cimento Portland	71
2.11.3.	Substâncias químicas modificadoras de pega.....	76
2.12.	RESÍDUOS POZOLÂNICOS	78
2.13.	CINZA DA CASCA DE ARROZ.....	79
2.14.	CINZA VOLANTE.....	80
CAPÍTULO 3	82
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	82
3.2.	ENSAIOS DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA CIRCULAR.....	82
3.3.	PREPARAÇÃO DOS MOLDES, MOLDAGEM, CURA E MISTURAS	85
3.3.1.	Ensaio de compressão não-confinada.....	91
3.3.2.	Solo cimento-silte.....	92

3.3.3.	Solo-cimento/cal, turfa/resíduo de folha de eucalipto moída.....	92
3.3.4.	Ácido Clorídrico.....	93
	Mistura solo-ácido sulfúrico	93
3.3.5.	93
3.3.6.	Ácido húmico	94
3.3.7.	Turfa líquida.....	95
CAPÍTULO 4		96
4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS		96
4.1.	INTRODUÇÃO	96
4.2.	MÉTODOS	96
4.2.1.	Análise elementar CHNS	96
4.2.2.	Fracionamento químico e quantificação do ácido húmico.....	98
4.2.3.	Moagem.....	99
4.3.	MATERIAIS	100
4.3.1.	Silte.....	100
4.3.2.	Caulim	102
4.3.2.1.	Caracterização básica	102
4.3.3.	Bentonita	103
4.3.4.	Folhas de eucalipto.....	104
4.3.5.	Cimento	105
4.3.6.	Cal hidratada	107
4.3.7.	Cal virgem	107
4.3.8.	Turfa.....	108
4.3.9.	Ácido húmico	113
CAPÍTULO 5		115
5. RESULTADOS		115
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	115

5.2.	SOLO SILTOSO, CIMENTO E CAL.....	115
5.3.	ENSAIOS DE CRAVAÇÃO.....	123
5.4.	MISTURA CAULIM, BENTONITA E CAL.....	130
5.5.	SOLO CAULIM, BENTONITA, TURFA E CIMENTO.....	131
5.6.	ÁCIDO CLORÍDRICO.....	134
5.7.	TURFA LÍQUIDA.....	136
5.8.	ÁCIDO HÚMICO.....	136
5.9.	SOLO-CIMENTO-FOLHAS DE EUCALIPTO MOÍDA.....	137
5.10.	ÁCIDO SULFÚRICO.....	140
CAPÍTULO 6.....		142
6.	CONCLUSÕES.....	142
6.1.	EQUIPAMENTO PARA PREVISÃO DE CARGA.....	142
6.2.	SOLO-CIMENTO.....	142
6.3.	CAL.....	142
6.4.	ÁCIDO CLORÍDRICO.....	143
6.5.	FOLHA DE EUCALIPTO.....	144
6.6.	ÁCIDO HÚMICO.....	144
6.7.	ÁCIDO SULFÚRICO.....	145
6.8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
6.9.	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		147
ANEXO A - ENSAIOS DA MISTURA CAULIM-BENTONITA CIMENTO, TEMPO DE CURA DE 7, 28 E 90 DIAS, $\omega=100\%$, TEOR DE CIMENTO DE 10%, 30% E 50%, pH=6,5.....		161
ANEXO B - ENSAIOS DE pH DOS MATERIAIS.....		163
ANEXO C - PREPARO SOLUÇÕES.....		164
ANEXO D - FOTOS DO MODO DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES, $\omega=100\%$, $\omega=135\%$ E		

$\omega=170\%$. TEOR DE CIMENTO/CAL DE 30%, 50%, 70% E 100%, AOS 7, 14, E 28 DIAS DE CURA.	166
ANEXO E - DETALHAMENTO EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE CRAVAÇÃO	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Ilustração da classificação e propriedades das substâncias húmicas (adaptado de Stevenson, 1985)	25
Figura 2-2: Representação de uma possível estrutura-tipo para as substâncias húmicas, (adaptado de Schnitzer, 1978)	26
Figura 2-3: Modelo proposto para a estrutura do ácido húmico por Schulten e Schnitzer (1993)	26
Figura 2-4. Estrutura com os componentes de uma substância húmica, (fonte Dick et al. 2009)	28
Figura 2-5: Interação das partículas de argila e moléculas orgânicas, (adaptado de Koskinen; Harper 1990).....	29
Figura 2-6: Efeito do teor de ácido húmico na resistência a compressão simples, (Yumus et al., 2011).....	35
Figura 2-7: Efeito do teor de cal na resistência a compressão simples da argila aos 7 dias de cura, (Yumus et al., 2011)	35
Figura 2-8: Efeitos do tempo de cura na resistência a compressão simples em solos tratados com 5% de cal e adição de ácido húmico, (Yumus et al., 2011).....	36
Figura 2-9: Relação do pH do solo e teor de matéria orgânica, e relação da troca catiônica com o teor de matéria orgânica, (Gorham, 1957).....	38
Figura 2-10: Manômeros de taninos condensados, (fonte Santos, 2003).....	39
Figura 2-11: Estrutura dos taninos hidrolisáveis, (fonte Brumeton, 2001)	40
Figura 2-12: Mecanismo de troca de cátions, (adaptado de Prusinski & Bhattacharja, 1999).43	
Figura 2-13: Mecanismo de estabilização solo-cal (adaptado de Ingles & Metcalf, 1972)	43
Figura 2-14: Resistência à tração x porcentagem de cal viva para diferentes teores de umidade (fonte Winter, 2013)	45
Figura 2-15: Verificação da influência da temperatura de cura com a cal viva e teor de umidade de 125% e 150% aos 28 dias de cura (fonte Winter, 2013).....	45
Figura 2-16: Verificação da influência da temperatura de cura com a cal viva e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura (fonte Winter, 2013).....	45
Figura 2-17: Variação da compressão não confinada com teor de matéria orgânica (Franklin et al., 1973).....	64
Figura 2-18: Teor de umidade natural (W_o) e índice de compressão de turfas comparadas com argilas moles e siltes, (Mesri et al., 1997)	65

Figura 2-19: Variação do peso aparente seco máximo com teor de matéria orgânica, (Franklin et al., 1973).....	67
Figura 2-20: Efeito do tipo de secagem com umidade ótima, (Franklin et al., 1973).....	68
Figura 2-21: Comportamento mecânico dos compostos de cimento, (Petrucci, 1979).....	72
Figura 2-22: Hidratação dos componentes do clínquer ao longo do tempo em uma pasta de cimento com um fator água/cimento = 0,50, (Lothenbach, 2006)	74
Figura 2-23: Evolução do calor liberado versus tempo de hidratação, (Faria, 2004).....	75
Figura 3-1: Fotos dos anéis dinamométricos de nylon.....	84
Figura 3-2: Foto da vista lateral das ponteiros com base alargada	85
Figura 3-3: Foto da vista das bases das ponteiros com base alargada: 22,568mm, 15,958mm, 11,284mm e 7,979mm de diâmetro	85
Figura 3-4: Foto dos moldes com tubo de PVC	90
Figura 3-5: Efeito no pH devido adição de ácido sulfúrico.....	94
Figura 4-1: Desenho esquemático da análise elementar de CNHS	97
Figura 4-2: Desenho esquemático da leitura de massa adsorvida no ensaio de CNHS.....	97
Figura 4-3: Moinho de bolas	99
Figura 4-4: Localização da retirada da amostra (Winter, 2013).....	100
Figura 4-5: Curva granulométrica (Winter, 2013).....	101
Figura 4-6: Curva granulométrica caulim	103
Figura 4-7: Curva granulométrica da bentonita sódica	103
Figura 4-8: Análise granulométrica da folha de eucalipto moída	104
Figura 4-9: Espectro de FTIR do eucalipto	105
Figura 4-10: Análise granulométrica do cimento CP V – ARI	106
Figura 4-11: Localização da amostra retirada da turfa.....	108
Figura 4-12: Localização da amostra retirada da turfa.....	109
Figura 4-13: Análise granulométrica turfa decomposta	110
Figura 4-14: Espectro de FTIR da turfa.....	112
Figura 4-15: Espectro de FTIR do ácido húmico extraído da turfa.....	112
Figura 4-16: Resultado da análise do infravermelho do ácido húmico utilizado nos ensaios de compressão simples	113
Figura 5-1: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, com vários teores de cimento e $\omega=100\%$	116
Figura 5-2: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, com o teor de cimento e $\omega=135\%$	116

Figura 5-3: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%	117
Figura 5-4: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%	117
Figura 5-5: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%	118
Figura 5-6: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$ e 135%	119
Figura 5-7: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$, 135% , e 170%	119
Figura 5-8: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$	120
Figura 5-9: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$	120
Figura 5-10: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=135\%$	121
Figura 5-11: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$	122
Figura 5-12: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$	122
Figura 5-13: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 90 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$	123
Figura 5-14: Resistência à compressão simples (q_u) versus tensão de cravação (q_c) de todos os pontos combinados	124
Figura 5-15: Resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média	124
Figura 5-16: Comparação das umidades, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100% , 135% , 170% do silte	125
Figura 5-17: Comparação das quantidades de cimento por m^3 , resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100% , 120% , 135% , 170% do silte	126
Figura 5-18: Comparação dos tempos de cura, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100% , 135% , 170% do silte	126
Figura 5-19: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 100% , solo siltoso.....	127

Figura 5-20: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 135%, solo siltoso.....	127
Figura 5-21: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 170%, solo siltoso.....	128
Figura 5-22: Resistência a tração vs compressão simples.....	129
Figura 5-23: Resistência a tração vs tensão resistência à cravação.....	129
Figura 5-24: Resistência de ruptura à compressão não-confinada versus tempo de cura das misturas com cal.....	131
Figura 5-25: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	132
Figura 5-26: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 5%, teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	133
Figura 5-27: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	133
Figura 5-28: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 5% e 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	134
Figura 5-29: Comparação da curva com pH=3 e pH=6,5 da mistura com teor de 70% caulim, 30% bentonita, e teor de cimento ci=10%, ci=30% e ci=50%, $\omega=100\%$	135
Figura 5-30: pH versus material.....	135
Figura 5-31: Teor de ácido húmico versus resistência não-confinada MIST 86 a 88 (Tabela 3-5).....	136
Figura 5-32: Modelo de estrutura das carboxilas dissociadas.....	137
Figura 5-33: Comparação da curva de resistência à compressão aos 28 e 90 dias de solo com teor de RFEM de 5% E 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	138
Figura 5-34: Desenho ilustrativo da dissociação de íons do ácido tânico com $\text{pH} \leq 10$	139
Figura 5-35: Resistência de ruptura à compressão simples versus porcentagem de cimento	141
Figura A. 1: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 7 dias, $\text{pH}=6,5$ e $\omega=100\%$	161
Figura A. 2: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 28 dias, $\text{pH}=6,5$ e $\omega=100\%$	162
Figura A. 3: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 90 dias, $\text{pH}=6,5$ e $\omega=100\%$	162
Figura B. 1: pH versus material.....	163

Figura B. 2: Figura mostra o pH da mistura de caulim, bentonita e matéria orgânica com pequenas adições de cal..... 163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Solubilidade das soluções húmicas (Stevenson, 1982)	24
Tabela 2-2. Principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas, (Sparks, 1995 citado em Dick et al. 2009).....	27
Tabela 2-3: Principais bandas de absorção de IR de substâncias húmicas, fonte (Stevenson 1994).....	33
Tabela 2.4: Componentes orgânicos, (Tremblay et. al, 2002).....	36
Tabela 2-5: Avaliação de eficácia de aglomerantes na estabilização de diferentes solos (adaptado de Ahnberg et al., 1995).....	47
Tabela 2-6: Avaliação da eficácia de aglomerantes na estabilização de diferentes solos Nórdico tendo por base a resistência à compressão não confinada aos 28 dias de amostras laboratoriais (adaptado de EuroSoilStab, 2001).....	47
Tabela 2-7: Classificação do material entre fábriico, hêrmico e sáprico, (USDA, 1996).....	55
Tabela 2-8. Classificação do teor de umidade do solo (escala visual de Von Post adaptado de Hartlém; Wolski, 1996)	58
Tabela 2-9. Classificação da quantidade de raízes do solo (escala visual de Von Post adaptado Hartlém; Wolski, 1996)	58
Tabela 2-10. Classificação da turfa pelo grau de humificação (escala visual de Von Post)	58
Tabela 2-11. Classificação de restos de madeira do solo (escala visual de Von Post adaptado Hartlém; Wolski, 1996)	59
Tabela 2-12. Classificação da turfa (Radforth, 1969)	59
Tabela 2-13. Comparação de classificações de solos orgânicos (Andrejko et al., 1983).....	60
Tabela 2-14. Teores de umidade natural (W_o), condutividade hidráulica vertical inicial (K_{vo}), e $C\alpha/Cc$ para turfas, (Mesri et al., 1997)	66
Tabela 2-15. Valores de $C\alpha/Cc$ para diversos tipos de solos (Terzaghi et al, 1996).....	66
Tabela 3-1: Características do anel dinamométrico de nylon.....	83
Tabela 3-2: Equações de calibração dos anéis dinamométricos de nylon.....	83
Tabela 3-3: Área da base das ponteiros mostrando as tensões máximas e mínimas com anéis dinamométricos de nylon diferentes.....	84
Tabela 3-4: Variáveis utilizadas	86
Tabela 3-5: Lista de misturas	87
Tabela 4-1: Resultado análise elementar do solo, (Winter, 2013)	101
Tabela 4-2: Resultado quantificação ácido húmico do solo, (Winter, 2013)	101

Tabela 4-3: Propriedades físicas caulim.....	102
Tabela 4-4: Propriedades físicas da bentonita sódica.....	104
Tabela 4-5: Análise elementar do resíduo de folha de eucalipto.....	105
Tabela 4-6: Características físicas e mecânicas do cimento CP V – ARI (INTERCEMENT – GRUPO CAMARGO CORRÊA).....	106
Tabela 4-7: Propriedades físicas da cal hidratada	107
Tabela 4-8: Propriedades físicas da cal virgem.....	108
Tabela 4-9: Análise elementar da turfa decomposta	109
Tabela 4-10: Análise química da turfa decomposta	110
Tabela 4-11: Resultado quantificação ácido húmico da turfa	111
Tabela 4-12: Resultado porcentagem da substância húmica na turfa.....	111
Tabela 4-13: Resultado da quantificação ácido húmico proveniente da Leonardita.....	114
Tabela 4-14: Resultado da porcentagem da substância húmica na Leonardita.....	114
Tabela 4-15: Análise química da Leonardita.....	114
Tabela 5-1: Intensidades e índice de aromaticidade.....	139

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – fator água/cimento	ω – teor de umidade
Al – alumínio	Ti – titanium
Al ₂ O – óxido de alumínio	q _u – Resistência a compressão simples não-drenado
Ca ⁺² – íons cálcio	q _e – Resistencia a cravação
Ca (OH) ² – hidróxido de cálcio	q _t – Resistencia a tração por compressão diametral
C ₃ A – aluminato tricálcio	RFEM – Resíduo de folha de eucalipto moída
C ₃ S – silicato tricálcio	
CCA – cinza de casca de arroz	
CO ₂ – anidrido carbônico ou dióxido de carbono	
CaCO ₃ - carbonato de cálcio	
CaO – óxido de cálcio	
C ₃ A - ferro aluminato tricálcio	
CH - hidróxido de cálcio	
CP – Cimento Portland	
C-S-H – silicatos de cálcio hidratado	
Fe ²⁺ - íons ferro	
Fe ₂ O ₃ - óxido de ferro	
Fe - ferro	
H ⁺ - íons hidrogênio	
HCL – ácido clorídrico	
K ⁺ - íons potássio	
KOH – hidróxido de potássio	
K ₂ O – óxido de potássio	
K - potássio	
kN - kilonewton	
kPa - kilopascal	
Mg ²⁺ - íons magnésio	
MgO – óxido de magnésio	
Mg – magnésio	
Mn - manganês	
Na - sódio	
Na ⁺ - íons sódio	
NaCl – cloreto de sódio	
NaOH – hidróxido de sódio	
Na ₂ O – óxido de sódio	
OH ⁻ - íons hidroxila ou hidroxilia	
pH – potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico	
P ₂ O ₅ . óxido fosfórico	
PVC – policloreto de vinila	
pH – potencial hidrogênio	
q _u – resistência à compressão simples	
SiO ₂ – Dióxido de silício	
Ø - diâmetro	
µm – microns	

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A resistência do solo é um dos principais parâmetros para elaboração de projetos. Existem diversas variáveis que interferem na resistência dos solos: propriedades físico-químicas do solo (mineralogia, granulometria, teor de umidade, teor de matéria orgânica e pH), tipo de agente cimentante, presença de adições e relação água/cimento, composição química, densidade, índice de vazios. Para determinação da resistência é necessário ensaios de caracterização que em solos moles orgânicos artificialmente cimentados apresentam maior dificuldade devido às suas altas umidades, processo de amostragem e precisão nos resultados.

Atualmente não existe um equipamento prático e preciso de fácil manuseio para caracterização de resistência de solos moles orgânicos. A cada dia se torna mais necessário o aprimoramento de equipamentos e técnicas de caracterização dos materiais, pois diversas edificações e rodovias são construídas sobre solos moles orgânicos, uma vez que sua remoção se torna muita cara devido às exigências ambientais e aos longos prazos de retirada. Por estas razões muitas vezes se adota a solução de estabilização in loco com técnicas modernas de adição de agente cimentante, como a cal e o cimento.

A busca de aprimoramento das técnicas de estabilização é constante para que proporcionem e viabilizem seu uso em diversas situações encontradas. Dependendo dos objetivos pretendidos e da filosofia de concepção de uma dada obra de engenharia e tendo ainda em conta os diferentes estados de tensão a introduzir no terreno, a opção da técnica de melhoramento a adotar poderá variar muito em função das características do solo. As propriedades dos materiais encontrados podem diversificar-se muito dependendo do seu teor de umidade e matéria orgânica, concentração de componentes orgânicos, granulometria etc.

Uma das metodologias mais utilizadas para melhoramento de solos moles orgânicos é a adição de agente cimentante (Consoli et al. 2007). A avaliação do teor ótimo de adição é

realizada através de ensaios no laboratório, porém encontram-se diversos obstáculos, por exemplo, os moldes para realização do ensaio de compressão simples devem ser totalmente impermeáveis, pois se ocorrer perda de umidade ou material os resultados podem sofrer alterações.

Algumas pesquisas apontam que a as reações químicas entre os componentes orgânicos (ácido acético, ácido húmico, ácido tânico, sacarose e etilenodiaminotetracético) é um dos grandes fatores que podem influenciar significativamente nas propriedades do material, além do tipo de agente cimentante, tempo de cura, condições climáticas e umidade do solo, (Tremblay et. al, 2002; Yumus et al., 2011). Os componentes orgânicos apresentam características de retardo assim como diminuição da resistência de solos artificialmente cimentados que podem ser explicado devido a formação de uma película no entorno das partículas do cimento que impede sua hidratação parcial.

Considerando o citado acima, este trabalho busca contribuir para o aperfeiçoamento das técnicas de caracterização de solos, ensaios, metodologias de dosagens de solos moles orgânicos, podendo potencialmente utilizar de forma confiável e objetiva misturas de solo-cimento-cal e outros materiais de acordo com as propriedades requeridas.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver, testar e comprovar a acurácia de um equipamento específico para previsão de resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados com o qual se consiga de forma ágil e simplificada de obter parâmetros de resistência mínimos requeridos, bem como a simplificação dos processos de moldagem. A presente pesquisa tem com objetivos secundários:

- Aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de solos com matéria orgânica;
- Estudar o comportamento de solos orgânicos em condições controladas;
- Compreender os fatores dominantes que afetam a cimentação dos solos melhorados;
- Verificar o desempenho de misturas solo-agente cimentante;

- Identificar a quantidade ótima de agente cimentante misturado com solos que contém matéria orgânica;
- Identificar os efeitos do teor de umidade e ácido húmico em solos orgânicos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

O trabalho está organizado em seis capítulos, que são descritos a seguir:

1º CAPÍTULO - consiste na apresentação das considerações iniciais deste estudo e a forma com que a tese está organizada;

2º CAPÍTULO – exhibe uma breve revisão bibliográfica do comportamento da matéria orgânica, agentes cimentantes, misturas solo-cimento e solo-cal. É abordado o comportamento químico dos materiais individualmente e das misturas do solo com matéria orgânica. No mesmo capítulo mostra a eficácia das misturas de solo-cimento e resíduos pozolânicos.

3º CAPÍTULO – nesse capítulo é descrito o programa experimental com detalhes, métodos e técnicas adotadas na realização dos ensaios da pesquisa. Descrição do novo equipamento de previsão de resistência do solo.

4º CAPÍTULO – apresenta a caracterização das propriedades dos materiais utilizados na pesquisa.

5º CAPÍTULO – nessa seção do trabalho apresentado os resultados e sua análise através de figuras e tabelas.

6º CAPÍTULO – apresenta as conclusões obtidas da pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MATÉRIA ORGÂNICA

Solos moles orgânicos são considerados como um tipo de material com comportamento problemático. Solos que contém proporções de matéria orgânica estão sujeitos à instabilidade e elevado recalque a curto e longo prazo quando submetidos a carregamentos, (Bujang et al, 2005). As construções em materiais com matéria orgânica são normalmente sobre estacas, alternativamente o solo é substituído, mas mesmo assim o solo na sua volta pode apresentar recalques que afetam a estrutura. Nesse tipo de material, muitas vezes ocorre mudanças químicas e biológicas com o tempo, por exemplo, humificação dos constituintes orgânicos que altera as propriedades mecânicas como a compressibilidade, tensão de cisalhamento e condutividade hidráulica. O rebaixamento do nível do lençol freático causa recalque e oxidação da matéria orgânica, gerando humificação e conseqüentemente aumento da permeabilidade e compressibilidade.

2.1.1. Decomposição da matéria orgânica

Durante o processo de decomposição da matéria orgânica, diversos fatores influenciam nesse processo de retardo ou aceleração de sua velocidade. Os principais fatores são: umidade, pH, tipo de material, temperatura e oxigenação.

Segundo Rosa (2008), na condição de escassez de oxigênio, a decomposição da matéria orgânica se dá mais lentamente. Com o aumento da saturação do solo, as frações de ácido húmico tornam-se menos humificadas (frações de ácido húmicos tornam-se menos oxidadas).

Silva (2008) relata que devido à diminuição da temperatura e aumento da saturação do solo, baixou a taxa de decomposição dos resíduos pelos microorganismos em ensaios realizados com matéria orgânica.

Segundo as investigações de Christensen (1987) sobre frações organominerais usando incubação e CO₂ obtiveram-se resultados que demonstraram que a decomposição da matéria orgânica do solo segue a seguinte ordem: areia (maior 53µm) > argila (menor 2 µm) > silte (

1-20 μ m). Assim, a fração silte associada à matéria orgânica foi a que teve maior resistência ao ataque microbiano, sugerindo que o carbono na fração silte (1-20 μ m) é mais recalcitrante do que na fração argila (0-20 μ m).

2.1.2. Substâncias húmicas

A matéria orgânica do solo é constituída de 60% a 90% de substâncias húmicas e de 10 a 40% de substâncias inertes, denominadas huminas (Clasen et al, 1998).

As substâncias húmicas são classificadas principalmente em três frações ou grupos químicos baseados na sua solubilidade em meio ácido e meio alcalino: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas, (Tabela 2-1), (Stevenson, 1982).

Os ácidos fúlvicos são a fração das substâncias húmicas que são solúveis em meio alcalino e em meio ácido. Das três frações que compõem as substâncias húmicas, esta é aquela que possui o menor peso molecular, a coloração mais clara variando desde o amarelo-claro ao amarelo-castanho e é a mais susceptível ao ataque microbiano (Stevenson, 1994; Fassender, 1986).

Ácidos húmicos são solúveis em meio alcalino e insolúveis em meio ácido. Quando comparado com a fração anterior, a sua coloração varia desde marrom-escuro ao cinza-escuro (Stevenson, 1994; Fassbender, 1986).

As huminas são insolúveis em meio alcalino e em meio ácido. Quando comparada com as demais frações das substâncias húmicas, é aquela que apresenta maior peso molecular, coloração mais escura e alto teor de carbono resultante da alta condensação do material húmico (Stevenson, 1994; Fassebender, 1986; Stevenson 1985).

Tabela 2-1: Solubilidade das soluções húmicas (Stevenson, 1982)

FRAÇÕES DAS SUBSTÂNCIAS HÚMICAS	SOLUBILIDADE		
	ÁGUA	MEIO ALCALINO	MEIO ÁCIDO
ÁCIDO FÚLVICO	SOLÚVEL	SOLÚVEL	SOLÚVEL
ÁCIDO HÚMICO	INSOLÚVEL	SOLÚVEL	INSOLÚVEL
HUMINA	INSOLÚVEL	INSOLÚVEL	INSOLÚVEL

Os ácidos húmicos e os fúlvicos são muito semelhantes, diferenciam-se principalmente pela massa molecular e o conteúdo de grupos funcionais. As huminas são componentes que

consistem em ácidos húmicos intimamente ligados à fração mineral que não podem ser separados, por isso não estão representadas na Figura 2-1, que ilustra a classificação e propriedades das substâncias húmicas, (Stevenson, 1982). Na Tabela 2-1 é mostrada a solubilidade das soluções húmicas.

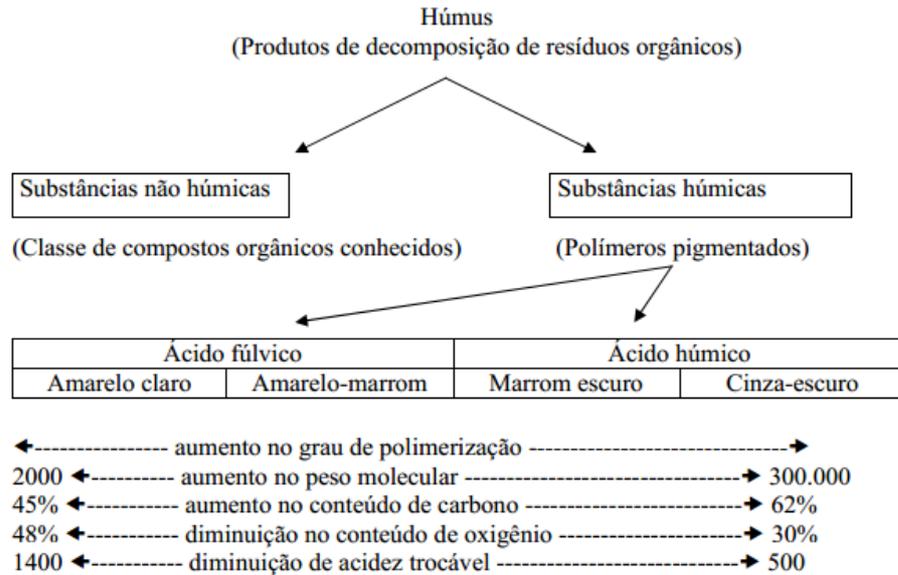


Figura 2-1: Ilustração da classificação e propriedades das substâncias húmicas (adaptado de Stevenson, 1985)

Os ácidos húmicos são os grandes responsáveis pela retenção e agregação de água no solo devido a sua característica de apresentar maior massa molar, maior conteúdo de carbono e menores quantidades de oxigênio em grupos funcionais fenólicos e carboxílicos. Os ácidos fúlvicos apresentam comportamento diferente, interferem mais nas propriedades químicas dos solos como, por exemplo, na formação de complexos de íons metálicos e aumento de capacidade de troca catiônica devido a sua menor massa molar, maior solubilidade, o qual fornece aos ácidos fúlvicos maior mobilidade, e maior conteúdo de grupos funcionais carboxílicos e fenólicos, (Stevenson, 1986).

2.1.3. Estrutura substâncias húmicas

De acordo com Senesi e Lofreddo (1999), a matéria orgânica é composta por cerca de 65% de substâncias húmicas, sendo o restante dividido entre carboidratos (10%), grupos contendo N (10%), e lipídeos (15%). Esses valores variam em função do tipo de solo e da adição de material orgânico.

Ao longo dos anos diversas pesquisas foram realizadas a fim de propor uma estrutura básica definitiva para as substâncias húmicas. Segundo Jenkinson (1998), atualmente pode-se dizer que existe substâncias de grupos OH que formam ligações de hidrogênio, ligações por amidas e, eventualmente, ligações C – C aromáticas, ligações alifáticas C – H, grupos carboxílicos ligados a carbono alifáticos ou aromáticos, podendo estes últimos estar esterificados com grupos OH de natureza fenólica (Schnitzer 1998), conforme a Figura 2-2:

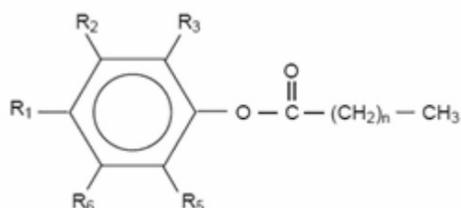


Figura 2-2: Representação de uma possível estrutura-tipo para as substâncias húmicas, (adaptado de Schnitzer, 1978)

Conforme Schulten e Schnitzer (1993), o ácido húmico é representado como uma macromolécula, onde os ácidos húmicos seriam compostos por longas cadeias alifáticas, grupos OH fenólicos ligados e livres, estruturas de quinona, nitrogênio e oxigênio como ponte de ligação dos grupos de COOH localizados em diferentes formas nas cadeias aromáticas, segue abaixo a ilustração:

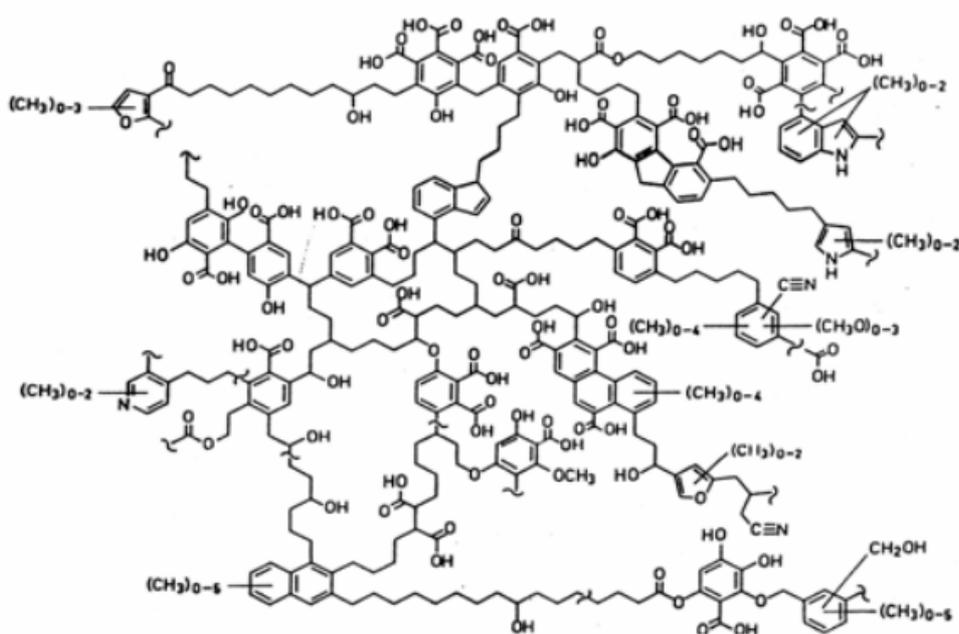


Figura 2-3: Modelo proposto para a estrutura do ácido húmico por Schulten e Schnitzer (1993)

Outros autores apresentam modelos de substâncias húmicas que seriam formadas por estruturas supermoleculares Piccolo (2001), Simpson et al. (2002a/2002b). Esses modelos basicamente sugerem que as substâncias húmicas em solução formam grandes agregados húmicos estabilizados por ligações fracas, tais como ligações de hidrogênio e/ou interações hidrofóbicas.

Os principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas estão descritos na Tabela 2-2.

Tabela 2-2. Principais grupos funcionais encontrados nas substâncias húmicas, (Sparks, 1995 citado em Dick et al. 2009)

Grupo Funcional	Fórmula Estrutural
Carboxila	R-COOH
Enol	R-CH=CH-OH
OH fenólica	Ar-OH
Quinona	Ar=O
OH-alcoólico	R-CH ₂ -OH
Éter	R-CH ₂ -O-CH ₂ -R
Cetona	R-C=O(-R)
Aldeído	R-CH=O
Éster	R-C=O(-OR)
Amina	R-CH ₂ -NH ₂
Amida	R-C=O(-NH-R)
Alquila	-CH=, -CH ₂ -, -CH ₃
O-alquila	R-CH ₂ -O-R

Segundo Dick (2009) os ácidos fúlvicos possuem menor quantidade de carbono em proporção que outras substâncias húmicas. Isso pode ser explicado devido a perda de oxigênio das cadeias carbônicas ao longo do tempo e além disso o ácido húmico e a humina levam 10 vezes mais tempo para serem formados do que o ácido fúlvicos.

As substâncias húmicas podem ser caracterizadas por não possuírem uma forma molecular definida, serem compostas pelos principais grupos funcionais do carbono e terem comportamento de uma macromolécula, (Dick, 2009). Além disso, elas são contituídas por uma vasta gama de substâncias diferentes. Elas são formadas por estruturas complexas conforme a Figura 2-4.

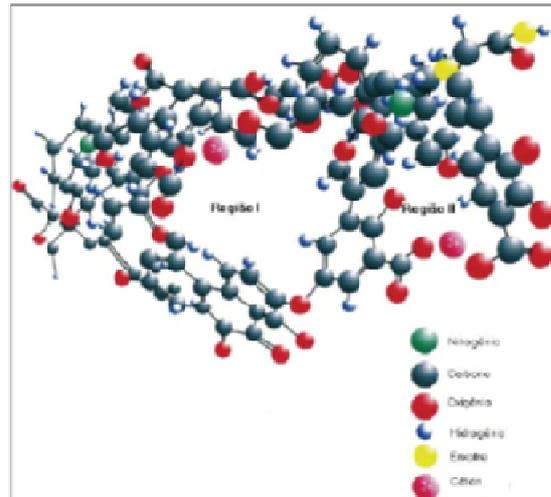


Figura 2-4. Estrutura com os componentes de uma substância húmica, (fonte Dick et al. 2009)

Segundo Chykiala (2008), existem regiões polarizadas nos espaços vazios entre as cadeias carbônicas, sendo o principal grupo funcional a carboxila a tornar estes espaços polarizados. A Figura 2-5 mostra um exemplo de cadeia carbônica com áreas polarizadas.

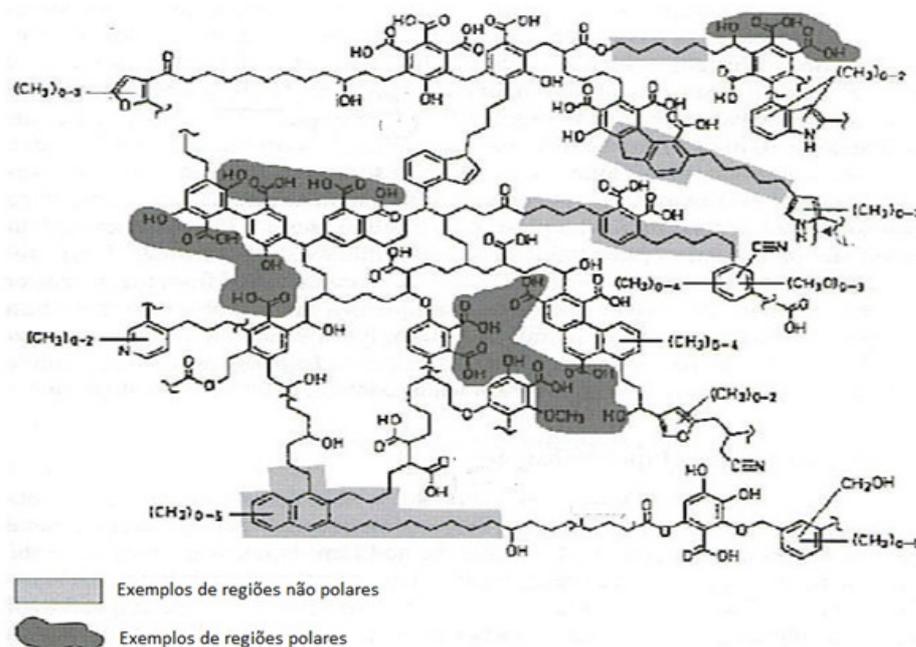


Figura 2-5. Áreas polarizadas em uma cadeia carbônica, (adaptado de Johnston, Tombacz, 2002)

A presença de cargas variáveis possibilita que as moléculas húmicas formem complexos químicos com metais que interagem com partículas minerais de solos para formar complexos organominerais conforme a Figura 2-5. O mecanismo que forma os complexos de

organominerais é devido às forças de van der Waals, ligações por pontes de cátion, pontes de oxi ou hidroxila e carboxila dos grupos de substâncias húmicas, Schnitzer (1986)

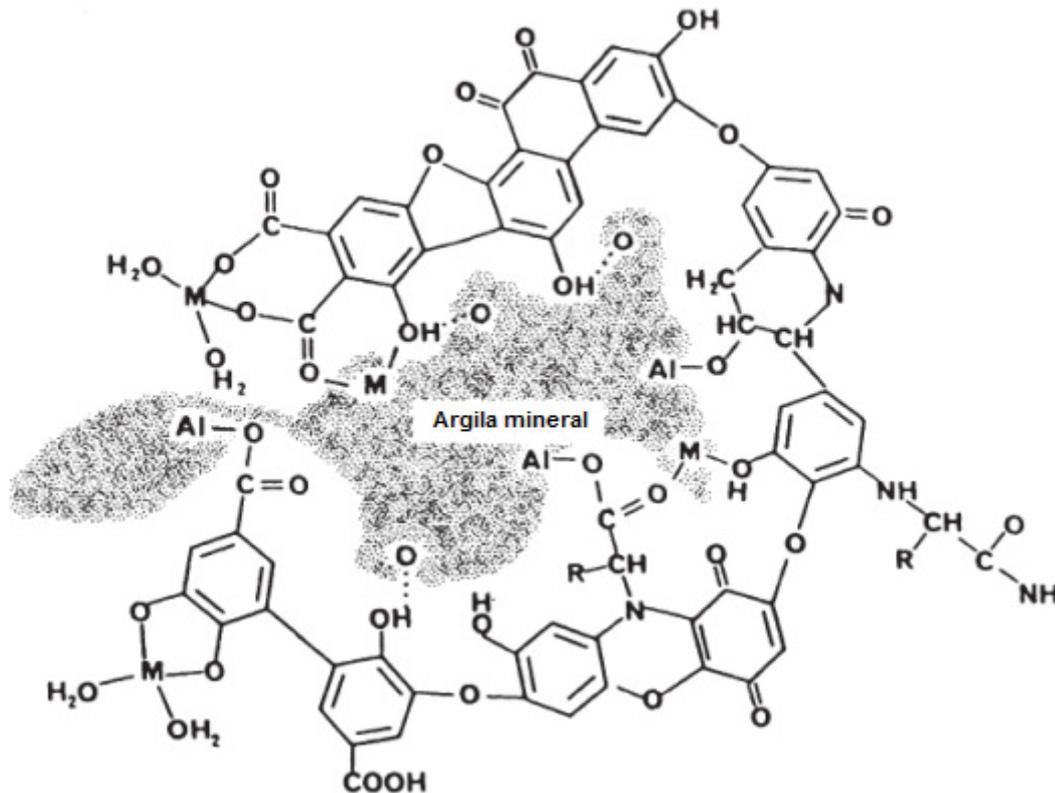


Figura 2-5: Interação das partículas de argila e moléculas orgânicas, (adaptado de Koskinen; Harper 1990)

2.1.4. Ácido húmico

Os ácidos húmicos são produtos intermediários deste ciclo de decomposição e originados pela ação da microvida existente no solo (oxidação biológica), sendo a sua formação um dos processos mais importante durante a formação da turfa (Stach, 1975).

Segundo Bujang et al (2005), quanto maior o teor de matéria orgânica e grau de humificação, menor serão os resultados positivos com cimento ou cal no melhoramento das propriedades mecânicas do solo.

A cal adicionada a solos orgânicos muitas vezes não oferece melhoramento pois sua cimentação é impedida pela matéria orgânica devido a não dissolução da sílica e alumina do solo que reage com a cal, (Thompson, 2004).

De acordo com Modmoltin (2004), não é somente o ácido húmico que interfere na perda de resistência de solos estabilizados com cal, a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pode modificar tanto

quanto. Os ensaios realizados por Modmoltin (2004), mostram que quanto menor a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, maior será a perda de resistência com o mesmo teor de ácido húmico no solo. O autor também descreve que o efeito do ácido húmico na resistência de solos estabilizados com cal está diretamente ligado à quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, baixando a quantidade de adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0,7g/l), e aumentando em 1% o teor de ácido húmico, reduz a resistência da argila “ariake” em aproximadamente 50%. Por outro lado o efeito do ácido húmico na resistência da argila estabilizada com cal, com a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (21g/l) é baixíssimo.

2.1.5. Extração substâncias húmicas

Dick et al (1998) cita em seu trabalho que existem diversos métodos que podem ser empregados para extração de substâncias húmicas dependendo do material a ser examinado, no entanto a técnica mais utilizada e eficiente consiste no tratamento com solução de NaOH 0,1 a 0,5 mol L⁻¹, sendo também recomendado pela IHSS – International Humic Substances Society. O método baseia-se em solubilização da matéria orgânica do solo em solução de hidróxido de sódio (NaOH) e seu fracionamento baseado nas características de solubilidade das substâncias húmicas. A extração alcalina é realizada em solução NaOH, que utiliza o princípio da solubilidade das substâncias húmicas. Adquirem-se os ácidos fúlvicos que estão em maior quantidade de agrupamentos funcionais oxigenados e são solúveis em meio ácido como básico e em qualquer pH. No entanto os ácidos húmicos se comportam de forma diferente, são insolúveis em meio fortemente ácido devido à protonação dos grupamentos funcionais que causa colapso da estrutura e precipitação das macromoléculas. A fração reativa é mais estável da matéria orgânica humificada e das huminas que representa a matéria orgânica ligada a fração mineral do solo, e por isso são insolúveis a qualquer valor de pH, (SAAB, 1999).

Para realização de certos tipos de análises como, por exemplo, espectroscopia de infravermelho o material extraído deve ser purificado, pois a solução alcalina dissolve a sílica da matéria mineral, sendo a sílica contaminada as frações orgânicas separadas da matéria original, produz artefatos que interferem na caracterização, (Stevenson, 1994).

A purificação dos ácidos húmicos e fúlvicos extraídos tem como objetivo diminuir o conteúdo de cinzas (material inorgânico) e a remoção das moléculas orgânicas de baixo peso molecular, que não são constituintes estruturais dessas frações das substâncias húmicas, (Santos &

Camargo, 1999). Segundo Stevenson (1994), as impurezas orgânicas são consideradas substâncias não húmicas coprecipitadas ou coadsorvidas como aminoácidos, carboidratos, gorduras, ceras, resinas, ácidos e outros.

2.1.6. Espectroscopia de infravermelho (IR)

Espectroscopia de infravermelho fornece evidências da presença de vários grupos funcionais na estrutura orgânica devida à interação das moléculas ou átomo. A técnica baseia-se no fato de que as ligações químicas das substâncias possuem frequência de vibração específica, as quais correspondem a níveis de energia da molécula. Se a molécula receber luz com exatamente a mesma energia de uma dessas vibrações, então a luz será absorvida desde que sejam atendidos a determinadas condições.

O espectro de IR de substâncias húmicas e seus derivados contém uma variedade de bandas que são características específicas da estrutura molecular, (Stevenson, 1994). A técnica agrega grande valor à pesquisa sobre húmus por determinar a natureza, reatividade e arranjos estruturais do oxigênio contido nos grupos funcionais; determinação de proteínas e carboidratos; presença ou ausência de impurezas inorgânicas (íons metálicos, argilas) em frações húmicas isoladas; e também por ser apropriada para análise quantitativa e estudo das interações entre a matéria orgânica-metal e matéria orgânica-pesticidas.

Na presença de pastilhas de cloreto alcalino e absorção da umidade na análise de substâncias húmicas podem ocorrer interferência produzindo bandas nas regiões de $3300-3000\text{ cm}^{-1}$ e $1720-1500\text{ cm}^{-1}$, segundo Stevenson (1994) podendo ser o maior problema para aplicação da espectroscopia de IR em substâncias húmicas.

As principais bandas de absorção dos ácidos húmicos e fúlvicos de típicos espectros de IR estão na região de:

- 3300 cm^{-1} (ligação -H de grupos OH),
- 2900 cm^{-1} (estiramento C-H alifático),
- 1720 cm^{-1} (estiramento C=O de COOH e de cetonas),
- 1610 cm^{-1} (C=C aromáticos e ligação -H de C=O) e,
- 1250 cm^{-1} (estiramento C-O e deformação OH de COOH).

Em adição pequenas bandas são frequentemente evidentes de 1500 cm^{-1} (C=C de aromáticos, 1460 cm^{-1} (deformação C-H de grupos CH_2 e CH_3) e 1390 cm^{-1} (deformação O-H, banda de CH_3 , ou estiramento C-O).

Os espectros dos ácidos húmicos e fúlvicos são muito parecidos, diferenciando-se principal pela intensidade da banda de 1720 cm^{-1} considerada forte nos ácidos fúlvicos devido à ocorrência de mais grupos COOH. Ao mesmo tempo a 1600 cm^{-1} existe uma banda de alta frequência (próxima de 1640 cm^{-1}).

De acordo com Stevenson (1994), as substâncias húmicas são classificadas em três tipos:

Tipo I: Espectro dessa categoria normalmente demonstram ser ácidos húmicos, bandas fortes que são próximos de 3400 , 2900 , 1720 , 1600 e 1200 cm^{-1} . A banda 1600 cm^{-1} tem intensidade equivalente à banda 1720 cm^{-1} .

Tipo II: Espectros dessa categoria normalmente são ácidos fúlvicos de baixo peso molecular, identificados pela absorção muito forte próxima a 1720 cm^{-1} . Outra característica é sua absorção na região do valor de 1600 cm^{-1} fraca e centrada próxima a 1640 cm^{-1} .

Tipo III: Para que se obtenha maior efectividade de absorção de bandas do Tipo I e II, bandas relativamente fortes são evidentes 1540 cm^{-1} . Absorção próxima de 2900 cm^{-1} (absorção C-H de alifático) é também mais pronunciada. Esse espectro é basicamente caracterizado devido à presença de bandas indicativas de proteínas e carboidratos.

Os espectros podem variar entre o Tipo I e II para substância húmicas de alguns solos. Assim para frequências de 1720 cm^{-1} as bandas são progressivas com aumento da intensidade da cor, indicando progressivo decréscimo do conteúdo COOH com aumento do peso molecular. Em bandas com frequência de $1660\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$, podem ocorrer mudanças sistemáticas nas intensidades e posições. Para ácidos húmicos de lagos encontram-se normalmente espectros do tipo III.

Está descrito na

Tabela 2-3 as principais bandas de IR de substâncias húmicas, conforme segue abaixo:

Tabela 2-3: Principais bandas de absorção de IR de substâncias húmicas, fonte (Stevenson 1994)

Frequência (cm ⁻¹)	Designação
3400-3300	Estiramento O-H, estiramento N-H
2940-2900	Estiramento C-H de alifático
1725-1720	Estiramento C=O de COOH e cetonas
1660-1630	Estiramento C=O de grupos amida (banda de amida I), C=O de quinona e/ou C=O de H ligado cetonas conjugadas
1620-1600	C=C de aromáticos
1590-1517	estiramento simétrico COO ⁻ , deformação N-H + estiramento C=N (banda de amida II)
1460-1450	C-H de alifático
1400-1390	deformação OH e C-O e estiramento OH de fenol, deformação C-H de grupos CH ₂ e CH ₃ , estiramento COO ⁻ assimétrico.
1280-1200	estiramento C-O e deformação OH de grupos COOH, estiramento C-O de aril esteres
1170-950	estiramento C-O de polissacarídeos ou do tipo polissacarídeos, Si-O de impurezas silicáticas

Segundo Stevenson (1994), a melhor classificação de ácidos húmicos baseados nas características do IR, foi desenvolvida por Kumada (1987), que essencialmente distribuiu os ácidos húmicos em quatro tipos distintos (A, B, R, e P) que considera intensidades relativas de bandas de absorções específicas. O tipo A é dividido em A1 e A2.

Tipo A: São ácidos húmicos com ligações C-H aromática forte com banda de estiramento próxima a 3075 cm⁻¹, e banda estiramento C-H alifático próximo a 2940 cm⁻¹ inferior a outros tipos. A intensidade da banda próxima a 2630 cm⁻¹ indica estiramento OH de COOH. Duas bandas de absorção agudas existentes próximas 1710 e 1615 cm⁻¹ são provenientes das vibrações de estiramento da ligação C=O e C=C respectivamente. Duas pequenas bandas ocorrem na região de 1470-1370 cm⁻¹ e banda forte e larga ocorre na região de 1280-1200 cm⁻¹.

Tipo B: A intensidade 3050 e 2630 cm^{-1} são bandas fracas, entretanto 2940 cm^{-1} é muito forte e aguda. Próximo da banda forte a 1615 cm^{-1} , uma marcante está presente a 1515 cm^{-1} . Quatro bandas moderadas agudas estão presentes a 1450, 1480, 1380 e 1330 cm^{-1} e bandas fortes na região de 1280-1205 cm^{-1} .

Tipo R: É parecido com o Tipo B, espectros destes ácidos húmicos diferem-se por uma banda fraca próxima a 2630 cm^{-1} e uma pequena que é encontrada próxima a 1540 cm^{-1} . Existem outras diferenças menores que podem ser encontradas.

Tipo P: É parecido com o Tipo A, as intensidades das bandas 3075, 2940 e 2630 cm^{-1} são relativamente fracas e a intensidade relativa da banda 1695 para a banda 1615 cm^{-1} é pequena. Outras diferenças são observadas a baixas frequências.

2.1.7. Efeitos dos componentes orgânicos no solo

Alguns autores apontam o ácido húmico como a principal substância que causa efeitos negativos. No caso de solos tratados com cal, os componentes orgânicos retardam e impedem o processo de hidratação através da formação de uma película no entorno das partículas de solo, além das substâncias orgânicas terem grande afinidade com o cálcio, quando em contato com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (Yumus et al., 2011).

Ensaio realizados por Yumus et al. (2011), mostram a relação entre a resistência à compressão simples e o teor de ácido húmico misturado com a argila. Com o teor de 3% de ácido húmico ocorreu uma perda de 44,6% de resistência comparado com a argila sem adição de ácido húmico. Segue a Figura 2-6 abaixo:

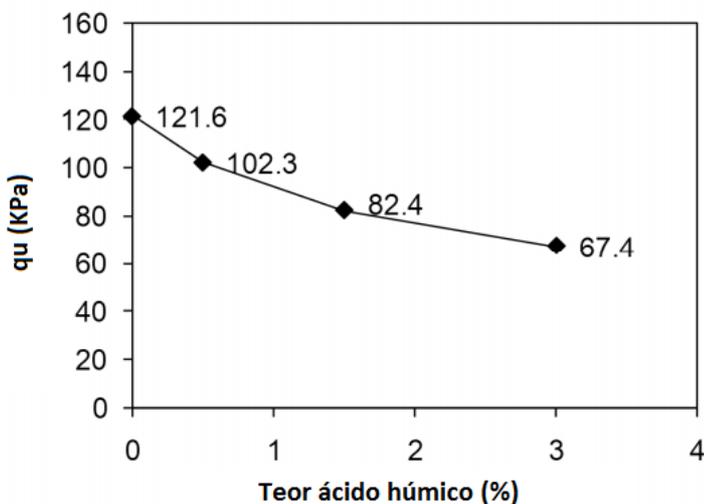


Figura 2-6: Efeito do teor de ácido húmico na resistência a compressão simples, (Yumus et al., 2011)

De acordo com os ensaios de Yumus et al. (2011), no caso de solos estabilizados com cal, existe um teor ótimo para adição de cal aos 7 dias de cura, independente da quantidade de ácido húmico que contém no solo. A Figura 2-7 abaixo mostra que todas as misturas aumentaram à resistência a compressão até o teor de 5% de cal e após começaram a diminuir sua resistência.

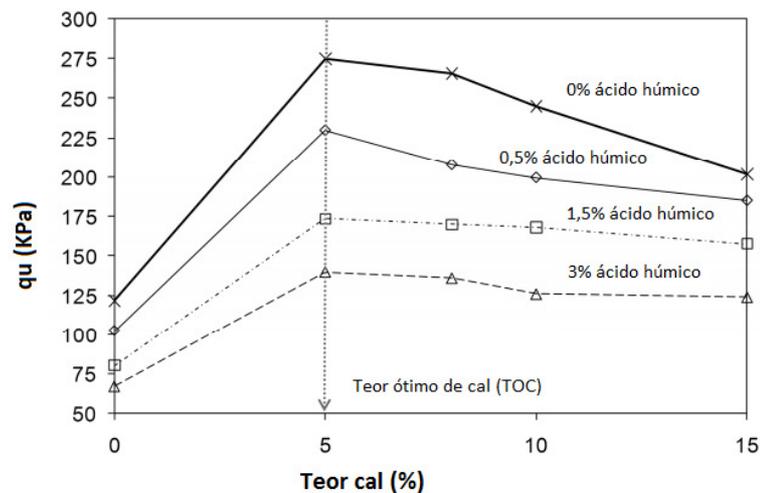


Figura 2-7: Efeito do teor de cal na resistência a compressão simples da argila aos 7 dias de cura, (Yumus et al., 2011)

Outro resultado importante obtido nos ensaios de Yumus et al. (2011), foi os efeitos no tempo de cura.

Com adição de ácido húmico, a resistência à compressão simples diminui com o tempo de cura, chegando a reduções de até 31,7% entre 7 e 90 dias para adição de 3% de ácido húmico. Segue abaixo a Figura 2-8:

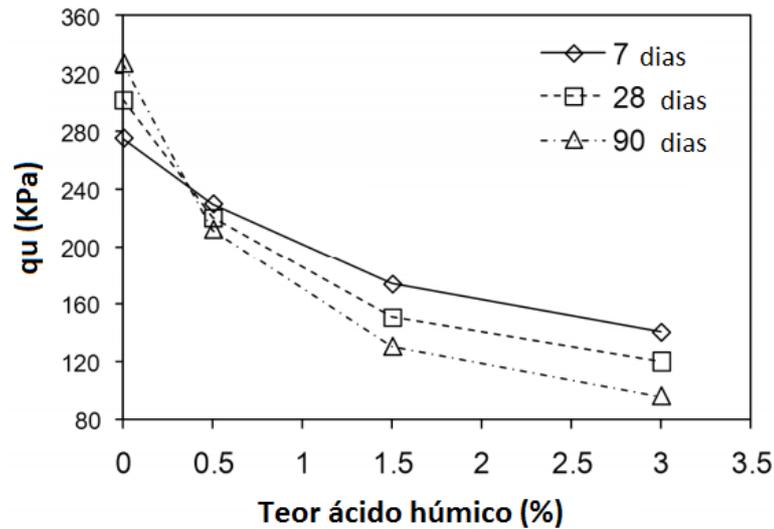


Figura 2-8: Efeitos do tempo de cura na resistência a compressão simples em solos tratados com 5% de cal e adição de ácido húmico, (Yumus et al., 2011)

Além do ácido húmico, outros componentes orgânicos influenciam nas propriedades físicas dos solos, (Tremblay et al. 2002). A matéria orgânica pode ser dividida em duas categorias: não-húmico e húmicos, (Morrill et al. 1982). A categoria não-húmica consiste em vegetal, animal ou micro-organismos que ainda estejam no solo, incluindo celulose, sacarose, amido, amino ácidos, proteínas, gordura, graxas, resinas e ácidos orgânicos. Durante o trabalho dos micro-organismos, esses componentes são transformados em polissacarídeos e carboidratos. A porção húmica é praticamente composta por alcanos, ácidos graxos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina.

Tremblay et al. 2002, realizou ensaios com dois tipos de solo: argila St-Alban (teor de matéria orgânica igual a 1%, limite de liquidez 44%, limite de plasticidade 18%, fração de argila 48% < 2 μm , fração de areia > 74 μm) e silte Trois-Rivières (teor de matéria orgânica menor que 1%, limite de liquidez 22%, limite de plasticidade 15%, fração de argila 20% < 2 μm , fração de areia > 34 μm). A capacidade de troca catiônica é baixa para ambos os solos; 8 e 4 mequiv./100g para argila St. Alban e silte Trois-Rivières. Foram misturados 13 componentes orgânicos nos solos descritos acima para verificar os efeitos nas misturas com cimento. Os componentes orgânicos foram misturados a uma concentração de 10% do peso seco e depois adicionado água até chegar à umidade de 95% para argila de St. Alban e 45% para o silte Trois-Rivières. O pH foi mantido em 12. Segue abaixo a Tabela 2.4 com os 13 componentes orgânicos adicionados a misturas:

Tabela 2.4: Componentes orgânicos, (Tremblay et. al, 2002)

Componentes orgânicos	Estado
Ácido	
Ácido acético	S
Ácido benzoico	S
Ácido húmico	S
Ácido tânico	S
Carboidratos e polícarboidratos	
Celulose	S
Amido	S
Sacarose	S
Óleo e hidrocarboneto	
Querosene	L
Óleo vegetal	L
Xileno tolueno	L
Outros	
Etilenodiaminotetracético	S
Etilenoglicol	L
Nitrobenzeno	L

L=líquido; S=solúvel

De acordo com os resultados do autor (Tremblay et. al, 2002), o principais efeitos negativos dos componentes orgânicos, ácido acético, ácido húmico, ácido tânico, sacarose e etilenodiaminotetracético é acidificação do pH da mistura, demonstrado pela concentração de Ca e SO₄ e a não presença de CSH ou formação de etringita.

O ácido benzoico também causa efeitos de acidificação na mistura, porém em proporções menores. Segundo Tremblay et. al (2002), o ácido benzoico basicamente atrasa as reações de hidratação do cimento. O ácido húmico adicionado na mistura parece que forma uma película em toda a volta das partículas e diminuiu a resistência a cisalhamento. O ácido tânico impede a ação do cimento, e a concentração de Ca é baixa, porém SO₄ é alta, o que significa que existe formação de etringita, conseqüentemente não ocorre ganho de resistência aos 28 dias.

O restante dos componentes orgânicos, fibras de celulose, etilenoglicol, nitrobenzeno, xileno, querosene e óleo vegetal não tiveram efeitos negativos significativos na resistência a cisalhamento.

O autor conclui que componentes ácidos impedem a água de chegar a pH alcalino e conseqüentemente não desenvolve cimentação dos solos tratados com teores até 10% de cimento comparados com mistura sem substâncias ácidas. As resistências á compressão das misturas são baixas, quando o pH $\leq 7,5$, a concentração de SO₄ é alta e o pH ácido consome sulfatos na solução para formar a etringita. Então conclui-se que para misturas com pH < 9,

não ocorre cimentação sendo necessário aumentar o teor de cimento para aumento do pH resistência a cisalhamento

Ácido tânico, também denominado de tanino, são substâncias orgânicas amareladas, solúveis em água, em contato com sais férricos apresentam coloração negras e verdes.

Taninos são compostos fenólicos que estão presentes na maioria das plantas. Existem estudos que apresentam teores entre 1% até 40,31% de ácido tânico nos eucaliptos, podendo variar de acordo com a espécie da árvore, época do ano, parte coletada, idade e local, (Andrade, 1961; Trugilho et. al., 2003; Simon et. al., 1999).

A absorção de água está ligada diretamente com a relação entre troca catiônica e pH, quanto maior a troca catiônica, maior absorção e maior aderência entre as partículas. Nesse contexto a turfa não é diferente das argilas, porém a magnitude de troca catiônica da turfa é muito diferente, (Gorham, 1957). A Figura 2-9 mostra a relação entre a troca catiônica e pH de solos orgânicos dos ensaios realizados na pesquisa de Gorham (1957). Nos solos com teores baixos de matéria orgânica, a troca catiônica é saturada por cátions metálicos (Ca, Mg, Na, K) dos minerais dos solos; conforme o teor de matéria orgânica aumenta a porcentagem de íons de hidrogênio aumenta. Em um determinado teor de matéria orgânica ($\pm 90\%$) a influência dos minerais do solo diminuem, as concentrações de cátions metálicos caem significativamente acompanhado com aumento da concentração de íons de hidrogênio.

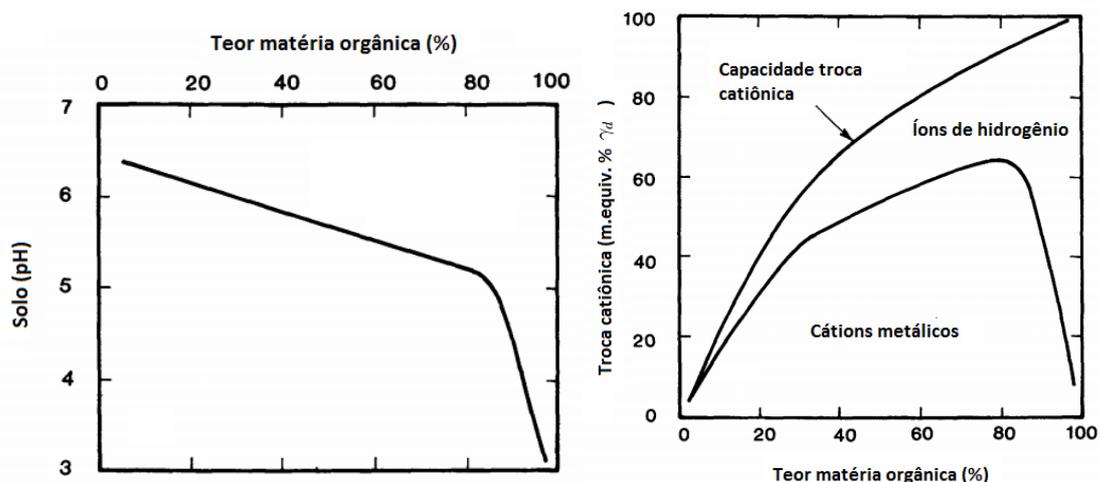


Figura 2-9: Relação do pH do solo e teor de matéria orgânica, e relação da troca catiônica com o teor de matéria orgânica, (Gorham, 1957)

2.1.8. Ácido tânico

O ácido tânico, também denominado de tanino é uma designação atribuída a várias substâncias orgânicas amareladas, solúveis em água e que com sais férricos, provocam colorações negras e verdes, (Santos, 2003). O termo ácido tânico é muito antigo (introduzido por M. Seguin em 1876), na qual peles de animais eram tratadas com a infusão de cascas de algumas árvores, (Revista Food Ingredients Brasil, nº 19 – 2011, pág. 3).

Os taninos são substâncias polifenólicas complexas, e são divididas em dois grupos: taninos hidrolisáveis e taninos condensados (Bruneton, 2001). Os taninos hidrolisáveis e condensados se distribuem no reino vegetal seguindo padrões significativamente diferentes. Os condensados ocorrem amplamente em gimnospermas e angiospermas, enquanto que os hidrolisáveis estão quase restritos a angiospermas dicotiledôneas (Santos 2003). Podem ocorrer na casca, folhas, frutos e galhos. Algumas espécies produzem somente galotaninos ou elagitaninos, enquanto outras apresentam misturas complexas contendo galotanino, elagitaninos e taninos condensados (Harvey, 2001).

Os taninos condensados são oligômeros e polímeros formados pela policondensação de duas ou mais unidades flavan-3-ol, tais como catequina ou epicatequina, respectivamente unidas por pares de ligações C4→C8 ou C4→C6, (Figura 2-10). Essas unidades podem ser esterificadas com ácido gálico originando 3-O-galatos. Esses taninos também são denominados proantocianidinas, devido à propriedade de produzirem pigmentos avermelhados da classe das antocianidinas, após degradação a quente com ácido mineral diluído (Martins, 1998).

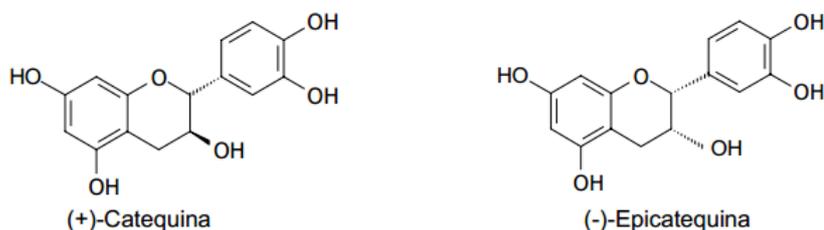


Figura 2-10: Manômeros de taninos condensados, (fonte Santos, 2003)

Os taninos hidrolisáveis são ésteres de um açúcar (central) e de ácidos fenólicos, principalmente ácidos gálico e elágico e seus derivados. Os galotaninos resultam da união entre unidades de ácido gálico e um polioli. Os elagitaninos possuem um ou dois resíduos de hexa-hidroxi-difenila-D-glicose (HHDP) unidos a um açúcar central (Figura 2-11). Pode

ocorrer a oxidação de HHDP a desidrohexadroxidifenoila (DHHDHP) que é característico dos desidroelagitaninos, (Costa, 1994; Brumeton, 2001).

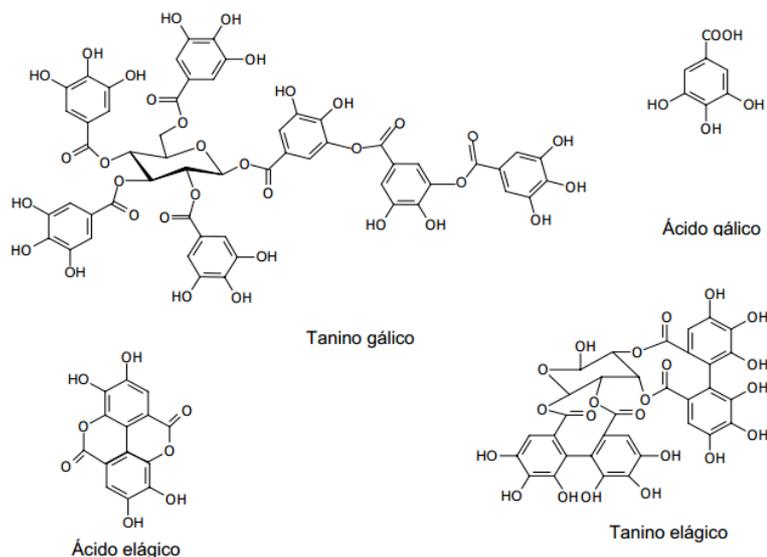


Figura 2-11: Estrutura dos taninos hidrolisáveis, (fonte Brumeton, 2001)

2.2. MISTURAS SOLO-AGENTE CIMENTANTE

Atualmente existem vários tipos de materiais cimentantes possíveis de utilização para melhoramento das propriedades mecânicas do solo, sendo o mais comum o cimento Portland, a cal, a escória granulada de alto forno, a cinza volante, a pozolana natural, a sílica de fumo e o filler do calcário, entre outros.

A cal é um dos principais agentes cimentantes utilizados em obras de infra-estrutura e obras civis em geral. Seu primeiro uso foi em 1924 em rodovias, (Bell, 1996).

Lopes (2007) cita em seu trabalho exemplos recentes de uso: Aeroporto de Congonhas (São Paulo) – na área de hangares da Varig (10.000m²) foi construída uma base de solo-cal-agregado, teor de cal hidratado de 6%; rodovia Curitiba/Porto alegre (Paraná) – próximo ao km 10, com 10.000m de extensão, foi utilizado um solo siltoso com teor de cal entre 3% a 7%; rodovia Brasília/Fortaleza (Distrito Federal) – proximidades de Sobradinho, foram construídos dois trechos de 150 metros cada e bases com teor de cal de 1% e 3%; Avenida Sernambetida - Guanabara (Rio de Janeiro), trecho de 18km com base de 3% e 4% de cal; Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-337/RS) – dois trechos experimentais em solo argiloso com 4% de cal.

Nem sempre a cal tem efeito eficaz no melhoramento das propriedades mecânicas. Ingles E Metcalf (1972) relata que a cal tem pouco efeito em solos com altos teores de matéria orgânica, podendo ter efeitos mais positivos do que outros aglomerantes em solos argilosos. Segundo USACE (1994), solos com média a alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência a cisalhamento.

Os aglomerantes também podem ser misturados com outros tipos de materiais, como fibras de polipropileno. Consoli et al (2003) obteve sucesso com adição de 7% de cimento Portland e 0,5% de fibras de polipropileno em camada de 30 cm de areia. Na análise do comportamento de fundações superficiais apoiadas, observou-se excelentes resultados no aumento da coesão e módulo de elasticidade.

2.2.1. EFEITO MISTURA SOLO-CAL-MATÉRIA ORGÂNICA

A presença de matéria orgânica no tratamento de solo com cal influencia o normal e eficaz desenvolvimento da ação de cimentação.

O fenômeno é muito complexo e está fortemente condicionado pelo tipo de solo e pela natureza da matéria orgânica presente. Embora não esteja definida nenhuma regra que indique a porcentagem de matéria orgânica a partir da qual surgem problemas, pode dizer-se que conteúdos inferiores a 1% são inofensivos (Lovato, 2004).

Normalmente, são considerados três mecanismos básicos envolvidos na reação da matéria orgânica com solo estabilizado com cal:

- Reação de troca entre cátions orgânicos e os íons de cálcio da cal;
- Reação química entre a matéria orgânica ativa e os íons de cálcio;
- Efeito de “máscara” provocado pelos cátions orgânicos sobre as partículas de argila, impedindo a dissolução da sílica e alumina.

A matéria orgânica é constituída por partículas complexas que possuem uma elevada capacidade de troca de base. Assim, podem adsorver cátions de cálcio para satisfazer essa capacidade de troca, reduzindo a quantidade de cal disponível para o desenvolvimento de reações pozolânicas. No entanto, se esse fosse o único processo responsável pela perda de

reatividade do solo em relação à cal, aumentos na sua porcentagem poderiam compensar os íons Ca^{2+} utilizados nas reações com os cátions orgânicos. Investigações conduzidas por THOMPSON (1966) mostram que isso não se verifica. Assim, este considera que apenas o terceiro mecanismo é válido.

Segundo Winter (2013), A cal viva depende da existência da sílica e alumina em estado amorfa para que ocorram reações pozolânicas, ao contrario do cimento. A cal como o cimento, apresenta reações químicas, imediatas à mistura, curto prazo e longo prazo, (Thomé, 1994). As principais são:

- Floculação: ocorre em função da troca catiônica, aumento da capacidade de troca catiônica dependente do pH e aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros. Esses fatores aumentam e estabilizam as partículas argilosas.
- Carbonatação: Ocorre após a exposição da cal ao ar. A cal reage com o dióxido de carbono do ar atmosférico gerando cristais de CaCO_3 .
- Adsorção química das moléculas da cal: íons de cálcio são liberados na mistura.
- Reações pozolânicas: é o principal responsável por ganho de resistência das misturas solo/cal. Basicamente o cálcio da cal reage com a sílica e alumina do solo, conseqüentemente gera os silicatos e aluminatos hidratados de cálcio.

As reações entre a cal e um solo fino com presença de água podem distinguir-se entre inicial rápida que duram 2 horas e mais lenta que pode levar meses a anos. As reações químicas mais rápidas são devido à troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica e adsorção da cal. As reações químicas lentas são as pozolânicas e carbonatação, (Castro, 1995).

Segundo Prusinski & Bhattacharja (1999) as trocas catiônicas acontecem devido à neutralização da deficiência de cargas do argilo-mineral, cátions e moléculas que entram em contato com a água e se atraem rapidamente a superfície carregada negativamente. A ordem de adsorção dos cátions sugerida por Herrin & Mitchel (1961) são os cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência ($\text{Na}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++} < \text{Al}^{++}$). A Figura 2-12 ilustrativa mostra o mecanismo de troca de cátions:

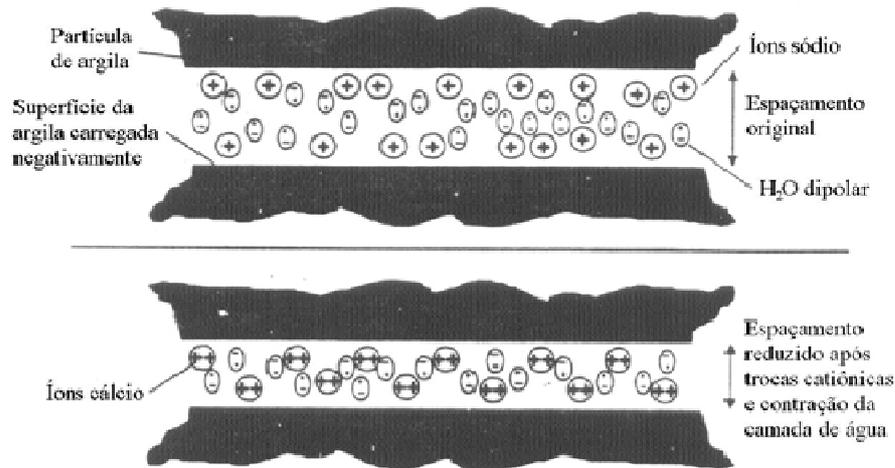


Figura 2-12: Mecanismo de troca de cátions, (adaptado de Prusinski & Bhattacharja, 1999)

O fenômeno do aumento contínuo de resistência mecânica do solo-cal é devido às reações entre as fontes de sílica, alumina, ferro, cal e água, que formam vários produtos cimentante, (Johann, 2013). Segundo Rogers & Glendinning (2000) o aumento do pH é por causa dos íons de hidroxila liberados pela cal para que a sílica e alumina se dissolvam no solo. O autor ainda cita que as reações formarão géis de silicato resultante da reação imediata que cobrem e ligam as partículas de argila bloqueando os vazios.

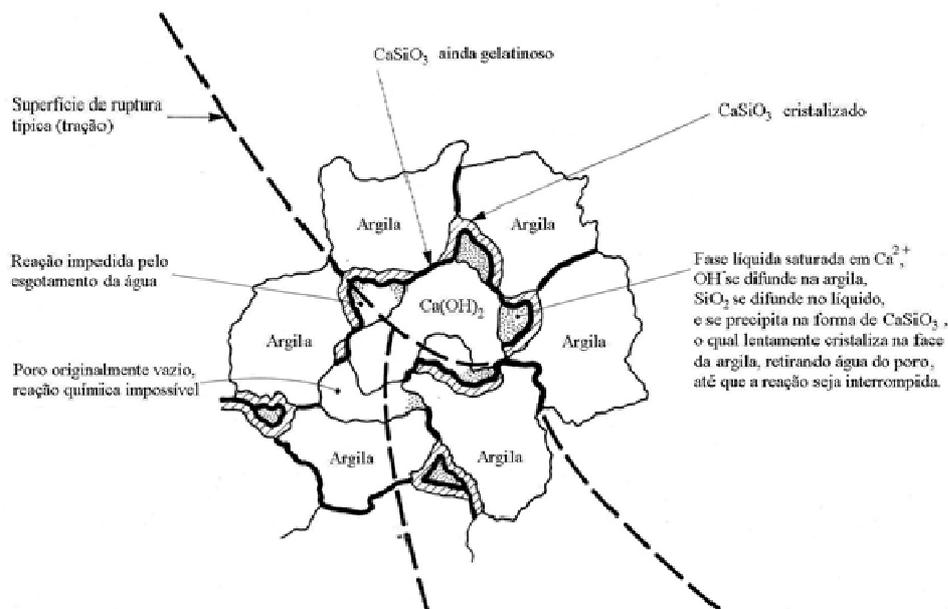


Figura 2-13: Mecanismo de estabilização solo-cal (adaptado de Ingles & Metcalf, 1972)

A Figura 2-13 ilustra a cristalização lenta dos géis e a sua transformação em silicatos hidratados de cálcio, e suas reações com a água que tem função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

Bergado et al. (1996) descreve as equações das reações químicas da cal misturada com solo. Segue abaixo as equações Equação 1.

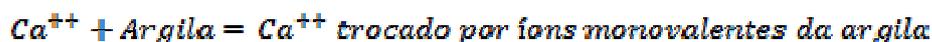
Equação 1: transformação da cal viva em cal hidratada e sua liberação de calor na hidratação.



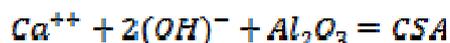
Equação 2: dissociação dos íons da cal.



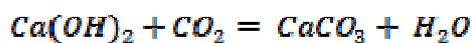
Equação 3: Trocas catiônicas da cal.



Equação 4: Reações pozolânicas.



Equação 5: Carbonatação da cal.



Na pesquisa de Winter (2013) apresentaram resultados de melhor desempenho das mistura com um teor ótimo de adição de cal de 20%. Nas misturas com solo orgênico foram utilizadas teores de cal viva acima de 20% (100 kg/m³), umidade entre 125% a 175% as resistência à tração aos 28 dias diminuiram. No entanto com o aumento da temperatura de cura de 20°C para 50°C o teor ótimo de cal viva é de 40% (200 kg/m³) e ocorre também o aumento significativo da resistência à tração. Os resultados são apresentados nas Figura 2-14, Figura 2-15 e Figura 2-16.

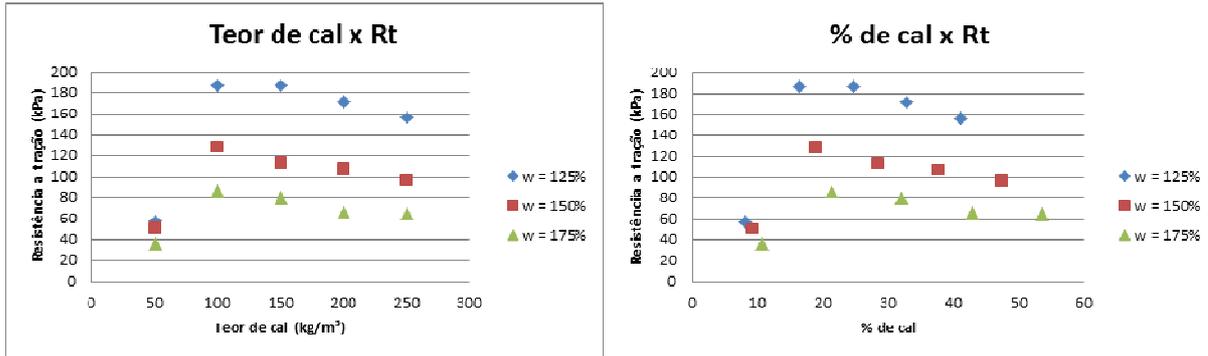


Figura 2-14: Resistência à tração x porcentagem de cal viva para diferentes teores de umidade (fonte Winter, 2013)

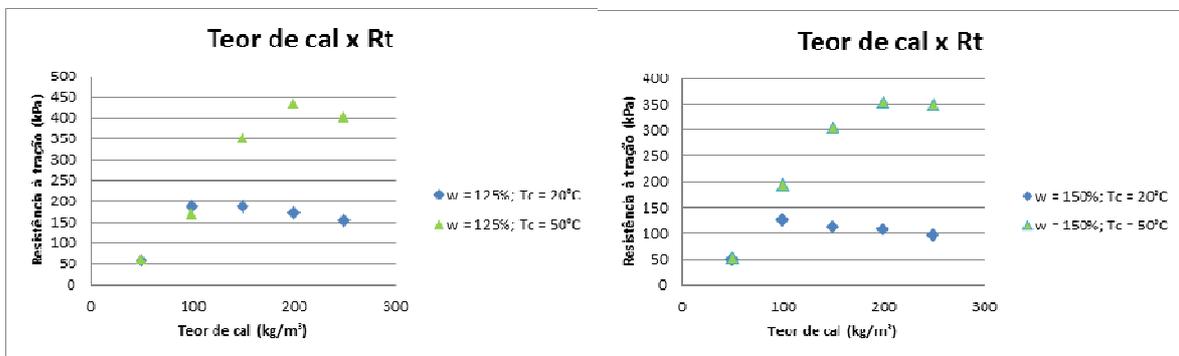


Figura 2-15: Verificação da influência da temperatura de cura com a cal viva e teor de umidade de 125% e 150% aos 28 dias de cura (fonte Winter, 2013)

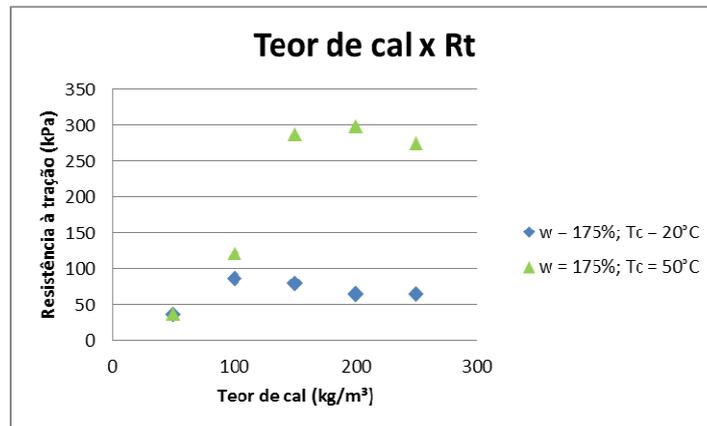


Figura 2-16: Verificação da influência da temperatura de cura com a cal viva e teor de umidade de 175% aos 28 dias de cura (fonte Winter, 2013)

Winter (2013) concluí que teor ótimo de cal viva é dependente de diversas variáveis, como mineralogia, pH do solo, tipo de cal, e principalmente teor de matéria orgânica, podendo em alguns casos o teor de cal viva para estabilização de um solo orgânico ser menor que o do cimento.

2.2.2. Eficácia da mistura solo-cimento

Segundo Janz & Johansson (2002), o cimento Portland é o grande responsável pelo ganho rápido de resistência mecânica. Cerca de 50% do cimento Portland reage até ao 3º dia, 60% até ao 7º dia, enquanto que as reações pozolânicas ocorrem mais lentamente e são grandes responsáveis pelo aumento de resistência em longo prazo.

No caso onde o solo possuir matéria orgânica, o desenvolvimento das reações descritas acima podem ser fortemente diferentes. A composição da matéria orgânica é fundamentalmente constituída por ácidos húmicos e humus, o qual eleva o teor de água de um solo, aumenta a porosidade e torna o solo mais ácido. A presença da matéria orgânica demonstra impactos negativos em termos de estabilização, ainda não compreendidos totalmente.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos por Edil & Staab (2005), Janz & Johansson (2002), e Axelsson et al (2002), sabe-se:

- Os ácidos húmicos reduzem o pH, fazendo com que nas reações pozolânicas o aumento de resistência aconteça em velocidade menor;
- Os ácidos húmicos e outros grupos de ácidos reagem com o hidróxido de cálcio, gerando produtos insolúveis que se precipitam na superfície das partículas, inibindo as reações pozolânicas e o aumento de resistência mecânica;
- A alteração da composição e estrutura do gel de silicatos de cálcio hidratados que se formam nas reações de hidratação e pozolânicas com redução de resistência mecânica pode ser devido à presença de matéria orgânica;
- Com aumento da porosidade, existe uma redução do número de partículas sólidas por unidade de volume, o que diminui o efeito estabilizador para igual quantidade de aglomerante.
- Devido à sua elevada capacidade de retenção de água, a presença de matéria orgânica pode limitar a quantidade de água disponível para as reações de hidratação e pozolânicas, retardando o ganho de resistência mecânica;

A partir de alguns resultados laboratoriais obtidos pelos autores Ahnberg et al. (1995), e Eurosoilstab (2001), é possível apresentar os quadros abaixo (Tabela 2-5 e Tabela 2-6) como referência à escolha do tipo de aglomerante a ser utilizado:

Tabela 2-5: Avaliação de eficácia de aglomerantes na estabilização de diferentes solos (adaptado de Ahnberg et al., 1995)

AGLOMERANTE	SOLO									
	SILTE ARGILOS	ARGILA SILTOSA	ARGILA	ARGILA SENSÍVEL	ARGILA SALINA	ARGILA SULFATO	ARGILA LODOSA	LODO ARGILOSO	LODO	TURFA
CAL (100%)	*	**	*	**	**	-	*	*	-	-
CIMENTO PORTLAND (75%) - CAL (25%)	**	**	**	**	**	**	**	*	*	*
CIMENTO PORTLAND (100%)	***	***	**	***	**	**	**	**	**	**
- sem ou pouca eficácia		* eficácia normal			** boa eficácia			*** muito boa eficácia		

Terashi et al. (1980), Uddin (1994), Horpibulsuk (2001) e Horpibulsuk et al. (2003) sugere-se que o valor mínimo de aglomerante a ser utilizados para solos argilosos seja de 50kg/m³. Quando na presença de solos orgânicos sobe-se para os 50-70kg/m³, (Babasaki et al, 1980; Axelsson et al., 2002).

Axelsson et al. (2002), testou diferentes tipos de aglomerantes no melhoramento de solos, e concluiu que a estabilização de lodos deve ser realizada com aplicação isolada de cimento Portland, enquanto que no caso de turfas, se deve recorrer à utilização de uma mistura de cimento Portland com escória granulada de alto forno. A quantidade total de ligante a adicionar no caso de lodos deverá ser entre 100-200kg/m³, e no caso de turfas entre 150-250kg/m³.

Tabela 2-6: Avaliação da eficácia de aglomerantes na estabilização de diferentes solos Nórdico tendo por base a resistência à compressão não confinada aos 28 dias de amostras laboratoriais (adaptado de EuroSoilStab, 2001)

AGLOMERANTE	SOLO			
	SILTE MO=0-2%	ARGILA MO=0-2%	SOLO ORGÂNICO MO=2-30%	TURFA MO=50-100%
CIMENTO	**	*	*	**
CIMENTO+GESSO	*	*	**	**
CIMENTO+ESCÓRIA	**	**	**	***
CAL+CIMENTO	**	**	*	-
CAL+GESSO	**	**	**	-
CAL+ESCÓRIA	*	*	*	-
CAL+GESSO+ESCÓRIA	**	**	**	-
CAL+GESSO+CIMENTO	**	**	**	-
CAL	-	**	-	-
- sem ou pouca eficácia		* eficácia normal	** boa eficácia	*** muito boa eficácia

Quando o silicato tricálcio (C₃S) é misturado com água ((Equação 2-6), são rapidamente liberados na solução íons de cálcio (Ca²⁺) e íons de hidróxido (OH⁻), originando em poucos minutos um aumento do pH para valores acima de 12. Quando a concentração deste íons

atinge determinado valor limite, formam-se cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na solução, e uma película de silicatos de cálcio hidratados (CSH) na superfície das partículas de C_3S .



O ácido húmico preto pode reagir com o cálcio e formar ácido húmico de cálcio insolúvel, (Bomaluwa & Palutnicowa, 1987). A combinação do ácido húmico com os íons de cálcio na hidratação atrapalham a cristalização do cálcio o qual é responsável pelo aumento da resistência do cimento. No entanto o ácido fúlvico na matéria orgânica tende a combinar com as partículas minerais contidas no alumínio, o qual induz a decomposição da camada cristalina. Basicamente a água solúvel contém ácido fúlvico, assim a hidratação do cimento com essa solução começa imediatamente quando em contato. A reação do ácido fúlvico e os minerais do cimento podem impedir o processo de hidratação do cimento e também o ácido fúlvico decompõe os cristais como o aluminato de cálcio hidratado. Assim é impedida a formação de cristais da estrutura do cimento, (Xun, 2000).

2.2.3. Cal

Na estabilização de solo-cal utiliza-se cal virgem ou hidratada, em pó ou na forma de leite de cal. Geralmente, a maioria dos tipos de cal utilizada na estabilização de solos tem, em comum o fato de possuírem um elevado teor de cálcio.

A cal aérea pode ser dividida em gorda e magra, consoante o teor de impurezas, e quanto ao teor de óxido de magnésio, em cal calcítica, cálcico-dolomítica e cal dolomítica. A cal aérea gorda deriva de calcários quase puros com teores de carbonatos não inferiores a 99% enquanto que a cal aérea magra deriva de calcários com teores de argila e outras impurezas compreendidos entre 1% e 5% (Coutinho, 1988).

Chamam-se gordas as primeiras devido as suas propriedades plásticas, pois se tratam de cais facilmente trabalháveis e bastante macias. As cais magras não tão fáceis de trabalhar nem tão macias, (Sampaio, 1978).

Uma vez que o cálcio e o magnésio surgem muitas vezes associandos, são frequentes na natureza calcários com porcentagens variáveis de dolomita. A calcinação desses calcários

pode dar origem a cal calcítica (%MgO < 2%), cálcico-dolomíticas (2 < %MgO < 20 (ou dolomíticas (20 < %MgO < 45).

Existem dois tipos de cal aérea – a cal virgem e a cal hidratada - e a diferença entre as duas reside da sua susceptibilidade à água.

Dá-se o nome de cal virgem (óxido de cálcio) ao produto obtido pela cozedura dos calcários e a expressão dessa reação é:



Esta reação verifica-se a cerca de 894°C, temperatura à qual a pressão de dióxido de carbono que sai do calcário (pressão de dissociação do carbono de cálcio) é um pouco superior à pressão atmosférica.

A cal hidratada tem origem na extinção por imersão ou aspensão com água da cal virgem. A reação de extinção é apresentada da seguinte forma:



A cada uma das classificações, cal virgem ou cal hidratada, surge associada a uma gama de diferentes quantidades de óxido de cálcio e hidróxido de cálcio, respectivamente, que correspondem a uma variedade de produtos com diferentes propriedades físico-químicas que os tornam mais ou menos aptos para uma determinada aplicação, (Coutinho, 1988).

O leite de cal é um produto obtido a partir da cal aérea, viva ou hidratado e consiste somente numa suspensão da cal, com teores compreendidos entre 30 e 150g/l.

A obtenção de leite de cal é à partir da cal virgem, esse processo requer quantidade de água muito superior àquela que é necessária para satisfazer a afinidade química da cal à reação de hidratação. As características do leite de cal dependem da composição química e grau de calcinação da cal virgem e da qualidade da água.

A obtenção do leite de cal por dissolução de cal hidratada é facilitada pelo fato desta já se encontrar na forma de pó e completamente extinta.

Quanto às cals hidráulicas, estas se obtêm por cozedura de calcário com porcentagens de argilas geralmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200°C e 1500°C. Para além da formação do óxido de cálcio, dá-se a combinação deste com a sílica e a alumina,

resultando na presença de silicatos e aluminatos que, quando hidratados, dão origem a produtos que endurecem tanto na água como no ar. Assim, a cal hidráulica pode ser considerada como um produto intermediário entre a cal aérea e o cimento (Coutinho, 1988).

Segundo Neves (2009), cal hidráulica pode classificar-se em função do teor em elementos argilosos e em carbonato de cálcio da rocha calcária. Assim, por ordem decrescente do teor em carbonato de cálcio da rocha calcinada, as cals classificam-se como fracamente hidráulicas ($90 < \%CaCO_3 < 95$), mediamente hidráulicas ($75 < \%CaCO_3 < 90$) ou fortemente hidráulicas ($40 < \%CaCO_3 < 75$).

2.3. ARGILAS

As argilas de uma forma geral apresentam partículas com dimensões entre 0,001mm a 0,005mm na forma de lâminas ou placas. Sua composição mineralógica favorece o desenvolvimento de reações químicas com a água presente no solo e com os sais nela dissolvidos. Analisando sua mineralogia, as partículas de argila são constituídas por minerais argilosos que são silicatos hidratados, em que podem participar cátions como Al^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , K^+ entre outros, (Matos Fernandes, 2002).

As partículas de argila podem ser descritas quimicamente, de uma forma muito simplificada que, devido ao arranjo da sua estrutura molecular, apresentam cargas elétricas negativas nas faces e também algumas cargas positivas nos bordos. Em termos globais as partículas de argila apresentam superfície eletricamente ativa (carregada negativamente). Para manter a neutralidade elétrica, as partículas de argila atraem íons do ambiente (cátions de sais dissolvidos na água, como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , etc.), bem como moléculas de água. Os íons e as moléculas de água mais próximas da superfície das partículas estão submetidas a tensões elevadíssimas, encontrando-se praticamente no estado sólido. Cada partícula pode atrair várias camadas de moléculas de água e íons até ficar eletricamente neutralizada, (Gomes, 1988; Costa 2006).

Contudo, as moléculas de água, íons adsorvidos não fazem parte da estrutura da argila, variando a sua presença ao redor da partícula da argila em função do tipo de mineral de argila, do teor em água do solo, do tipo de íons de sais dissolvidos na água do solo, do equilíbrio que se estabelece em cada ponto entre forças atrativas e repulsivas, (Matos Fernandes, 2002). Assim se o teor de água do solo for elevado, o equilíbrio entre as forças atrativas e repulsivas

estabelece distâncias consideráveis entre partículas, cada uma delas envolvida por uma espessa nuvem de água adsorvida, o solo terá baixa consistência, elevado índice de vazios e porosidade.

À capacidade de troca iônica, entende-se o processo pelo qual íons retidos na superfície de uma fase sólida são permutados com quantidades equivalentes de íons em solução numa fase líquida, ou pertencentes a outra fase sólida em contato com a primeira, (Gomes, 1988).

À retenção de íons sob a forma permutável explica-se essencialmente por adsorção eletrostática. Numa solução coloidal os íons de troca envolvem cada partícula coloidal até maior ou menor distância da superfície desta, chama-se camada dupla difusa ao conjunto formado pelas cargas da superfície da partícula coloidal e pelos íons de troca, cuja concentração diminui consoante a distância à superfície das partículas. Uma parte substancial da argila do solo e as substâncias húmicas propriamente ditas estão no estado coloidal. Os minerais de argila e os coloides húmicos são eletronegativos, mas em determinadas condições podem desenvolver certo número de cargas positivas, sendo sempre a carga efetiva destes coloides negativa, pois há predominância de cargas negativas. Muitos solos desenvolvem cargas de um e outro tipo, o que é evidenciado pela propriedade do complexo coloidal absorver cátions (carga +), para o que é necessária a existência de cargas negativas, e ânions (carga -), o que resulta de cargas positivas. De modo geral, quando o pH aumenta, aumentam as cargas negativas e diminuem as cargas positivas do complexo coloidal do solo, verificando-se o contrário quando o pH diminui.

2.4. BENTONITA

A bentonita é um material formado por argilo e minerais do grupo montmorilonita. O cátion adsorvido pode ser o sódio ou cálcio, sendo que a bentonita sódica é mais utilizada em aplicações de selagem e impermeabilização. A bentonita sódica tem um poder muito maior de expansão em relação à bentonita cálcica. Por outro lado, a bentonita cálcica é mais estável quimicamente quando exposta a certos compostos químicos. A qualidade de um bentonita pode ser avaliada através de medidas indiretas: através da avaliação dos Limites de Atterberg e de ensaios de expansão livre. Quanto maior o Limite de Plasticidade e o Limite de Liquidez, melhor a qualidade da bentonita. O Limite de Liquidez de uma bentonita cálcica situa-se entre 100 e 150%. Uma bentonita sódica de média qualidade tem Limite de Liquidez entre 300 e 500% e uma bentonita sódica de alta qualidade entre 500 e 700%. Os testes de expansão livre

mostram que quanto maior a capacidade de expansão da bentonita, melhor a sua qualidade (Heineck, 2001).

Existem diversas aplicações para as misturas de solo bentonita: funcionam como paredes semipermeáveis com o objetivo de conter o lençol freático contaminado ou redirecionar o lençol freático de áreas com solos contaminados; preenchimento de furos de estacas e buracos de muros de contenção para possibilitar sua execução, etc.

Segundo Azambuja (2004), quando o cimento e a lama bentonítica entram em contato, existe um rápido enrijecimento da mistura devido à floculação mútua dos materiais. Depois de alguns minutos de mistura, o compósito volta a seu estado fluido, isso porque ocorre a quebra da estrutura da bentonita no seu estado gel causado pela segregação das partículas de argila. O cimento é misturado à lama bentonítica até as partículas de cimento estarem completamente dispersas na lama bentonítica.

De acordo com Li et al. (1989), quanto maior for o fator água-cimento e menor for a porcentagem de bentonita, pode resultar em um período maior antes do início das reações da mistura cimento-bentonita.

2.5. TURFA

Turfa é um material fóssil, organo-mineral, originado da decomposição de restos vegetais, encontrado em áreas alagadiças como várzeas de rios, planícies costeiras e regiões lacustres, (Franchi & Lima, 2000).

Dependendo do seu grau de deterioração biológica, desintegração mecânica das fibras e presença de sedimentos, a turfa pode apresentar cor variando do amarelo ao marrom escuro.

O processo de decomposição da matéria orgânica ocorre em condições ambientais anóxicas, sendo responsável pela sua evolução fóssil o desaparecimento da estrutura vegetal, perda de oxigênio e enriquecimento relativo em carbono (IPT, 1979). Segundo Martinho & Kurth (1982), o ambiente saturado em água inibe a decomposição biológica ativa dos materiais da planta e promove retenção do carbono que normalmente seria liberado na forma de produtos gasosos provenientes da atividade biológica.

A transformação da matéria em turfa envolve transformações químicas e microbiológicas, podendo também ser denominada de carbonificação bioquímica, diferentemente da carbonificação geoquímica, que ocorre mais tarde e na qual os microrganismos não tomam parte. As maiores alterações ocorrem na superfície da turfa e imediatamente abaixo até uma profundidade de aproximadamente 0,5m. Nesta região ocorre atividade de bactérias aeróbicas, mas como as substâncias facilmente assimiladas desaparecem, a vida microbiana vai se reduzindo e finalmente se extingue, geralmente até uma profundidade menor que 10m, abaixo da qual ocorrem somente transformações químicas, primeiramente condensação, polimerização e reações de redução (Stach, 1975).

Fuchsman (1980) identifica quatro grupos constituintes básicos em turfás, classificáveis de acordo com o modo com que podem ser processadas quimicamente: betumes (ácidos graxos, ceras e esteróides), ácidos húmicos, carboidratos (celulose e proteínas) e ligninas.

Segundo Aguiar (1987) & Nucci (1985) uma turfa pouco decomposta é similar à matéria vegetal, enquanto a turfa fortemente decomposta se assemelha ao carvão jovem (linhito). A matéria orgânica pode variar consideravelmente em composição, desde a fórmula empírica $C_{1200}H_{813}O_{389}N_5S$ para a turfa pouco decomposta até $C_{293}H_{489}O_{20}N_{15}S$ para a turfa muito decomposta.

2.6. DEFINIÇÃO/CLASSIFICAÇÃO MATÉRIA ORGÂNICA

Primeiro passo para distinção de um solo é identificar sua “fração mineral” e “orgânica”. Define-se a parte mínima de matéria mineral e a parte mínima de matéria orgânica. Todos os solos contêm vestígios de matéria mineral e matéria orgânica em seus horizontes, porém a maioria é um ou outro. O horizonte que contém menos de 20 a 35 por cento de matéria orgânica do seu peso, suas propriedades são mais de matéria mineral do que orgânica.

I) Classificação brasileira (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA)

Conforme a classificação da EMBRAPA (1988) é definido material mineral todo aquele constituído por compostos inorgânicos, em estado mais ou menos intemperizado, podendo variavelmente ser maior a proporção de constituintes secundários, ou de constituintes inatos da própria rocha de origem. Quando em mistura com material orgânico, o conteúdo de

constituintes inorgânicos sobrepuja quantitativamente o que contenha de constituintes orgânicos, de modo que o material tenha:

- a) Menos que 12% de carbono orgânico (expresso em peso), se 60% ou mais da fração mineral for composto de argila;
- b) Menos que 8% de carbono orgânico, se a fração mineral não contém argila;
- c) Valores de carbono inferiores aos intermediários (entre 12% e 8%) proporcionais a teores intermediários de argila (até 60%), por exemplo: $C < 8 + 0,067 * \text{argila} (\%)$, tendo como base valores de determinação analítica conforme o SNLCS;

Segunda a classificação da EMBRAPA (1988) é definido material orgânico todo material que seguir os seguintes requisitos:

- a) 12% ou mais de carbono orgânico (expresso em peso), se a fração mineral contém 60% ou mais de argila;
- b) 8% ou mais de carbono orgânico, se a fração mineral não contém argila;
- c) Valores intermediários de carbono orgânico proporcional a teores intermediários de argila (até 60%), por exemplo: $C \geq 8 + 0,067 * \text{argila} (\%)$, tendo por base valores de determinação analítica conforme o SNLCS.

O material orgânico será identificado de acordo com seu conteúdo de carbono orgânico, considerando também os teores de argila presentes na fração mineral do solo.

II) Classificação NRCS (The natural resources conservation service – instituto de classificação dos Estados Unidos)

Segundo USDA (1996), a matéria mineral (menor que 2,0mm em diâmetro) é:

1. Saturada com água por tempo inferior a 30 dias em um ano e conter 20% de (peso) carbono orgânico; ou
2. Saturado com água por 30 dias ou mais acumulados em um ano (ou drenado artificialmente) e, excluindo raízes e teor de carbono orgânico (peso) de:
 - a) Menos de 18 por cento se a fração mineral contiver 60% ou mais de argila; ou
 - b) Menos de 12 por cento se a fração mineral não contiver argila; ou
 - c) Menos de 12 mais (porcentagem de argila multiplicada por 0,10) por cento se a fração mineral contiver menos de 60 por cento de argila.

Se o solo contém mais carbono do que o descrito acima para matéria mineral, é considerado material orgânico.

2.6.1. Determinação grau de humificação

De acordo com o grau de transformação do material vegetal originário, três tipos básicos de material orgânico de solo são identificados: fíbrico, hêrmico e sáprico. O teor de fibra vegetal é usado na caracterização desses materiais. Fibra vegetal (USDA, 1996) como fragmentos de tecido vegetal presentes no material orgânico de solo, excluindo raízes vivas, com as seguintes características:

- a) São capazes de serem retidos em peneira de malha 100 mesh (abertura de 0,15mm, em diâmetro), após dispersão do material em solução hexametáfosfato de sódio;
- b) Apresentam estrutura celular reconhecível da planta originária;
- c) Possuem largura ou diâmetro de 2,0cm ou menos (menor dimensão), ou estão decompostos de forma a serem amassados e desfiados com os dedos até atingirem o tamanho limite de 2,0cm.

Em solos onde o material vegetal passou por intensa transformação, o teor de fibra é reduzido ou ausente. As características dos principais tipos de material orgânico, quanto ao grau de transformação do material vegetal, são resumidas na Tabela 2-7:

Tabela 2-7: Classificação do material entre fíbrico, hêrmico e sáprico, (USDA, 1996)

CRITÉRIO	FÍBRICO	HÊRMICO	SÁPRICO
Grau de saturação	Pouco ou, nenhum, origem botânica	Intermediário, 2/3 do material reconhecível	Quase completa, origem botânica
Conteúdo de fibra (amassada) ¹	> 3/4 volume total	1/6 a 3/4 volume total	< 1/6 volume total
Densidade do solo (Mg m ⁻³ , úmido)	< 0,1 volume total	0,07 a 0,18	> 0,2
% água retida (solo saturado, g 100g ⁻¹)	850 a > 3000	450 a 850	< 450
Cor (munsell, material úmido)	bruno-amarelado-claro ou bruno-	bruno-aczentado-escuro ou bruno-	cinzento muito escuro a preto

¹ Excluindo fragmentos grosseiros (de tamanho superior a 2,0cm).

Fíbrico (fibra) representa o estágio de menor grau de transformação do material vegetal no solo. Estão presentes quantidades apreciáveis de fibras, bem preservadas e facilmente identificáveis quanto à origem botânica. O material de solo fíbrico é caracterizado pela reduzida densidade do solo e elevados teores de água retidos quando o solo está saturado.

Hêrmico (*hemi; metade*) representa o estágio intermediário de transformação do material vegetal do solo.

Sáprico (*Sapros; podre*) representa o estágio de maior grau de transformação, com menor quantidade de fibras. O material de solo sáprico é caracterizado pela densidade do solo relativamente superior à observada no material tipo fíbrico e pelos menores teores de água retidos quando o solo está saturado. Nesse estágio, é frequentemente a presença de constituintes minerais no solo, o que também contribui para o aumento da densidade do solo.

Descrições micromorfológica de material fíbrico indicam uma matriz fibrosa constituída essencialmente de tecido vegetal relativamente não decomposto, fragmentos de árvores, arbustos e gramíneas (ramos, folhas e raízes), resíduos de tecido vegetal e “sphagnum” e de partículas de material orgânico, tais como sementes e constituintes minerais (fitólitos, que são opala biogênica), facilmente identificáveis (Fox, 1985).

A microfábrica de material sáprico é constituída, principalmente, de fragmentos de material orgânico de cor escura, amorfos e não identificáveis quanto a sua origem botânica. É comum a presença de microagregados devido à ação da fauna do solo. Materiais hêrmicos apresentam em geral uma aparência fibrosa, entretanto a maioria do material orgânico está parcialmente decomposto. Fragmentos de material orgânico estão também presentes (Fox, 1985). Estimativas de quantidade de fibras são obtidas a partir de testes de campo, associados a técnicas simples de laboratório, para caracterizar o grau de decomposição do material orgânico (Lynn et al., 1974; USDA, 1996).

No campo a estimativa de fibra é obtida ao amassar uma pequena quantidade de material úmido entre os dedos, cerca de dez vezes, aplicando firme pressão. O material é então moldado em uma massa esférica, quebrando e examinando com uma lente de mão (dez vezes ou mais). Vários solos podem ser identificados por meio desse teste, mas, em casos de dúvida, o teste de solubilidade em pirofosfato de sódio pode ser também usado (USDA, 1996).

Kampf & Schneider (1989) caracterizam solos orgânicos no Rio Grande do Sul como os seguintes horizontes: Fíbrico (Ho), Hêrmicos (He) e Sápricos (Hd). Na sequência Ho, He, Hd, diminuem as proporções de matéria orgânica, de fibras e a umidade gravimétrica, e aumenta a densidade do solo. O teor de matéria orgânica variou de 23 a 97% (em peso), influenciando a densidade do solo (0,03 a 0,38 Mg m⁻³; $r = -0,087$, $n=76$). A umidade gravimétrica nos

horizontes orgânicos variou de 190 a 1490% (em peso), apresentando elevada correlação com a densidade do solo ($r=-0,918$; $n=76$) e o teor de fibras ($r=0,909$; $n=38$).

Kämpf & Schneider (1989) propuseram os seguintes critérios para a classificação de Solos Orgânicos:

- a) Quanto ao teor de matéria orgânica e densidade do solo em orto-orgânico (teor de matéria orgânica $\geq 65\%$ e densidade do solo $\leq 0,15 \text{ Mg m}^{-3}$) e para-orgânicos ($20 \leq \%$ matéria orgânica $< 65\%$ e $0,5 \geq$ densidade do solo $\geq 0,15 \text{ Mg m}^{-3}$);
- b) Segundo a espessura da cada orgânica, em rasos, pouco profundos e profundos;
- c) Conforme o grau de decomposição do material orgânico, em gléico, vértico, arênico, lítico ou litóide, e sua textura, em média, argilosa, muito argilosa. Segundo os autores, esses critérios expressam as principais qualidades da terra e conferem um caráter interpretativo à classificação dos Solos Orgânicos.

Os critérios morfológicos de classificação de material orgânico de solo e de húmus têm sido usados na comparação de intensidade de processos pedogenéticos e na taxonomia de solos, principalmente os solos orgânicos. Entretanto, são insuficientes para explicar a dinâmica de nutrientes e as propriedades químicas e físicas dos solos, devendo ser suplementados por novos critérios, derivados dos processos bioquímicos de formação de húmus.

Referem-se às distinções de estado de acidez ou alcalinidade do material dos solos.

Segundo critérios adotados pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Bloise et al. 1977), as classes distinguidas são qualificadas conforme especificações a seguir:

- Extremamente ácido – pH $< 4,3$
- Fortemente ácido – pH entre $4,3 - 5,3$
- Moderamento ácido – pH entre $5,4 - 6,5$
- Praticamente neutro – pH entre $6,6 - 7,3$
- Moderamento alcalino – pH entre $7,4 - 8,3$
- Fortemente alcalino – pH $> 8,3$

2.6.1.1. Classificação de Von Post

O sistema de classificação de Von Post é utilizado para solos na horticultura, agricultura e silvicultura. Von Post classifica solos pela escala visual de grau de humificação, teor de umidade, quantidade de raízes e restos de madeira.

A decomposição da turfa é traduzida em grau de humificação (H), isto é, o estado físico-químico de conversão dos vegetais originais em matéria sólida amorfa, não fibrosa. O grau de humificação H pode ser estimado pelo método Von Post, que considera uma escala de 1 a 10 (Tabela 2-10). O método consiste na compressão manual de uma porção de turfa e observação de: presença de água, quantidade de água, coloração da água, quantidade de material que escapa através dos dedos, conteúdo das fibras vegetais, dimensões das fibras vegetais, (CESP, 1985).

Von Post através do teor de umidade classifica os solos em 5 categorias, conforme a abaixo:

Tabela 2-8. Classificação do teor de umidade do solo (escala visual de Von Post adaptado de Hartlém; Wolski, 1996)

Classificação	Descrição	Teor de umidade
B1	Seca	Seca
B2	Relativamente seca	< 500%
B3	Teor de umidade normal	500% - 1000%
B4	Muito úmida	1000% - 2000%
B5	Em grande parte água livre	> 2000%

Conforme a Tabela 2-8 e Tabela 2-11, Von Post classifica a quantidade de raízes e restos de madeira que contém os solos.

Tabela 2-9. Classificação da quantidade de raízes do solo (escala visual de Von Post adaptado Hartlém; Wolski, 1996)

Classificação	Definição
R0	Sem raízes
R1	Com poucas raízes
R2	Com muita raízes
R3	Puramente raízes

Tabela 2-10. Classificação da turfa pelo grau de humificação (escala visual de Von Post)

GRAU DE HUMIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	COR DA ÁGUA QUE FLUI ENTRE OS DEDOS	FRAÇÃO DA TURFA QUE FLUI ENTRE OS DEDOS	RESTA NA MÃO	
				FORMA	ESTRUTURA VEGETAL
H1	sem decomposição	incolor	não passam	Não tem aspecto gelatinoso	estrutura vegetal nitidamente reconhecível
H2	muito pouco decomposta	ligeiramente castanha	sólidos		
H3	fracamente decomposta	castanha fraca	entre os		
H4	decomposta fracamente	muito castanha	dedos	Apresenta aspecto gelatinoso	ainda poucos restos vegetais reconhecíveis
H5	decomposta	líquido	poucos sólidos fluem		
H6	bem decomposta		passa 1/3 do volume		
H7	fortemente decomposta		passa metade do volume		
H8	muito fortemente decomposta		bem escuro	passa 3/5 do volume	ficam na mão resíduos de fibras, raízes, etc.
H9	quase integralmente decomposta	passa quase tudo			
H10	completamente decomposta	flui integralmente entre os dedos	sobra muito pouco ou quase nada nas mãos		

Fonte: (Franchi, 2000)

Tabela 2-11. Classificação de restos de madeira do solo (escala visual de Von Post adaptado Hartlém; Wolski, 1996)

Classificação	Definição
V0	Sem restos de madeira
V1	Com pouco resto de madeira
V2	Com muito resto de madeira
V3	Puramente resto de madeira

2.6.1.2. Classificação de Radforth

O sistema de classificação de Radfortn é mais utilizado na classificação de solos orgânicos na engenharia geotécnica que contém “teor de matéria orgânica $\geq 80\%$, (Landva et al, 1983). A turfa é classificada em três categorias principais, incluindo amorfo e granular, fibroso, e muito fibroso conforme sua estrutura. O material é classificado também por ser de madeira ou não-madeira. Segue a Tabela 2-12 com a classificação:

Tabela 2-12. Classificação da turfa (Radforth, 1969)

Característica predominante	Categoria	Nome
Turfa granular amorfa	1	Turfa granular-amorfa
	2	Turfa com fibras finas de madeira
	3	Turfa ganular-amorfa com fibras finas não-madeira
	4	Turfa ganular-amorfa, com fibras finas de madeira
	5	Turfa predominante ganular-amorfa, sem fibras finas de madeira
	6	Turfa predominante ganular-amorfa, com fibras finas de madeira
	7	Turfa granular-amorfa com camadas alternadas com fibras finas de madeira e fibras finas não-madeira
Turfa fibrosa	8	Turfa com fibras grossas de madeira e fibras finas não-madeira
	9	Turfa com fibras finas e grossas de madeira
	10	Partículas de madeira aderidas a fibras finas não-madeira
Turfa muito fibrosa	11	Partículas de madeira e não-madeira aderidas as fibras de finas de turfa
	12	Fibras grossas de madeira
	13	Fibras de madeira fina cruzadas com fibras grossas de madeira
	14	Fibras finas de madeira e não-madeira aderidas a fibras grossas
	15	Arranjo de fibras de madeira e partículas cercado turfa granular-amorfa com fibras finas
	16	Fibras grossas de madeira com pedaços de madeira
	17	Arranjo de raízes, pedaços de madeira cercados por fibras grossas

Segundo a ASTM D2487, classifica-se um solo como orgânico/turfa quando o teor de matéria orgânica é menor que 75% da massa do solo. No entanto International Peat Society (IPS) classifica solo como orgânico quando o teor de matéria orgânica/turfa for inferior a 20%.

Segundo Andrejko (1983) solos orgânicos que não são caracterizados como turfa, são classificados como carbonáceos ou sedimento mineral, o qual depende na quantidade total de cinza. A Tabela 2-13 mostra comparação entre sistemas de classificação que consideram a quantidade de cinza que permaneceu após o ensaio de perda ao fogo.

Tabela 2-13. Comparação de classificações de solos orgânicos (Andrejko et al., 1983)

Quantidade de cinza	0%	Turfas	Fortemente orgânicos	Turfas	Turfas	Pouca cinza	Pouca cinza	Turfas	Solos Calcareos / Lamas orgânicas (Gyttja)	
	10%					Média cinza				
	20%					Muita cinza				
	30%	Solo orgânico turfoso		Sedimentos carbonáceos	Pouca cinza	Orgânicos	Média cinza	Solo turfoso		
	40%									
	50%	Altamente orgânicos		Solo orgânico	Sedimentos carbonáceos	Muita cinza	Orgânicos	Muita cinza		Lama
	60%									
	70%	Medianamente orgânicos		Solo orgânico	Sedimentos carbonáceos	Muita cinza	Orgânicos	Muita cinza		Lama
	80%									
	80%	Pouco orgânicos		Medianamente orgânicos	Sedimentos minerais	Mineral e orgânico	Mineral e orgânico	Siltos e argilas orgânicos		
90%	Mineral ou mineral com matéria orgânica	Pouco orgânicos								
90%	Mineral ou mineral com matéria orgânica	Pouco orgânicos	Minerais	Minerais	Mineral e orgânico	Siltos e argilas orgânicos				
100%		Minerais								
Autor		Konvalov (1980)	Karlsson e Hansbo (1981)	Landva et al (1983)	Andrejko et al (1983)	Okruszko (1984)				
País de origem		União Soviética	Suécia	Canadá	Estados Unidos	Polônia				

2.6.2. Método de determinação de carbono orgânico

Segundo Oades (1989), a matéria orgânica do solo é definida como resíduo de plantas e animais decompostos. No entanto a maioria dos métodos analíticos de determinação da matéria orgânica não distingue entre resíduos de plantas e animais decompostos ou não decompostos que passem através da peneira de 2mm.

Os métodos de determinação do carbono orgânico são utilizados para estimar quantitativamente a fração orgânica do solo, no qual auxilia na sua classificação e entendimento de suas propriedades químicas, físicas e biológicas, (Nelson & Sommers, 1982). Os procedimentos de análise de carbono total geralmente recuperam todas as formas de carbono orgânico, envolvem a conversão de todas as formas para CO_2 por meio de combustão seca ou úmida. Subsequentemente quantifica-se o CO_2 extraído, empregando-se técnicas gravimétricas, titulométricas, volumétricas, espectrométricas ou cromatográficas.

Segundo Soon & Abboud (1991), o método de combustão a seco é considerado padrão, devido a sua alta precisão e exatidão nos resultados. Nesse método a amostra sofre oxidação em presença de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ e $\text{CO}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ através do aquecimento, a temperaturas entre 1020 e 1500 °C, alimentado com O_2 sob pressão de 30kPa. Basicamente as moléculas orgânicas são oxidadas na forma N_xO_y e CO_2 . $\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2$, que são carregadas, nas formas de gás, para um forno de redução, sob fluxo de hélio. O forno de redução contém íons Cu, a temperaturas de

750 °C, de onde N sai na forma de N₂. Posteriormente, o N₂ e CO₂ são separados em uma coluna cromatográfica e determinados em detector apropriado.

Rodella & Alcarte (1994) descreve os métodos de combustão úmida, que utilizam reagentes muito tóxicos. Esses métodos reduzem o dicromato (Cr₂O₇²⁻) por compostos de C orgânico e subsequentemente determinam o Cr₂O₇²⁻ não reduzido por titulação de oxirredução com Fe²⁺ ou por técnicas colorimétricas (Nelson & Sommers, 1996).

Métodos como Mebius modificado e Walkley & Black descrito por Nelson & Sommers (1982) também baseiam-se no mesmo princípio do método da combustão úmida. Segundo Nelson & Sommers (1982), o método de Walkley & Black (1960) originalmente subtrai o aquecimento da amostra, o qual compromete a exatidão dos resultados. Esse método foi precursor dos métodos usados em análise do solo no Brasil.

Nelson & Sommers (1982) citam em seu trabalho o método proposto por Allison (1960) que descreve a utilização do bloco de digestão. Esse método baseia-se no princípio da captura do CO₂ evoluído, com uma base forte, titulando-se a alcalinidade excedente, porém não foram eliminados os inconvenientes apresentados no método de combustão a seco (alto custo) e no método de combustão a úmido (operacionalidade reduzida). Segundo Nelson & Sommers (1982) sua eficiência quanto a evolução e captação do CO₂, pode subestimar o teor de carbono orgânico total e, por consequência, a de matéria orgânica do solo.

O método de Mebius no bloco é proposto por Yeomans & Bremner (1988), com objetivo de uniformizar a temperatura durante o processo de digestão, aumentando o número de amostras manipuladas por bateria. Esse método também permitiu diminuir a quantidade de solo e de dicromato utilizados.

2.7. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento é um dos principais parâmetros para analisar a construção de estruturas nos solos orgânicos. A resistência a cisalhamento também é importante na fase inicial de construção para suportar equipamentos da construção da estrutura. Mudanças na tensão de cisalhamento na sub-base no futuro são de grande importância para pavimentos construídos sobre solos orgânicos devido ao comportamento das tensões de cisalhamento afetadas pelas tensões efetivas e poro-pressão, (Lechowicz, 1994).

Resistência ao cisalhamento de solos é definida como cisalhamento máximo que pode ser suportado por um solo. Dois tipos de análises são considerados para avaliar a resistência ao cisalhamento em uma superfície com potencial alto de ruptura e o fator de segurança: análise da tensão total e análise da tensão efetiva. A análise da tensão total considera as condições do solo como não drenado e análise da tensão efetiva considera condições do como drenado.

Coesão ' c ' e ângulo de atrito ' ϕ ' são duas propriedades mecânicas do solo que interferem na resistência ao cisalhamento. Segundo Adams (1965), as turfas podem ser encontradas com ângulo de atrito por volta de 48° . A consolidação anisotrópica das turfas tem pouco ou insignificante efeito nos parâmetros de tensão de cisalhamento, (Adams, 1965). As fibras da turfa tem o efeito de aumentar a ligação entre as partículas, que conseqüentemente poderá aumentar sua resistência ao cisalhamento que está diretamente ligada a orientação do plano de ruptura e fibras, (Landava et al, 1983; Edil & Wang, 2000). Segundo Edil & Wang (2000), o alinhamento das fibras pode aumentar o ângulo de atrito em 16° . A resistência ao cisalhamento dos solos orgânico aumenta conforme aumenta o teor de fibras e seu alinhamento, (Arman, 1969). Geralmente a resistência do solo orgânico e rigidez dependem se o material orgânico é decomposto ou rico em fibras. Se o material orgânico é decomposto, a tensão de cisalhamento não drenada e rigidez serão reduzidas devido ao alto teor de umidade e índice de plasticidade gerada pelo material orgânico decomposto. No entanto se o solo orgânico contiver fibras, o qual age como um material de reforço, aumentará a resistência ao cisalhamento, (Mitchell & Soga, 2005).

A Figura 2-17 mostra a variação da resistência à compressão não confinada com o teor de matéria orgânica de um solo orgânico com teor de matéria orgânica $< 20\%$ da cidade de Chicago dos ensaios realizados por Franklin et al. (1973).

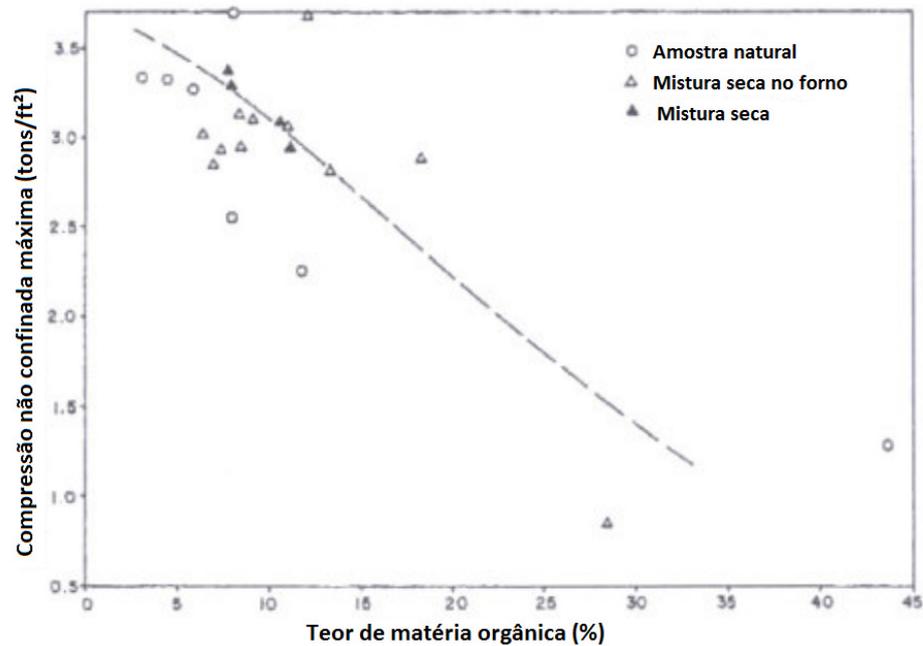


Figura 2-17: Variação da compressão não confinada com teor de matéria orgânica (Franklin et al., 1973)

2.8. ADENSAMENTO E COMPRESSIBILIDADE

Solos orgânicos e turfas são conhecidos pela sua alta compressibilidade e adensamento. Adensamento é o fenômeno pelo qual o solo sofre uma deformação vertical devido a um carregamento. Os adensamentos são basicamente dois tipos: curto prazo e longo prazo. Longo prazo devido à consolidação primária e compressão secundária do solo orgânico, (Edil & Den Hann, 1994).

Conforme Cola & Cortellazo (1999) solos orgânicos e turfas, são um dos mais difíceis solos para serem executadas fundações porque sua compressão se comporta de forma muito diferente dos outros solos devido à sua alta compressibilidade e seu estágio de compressão secundária. Outros parâmetros que também interferem significativamente, são seu índice de vazios alto em campo, umidade alta, e índice de compressão primária e secundária alta que são por volta de 10 vezes mais altos que um solo argiloso normal. Além disso, o comportamento das misturas de solos orgânicos e agentes cimentantes depende das características naturais da turfa e sua história de tensões.

A Figura 2-18 mostra o índice de compressão (C_c) e o teor de umidade natural (W_o) das turfas comparados com argilas moles e siltes, nota-se que as turfas estão em uma magnitude

muito superior as argilas moles e siltes. A alta compressibilidade dos solos orgânicos é devido a tendência de envelopar as partículas de argila, Stevenson (1994).

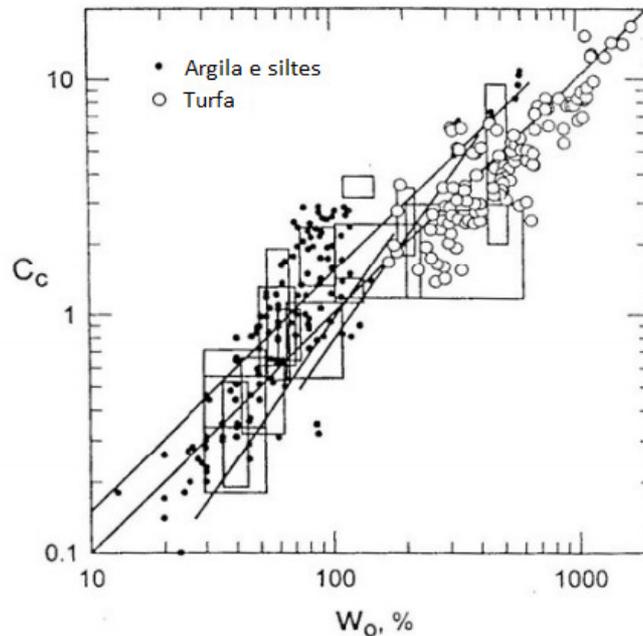


Figura 2-18: Teor de umidade natural (W_o) e índice de compressão de turfas comparadas com argilas moles e siltes, (Mesri et al., 1997)

De acordo com Mesri et al. (1997), o adensamento de solos orgânicos e turfas, é mais significativo devido à sua grande compressão secundária. Para qualquer solo natural, existe uma única relação entre o índice de compressão secundária ($C\alpha$) e índice de compressão (C_c) com o tempo, que é diretamente relacionado com a magnitude e comportamento do índice de compressão com a tensão efetiva vertical. O conceito da relação $C\alpha/C_c$ pode ser aplicado para solos sobreconsolidados e normalmente consolidados, C_c representa a inclinação da curva de compressão para ambos os solos.

Tabela 2-14 apresenta os valores $C\alpha/C_c$ para diversas turfas o qual varia entre 0,035-0,10. Tabela 2-15 resume os valores de $C\alpha/C_c$ para solos diferentes. O valor alto de $C\alpha/C_c$ para turfas é devido à alta taxa de deformação das partículas orgânicas. O valor alto de $C\alpha/C_c$ para as turfas indica que o índice de compressão secundária ($C\alpha$) é bem mais alto que o valor de $C\alpha$ para argilas e siltes.

Tabela 2-14. Teores de umidade natural (W_o), condutividade hidráulica vertical inicial (K_{vo}), e C_a/C_c para turfas, (Mesri et al., 1997)

Turfa	W_o (%)	K_{vo} (m/s)	C_a/C_c	Referências
Turfa fibrosa	850	$4 \cdot 10^{-6}$	0.06-0.10	Hanrahan (1954)
Turfa	520	---	0.061-0.078	Lewis (1956)
Turfa amorfa e fibrosa	500-1500	$10^{-7} - 10^{-6}$	0.035-0.083	Lea and Brawner (1963)
Lodo canadense	200-600	10^{-5}	0.09-0.10	Adams (1965)
Turfa amorfa e fibrosa	705	---	0.073-0.091	Keene and Zawodniak (1968)
Turfa	400-750	10^{-5}	0.075-0.085	Weber (1969)
Turfa fibrosa	605-1290	10^{-6}	0.052-0.072	Samson and Larochell (1972)
Turfa fibrosa	613-886	$10^{-6} - 10^{-5}$	0.06-0.085	Berry and Vickers (1975)
Turfa amorfa e fibrosa	600	10^{-6}	0.042-0.083	Dhowian and Edil (1981)
Turfa fibrosa	660-1590	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	0.06	Lefbevre et al. (1984)
Turfa holandesa	370	---	0.06	Den Haan (1994)
Turfa fibrosa	610-850	$6 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$	0.052	Present study (1997)

Tabela 2-15. Valores de C_a/C_c para diversos tipos de solos (Terzaghi et al, 1996)

Tipo de solo	C_a/C_c
Solo granular, incluindo pedras	0.02 ± 0.01
Xisto e areia fina	0.03 ± 0.01
Argila inorgânica e silte	0.04 ± 0.01
Argila orgânica e silte	0.05 ± 0.01
Turfa e lodo	0.06 ± 0.01

A compressão secundária ocorre após período primário hidrodinâmico que é normalmente descrito pelo índice de vazios linear em longo prazo com relação à inclinação C_a quando a escala do tempo começa no tempo da aplicação do incremento de carregamento, (Edil & Den Dann, 1994). A compressão terciária também é apresentada nas turfas fibrosas em determinadas tensões, devido rebaixamento do lençol freático e compressibilidade alta, através da oxidação dos solos que leva a humificação da turfa e conseqüentemente aumenta a permeabilidade, (Vonk, 1994). Após a oxidação do solo, ocorre a formação de gás, e isso

aumenta a poro pressão no solo. No entanto esses efeitos não são levados em conta no comportamento da estrutura em longo prazo, (Edil & Den Hann, 1994).

2.9. COEFICIENTE DE TENSÃO LATERAL

Segundo Edil & Dhowian (1981) os valores do coeficiente lateral da turfa (K) variam entre 0,3 e 0,53, depende no teor de fibras e na qualidade do solo. Edil & Wang (2000) sugerem que os valores de 'K' variam dependendo do teor de fibras no solo e não no teor de material orgânico e turfas normalmente consolidada tem valores de 'K' inferiores aos solos inorgânicos. Eles também sugerem para turfas amorfas valores de 'K' 0,49 e 0,33 para turfas fibrosas.

2.10. CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO

A compactação do solo é caracterizada pelo aumento da densidade e conseqüentemente redução dos vazios (ar nos poros do solo) mediante a aplicação de energia mecânica. Segundo Terzaghi et al. (1996) os três principais objetivos da compactação são: diminuição da compressibilidade do solo, a fim de se evitar recalques excessivos; aumento da resistência ao cisalhamento; e diminuição da permeabilidade.

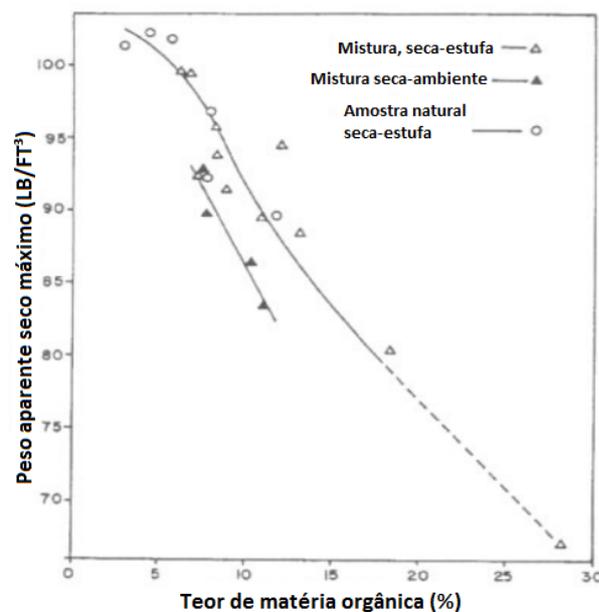


Figura 2-19: Variação do peso aparente seco máximo com teor de matéria orgânica, (Franklin et al., 1973)

Franklin et al. (1973) apresenta alguns resultados obtidos com um solo pouco orgânico seco que reduziu a influência do teor de matéria orgânica no seu comportamento com a compactação. Nos seus resultados também foi observado com aumento do teor de matéria orgânica, redução do seu peso aparente seco a aumento no teor ótimo de água, conforme as Figura 2-19 e Figura 2-20.

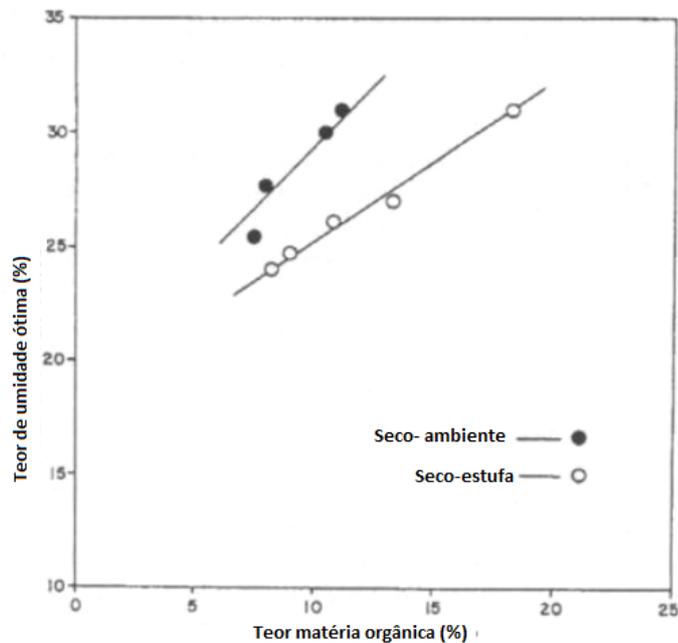


Figura 2-20: Efeito do tipo de secagem com umidade ótima, (Franklin et al., 1973).

2.11. CIMENTO

Cimentos são substâncias ligantes, capazes de unir fragmentos ou massas de materiais sólidos em um corpo compacto. Essa definição abrange um grande número de substâncias distintas entre si, com poucas características em comum, a não ser sua capacidade aglutinante.

Dentre esses ligantes, o cimento Portland é um aglomerante hidráulico utilizado na construção civil. Tem importância no desempenho, qualidade e durabilidade do concreto. Após entrar em contato com a água, o cimento Portland é submetido a processos de transformações químicas-mineralógicas, que contribuem para agregar e consolidar os agregados, resultando em um compósito.

2.11.1. Composição cimento Portland

O principal constituinte do cimento Portland é o clínquer Portland, material sintetizado, resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferríferas.

Para a fabricação do clínquer Portland, o material de partida deve conter em sua composição química os óxidos principais do clínquer, quais sejam: CaO, SiO, Al₂O₃ e Fe₂O₃, (Zampieri, 1989). Raramente esses componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas. Por isso, é necessário preparar misturas de dois ou mais tipos de rochas. O calcário (75% a 80%) e a argila (20% a 25%) são matérias primas comuns do clínquer, (Taylor, 1992). Quando um componente químico essencial não estiver presente na proporção adequada, eventuais aditivos corretivos, como o minério de ferro, a areia, a bauxita, serão utilizados.

Na etapa de transformações mineralógicas que se processa no interior do forno, as fases minerais abundantes na natureza, como calcita (CaCO₃), dolomita {CaMg(CO₃)₂}, quartzo (SiO₂), plagioclásio {(NaAlSi₃O₈)-(CaAl₂Si₂O₈)}, caulinta {Al₄(Si₄O₁₀)(OH)}, hematita (Fe₂O₃), entre outras, são os principais constituintes das rochas calcárias e argilosas. Essas fases são transformadas em minerais metaestáveis, cujos campos de estabilidade envolvem normalmente temperaturas superiores a 1000°C, representados pelos silicatos cálcicos (alita – Ca₃SiO₅ e belita – Ca₂SiO₄) e pelos aluminatos e ferro-aluminatos cálcios (C₃A - Ca₃Al₂O₆ e C₄AF – Ca₄Al₂Fe₂O₁₀). Adicionalmente, outros minerais se formam em proporções menores, como a cal livre (CaO), o perclásio (MgO) e sulfatos alcalinos diversos, (CENTURIONE et al., 2003).

A halita é o principal constituinte do clínquer, compreendendo 40% a 70% em massa. Tem importante papel no endurecimento e na resistência mecânica do cimento às primeiras idades (1 a 28 dias de cura). Apresenta-se sob a forma de solução sólida de Ca₃SiO₅ com proporções variadas de elementos menores (Al, Mg, Fe, Na, K, Ti, Mn, P e outros), (Kihara et al., 1990).

A belita também desempenha importante papel nas resistências mecânicas do cimento, sobretudo a idades mais avançadas (acima de 28 dias de cura), uma vez que apresenta taxa de hidratação mais lenta. Assim como a alita, constitui solução sólida de Ca₂SiO₄ com diversos elementos menores. Em média, representam de 10% a 20% do clínquer, (Kihara et al., 1990).

A fase intersticial, material que preenche os espaços entre os cristais de alita e belita, compreende o material que se funde durante o processo de clínquerrização. Essa fase é formada por aluminatos e ferroluminatos cálcicos, em solução sólida. O C_3A (ferro aluminato tricálcio) tem importante papel na resistência química do cimento, em especial ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto. A fase intersticial ocorre em proporções que variam de 15% a 20%, (Kihara et al., 1990).

A cal livre (CaO) é considerada indesejável no clínquer em teores superiores a 2%. Forma-se pela descarbonatação do $CaCO_3$ da farinha e serve como parâmetro de controle das condições de fabricação do clínquer. Teores elevados de cal livre indicam que a combinação dos óxidos presentes no forno não foi completa, seja pela finura e homogeneização inadequadas da farinha, seja pelas condições de queima insatisfatórias.

O periclásio (MgO) e os sulfatos alcalinos ocorrem em clínqueres cujas matérias primas sejam ricas em óxidos de magnésio, elementos alcalino (K e Na) e sulfato. Os combustíveis utilizados no forno podem contribuir também para o aporte de íons sulfato no sistema.

O processo de hidratação do cimento Portland pode ser entendido como a estabilização pela água dos minerais do clínquer, metaestáveis a temperatura ambiente, gerando uma assembléia mineralógica distinta, constituída predominantemente por fase de baixa cristalinidade.

De acordo com Neville (1997), existem duas formas de reação entre os constituintes do cimento e água: a) incorporação direta de algumas moléculas de água, ou seja, hidratação propriamente dita, e b) hidrólise, isto é, quebra e dissolução de determinados componentes do cimento, como por exemplo, o gesso que disponibiliza íons de sulfato ao sistema.

Considerando-se os principais constituintes mineralógico do clínquer Portland, os aluminatos se hidratam muito mais rapidamente que os silicatos. O enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação) resultam diretamente das reações de hidratação dos aluminatos, enquanto que os silicatos, que correspondem à cerca de 75% do clínquer, têm importante papel na determinação das características do endurecimento, (Mehta & Monteiro, 1994).

A hidratação do cimento pára quando não existe mais fase anidra de cimento (misturas com elevada relação a/c e bem curadas), ou quando a água não puder mais chegar às fases não hidratadas (sistemas muito densos e defloculados), ou ainda quando não existe mais água disponível, caso isso aconteça (relação a/c muito baixa), (Aïtcin, 2000).

É importante lembrar que a hidratação do cimento Portland não depende exclusivamente dos componentes mineralógicos do clínquer e das adições ativas do cimento, mas também de fatores físicos com finura, relação água-cimento, temperatura e procedimento de cura.

Segundo a NBR NM 65 o tempo de início de pega é ≥ 1 hora e de fim de pega é ≤ 10 horas.

2.11.2. Hidratação cimento Portland

Nos últimos anos o uso de misturas de solo-cimento vêm sendo amplamente aplicado na engenharia geotécnica para melhorar as propriedades mecânicas de solos, (CHEN & WANG, 2000). Porém é difícil atingir consolidação desejada, quando o teor de matéria orgânica é alto devido a hidratação do cimento ser impedida.

Ao adicionar materiais com propriedades aglomerantes em um solo, geram interações físico-químicas que modificam o comportamento mecânico do solo uma vez estabilizado. Tais reações dependem muito do tipo e quantidade do aglomerante adicionado e também das características e condições do solo, (Terashi, 1997). Então o conhecimento das propriedades do aglomerante a ser utilizado e as características do solo antevira qual o tipo de interações que se irão processar. Essas interações podem ser definidas em 3 categorias: reação de hidratação (ou reação primária); reação pozolânica (ou reação secundária); e troca iônica.

As reações de hidratação (ou primária) são as que acontecem com a água existente no solo. Geralmente essas reações cessam nas primeiras horas então seguem-se as reações pozolânicas. As reações pozolânicas (ou secundárias) são devido à combinação de alguns produtos das reações primárias com os minerais pozolânicos, chamados de sílica e alumina. A sílica e alumina existem no solo ou estão contidos no aglomerante. Segundo Coutinho (1998), essas reações podem desenvolver-se por meses ou anos. Por consequência dessas reações, a estrutura das partículas podem sofrer alterações por troca iônica que pode contribuir para a estabilização do solo. No entanto, o efeito estabilizador associado à troca iônica é em geral modesto quando comparado com o resultado das reações de hidratação e pozolânicas.

A reatividade do aglomerante em contato com a água é traduzida pela capacidade de o material combinar com a água. Quando existe essa afinidade e é alta, classifica-se o aglomerante como hidráulico (cimento Portland), gerando neste caso reações de hidratação de forma espontânea. No entanto quando essa capacidade é menor, as reações somente ocorrem se forem ativas. O aglomerante é então classificado com hidráulico latente (escória granulada

de alto forno). Quando o aglomerante exibe reação primária nula, classifica-se como aglomerante pozolânico (cinza volante).

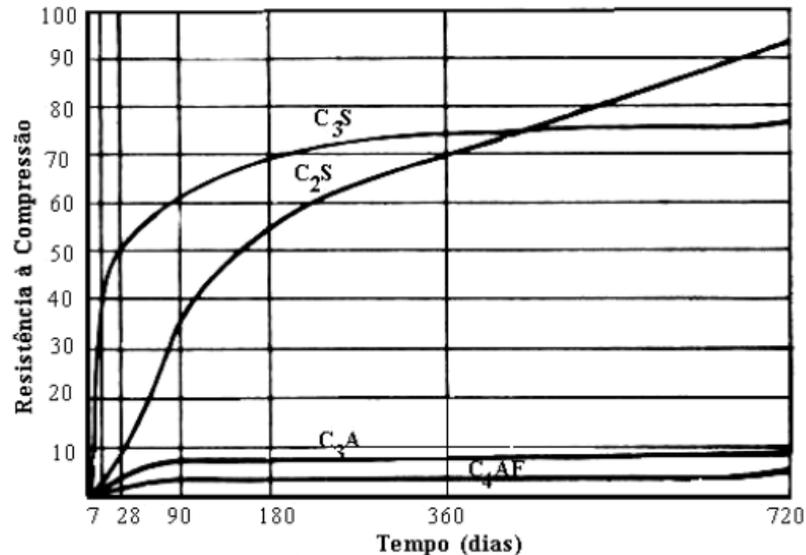


Figura 2-21: Comportamento mecânico dos compostos de cimento, (Petrucci, 1979)

A velocidade de hidratação do cimento é influenciada também pela composição do cimento. Analisando quimicamente o cimento pode-se definir as proporções dos óxidos. As propriedades do cimento são relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos. A Figura 2-1 relaciona os principais silicatos e aluminatos.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland, representados na forma de óxidos, são a Cal (CaO), a Sílica (SiO₂), a Alumina (Al₂O₃), e o Óxido de Ferro (Fe₂O₃), (Taylor, 1990), além de certa proporção de Magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto, (BAUER, 1999). Existem ainda, como constituintes menores, as impurezas, que são: os Óxidos de Potássio (K₂O) e Sódio (Na₂O), conhecidos como os álcalis do cimento; o Óxido de Titânio (TiO₂) e outras substâncias de menor importância, como o Óxido de Manganês (Mn₃O₄) e o Anidrido Fosfórico (P₂O₅), (Petrucci, 1979).

Analisando a figura acima verifica-se que:

- O Silicato tricálcio (C₃S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente no primeiro mês. O silicato tricálcio (C₃S) é conhecido também como Alita, aparecendo como pequenos grãos equidimensionais incolores, compondo entre 35% e 60% do cimento Portland. Produz médio calor de hidratação a qual inicia-se em

poucas horas. Resulta da combinação da cal restante das demais combinações com o silicato dicálcio; ocorre em cristais bem definidos, relativamente grandes, com contornos hexagonais, (Petrucci, 1979). Pode-se apresentar em três tipos de estruturas: monoclínica, triclínica e romboédrica.

- O silicato dicálcio (C_2S) é o maior responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas, principalmente, após um ano de idade. Conhecido como Belita, apresenta grãos arredondados, geralmente geminados, aparecendo usualmente entre 10% e 40% na composição do cimento Portland. O silicato dicálcio resulta da combinação da sílica com a cal presente na composição do cimento; ocorre na forma de cristais relativamente grandes.
- O aluminato tricálcio (C_3A) contribui para ganhos de resistência especialmente no primeiro dia. O aluminato tricálcio conhecido como Aluminato, forma cristais retangulares, aparecendo entre 0% e 15% na composição do cimento Portland. Segundo Petrucci (1979), resulta da combinação da alumina restante das demais combinações com a cal. Geralmente encontrado na forma cúbica ou ortorrômbica, mas também encontrado na forma monoclínica. Reage rapidamente e libera uma grande quantidade de calor, (Taylor, 1990).
- O Ferro aluminato tetracálcio (C_4AF) pouco contribui para a resistência do cimento, é uma solução sólida, cuja composição varia entre C_2F e C_6A_2F , e compõe entre 5% e 15% do cimento Portland. São cristais normalmente tubulares, sendo opaco a brilhante em superfície polida, podendo apresentar com preenchimentos intersticiais. De acordo com Petrucci (1979), resulta da combinação da cal com o óxido de ferro e a alumina até esgotar o óxido de ferro. O ferro aluminato tetracálcio é conhecido como ferrita. Encontra-se na forma monoclínica, tetraédica ou octaédrica, (Taylor, 1990).
- Óxido de Magnésio: Sua principal fonte é normalmente a dolomita, que está presente como impureza na maioria dos calcários. Uma parte do total do óxido de magnésio, até 2% pode entrar em solução sólida com várias fases: alita, belita e aluminatos. O restante ocorre como MgO cristalino, denominado de periclásio; possui estrutura cristalina e são influenciados pelas condições de resfriamento, (Coutinho, 1973).

Os constituintes alcalinos, Óxidos de Potássio (K_2O) e Óxido de Sódio (Na_2O), presentes no cimento Portland, são principalmente provenientes dos componentes da argila e estão

presentes na estrutura dos principais constituintes do clínquer, os silicatos e aluminatos. O efeito dos álcalis na água reflete-se principalmente na elevação do pH da solução, na diminuição da solubilidade do cálcio e aumento na solubilidade do silicato, (Gobbo, 2003).

Ensaio realizado por Lothenbach (2006) mostrados na figura abaixo, apresentam resultados da hidratação do cimento num período de 420 dias. Verifica-se que o silicato tricálcio corresponde 56% da resistência na primeira hora enquanto que o silicato dicálcio representa 15%. Após aproximadamente 45 dias o silicato tricálcio iguala-se com o silicato dicálcio sua proporção de influência na resistência (Figura 2-22).

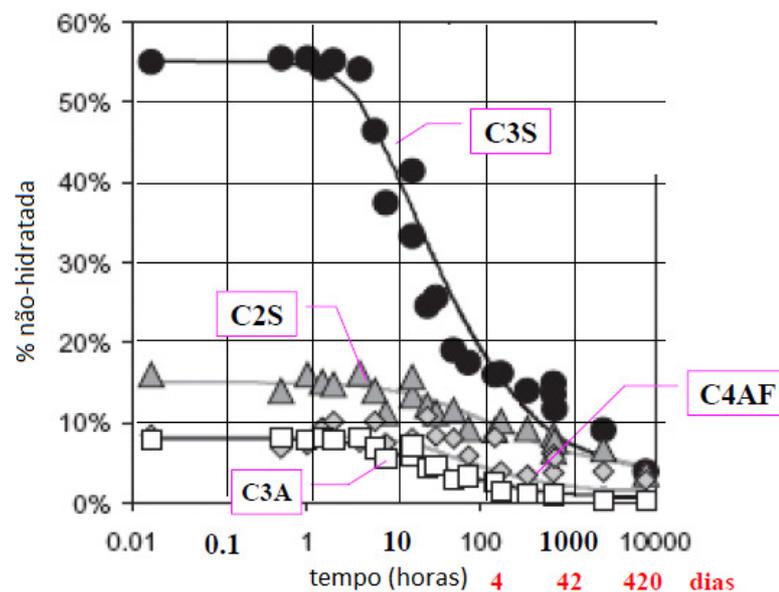


Figura 2-22: Hidratação dos componentes do clínquer ao longo do tempo em uma pasta de cimento com um fator água/cimento = 0,50, (Lothenbach, 2006)

Com a combinação da água, os componentes do cimento começam a se hidratar, formando compostos que, em sua maioria, são silicatos de cálcio hidratado (CSH). Estes começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos. Segundo Faria (2004), esta rede é constituída pela ligação mecânica entre os grãos, que aparecem inicialmente de maneira aleatória e isolada. Depois se inicia a formação de subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente (amas), que por fim se juntam formando um caminho contínuo.

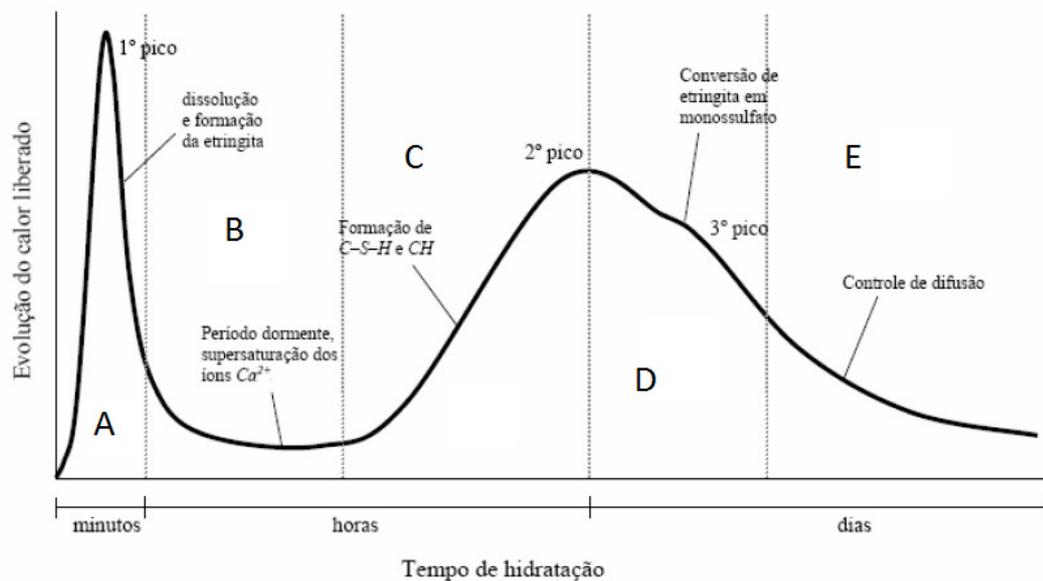


Figura 2-23: Evolução do calor liberado versus tempo de hidratação, (Faria, 2004).

Faria (2004) apresenta estudo realizado da curva de hidratação do cimento Portland (Figura 2-23), mostra a evolução da taxa de liberação de calor pelo tempo de hidratação. Por meio dessa curva, observa-se:

Estágio A - Nos primeiros 15 a 20 minutos, o cimento começa a ser dissolvido na água formando uma suspensão de íons, dentre os quais o Al^{3+} reage instantaneamente com o gesso e a água do sistema, liberando grande quantidade de calor e promovendo o primeiro pico exotérmico, resultando numa camada constituída por pequenas agulhas chamadas etringita.

Estágio B – Mais conhecido com período dormente ou de indução, onde o cimento ainda permanece plástico. A etringita continua sendo formada enquanto houver gesso na forma de íons SO_4^{2-} na solução. A dissolução dos minerais do cimento é concluída, aumentando a concentração de íons na solução. O hidróxido de cálcio cristaliza da solução, e o C-S-H se desenvolve na superfície do C_3S , formando uma cobertura. A reação se transforma em difusão controlada, com o aumento de espessura dessa cobertura e do tempo que a água leva para penetrar na mesma. O C_2S hidrata a uma taxa mais lenta porque é um componente menos reativo. Por isso se nota uma baixa liberação de calor neste estágio. Com o desaparecimento do SO_4^{2-} na solução vem a instabilidade da camada de etringita, causando sua desintegração e terminando o período dormente.

Estágio C – Esse estágio leva de 4 a 8 horas, é marcado pela concentração crítica de íons e a consequente retomada das vigorosas reações. A taxa máxima de reação acontece nesta fase,

promovendo uma forte liberação de calor que origina o segundo pico exotérmico. A pega chega ao final e o endurecimento se inicia.

Estágio D – Após o segundo pico exotérmico, ocorre a conversão da entrigita em monossulfato pela sua reação com os íons Al^{3+} não reagidos, consolidando o estágio D que leva de 8 a 12 horas. Os íons Al^{3+} remanescentes reagem formando uma proteção em torno do grão de cimento, impedindo o contato da água livre com a sua parte hidratada.

Estágio E – O último estágio demora entre 12 e 24 horas, conhecido como controle de difusão.

2.11.3. Substâncias químicas modificadoras de pega

Algumas substâncias químicas atuam como retardadores da pega quando usadas em pequenas quantidades, por exemplo, 0,3% em massa de cimento. Em grandes dosagens, por exemplo, 1% em massa de cimento, comportam-se como aceleradores de pega, (Fosen, 1983).

Atualmente se aceita que as reações iniciais dos componentes do cimento Portland com a água ocorrem através de uma solução. Os compostos anidros primeiro se ionizam e então os produtos de hidratação se formam na solução. Devido à sua solubilidade limitada, os produtos de hidratação se cristalizam e os fenômenos de enrijecimento, pega e endurecimento nas pastas de cimento Portland estão diretamente relacionados aos diferentes estágios do processo progressivo de cristalização. Portanto, pode-se assumir que, pela adição de determinadas substâncias solúveis ao sistema cimento Portland-água, pode-se influenciar a taxa de ionização dos componentes do cimento ou taxa de cristalização dos produtos de hidratação.

Joisel (1973) relata que a ação das substâncias químicas reguladoras da pega no cimento Portland pode ser atribuída principalmente à dissolução de constituintes anidros em vez da cristalização dos hidratos. Para explicar o mecanismo de aceleração ou retardo da pega da mistura, considera-se uma pasta de cimento Portland em hidratação como sendo composta de cátions de cálcio e ânions de silicato e aluminato, sendo que a solubilidade de cada um depende do tipo de concentração dos íons ácidos e básicos presentes na solução. Como a maioria dos aditivos químicos se ioniza imediatamente na água, é possível alterar o tipo de concentração dos constituintes iônicos na solução por meio da adição desses aditivos ao sistema cimento-água, influenciando assim a dissolução dos componentes do cimento de acordo com as seguintes diretrizes propostas por Joisel (1973):

- Um aditivo acelerador tem que promover a dissolução dos componentes catiônicos ou aniônicos do cimento. Como há dois ânions predominantes a dissolver, o acelerador deveria promover a dissolução do constituinte que tem a menor velocidade de dissolução durante o período da hidratação inicial, como o silicato.
- Um aditivo retardador deve impedir a dissolução dos componentes catiônicos ou aniônicos do cimento, de preferência o aniônico, que tem mais alta velocidade de dissolução durante o período da hidratação inicial, como o aluminato.
- A presença de cátions monovalentes (K^+ ou Na^+) na solução reduz a solubilidade dos íons Ca^{2+} , mas tende a promover a solubilidade dos íons silicato aluminato. Em concentrações pequenas, o primeiro efeito é dominante; em concentrações maiores, o último efeito se torna dominante.
- A presença de determinados ânions monovalentes na solução (Cl^- , NO_3^-) ou SO_4^{2-} reduz a solubilidade dos silicatos e aluminatos, mas tende a promover a solubilidade dos íons cálcio. Em pequenas concentrações, o primeiro efeito é dominante; em grandes concentrações, o segundo efeito se torna dominante.

Segundo Joisel (1973) ácidos com uma cadeia longa de hidrocarboneto geralmente agem como retardadores através da inibição da formação de ligações entre os produtos de hidratação. A trietanolamina é uma substância química que tende a retardar a hidratação de C_3S , desta forma reduz a velocidade de desenvolvimento da resistência.

Normalmente nas misturas de concreto os aditivos químicos que contém surfactantes com grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos (gluconatos, lignossulfatos e açúcares), sais de sódio de ácidos fosfórico, bórico, oxálico, ou hidrofúrico, e sais de zinco ou chumbo, atuam como poderosos retardadores, (Malhotra, 2000).

De acordo com Malhotra (2000) os surfactantes agem como retardadores por atrasarem a formação de ligações entre os produtos de hidratação; outros reduzem a solubilidade dos constituintes anidro do cimento pela formação de produtos insolúveis e impermeáveis em torno das partículas. Os sais de sódio derivados de ácido fosfórico, bórico, oxálico e hidrofúrico são solúveis, mas os sais de cálcio são altamente insolúveis, portanto, se formam rapidamente em torno das partículas de cimento em hidratação. Uma vez formadas as

camadas insolúveis e densas em torno dos grãos de cimento, diminui-se consideravelmente a velocidade de hidratação subsequente.

2.12. RESÍDUOS POZOLÂNICOS

Com o uso de novas tecnologias as emissões de CO₂ podem ser reduzidas consideravelmente (IPCC, 2007). A indústria do cimento é responsável por cerca de 10% de emissões mundiais de CO₂ (Taylor et. al, 2006). O setor do cimento tem seu crescimento associado a demanda da construção civil que nos últimos anos obteve um grande crescimento. Segundo o SNIC, em 2009 o Brasil teve uma produção de 51,9 milhões de toneladas de cimento Portland. O consumo do Brasil aumentou 0,6% enquanto países como Estados Unidos e Espanha tiveram redução de 20% e 33%.

Tentando minimizar a emissão de gases nocivos a saúde, que é de 900kg de CO₂ por tonelada produzida de cimento, uma prática comum que está sendo adotada pelas cimenteiras que são responsáveis por 5% das emissões de CO₂, é a utilização de resíduos como substitutos parciais do cimento (MME, 2011). Além da visão ambiental, as construtoras e concreteiras buscam reduzir os custos na produção de concreto que chega a 15% com a utilização de resíduos, por exemplo: cinza pozolânica.

Uma fonte de material pozolânico é a casca de arroz. Esse resíduo se processado adequadamente é rico em sílica, que pode ser usado tanto em substituição ao cimento quanto como adição em concretos e argamassas (Cordeiro, 2006).

A obtenção de uma cinza de boa qualidade para aplicação em argamassas e concretos depende do método de geração utilizado, pois este influenciará nas características adequadas para a produção de cinzas de elevada reatividade.

Pode-se considerar material pozolânico, todo material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso que por si só não apresenta atividade hidráulica. Quando finamente moído e em presença de água, reage com hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, formando produtos resistentes (ACI 116-R-00, 2002). O termo pozolana é uma derivação do nome da cidade italiana de Possuoli. Atribuído originalmente aos materiais de origem vulcânica com propriedades similares dessa cidade (MAassaza, 1998).

A pozolana quando introduzida numa matriz cimentícia, reage com o hidróxido de cálcio (CH) formado na hidratação do cimento e gera produtos resistentes de hidratação como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e/ou o silico-aluminato de cálcio hidratado (S-A-C-H) (Vieira, 2005; Tashima, 2006).

A atividade pozolana é principalmente dependente às suas origens de natureza, por exemplo: qualidade e quantidade das fases ativas (amorfas) presentes na pozolana. Segundo Farias Filho et al. (2000) a tendência dos materiais pozolânicos de reagirem com o hidróxido de cálcio, formando compostos de propriedades aglomerantes, que melhorem as propriedades do cimento, concreto e argamassa, reside no fato de o silício e óxido de alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

A combinação dos efeitos pozolânico e filer decorrentes da reação pozolânica representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos (Vieira, 2005).

2.13. CINZA DA CASCA DE ARROZ

A cinza proveniente da casca de arroz já é utilizada em substituição parcial do cimento. Existem projetos para geração de energia através da queima da casca de arroz, uma vez que a matéria prima é abundante e todo CO₂ produzido na queima, volta para o ciclo de carbono da biosfera. Segundo IRGA (2010) no ano de 2010 foram produzidos 710 milhões de toneladas de arroz e cerca de 20% desse valor é rejeito. No Brasil são produzidos 11,3 milhões de toneladas de arroz, 2,26 toneladas de casca de arroz e 0,45 toneladas de cinza. Somente o Rio Grande do Sul produz 7,13 toneladas de arroz e 0,28 toneladas de cinza.

No caso da geração de energia pela combustão direta, o resíduo final é a cinza impura. Como a cinza contém alto teor de sílica (~92%), isto a torna um resíduo valorizado. No entanto essa cinza só terá alto valor econômico se tiver alta qualidade, que é mensurada pela alta superfície específica, tamanho e pureza de partícula.

Com a queima da casca, a lignina e a celulose são removidas, resultando em uma estrutura celular e porosa. Além do alto teor de sílica, essas cinzas geralmente contêm carbono, óxido de potássio (K₂O), óxido fosfórico (P₂O₅), CaO, pequenas quantidades de magnésio (Mg), ferro (Fe) e sódio (Na), (Armesto et. al, 2002). Segundo Prudêncio & Santos (1998), as

principais impurezas presentes são os álcalis, K_2O e óxido de sódio (Na_2O). Estes álcalis podem reagir com alguns minerais presentes nos agregados. Esta reação é conhecida como reação álcali-agregado e provocam a deterioração do concreto. O teor de K_2O encontra-se entre 1% e 5% e depende da quantidade de fertilizante usado na plantação de arroz. Pequenas quantidades (inferiores a 1%) de outras impurezas como CaO , MgO , e P_2O_5 também já foram encontradas.

Estudos realizados com o concreto demonstram aumento de resistência. Segundo os resultados de ensaios de resistência a compressão realizada por Rego (2001), todos os concretos com substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz residual, apresentaram resultados com aumento de resistência à compressão. No teor de substituição de 5%, a resistência aumentou 17%. Com teores de substituição de 10% houve um aumento na resistência à compressão de cerca de 10%, o que reforça a idéia da utilização desse material tanto do ponto de vista da melhoria das propriedades mecânicas, quanto de economia e sustentabilidade do processo de produção.

2.14. CINZA VOLANTE

Cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada, é a cinza obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, sendo a pozolana artificial mais comum. As partículas de cinza volante são esféricas (o que é uma vantagem do ponto de vista de demanda de água), são muito finas (diâmetro entre 1 e $100\mu m$). A grande área específica da cinza volante significa que o material está prontamente disponível para reação com o CH.

As cinzas volantes mais comuns são provenientes de carvão betuminoso, sendo predominante silicosas e conhecidas com cinzas volantes Classe F. Os carvões sub-betuminosos e a lignita resultam cinzas volantes ricas em cal, classificadas como Classe C.

Segundo Neville (1997) o melhoramento da resistência do concreto pela cinza volante não é apenas em consequência de sua pozolanicidade, mas também da capacidade das partículas bem pequenas e esféricas se acomodarem entre as partículas de cimento. O efeito benéfico da acomodação das partículas sobre a resistência é a redução do ar aprisionado e a redução do volume de poros capilares.

A resistência mecânica também dependerá da qualidade da cinza. Para cinzas com melhores características físicas e químicas, as misturas com cimento de pega rápida resultam nas melhores eficiências, inclusive, com resistências superiores aos concretos de referência para as mesmas idades, (Bijen & Selst, 1993). Segundo Bijen & Selst (1993), a contribuição da pozolana na resistência também é fortemente dependente do tipo de cimento, da relação água/aglomerante e teor utilizado.

CAPÍTULO 3

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais envolvidos nesta pesquisa passaram por uma série de ensaios de laboratório, realizados segundo as normas brasileiras, para a determinação de suas propriedades físicas. Mais detalhes são fornecidos abaixo.

O programa experimental se divide em cinco partes:

1^a – desenvolvimento de um equipamento para previsão de resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados através da cravação de uma haste com base alargada.

2^a – utilização de uma mistura com características controladas destinadas a reproduzir aspectos do comportamento dos solos naturais com matéria orgânica. Com esse objetivo, foram realizadas misturas de argila caulim e bentonita sódica e cálcica.

3^a - verificação da influência da acidez do solo na resistência à compressão simples. Nesta etapa foram testadas duas substâncias ácidas (ácido sulfúrico e ácido clorídrico).

4^a- avaliação dos efeitos de resíduos orgânicos obtidos através da moagem das folhas de eucalipto incorporados à mistura.

5^a – avaliação dos efeitos do ácido húmico na mistura.

3.2. ENSAIOS DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA CIRCULAR

O ensaio tem como finalidade determinar a tensão máxima de cravação de uma haste com base alargada circular e obter uma correlação entre o ensaio de compressão simples, que no caso de solos moles orgânicos apresenta muitas variáveis no processo de moldagem. Dentre os problemas mais comuns são identificados perda de umidade e material, pois os moldes não são completamente vedados. Para caracterizar melhor os solos moles, trocou-se o anel dinamométrico de metal para nylon. Após adaptou-se no anel uma ponteira com base alargada.

O ensaio consiste basicamente na medição da máxima tensão obtida na cravação da ponteira com base alargada até uma profundidade máxima de 30 mm em uma camada de solo com espessura mínima do dobro da cravação. A distância entre as laterais do recipiente deve ser no mínimo de 50 mm. No caso de realização de mais de um ensaio no mesmo recipiente, deverão ser criadas juntas de plástico para evitar interferência e propagação de fissuras. A força máxima aplicada no solo durante a cravação será determinada usando a curva de calibração. Dividindo a força máxima pela área da base da ponteira será determinada a tensão máxima aplicada ao solo.

Os anéis dinamométricos de nylon têm diâmetro externo de 220 mm e com diferentes espessuras que são escolhidas de acordo com a sensibilidade do solo (Figura 3-1). Na Tabela 3-1 estão descritas as características de cada anel utilizado. Na são mostradas as equações de calibração de cada anel.

Tabela 3-1: Características do anel dinamométrico de nylon

Anel	Espessura anel (mm)	Força máxima (N)	Sensibilidade (N)	Tensão máxima (kPa)	Tensão mínima (kPa)
1	10	639	0,515	12780	1,6
2	6	121	0,121	2420	0,3
3	3	35	0,035	700	0,09

Tabela 3-2: Equações de calibração dos anéis dinamométricos de nylon

Força aplicada	
Anel	Equação de calibração
1	63,74 N x [medida anel (mm)]
2	12,11 N x [medida anel (mm)]
3	3,52 N x [medida anel (mm)]



Figura 3-1: Fotos dos anéis dinamométricos de nylon

Foram desenvolvidas quatro ponteiras com base circular alargada. A Tabela 3-3 mostra uma combinação entre os anéis dinamométricos de nylon com espessuras variadas e as diferentes áreas das bases das ponteiras. As Figura 3-2 e Figura 3-3 mostram as ponteiras com bases alargadas em vistas diferentes.

Tabela 3-3: Área da base das ponteiras mostrando as tensões máximas e mínimas com anéis dinamométricos de nylon diferentes

Area da base (cm ²)	Espessura do anel 10 mm		Espessura do anel 6 mm		Espessura do anel 3 mm	
	Tensão mínima (kPa)	Tensão máxima (kPa)	Tensão mínima (kPa)	Tensão máxima (kPa)	Tensão mínima (kPa)	Tensão máxima (kPa)
0,5	12,78	12780	2,42	2420	0,7	700
1,0	6,39	6390	1,21	1210	0,35	350
2,0	3,2	3195	0,61	605	0,18	175
4,0	1,6	1598	0,3	302,5	0,09	87,5



Figura 3-2: Foto da vista lateral das ponteiros com base alargada

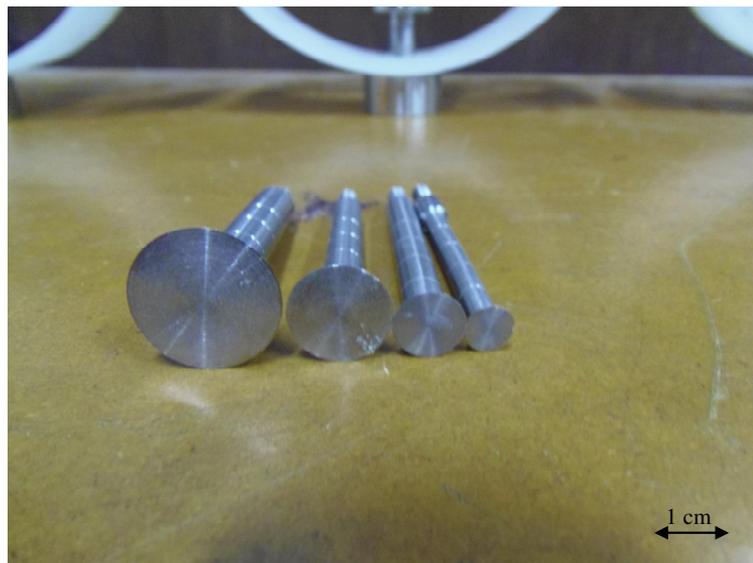


Figura 3-3: Foto da vista das bases das ponteiros com base alargada: 22,568mm, 15,958mm, 11,284mm e 7,979mm de diâmetro

O detalhamento do equipamento está no ANEXO E.

3.3. PREPARAÇÃO DOS MOLDES, MOLDAGEM, CURA E MISTURAS

Os ensaios foram divididos em duas etapas, uma com solo siltoso retirado em Nova Santa Rita (MIST-1 até MIST-52), e outra com solo caulim e bentonita (MIST-53 até MIST-84).

Dois processos de moldagem foram usados. Para as misturas com solo siltoso, foram utilizados os tubos de PVC e para as mistura com caulim e bentonita moldes bipartidos em PVC. Na Tabela 3-4 são listadas as variáveis testadas e na Tabela 3-5 são apresentadas todas as informações das misturas testadas na presente tese.

Tabela 3-4: Variáveis utilizadas

Mistura	70% Caulim +	Silte
	30% bentonita	
Umidade (%)	100	100, 135, 170
Teor de cimento (%)	3, 7, 10, 12, 30, 50	5,5, 9,0, 12,5, 10, 11, 16, 18, 25, 30, 32, 36,
Teor de cal virgem	10, 15, 20, 50	5,5, 9,0, 12,5, 10, 11, 16, 18, 25, 30, 32, 36, 50, 70, 102
Teor de cal hidratada	5, 10, 30	-
Teor de cinza	50, 100	-
Tempo de cura (dias)	7, 28, 90	7, 14, 28, 90
pH	2, 3, 6,5	6,5
Turfa (%)	5, 20	-
RFEM	5, 20	-
Ácido clorídrico/Sulfúrico	Sim	-
Turfa líquida	Sim	-
Ácido húmico	0,5, 2,1, 4,0	-

Tabela 3-5: Lista de misturas

MISTURAS																
MISTURA	MISTURA								TEOR DE	TEOR DE	pH	UMIDADE DA MISTURA (ω)	SUBSTÂNCIA			OBSERVAÇÃO
	cimento	ci (kg)	CAL	CAL	CINZA	Bentonita	Caulim	Silte	RES.	MAT.			TEMPO DE	TEOR	SUBSTÂNCIA	
	(%)		(%)	(kg)		(%)	(%)		EUC. (%)	ORG. (%)			CURA (DIAS)			
MIST-1	11%	75	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-2	18%	125	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-3	25%	175	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-4	32%	225	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-5	36%	250	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-6	-	-	11%	75	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-7	-	-	18%	125	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-8	-	-	25%	175	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-9	-	-	32%	225	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-10	-	-	36%	250	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-11	5,5%	37,5	5,5%	37,5	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-12	9,0%	62,5	9,0%	62,5	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-13	12,5%	87,5	12,5%	87,5	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-14	16,0%	112,5	16,0%	112,5	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-15	18,0%	125,0	18,0%	125,0	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	120%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-16	30%	220	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-17	50%	360	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-18	70%	510	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-19	100%	725	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-20	30%	175	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-21	50%	290	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-22	70%	405	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-23	100%	580	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-24	30%	144	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-25	50%	241	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-26	70%	337	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7,14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-27	100%	480	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7, 14, 28	-	-	RES. 14/28 DIAS
MIST-28	30%	144	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7, 14, 28	-	-	segregou
MIST-29	50%	241	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7,14, 28	-	-	segregou
MIST-30	70%	337	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7,14, 28	-	-	segregou
MIST-31	100%	480	-	-	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7, 14, 28	-	-	segregou

MISTURAS																
MISTURA	MISTURA							Silte	TEOR DE	TEOR DE	pH	UMIDADE DA MISTURA (ω)	SUBSTÂNCIA			OBSERVAÇÃO
	cimento (%)	ci (kg)	CAL (%)	CAL (kg)	CINZA	Bentonita (%)	Caulim (%)		RES.	MAT.			TEMPO DE CURA (DIAS)	TEOR	SUBSTÂNCIA	
									EUC. (%)	ORG. (%)						
MIST-32	-	-	30%	220	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-33	-	-	50%	360	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-34	-	-	70%	510	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-35	-	-	100%	725	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	100%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-36	-	-	30%	175	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-37	-	-	50%	290	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-38	-	-	70%	405	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-39	-	-	100%	580	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	135%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-40	-	-	30%	144	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-41	-	-	50%	241	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-42	-	-	70%	337	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7,14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-43	-	-	100%	480	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	170%	7, 14, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-44	-	-	30%	144	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7, 14, 28	-	-	segregou
MIST-45	-	-	50%	241	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7,14, 28	-	-	segregou
MIST-46	-	-	70%	337	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7,14, 28	-	-	segregou
MIST-47	-	-	100%	480	-	-	-	100%	-	11,30	3,7	205%	7, 14, 28	-	-	segregou
MIST-48	10%	72	-	-	-	30,00	70,00	-	-	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-49	30%	184	-	-	-	30,00	70,00	-	-	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-50	50%	266	-	-	-	30,00	70,00	-	-	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-51	10%	68	-	-	-	30,00	70,00	-	-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-52	30%	175	-	-	-	30,00	70,00	-	-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-53	50%	255	-	-	-	30,00	70,00	-	-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-54	10%	58	-	-	-	30,00	70,00	-	-	20,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-55	30%	153	-	-	-	30,00	70,00	-	-	20,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-56	50%	226	-	-	-	30,00	70,00	-	-	20,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-57	10%	68	-	-	-	30,00	70,00	-	5,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-58	30%	175	-	-	-	30,00	70,00	-	5,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-59	50%	255	-	-	-	30,00	70,00	-	5,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-60	10%	58	-	-	-	30,00	70,00	-	20,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-61	30%	153	-	-	-	30,00	70,00	-	20,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-
MIST-62	50%	226	-	-	-	30,00	70,00	-	20,00	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	-

MISTURAS																
MISTURA	MISTURA							Silte	TEOR DE	TEOR DE	pH	UMIDADE DA MISTURA (w)	SUBSTÂNCIA			OBSERVAÇÃO
	cimento (%)	ci (kg)	CAL (%)	CAL (kg)	CINZA (%)	Bentonita (%)	Caulim (%)		RES. EUC. (%)	MAT. ORG. (%)			TEMPO DE CURA (DIAS)	TEOR	SUBSTÂNCIA	
MIST-63	30%	184	10%		50%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-64	30%	184	20%		50%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-65	30%	184	50%		50%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-66	30%	184	20%		100%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-67	30%	184	50%		100%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-68	-	-	10%		50%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-69	-	-	20%		50%	30,00	70,00		-	5,00	6,5	100,00%	7, 28, 90	-	-	CAL VIRGEM
MIST-70	10%	68	-		-	30,00	70,00		-	-	3	100,00%	7, 28, 90	*	ÁCIDO CLORÍDRICO	-
MIST-71	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	3	100,00%	7, 28, 90	*	ÁCIDO CLORÍDRICO	-
MIST-72	50%	255	-		-	30,00	70,00		-	-	3	100,00%	7, 28, 90	*	ÁCIDO CLORÍDRICO	-
MIST-73	0%	0	-		-	-	100,00		-	-	2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-74	3%	17,5	-		-	-	100,00		-	-	2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-75	7%	41	-		-	-	100,00		-	-	2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-76	12%	70	-		-	-	100,00		-	-	2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-77	0%	0	-		-	-	100,00		-	-	1,2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-78	3%	17,5	-		-	-	100,00		-	-	1,2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-79	7%	41	-		-	-	100,00		-	-	1,2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-80	12%	70	-		-	-	100,00		-	-	1,2	20,00%	7	*	ÁCIDO SULFÚRICO	-
MIST-81	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28	0,50%	ÁCIDO HÚMICO	-
MIST-82	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28	2,10%	ÁCIDO HÚMICO	-
MIST-83	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28	4,00%	ÁCIDO HÚMICO	-
MIST-84	-		15,00		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28	4,00%	ÁCIDO HÚMICO	CAL VIRGEM
MIST-85	-		15,00		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28	-	-	CAL VIRGEM
MIST-86	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	100,00%	7, 28, 90	15,00%	TURFA LÍQUIDA	-
MIST-87	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	125,00%	7, 28, 90	15,00%	TURFA LÍQUIDA	-
MIST-88	30%	175	-		-	30,00	70,00		-	-	6,5	150,00%	7, 28, 90	15,00%	TURFA LÍQUIDA	-
MIST-89	-		5,00		-	30,00	70,00		5,00	-	6,5	100,00%	7, 28	15,00%	-	CAL HIDRATADA
MIST-90	-		10,00		-	30,00	70,00		5,00	-	6,5	100,00%	7, 28	15,00%	-	CAL HIDRATADA
MIST-91	-		30,00		-	30,00	70,00		5,00	-	6,5	100,00%	7, 28	15,00%	-	CAL HIDRATADA

* Foi acidificado até atingir o pH necessário.

Na preparação dos moldes foram testadas diversas técnicas de moldagem com objetivo de viabilizar a moldagem, reduzir perda de umidade e má compactação. Definiu-se o seguinte procedimento: compactação será realizada por meio de bastão com diâmetro de 2mm; as duas partes dos moldes de PVC colados com fita adesiva com largura de 40mm; a base do molde de alumínio, a secção cilíndrica em molde de PVC, e a vedação realizada com cola quente.

A quantidade de matéria orgânica, agente cimentante e solo para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizado, e o teor de água em relação ao somatório das massas de solo seco, matéria orgânica e agente cimentante. Os materiais foram pesados em balança com resolução de 0,01gf. O procedimento de moldagem realizado foi: pesagem do material (solo, matéria orgânica, aglomerante e água), mistura do material seco, adição de água e misturada até atingir homogeneidade adequada.

Esse tipo de molde foi utilizado para moldagens das misturas MIST-53 até MIST-96.

2ª moldes tubos de PVC:

O molde utilizado com tubos de PVC 50mm atendeu todos os requisitos da NBR 12024/92, a técnica foi somente adaptada para que se obtivesse mais precisão e controle devido as dificuldade que os solos moles apresentam. Os moldes cilíndricos eram divididos em duas partes, uma com 100mm de altura e outra com 50mm que eram unidas com uma fita adesiva de 40mm. A finalidade da divisão é para manter a integridade amostra. Após a cura, a seção de 50mm é cortada com serra e destacada. A fita adesiva que tampa o fundo é retirada e o molde é cortado lateralmente em duas ou três partes com serra circular para extração do corpo de prova assim evitando qualquer dano na sua integridade. A Figura 3-4 mostra foto dos moldes utilizados.



Figura 3-4: Foto dos moldes com tubo de PVC

Os corpos-de-prova, depois de preparados, foram colocados dentro de sacos plásticos e vedados evitando perda de água. Após, os moldes foram colocados em ambiente com temperatura de cura de 21°C. Os corpos de prova das mistura com cal virgem foram colocados diretamente na água.

Nas misturas com bentonita cálcica não se obteve altas umidades. Assim testou-se misturas com bentonita sódica, chegando ao um teor ótimo de 30% e 70% de caulim. Com teores inferiores a 30% de bentonita sódica criava-se uma lamina de ± 3 mm no topo do molde para umidades da mistura acima de 100%.

O teor de cinza e cal entre as misturas MIST-63 a MIST-69 foram dosados sobre a massa de solo seco da mistura (somatório de da quantidade de bentonita, caulim e cimento) e a água sobre o somatório total de bentonita, caulim, cimento, cinza e cal.

As amostras foram submersas no tanque de água por 24 horas antes do ensaio de compressão simples e cravação, com exceção das misturas com cal virgem que eram colocadas no tanque logo após a moldagem devido à sua perda de umidade em função do aumento de temperatura.

Os corpos-de-prova das misturas MIST-48 até MIST-84 foram, então armazenados e curados por um período de 7 dias, 28 dias, 90 dias. As misturas MIST-1 até MIST-52 foram curadas por período de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

O teor de ácido clorídrico e sulfúrico nas misturas MIST-70 a 80 foram adicionados até atingir o pH desejado.

Para o solo coletado em Nova Santa Rita utilizado nas misturas MIST-1 até MIST-52 foi separada a quantidade necessária para moldagem de todas as misturas e homogeneizada mecanicamente para evitar diferentes teores de umidade e propriedades do solo. Dois dias antes da execução das amostras era medido o teor de umidade.

3.3.1. Ensaio de compressão não-confinada

Os ensaios de compressão não-confinada foram realizados de acordo com os procedimentos prescritos na norma NBR 12777/1995. O equipamento empregado consistiu de uma prensa Wykeham Farrance instrumentada com uma célula de carga, marca Kratos, e um transdutor de deslocamento Gefran conectados a um sistema automatizado de leitura e registro dos dados. A velocidade empregada foi de 1,14mm/min.

Para critério de comparação foram utilizados ensaios de tração por compressão diametral conforme definido na norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

3.3.2. Solo cimento-silte

A principal mistura foi com silte de Nova Santa Rita que variam entre MIST-1 e MIST-52. Foram utilizados cinco teores de umidade, 100%, 120%, 135%, 170% e 205% e quatro teores de cimento CP V ARI RS e cal virgem, 30%, 50%, 70% e 100%. As misturas com teor de umidade de 205% segregaram, impossibilitando o uso de seus resultados.

Após foram desenvolvidas misturas com caulim e bentonita para simular outras variáveis dos solos moles orgânicos.

3.3.3. Solo-cimento/cal, turfa/resíduo de folha de eucalipto moída

Com objetivo de avaliar o comportamento do solo quanto ao teor de matéria orgânica, resíduos e substância utilizou-se a argila caulim com bentonita sódica. A primeira etapa foi identificar as propriedades básicas dessa mistura para estabelecer critérios para comparação com adição de turfa, resíduo de folha de eucalipto, ácido clorídrico e ácido húmico. A mistura básica varia entre MIST-48 e MIST-50 (na Tabela 4-4 são apresentadas todas as misturas testadas na presente tese.).

Essas misturas foram testadas com teor de umidade 100% e diferentes teores de cimento sendo eles 10%, 30% e 50%. Na segunda etapa foram utilizadas adições de turfa em teores de 5% e 20% às MIST-51 a MIST-56, variando também teor cimento 10%, 30% e 50%. Testaram-se misturas com adição de resíduo de folha de eucalipto moída com teores iguais as adições de turfa, assim como de teores de cimento (MIST-57 a 62).

Entre as misturas MIST-63 e MIAT-69 foram realizadas combinações entre cimento+cal+cinza e cal+cinza, alterando os teores de cada agente cimentante e mantendo constante o teor de umidade (100%), teor de turfa (5%), teor de caulim, teor de bentonita e pH (6,5). Após todos estes ensaios foram testados os efeitos da adição de ácido húmico e através da adição do ácido clorídrico as alterações nas propriedades do solo que o pH ácido poderia causar.

Seguiram-se todos os critérios de moldagem, cura e rompimento descritos no item 3.3.

3.3.4. Ácido Clorídrico

O ácido clorídrico (HCL) utilizado continha coloração clara e ligeiramente amarelado, com odor pungente, contendo cerca de 33% de Cloreto de Hidrogênio, solução aquosa de HCl na concentração de 1mol/L, pH=0.

As misturas (MIST-70 a MIST-72) foram primeiramente misturadas com caulim e bentonita e depois se adicionou água até atingir teor de umidade de 100%. Após as misturas estarem homogêneas acidificou-se com ácido clorídrico até atingir o pH=2 e 3, e por último misturou-se cimento.

Nos ensaios com o ácido clorídrico, utilizaram-se as misturas listadas na Tabela 3-5 (MIST-75 a MIST-77). Logo em seguida fazia-se a moldagem dos corpos de prova, sempre seguindo os cuidados para evitar perda de água. As curas foram realizadas para 7, 28, e 90 dias.

3.3.5. Mistura solo-ácido sulfúrico

O ácido sulfúrico (H₂SO₄) utilizado é uma substância incolor, viscosa, oxidante com pH=0,4.

O programa experimental foi dividido em duas etapas, composta primeiramente por ensaios de pH e posteriormente de compressão não-confinada.

Na escolha da quantidade de ácido sulfúrico, foi utilizado o método ICL proposto por Rogers et al (1997) para determinação do teor ótimo de adição de cal, (Consoli *et al*, 1997). Esse método foi utilizado com objetivo de verificação de sua realação com a acidez do solo utilizado nos experimentos. O ponto de fixação obtido a partir da Figura 3-5, corresponde um pH de 1,2 – 15% ácido sulfúrico.

Em seguida foram realizadas as misturas e moldados os corpos de prova. Os corpos de prova foram curados por 7dias.

Nestes ensaios não foi adicionado bentonita sódica. Foram testadas misturas da argila caulim em proporções de 0,1% e 10% de ácido sulfúrico e 0%, 3%, 7% e 12% de cimento Portland. Empregou-se umidade ótima de 20% em todas as misturas, obtida através dos ensaios de caracterização realizados no trabalho de Rosa (2009).

Na preparação dos corpos-de-prova, a massa específica aparente seco utilizado para a compactação da argila foi de 15,0kN/m³.

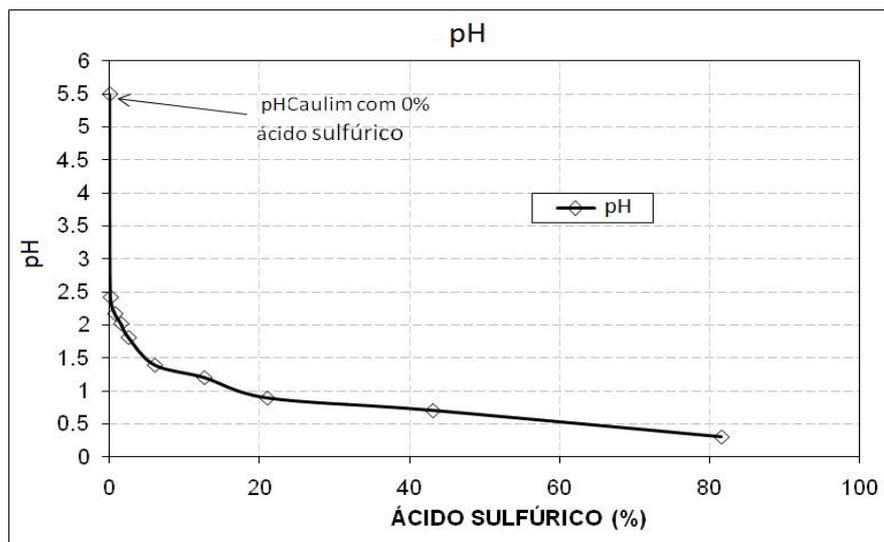


Figura 3-5: Efeito no pH devido adição de ácido sulfúrico

Os materiais utilizados foram argila (caulim), ácido sulfúrico, água e cimento. Os materiais foram pesados com resolução de 0,01gf e em seguida foram misturados solo e cimento, com auxílio de uma espátula metálica, sendo então adicionada água imediatamente.

Depois de misturados, argila, caulim e cimento, feita a adição de água, e posteriormente foi adicionado ácido sulfúrico. Em seguida foi realizada a homogeneização necessária para a moldagem dos corpos de prova. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação. Na moldagem dos corpos de prova foram tomados alguns cuidados: moldagem rápida (± 15 minutos), pois as reações do cimento começam a se processar no momento em que este entra em contato com a água (Clogh *et al.*, 1979). A quantidade de cimento, água e ácido sulfúrico foram determinadas em relação à massa de material seco. O percentual de ácido sulfúrico e cimento foram aplicados sobre a massa do solo seco. Da quantidade de água adicionada às misturas foi descontado o teor de ácido sulfúrico.

3.3.6. Ácido húmico

Nos ensaios com ácido foram utilizados dois tipos de ácidos húmicos descritos no capítulo anterior, um em estado sólido e outro líquido.

O ácido húmico em estado físico sólido (pó), com ponto de fusão 300°C do fornecedor Sigma-Aldrich Brasil Ltda.

O outro ácido húmico extraído da leonardita doado pela empresa JDMV Brasil foi utilizado na forma líquida entre as misturas MIST-81 a MIST-83 (Tabela 4-4). Utilizaram-se dosagens de 0,5%, 2,1%, e 4,0% de ácido húmico. A quantidade de ácido húmico foi calculada em relação ao somatório das massas de solo seco e o restante foi completado com água para atingir a umidade de 100%.

Nos ensaios com ácido húmico manteve-se constante o teor de cimento e cal, caulim, bentonita, e umidade para todos os corpos de prova.

3.3.7. Turfa líquida

Durante a procura de um material que tivesse propriedades similares a solos orgânicos testou-se também a turfa líquida utilizado na agricultura. O Mega Húmus obtido através da empresa Preserv – Agro Sustentável contém 12% de ácido húmico, 10% de ácido fulvico, 13,4% de carbono orgânico, 2% de nitrogênio, 1% aminoácidos e 61,5% água.

No preparo dos corpos de prova (MIST-91 a MIST-93) adicionou-se a turfa líquida em relação ao somatório das massas de solo seco.

CAPÍTULO 4

4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são mostrados os resultados da caracterização dos solos e adições utilizados na pesquisa. Os materiais foram caracterizados de diversas formas desde ensaios simples como curva granulométrica até ensaios de espectroscopia por infravermelho.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Análise elementar CHNS

A análise elementar de CHNS teve como objetivo identificar e quantificar quimicamente nas amostras de turfa e folhas de eucalipto moídas a quantidade de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre.

O princípio básico da análise elementar é a combustão a alta temperatura de compostos orgânicos, de sólidos inorgânicos e/ou amostras líquidas.

Para determinação da fórmula molecular de um composto desconhecido são necessários três procedimentos:

- Análise elementar qualitativa: descobrir que tipos de átomos estão presentes (C, H, N, S, etc).
- Análise elementar quantitativa (CNHS): descobrir os números relativos (%) de cada tipo de átomos diferentes na molécula.
- Determinação da massa molecular: determinação da massa em um mol de molécula.

A tecnologia associada à análise CNHS é a combustão, dessa forma a amostra é totalmente queimada e em seguida os produtos da sua combustão são analisados.

A combustão completa é geralmente seguida de fornecimento de oxigênio em excesso durante o processo. Os produtos analisados são CO_2 para análise de C, H_2O para análise de H e NO para análise de N.

Os produtos da combustão são retidos em colunas absorvedoras e específicas para CO_2 , H_2O e NO , assim sistemas de medida de massa (balança) fazem a leitura da quantidade de massa adsorvida e sua conversão em porcentagem (Figura 4-1e Figura 4-2).

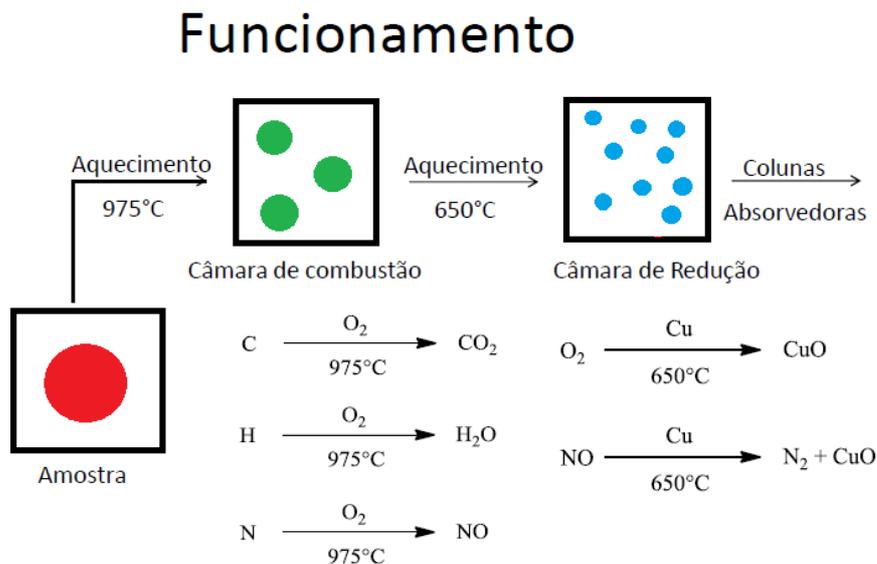


Figura 4-1: Desenho esquemático da análise elementar de CNHS

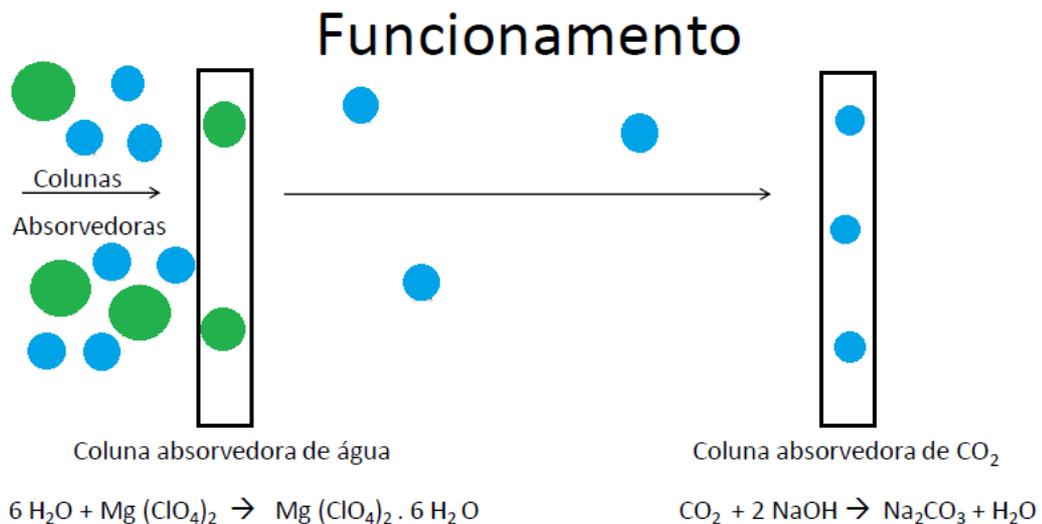


Figura 4-2: Desenho esquemático da leitura de massa adsorvida no ensaio de CNHS

Pela diferença de massa das colunas a absorvedoras antes e após o processo, obtém-se a massa de CO₂ e H₂O que permite estimar a porcentagem de C e H.

4.2.2. Fracionamento químico e quantificação do ácido húmico

Para quantificação separou-se uma massa de amostra de turfa de 1,0g e adicionou-se 30 ml de HCl 0,1mol L⁻¹, colocou-se no equipamento de agitação por 2 horas. Após a amostra foi colocada na centrífuga (6 min, 2.000 rpm) para sedimentação do extrato ácido. Depois a substância líquida foi separada do material sólido. Nos casos em que o material se mantiver não sedimentado na centrifugação pode ser realizada mais de uma vez, caso a substância continue escura deve-se separar sólido do líquido, depois adicionar HCl 0,1mol L⁻¹, agitar e centrifugar novamente. A seguir procedeu-se as extrações com 30 ml de NaOH 0,5 mol.L⁻¹ sob agitação de 3 horas até que o sobrenadante ficasse incolor (5 extrações). O volume do extrato alcalino contendo as substâncias húmicas solúveis (SHs) foi medido e retirado com uma alíquota de 10 ml para análise de C, Fe e Al. A solução alcalina foi acidificada a pH 2,0 com HCl 4mol L⁻¹, e deixada em repouso por 24 horas em repouso. Separou-se o ácido fúlvico (AF) sobrenadante e ácido húmico (AH) precipitado por centrifugação. O volume do extrato de AF foi medido. Prepararam-se as amostras para oxidação do carbono com dicromato de potássio em meio ácido a 60°C durante 4 horas, após os teores de carbono no extrato ácido, no extrato das substâncias húmicas solúveis (C_{SHs}) e no extrato de ácido fúlvicos (C_{AF}) foram quantificados, determinando-se a absorbância em 580nm com o Spectrofotômetro Shimadzu FTIR 8300, (Dick et al., 1998). Os teores de C do solo referente aos ácidos húmicos (C_{AH}) foram calculados e a partir da equação $C_{AH}=C_{SHs}-C_{AF}$. O teor presente de C na forma de huminas (C_{HU}) foi obtido através da equação $C_{HU}=C-(C_{SHs}-C_{HCL})$, onde C é o teor de carbono do solo.

A purificação dos ácidos húmicos foi feita com HF/HCl 5/5%. Adicionou-se 30ml de solução seguida de agitação (2 horas). Repetiu-se o procedimento por 5 vezes. Após foi adicionado 30ml de H₂O deionizada para a lavagem (retiro de resquício de solução na amostra) seguida por agitação (2 horas), repetiu-se o procedimento por 5 vezes.

No ANEXO C - está descrito o preparo das soluções utilizadas no fracionamento.

4.2.3. Moagem

A moagem é um processo de cominuição de materiais que tem por objetivo reduzir o tamanho das partículas. É necessária em materiais cimentícios e na maior parte das adições minerais, uma vez que acelera as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material. Nessa pesquisa os tempos de moagem foram pré-estabelecidos em 4, 8, 12 e 18 horas, com o objetivo de identificar o tempo mínimo suficiente para obter folhas moídas com granulometria fina. Como a folha de eucalipto é um material volumoso, a quantidade de folhas não ultrapassou 500g, devido à capacidade do jarro de porcelana usado na moagem. O moinho utilizado foi o de bolas horizontal (Figura 4-3) com jarro de porcelana de diâmetro igual a 350 mm, movido por um motor com rotação de 40rpm.

A razão entre carga dos corpos moedores e a quantidade de folha de eucalipto foi constante, utilizou-se uma proporção de 5:1 (bolas : material), o limite de cada moinho é de aproximadamente 7,5kg de solo e pesos. Utilizou-se a porção de 0,5kg de folhas de eucalipto para 2,5kg de bolas, em um total de 3,0kg. A escolha desta proporção foi embasada nos resultados obtidos por Pouey (2006), que utilizou o mesmo equipamento.



Figura 4-3: Moinho de bolas

As bolas utilizadas na presente pesquisa foram de alumina com diâmetros variando entre 10 e 20 mm. Após a moagem as amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização do material.

Para caracterização do tamanho de grãos foi utilizado o equipamento CILAS 1180 (Figura 4-3). O equipamento utiliza somente lasers como fontes de luzes, que possuem faixa analítica de 0,04 microm a 2500 microm, 64 detectores, 100 classificações de tamanho de partículas, três emissores a laser e uma câmara para análise das partículas maiores.

4.3. MATERIAIS

4.3.1. Silte

A amostra de silte foi retirada próxima à rótula entre a BR-448 e BR-386 no município de Nova Santa Rita, conforme as coordenadas latitude: 29°52'56.11"S e longitude 51°13'44.50"O em maio de 2013. Uma camada superficial de 3m de profundidade foi retirada a fim de evitar que a amostra tivesse raízes, resíduos ou outros materiais. Após a coleta mecânica, o solo foi armazenado em recipientes adequados para que não ocorresse alteração na umidade natural da amostra. A umidade natural da amostra variou entre 85% e 100%. A massa específica real dos grãos foi determinada através de picnometria (25,54 kN/m³) e o teor de matéria orgânica obtido foi de 11,3%, Winter (2013). A Figura 4-4 ilustra a localização da coleta da amostra.



Figura 4-4: Localização da retirada da amostra (Winter, 2013)

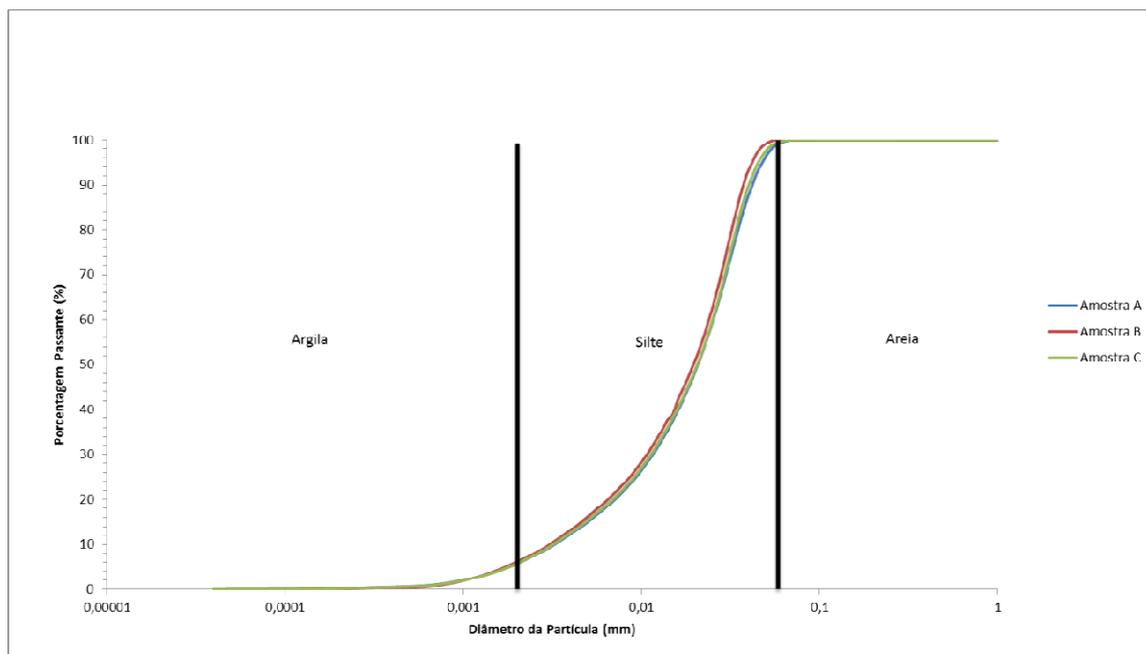


Figura 4-5: Curva granulométrica (Winter, 2013)

A Figura 3-5 acima mostra a curva granulométrica do solo utilizado. O limite de liquidez obtido foi de 58%, o limite de plasticidade foi de 35%, assim sendo, o índice de plasticidade ficou em 23%, Winter (2013). O silte é composto por 95% partículas entre 0,002 a 0,06mm, 5% de partículas menores que 0,006mm.

As Tabela 4-1 e Tabela 4-2 mostram os resultados do fracionamento químico e da análise elementar realizadas por Winter (2013).

Tabela 4-1: Resultado análise elementar do solo, (Winter, 2013)

Percentuais em massa (%)				
	Nitrogênio	Carbono	Hidrogênio	Enxofre
Solo	0,09	1,35	1,34	0,52

Tabela 4-2: Resultado quantificação ácido húmico do solo, (Winter, 2013)

Substância	Porcentagem no solo (massa)
Ácido fúlvico	0,20%
Ácido húmico	1,12%
Humina	1,24%

4.3.2. Caulim

O caulim utilizado nesta pesquisa é classificado como uma argila-siltosa, constituída basicamente pelos argilo-mineral caulinita e haloisita e em menor proporção por ilita, (FEUERHAMEL, 2000). Na composição do caulim existe um teor baixo de ferro apresentando uma cor branca ou rosada. Os caulins contêm silicatos de alumínio (hidratados cristalinos de composição química $Al_2.2SiO_2.2H_2O$) e outros metais além de impurezas ou materiais absorvidos.

4.3.2.1. Caracterização básica

O caulim utilizado é classificado comercialmente como “caulim rosa” e é extraído do município de Pantano Grande - RS.

O caulim é composto por 25,08% de argila (<0,002mm), 73,75% de silte (0,002 a 0,06mm) e 1,17% de areia fina (0,06 a 0,2). Abaixo estão apresentados os resultados de caracterização das propriedades físicas do caulim. Na Figura 4-6 é mostrada a análise granulométrica realizada através da técnica de difração à laser. Tabela 3-3 são mostrados os índices físicos do solo.

Tabela 4-3: Propriedades físicas caulim

Propriedades físicas	Valores médios
Peso específico real dos grãos	26,0kN/m ³
Areia fina	1,17%
Silte	73,75%
Argila	25,00%
Limite de liquidez	39,00%
Limite de plasticidade	34,00%
Índice de plasticidade	5,00%

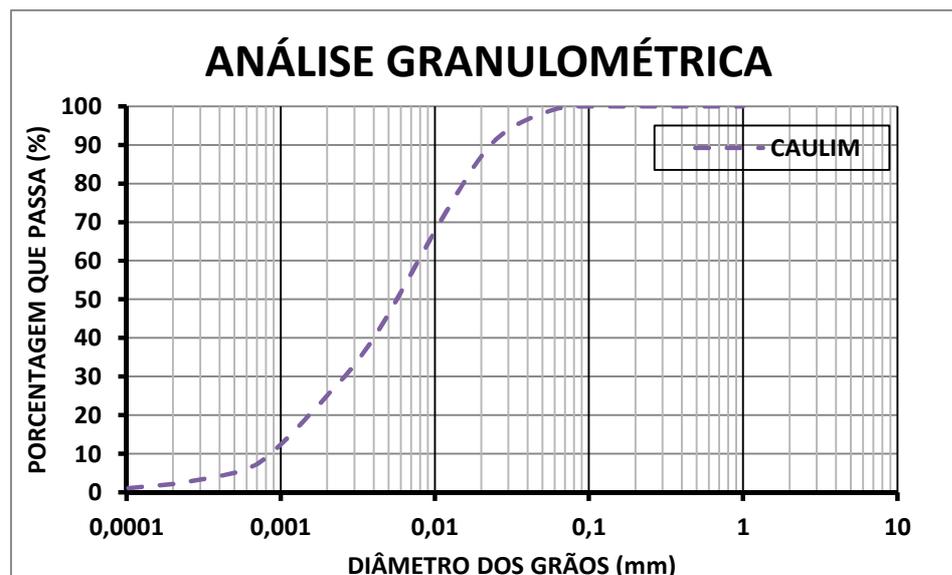


Figura 4-6: Curva granulométrica caulim

4.3.3. Bentonita

A bentonita sódica é composta por 6,36% de argila (<0,002mm), 3,37% de silte (0,002 a 0,06mm) e 89,87% de areia fina (0,06 a 0,2). Abaixo estão apresentados na Figura 4-7 curva granulométrica realizada através da técnica de difração à laser e propriedades físicas da bentonita sódica e seus índices físicos Tabela 4-4.

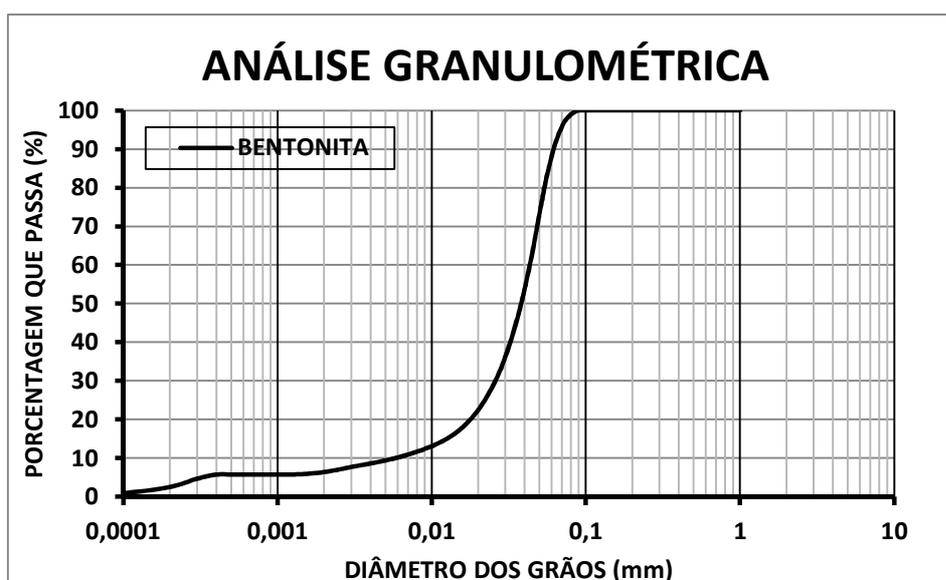


Figura 4-7: Curva granulométrica da bentonita sódica

Tabela 4-4: Propriedades físicas da bentonita sódica

Índices Físicos	Bentonita
Limite de Plasticidade, LP	55%
Limite de Liquidez, LL	400%
Peso específico	3,09g/cm ³

4.3.4. Folhas de eucalipto

As árvores de Eucalipto podem atingir até 100 metros de altura. Geralmente o eucalipto é encontrado em regiões com muito sol. Sua madeira é aproveitada para a indústria celulósica, ou seja, na fabricação do papel. Também é muito utilizada na construção civil, indústria de perfumes e óleos. As folhas das árvores de eucalipto são semelhantes: simples, longo-acuminadas, perenifólias, coriáceas e com glândulas oleíferas.

Utilizou-se resíduo de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) nessa pesquisa devido a sua disponibilidade na grande Porto Alegre e como comparativo sendo que o resíduo não sofreu reações químicas de decomposição.

Nesse trabalho as folhas do eucalipto foram utilizadas para simular os efeitos da matéria orgânica no solo. O resíduo é composto por 5,01% de material com diâmetro menor que 0,002mm, 10,78% de material com diâmetro entre 0,002 a 0,06 mm e 84,21% de material entre 0,06 a 0,2. Segue na Figura 3-8 a análise granulométrica realizada através da técnica de difração à laser:

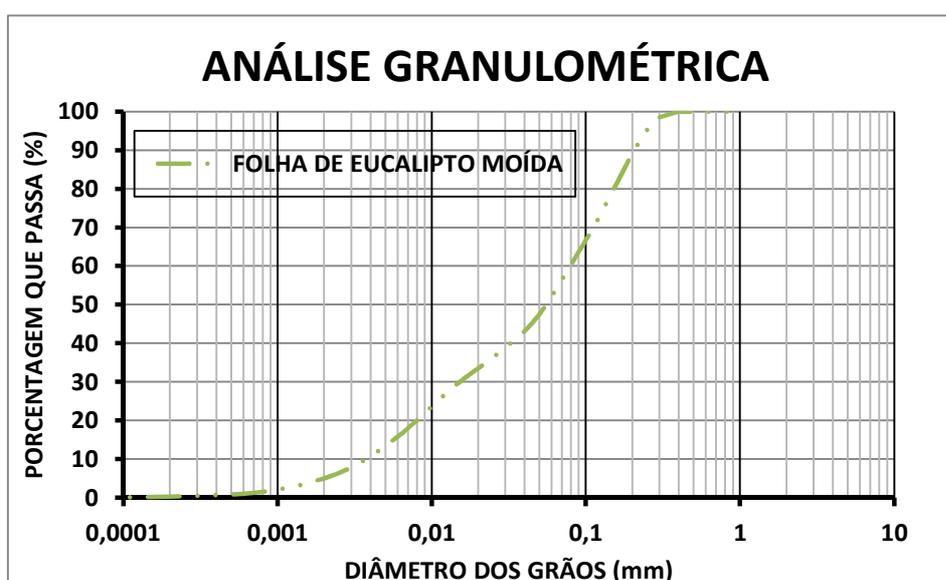


Figura 4-8: Análise granulométrica da folha de eucalipto moída

Antes de qualquer ensaio as folhas de eucalipto foram limpas para retirada de qualquer galho ou sujeira, depois secas na estufa e depois de moídas manualmente e no moinho. Segue Tabela 4-5 análise elementar realizada na amostra para melhor caracterização.

Tabela 4-5: Análise elementar do resíduo de folha de eucalipto

Percentuais em massa (%)				
	Nitrogênio	Carbono	Hidrogênio	Enxofre
Folha Euc.	2,00	46,58	4,27	0,22

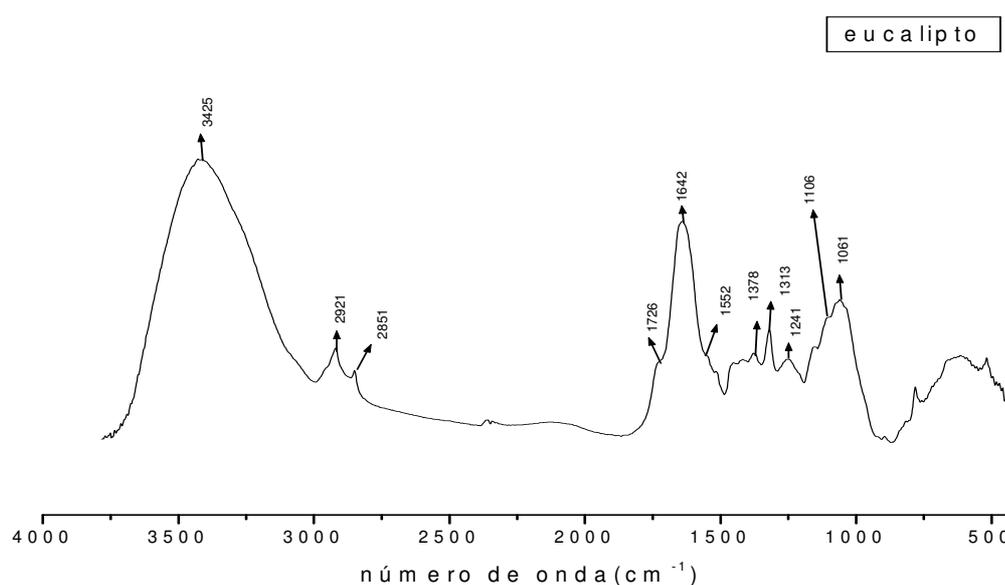


Figura 4-9: Espectro de FTIR do eucalipto

O espectro de FTIR do eucalipto (Figura 4-9) apresenta as seguintes bandas de absorção e suas respectivas atribuições: absorção em 2921 – 2851 cm^{-1} devido ao estiramento C-H de alifáticos; região em 1726 cm^{-1} referente ao estiramento C=O de COOH e de acetonas; banda em 1642 - 1552 cm^{-1} referente estiramento C=C de aromáticos; bandas 1378 - 1313 cm^{-1} referente deformação de O-H, banda de CH₃, ou estiramento C-O; bandas menos intensas em 1241 cm^{-1} devido ao estiramento de C-O; e bandas 1106 - 1061 cm^{-1} atribuído ao estiramento C-O de polissacarídeos.

4.3.5. Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) da marca Cauê. Este tipo de cimento possui a vantagem de atingir altos valores de resistência

em baixos períodos de cura, permitindo uma desforma mais rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer (que resulta na elevação dos conteúdos de alita e C_3A), e pela moagem mais fina do cimento. Assim quando reage com a água adquire elevadas resistências, com maior velocidade. Segue na Tabela 4-6 suas características básicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4-6: Características físicas e mecânicas do cimento CP V – ARI (INTERCEMENT – GRUPO CAMARGO CORRÊA)

	FINURA MASSA ESPECÍFICA (KG/M ³)	TEMPO DE PEGA		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO			
		INÍCIO (min)	FIM (min)	1 DIA (Mpa)	3 DIAS (Mpa)	7 DIAS (Mpa)	28 DIAS (Mpa)
MÉDIA	3,11	195	296	23,5	39,2	45,2	53,3
MÍNIMO	3,11	165	258	22,1	37,8	41,6	51,4
MÁXIMO	3,11	218	365	25,2	41,8	47,2	53,6
DESV. PADRÃO	0	14	27	0,9	0,9	1,2	1,3

O cimento é composto por 10,0% de partículas com diâmetro menor que 0,002mm, 14% de partículas com diâmetro entre 0,002 a 0,06mm e 75% das partículas com diâmetro entre 0,06 a 0,2mm. Segue a curva granulométrica abaixo realizada através da técnica de difração à laser (Figura 3-10):

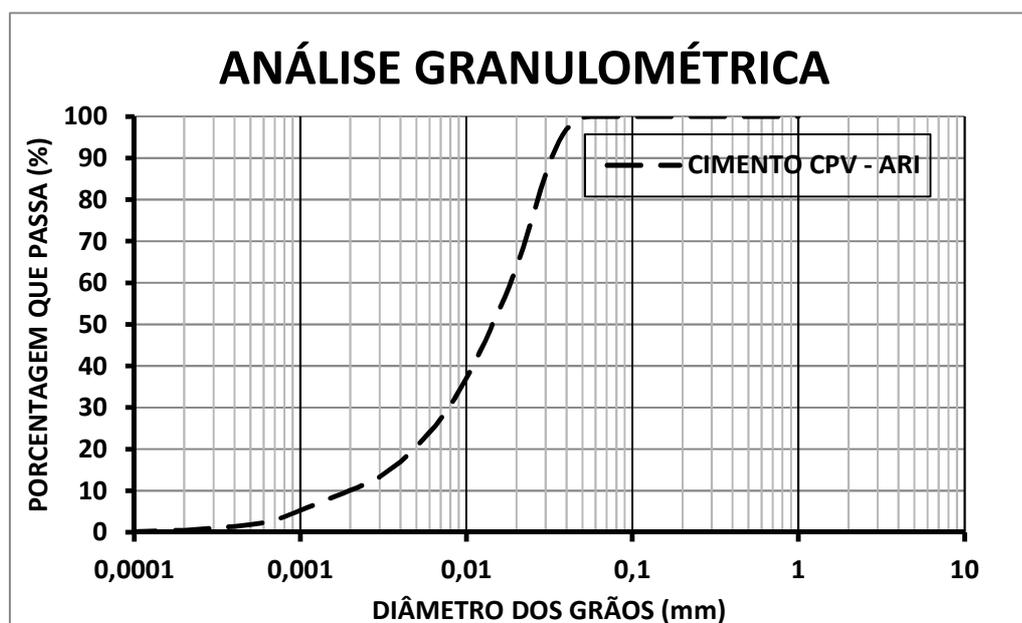


Figura 4-10: Análise granulométrica do cimento CP V – ARI

4.3.6. Cal hidratada

Nos ensaios realizados com cal, utilizou-se cal hidratada dolomínica, chamada comercialmente de Primor Extra, produzida na cidade de Caçapava do Sul – RS. Segue abaixo a caracterização do material fornecido pelo fabricante e a análise comparativa com as exigências da NBR 7175. Segue abaixo na Tabela 4-7 a caracterização da cal:

Tabela 4-7: Propriedades físicas da cal hidratada

Propriedades	Limites da NBR 7175	Análise
Densidade	≤ 600g/l	510g/l
Perda ao fogo	-	23,30%
Resíduo insolúvel	-	4,70%
CO ₂ (anidrido carbônico)	≤ 5%	2,20%
Óxidos totais	≥ 88%	94,80%
Óxidos ã hidratados	≤15%	11,00%
CaO	-	44,80%
MgO	-	27,90%
Umidade	≤1,5%	0,60%
Resíduo na peneira 0,600mm	≤ 0,5%	0,00%
Resíduo na peneira 0,075mm	≤ 15%	8,00%

* Fonte fabricante.

4.3.7. Cal virgem

A qualidade de uma cal hidratada está ligada proporcionalmente a qualidade de produção. Uma das principais características de uma cal hidratada é a capacidade de reagir com as impurezas suspensas na água através de condicionamento químico. Esta reatividade depende, além das características físicas como a granulometria e superfície específica, da pureza da cal virgem representada pelos teores de cálcio e magnésio, umidade, CO₂ e tipo de calcinação sofrida.

Se a cal virgem for calcinada em temperatura acima do ideal forma-se uma camada superficial de aproximadamente 0,8 a 1,2mm de composto de cálcio sinterizado de alta dureza que é solúvel em ácido clorídrico, porém, não é solúvel em água no tempo hábil do processo de tratamento apresentando-se na forma de areia abrasiva.

A cal virgem utilizada foi da marca Quallical, produzida na cidade de Santo André – SP segue Tabela 4-8 com suas propriedades físicas:

Tabela 4-8: Propriedades físicas da cal virgem

Ensaio	Resultado
CaO total	67,00%
Ca(OH) ₂	89,00%
MgO	2,00%
Insolúveis em HCL	1,50%
Umidade	2,00%
CO ₂	1,00%
Granulometria em 200mesh	5,00%
Densidade aparente	900kg/m ³
Peso específico	3,20g/cm ³

*Fonte fabricante

4.3.8. Turfa

A amostra de turfa foi retirada em Bal. Arroio do Silva – SC, conforme as coordenadas latitude: 29°1'3.95"S e longitude 49°30'12.32"O, onde a empresa Florestal S.A extrai turfa, conforme está localizada na Figura 4-11.

A área onde a turfa é retirada estava limpa sem vegetação, com drenagem em forma de valas.

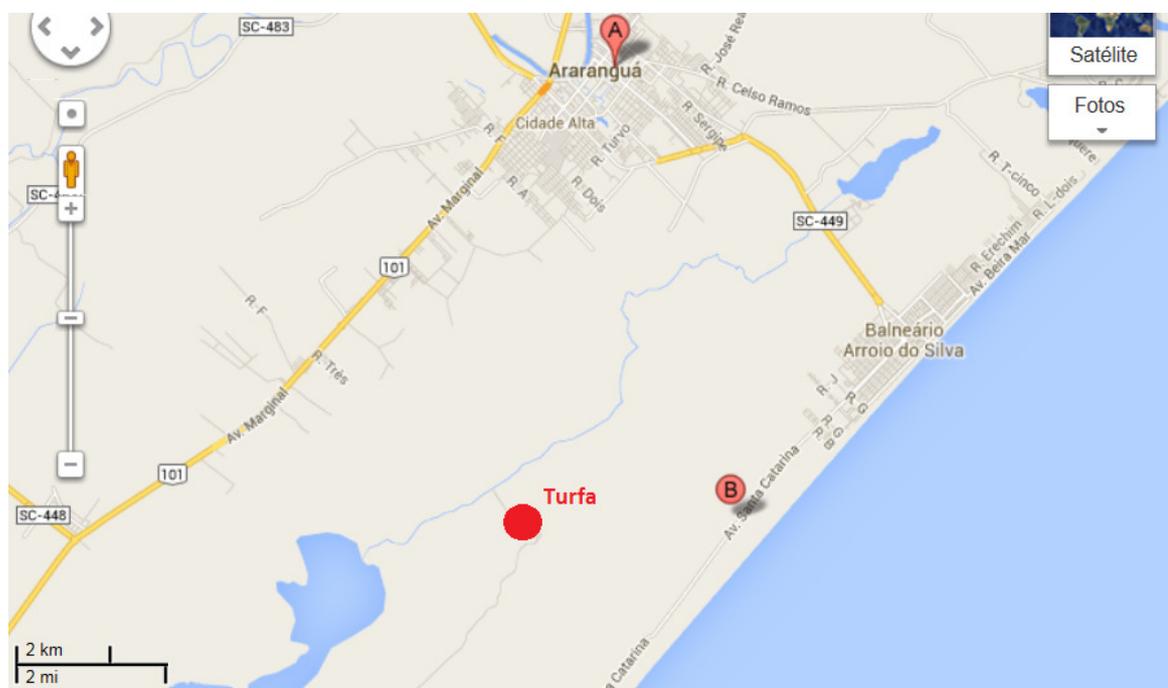


Figura 4-11: Localização da amostra retirada da turfa

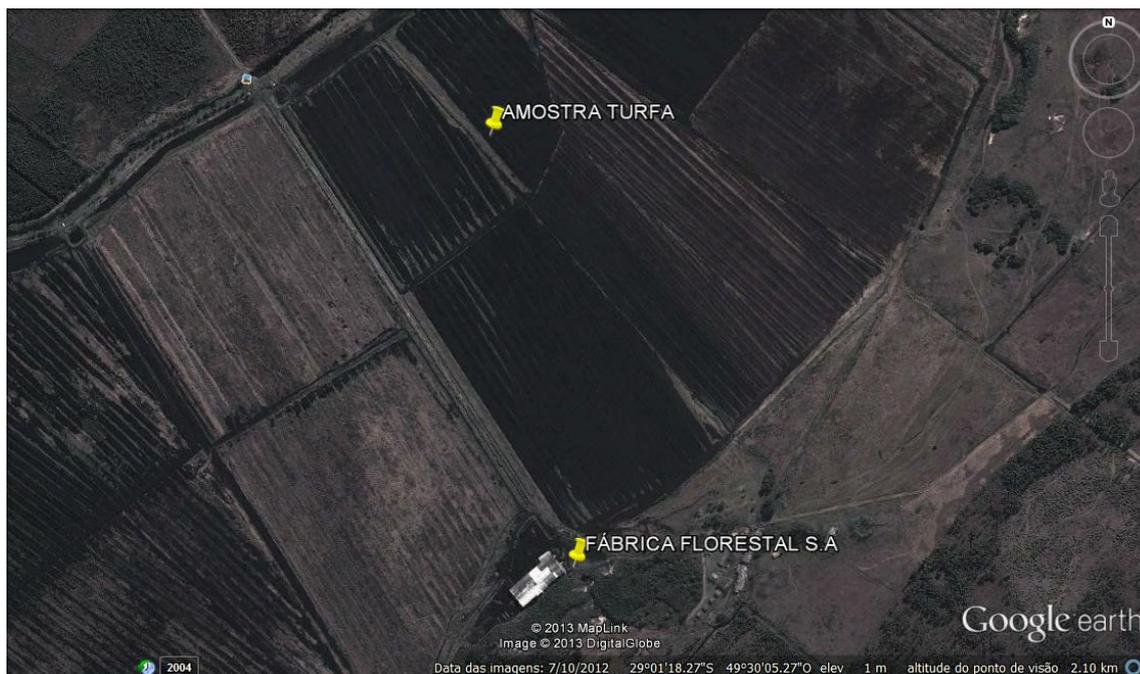


Figura 4-12: Localização da amostra retirada da turfa

Para determinação do grau de decomposição da turfa foi utilizado o método de Von Post (Franchi, 2000). Caracteriza-se com um material extremamente ácido, fracamente decomposto, líquido que corre entre os dedos quando se espreme o material é de cor “escura”, não passa qualquer fração de sólidos entre os dedos, não tem aspecto gelatinoso e sim arenoso com alguns grãos maiores de estrutura vegetal. De acordo com Von Post é classificado o grau de humificação “H3”. As Tabela 4-9 e Tabela 4-10 fornecem os resultados obtidos da análise elementar e química da turfa.

Tabela 4-9: Análise elementar da turfa decomposta

	Percentuais em massa (%)			
	Nitrogênio	Carbono	Hidrogênio	Enxofre
Turfa	1,76	44,72	2,40	0,80

Tabela 4-10: Análise química da turfa decomposta

Ensaio	Resultado
Boro	96,7 mg/kg
Cálcio	3,894 mg/kg
Carbono orgânico total	37,90%
Enxofre total	1,867 mg/kg
Fósforo total*	ND
Magnésio	1,134 mg/kg
Manganês	64,4 mg/kg
Nitrogênio amoniacal	307 mg NH ₃ N/kg
Nitrogênio total kjeldhl	10,506 mg NH ₃ /kg
Nitrato*	ND mg N/kg
Nitrito*	ND mg N/kg
pH	3,07
Poder de neutralização	< 1,0%
Potássio	223 mg/kg
Sódio	109 mg/kg

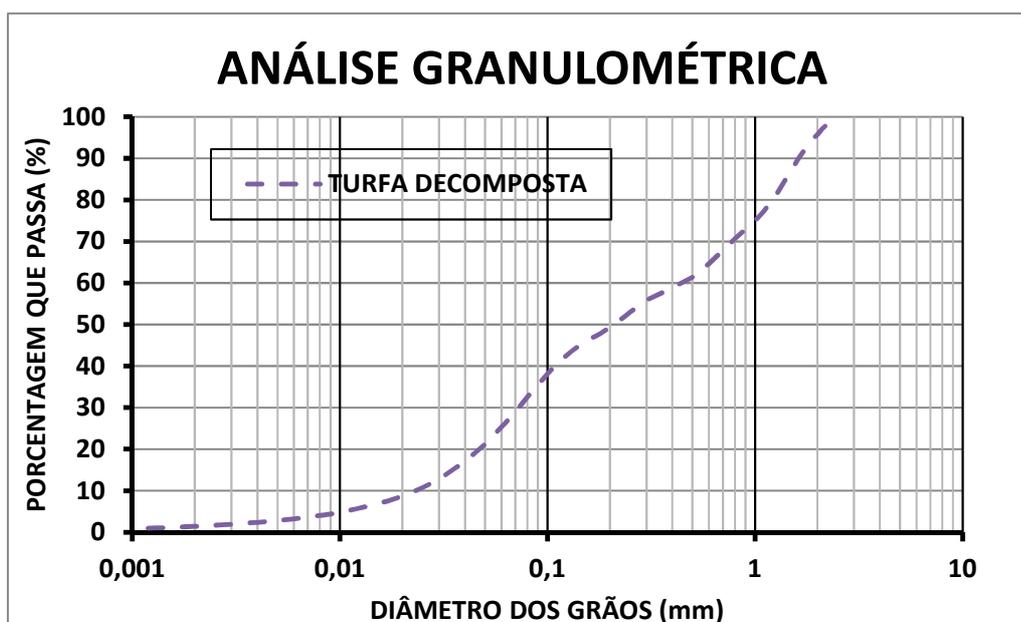


Figura 4-13: Análise granulométrica turfa decomposta

A turfa é composta por 3% partículas <0,005mm, 18% de partículas entre 0,005 a 0,05 mm, 37% de partículas entre 0,05 a 0,4mm, 37% de partículas entre 0,4 a 2 mm e 5% de partículas entre 2 a 5 mm conforme a Figura 4-13.

Para determinação do teor de matéria orgânica contida na turfa, foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 13600/1996. As amostras da turfa foram levadas a estufa com temperatura controlada entre 105°C a 110°C que foram mantidas por 24 horas. Após a secagem, as amostras foram colocadas na mufla. Gradualmente a temperatura foi elevada até atingir

(440±5) °C. Quando apresentou constância em massa foi retirada, pesada e calculada o teor de matéria orgânica e solo mineral.

Turfa - pH=3,07; teor de matéria orgânica= 79,0%, massa específica= 1,09g/cm³, peso específico dos grãos 10,70 kN/m³.

Nas Tabela 4-11 e Tabela 4-12 são apresentados os resultados dos espectros do FTIR (Figura 4-14).

Tabela 4-11: Resultado quantificação ácido húmico da turfa

Concentração C (mg/g)			
C _{AF}	C _{SH}	C _{HCL}	C _{AH}
51,96	218,43	2,77	166,47

Tabela 4-12: Resultado porcentagem da substância húmica na turfa

Substância	Porcentagem no solo (massa)
Ácido fúlvico	12,99%
Ácido húmico	33,29%
Humina	31,76%
Mat. Org. não humina	1,96%

O espectro de FTIR da turfa apresenta as seguintes bandas de absorção e suas respectivas atribuições: absorção em 2921 – 2844 cm⁻¹ devido ao estiramento C-H de alifáticos; região em 1713 cm⁻¹ referente ao estiramento C=O de COOH e de acetonas; banda em 1636 - 1506 cm⁻¹ referente estiramento C=C de aromáticos; bandas 1416 - 1371 cm⁻¹ referente deformação de O-H, banda de CH₃, ou estiramento C-O; bandas menos intensas em 1216 cm⁻¹ devido ao estiramento de C-O; bandas 1113 - 1086 cm⁻¹ atribuído ao estiramento C-O de polissacarídeos e banda em 1022 cm⁻¹ possivelmente devido à presença de Si-O.

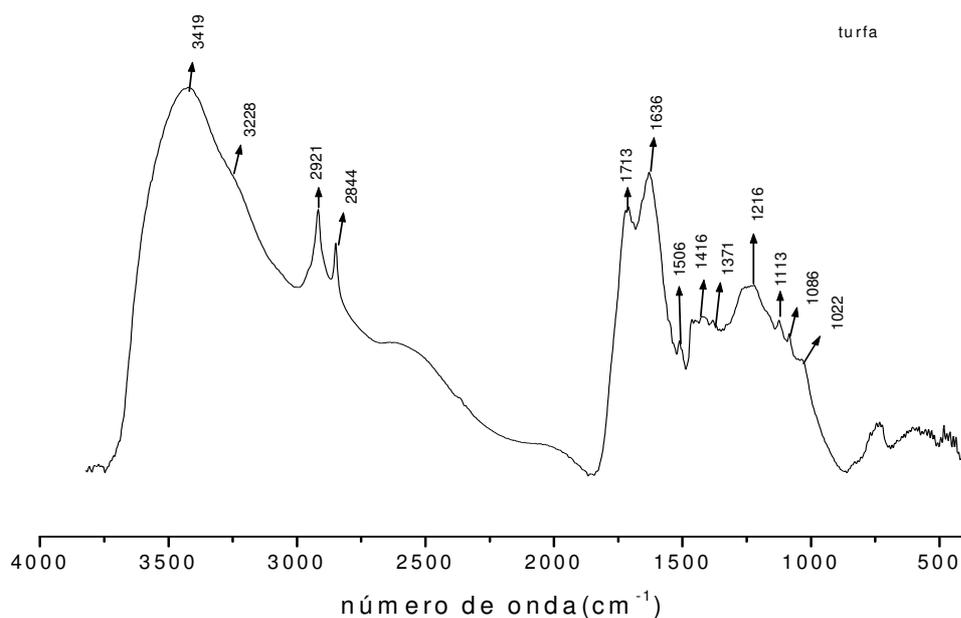


Figura 4-14: Espectro de FTIR da turfa

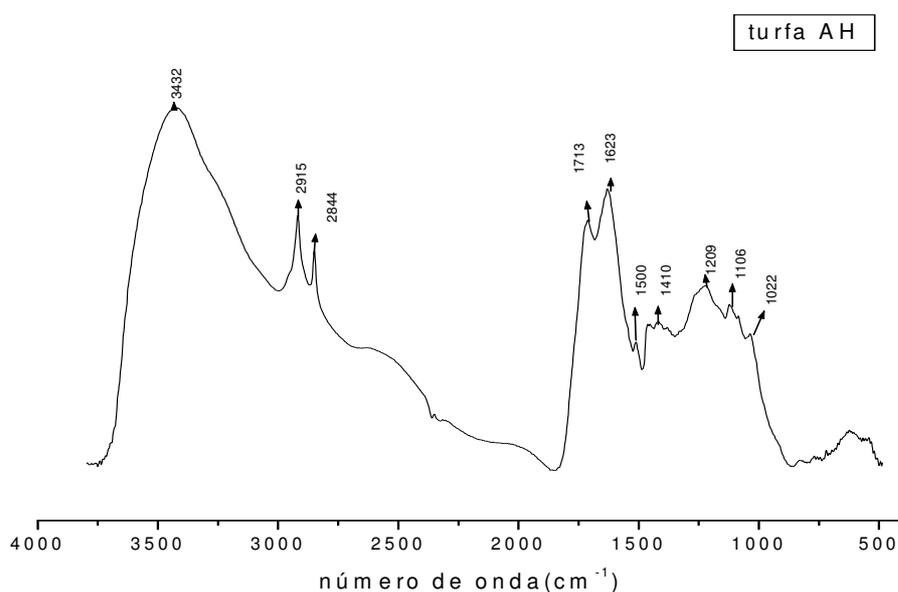


Figura 4-15: Espectro de FTIR do ácido húmico extraído da turfa

O espectro de FTIR do ácido húmico da turfa extraída Figura 4-15 apresenta o mesmo padrão da turfa sendo identificadas as seguintes bandas de absorção e suas respectivas atribuições: absorção em 2915 – 2844 cm^{-1} devido ao estiramento C-H de alifáticos; região em 1713 cm^{-1} referente ao estiramento C=O de COOH e de acetonas; banda em 1623 - 1500 cm^{-1} referente

estiramento C=C de aromáticos; bandas 1410 cm^{-1} referente deformação de O-H, banda de CH₃, ou estiramento C-O; bandas menos intensas em 1209 cm^{-1} devido ao estiramento de C-O; bandas $1106 - 1086\text{ cm}^{-1}$ atribuído ao estiramento C-O de polissacarídeos e banda em 1022 cm^{-1} possivelmente devido à presença de Si-O.

4.3.9. Ácido húmico

Para realização dos ensaios de compressão simples não drenado foi utilizado o ácido húmico purificado fornecido pela empresa JDMV Brasil devido a grande quantidade necessária para realização do ensaio. O ácido húmico utilizado é proveniente da leonardita.

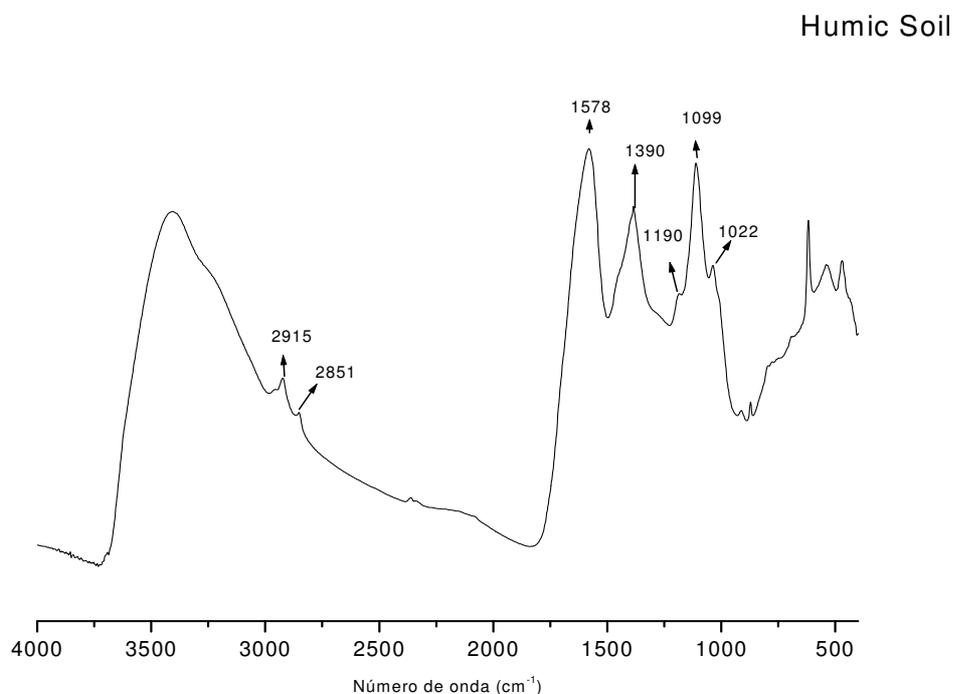


Figura 4-16: Resultado da análise do infravermelho do ácido húmico utilizado nos ensaios de compressão simples

Os espectros de FTIR do ácido húmico apresentaram o mesmo padrão sendo identificadas as seguintes bandas de absorção e suas respectivas atribuições: absorção em $2915 - 2851\text{ cm}^{-1}$ devido ao estiramento C-H de alifáticos; região em 1578 cm^{-1} referente ao estiramento C=C de aromáticos; banda em 1390 cm^{-1} referente a deformação C-H de alifático; bandas menos intensas em 1190 cm^{-1} devido ao estiramento de C-O ; 1099 cm^{-1} atribuído ao estiramento C-O de polissacarídeos e banda em 1022 cm^{-1} possivelmente devido à presença de Si-O.

Tabela 4-13: Resultado da quantificação ácido húmico proveniente da Leonardita

Concentração C (mg/g)			
C _{AF}	C _{SH}	C _{HCL}	C _{AH}
41,3	185,03	0,00	143,73

Tabela 4-14: Resultado da porcentagem da substância húmica na Leonardita

Substância	Porcentagem no solo (massa)
Ácido fúlvico	10,33%
Ácido húmico	26,13%
Humina	37,27%
Mat. Org. não humina	4,82%

Tabela 4-15: Análise química da Leonardita

Percentuais em massa (%)	
CARBONO	NITROGÊNIO
39,84	0,95

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios descritos nas seções anteriores cuja análise é baseada fundamentalmente nos ensaios de compressão não-confinada e do novo equipamento através da cravação de uma haste com ponta base circular alargada.

Os resultados são apresentados na forma de tabelas e gráficos de maneira a possibilitar uma melhor visualização.

5.2. SOLO SILTOSO, CIMENTO E CAL

No solo siltoso foi observado comportamento similar à mistura com caulim e bentonita. Em relação aos teores de cimento, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência, exceto com umidade de 100%. Verifica-se na Figura 5-1 que a partir do teor de cimento de 70% a resistência sofre uma queda se igualando aos resultados do teor de cimento de 30% nos tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Este comportamento não se verificou para teores de umidade superiores (e.g., teor de umidade de 135%), conforme apresentado na Figura 5-1, Figura 5-2 e Figura 5-3. Essa diminuição de resistência nas misturas com $\omega=100\%$ e teor de cimento a partir de 70% caracteriza-se pela falta de água que impede a formação de cristais dos produtos de hidratação do cimento. A falta da água dificulta o crescimento dos cristais, comprometendo o ganho de resistência que seria obtido pela continuidade das reações de hidratação dos compostos básicos formadores dos hidratos de sílica e cálcio.

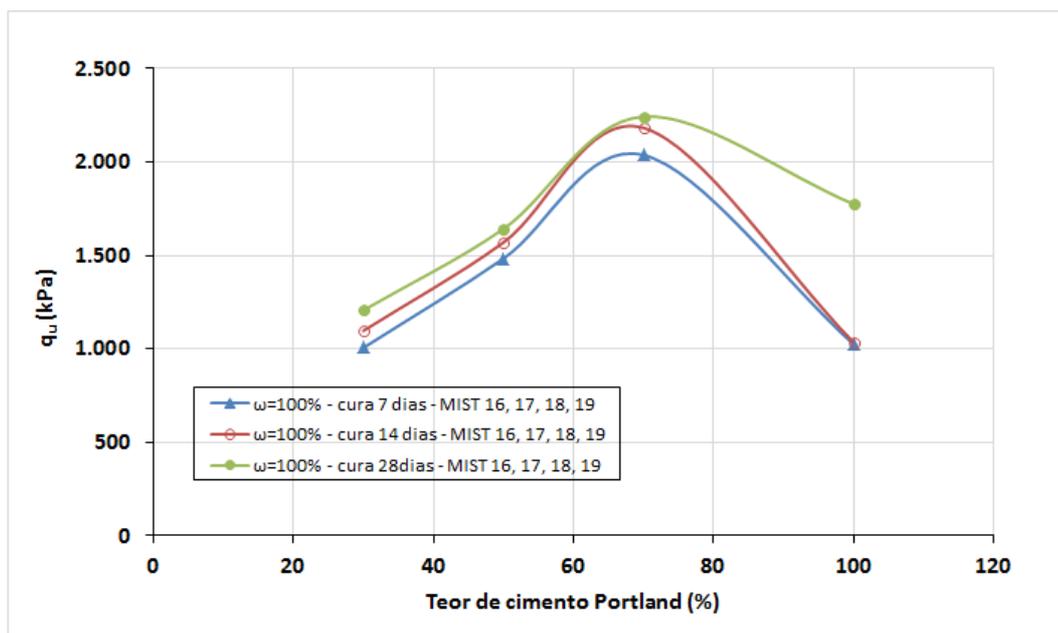


Figura 5-1: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, com vários teores de cimento e $\omega=100\%$

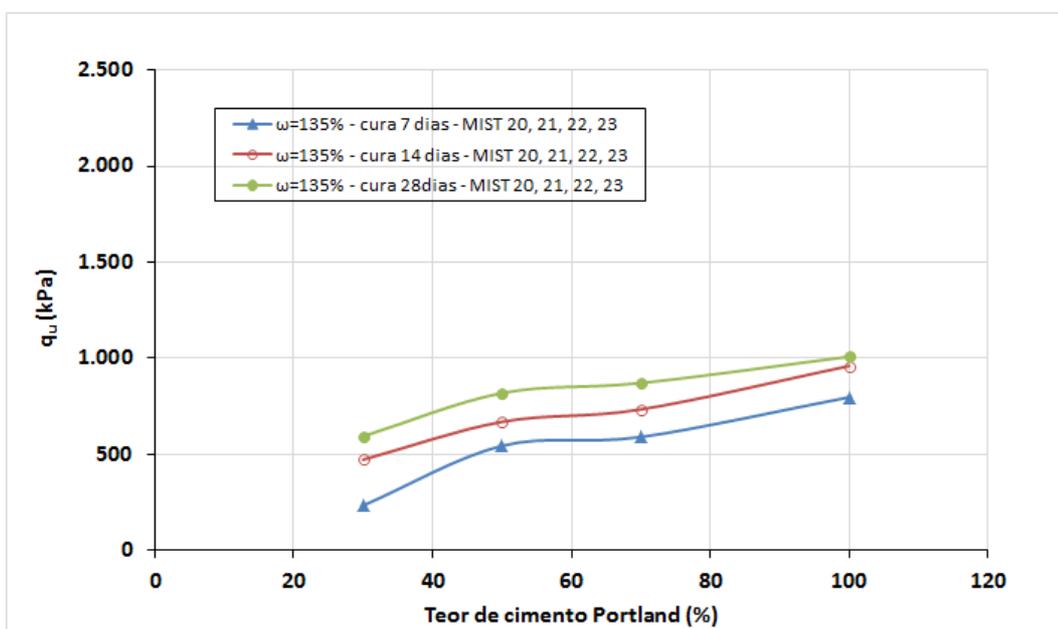


Figura 5-2: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, com o teor de cimento e $\omega=135\%$

O mesmo pode ser observado nas Figura 5-3:, Figura 5-4: e Figura 5-5:, quando realizada a comparação entre as curvas com teores de umidades 100%, 135% e 170% e tempos de cura de 7, 14, 28 dias, respectivamente, pode ser verificada Figura 5-5 que diminuindo a umidade presente no solo aumenta proporcionalmente à resistência à compressão simples, com exceção

da umidade de 100%, a qual é acompanhada de aumento de resistência até teor de cimento de 70%.

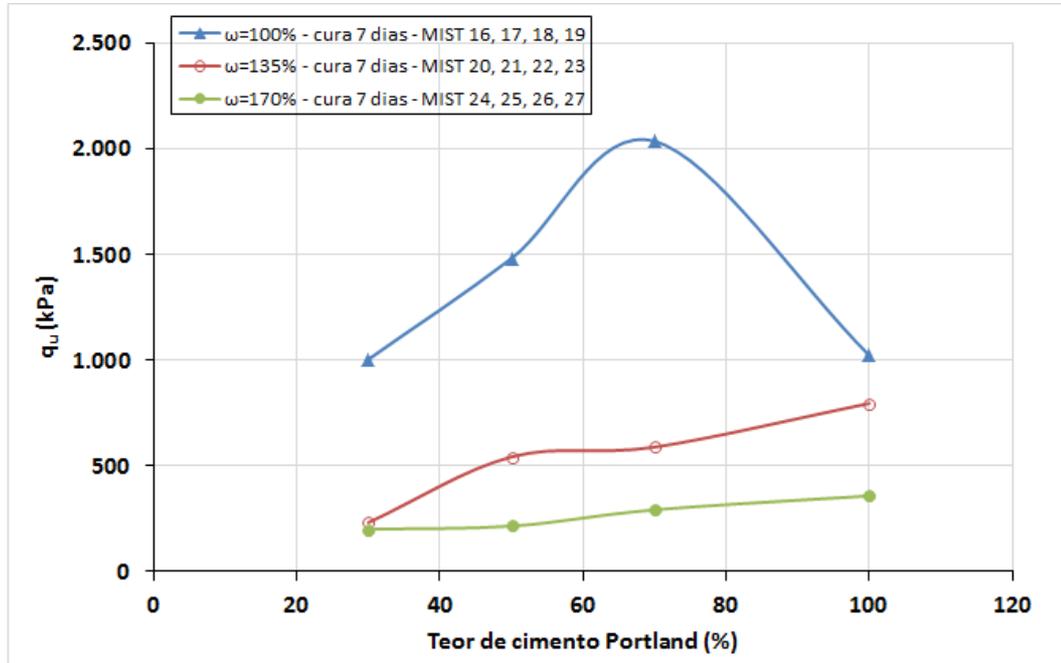


Figura 5-3: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%

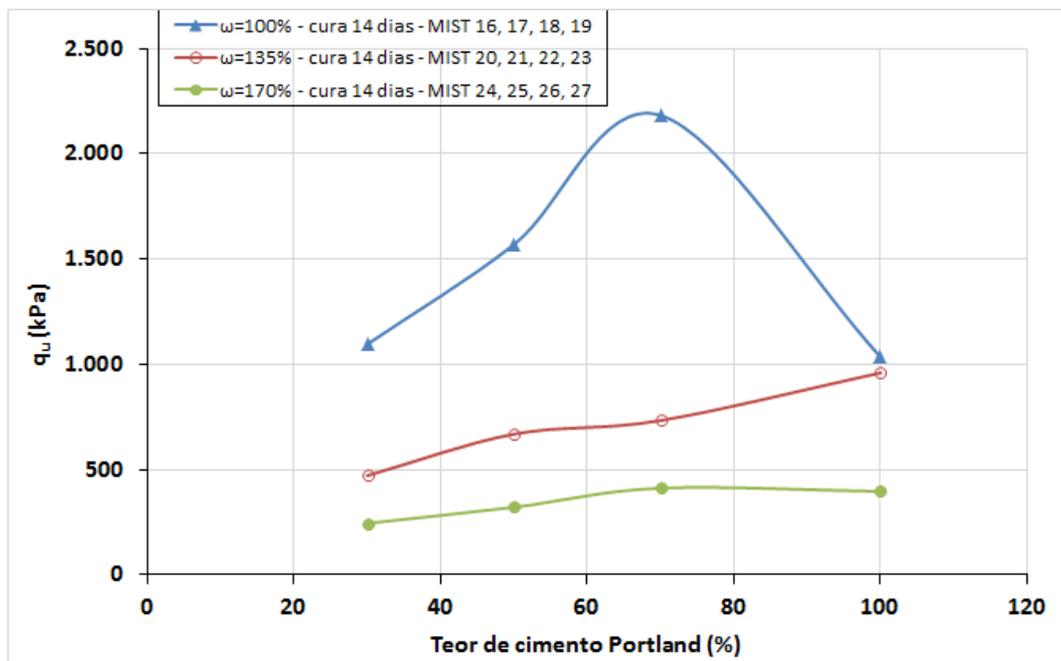


Figura 5-4: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%

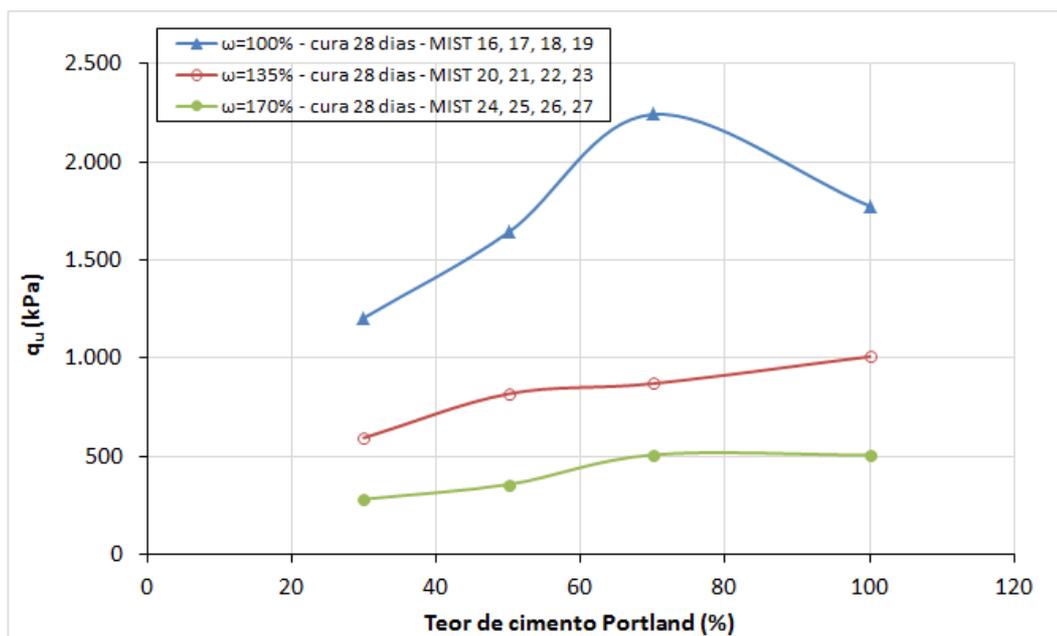


Figura 5-5: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso com o teor de cimento, $\omega=100\%$, 135% , 170%

A quantidade de água é um dos principais parâmetros controlados na dosagem do solo-agente cimentante, considerada a principal responsável pelas variações de resistência. A água utilizada contribui para a reação química que transforma o cimento Portland em uma pasta aglomerante conforme explicado na seção 2.11.2. Se a quantidade de água for insuficiente, a reação não ocorrerá por completo porém se a quantidade de água for superior à ideal, a resistência diminuirá em função dos poros que ocorrerão quando este excesso evaporar. No caso do presente estudo a quantidade necessária de cimento aumenta em função da umidade. Quanto maior a umidade, maior o consumo de cimento ou menor a resistência. Nas Figura 5-3 a Figura 5-5, relacionando resistência à compressão simples versus teor de cimento pode ser visualizada essa influência em diferentes tempos de curas e teores de umidade

Nos resultados das misturas de solo com adição de cal observou-se comportamento similar ao cimento quanto à umidade. À medida que o teor de umidade aumenta à resistência a compressão diminui, conforme mostrados nas Figura 5-6 e Figura 5-7 para 14 e 28 dias de cura, respectivamente. No entanto, para os teores de cal e tempos de cura estudados houve uma redução de resistência à compressão simples com o aumento do teor de cal até teores em torno de 70%, invertendo a tendência para valores acima destes.

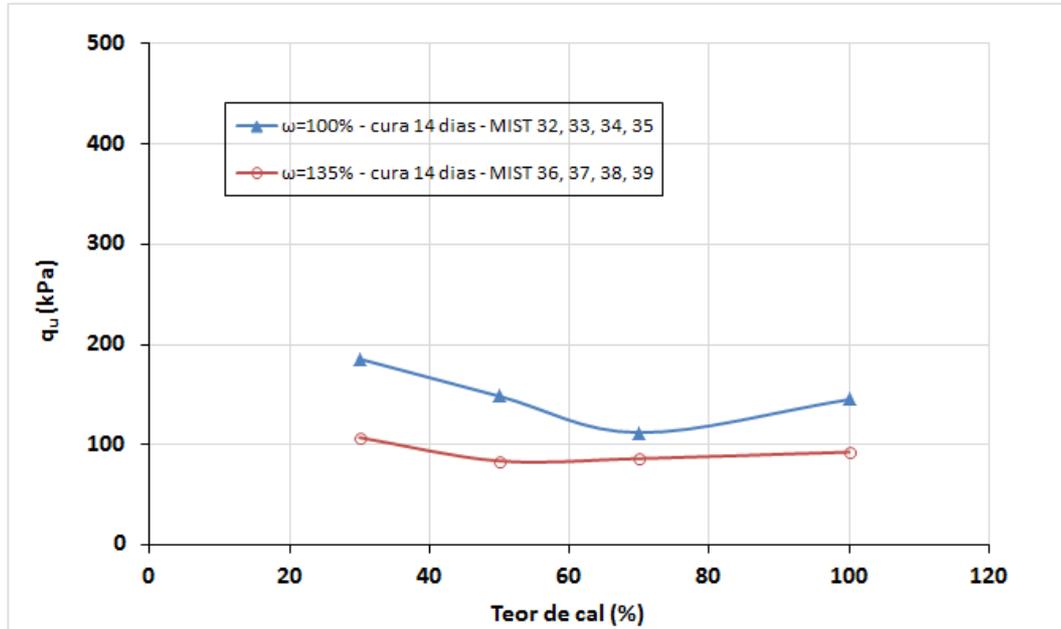


Figura 5-6: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$ e 135%

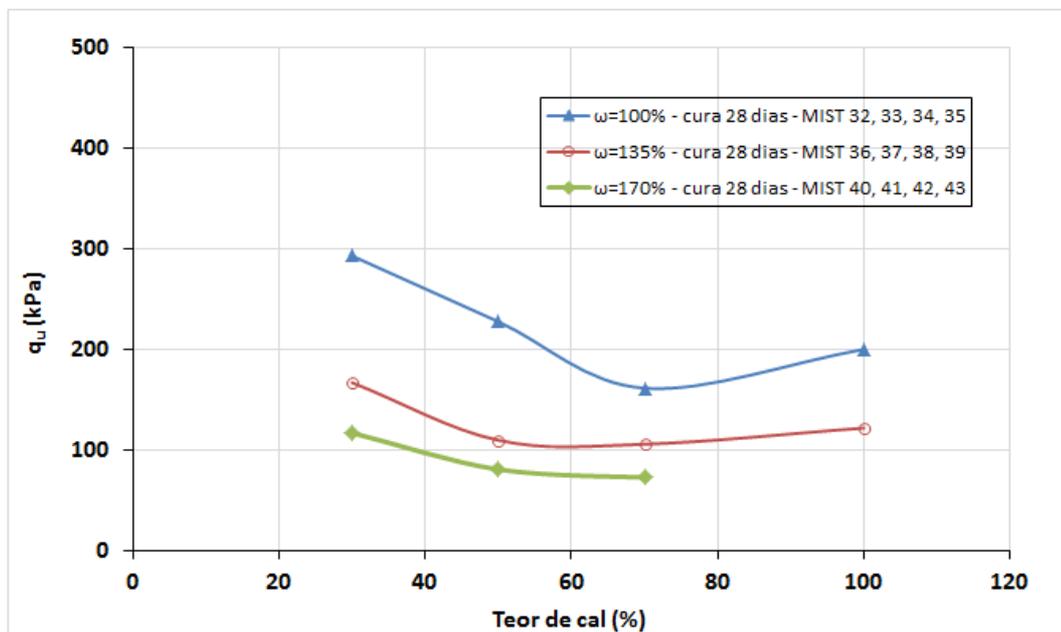


Figura 5-7: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$, 135% , e 170%

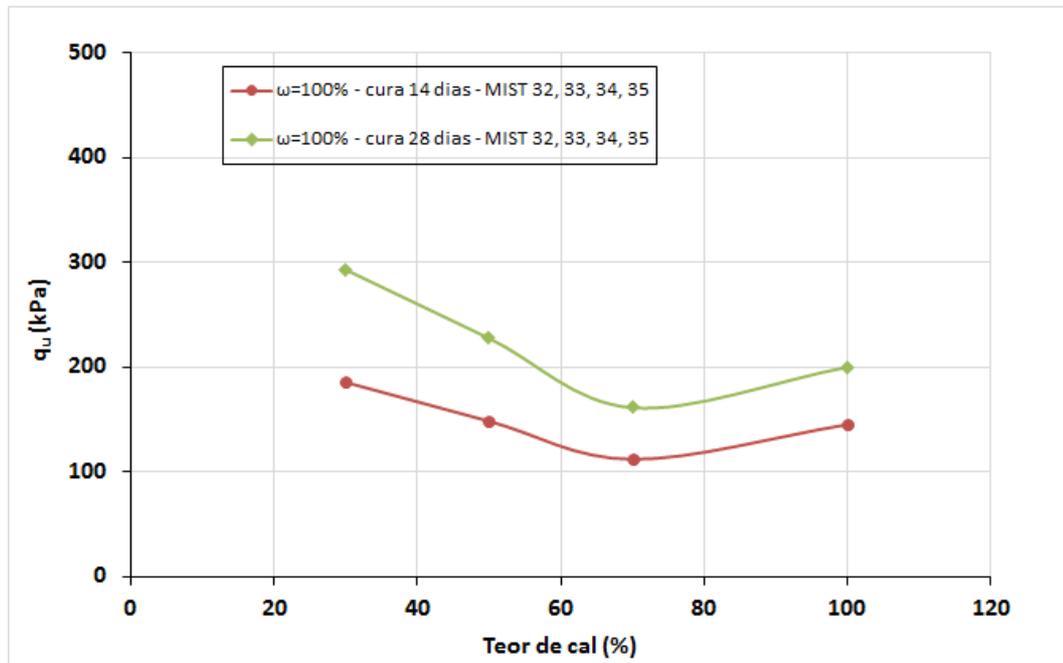


Figura 5-8: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$

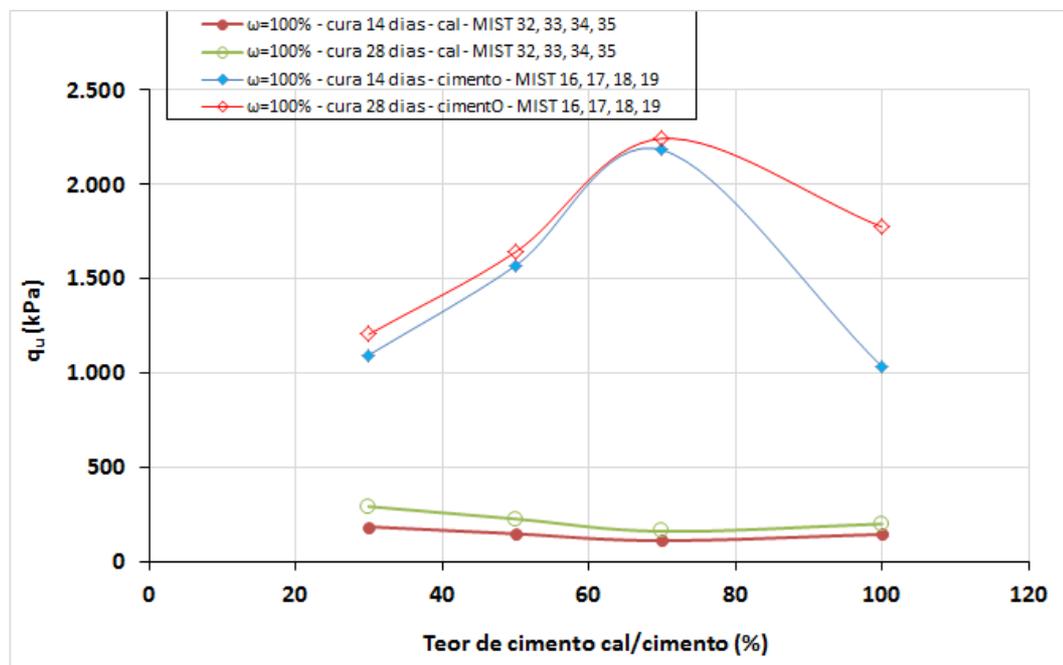


Figura 5-9: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=100\%$

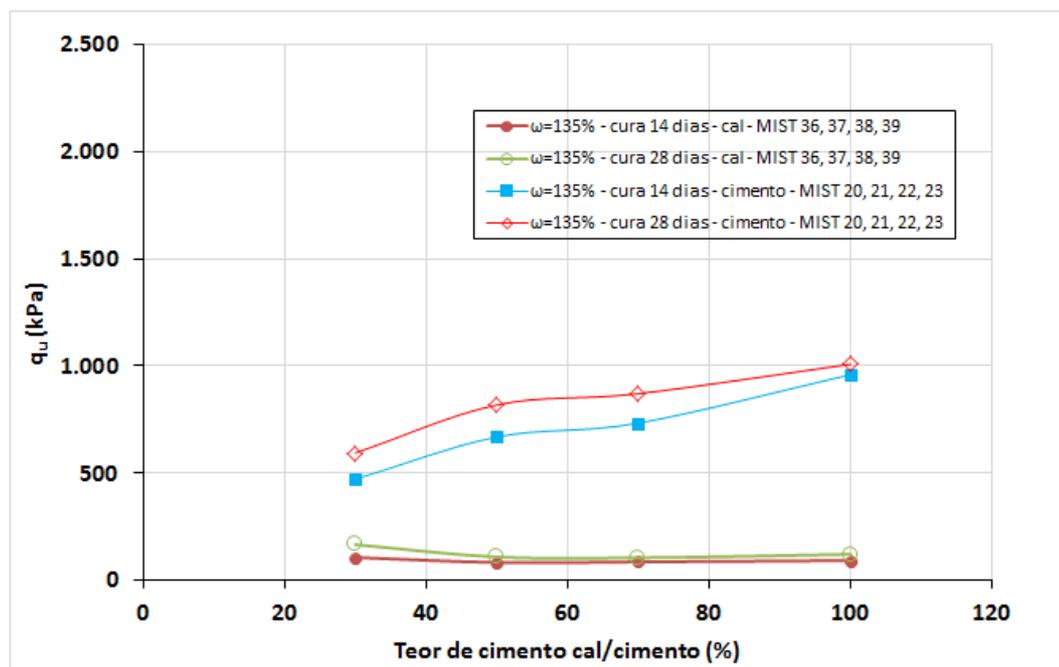


Figura 5-10: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 14 e 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=135\%$

Através dos resultados apresentados na Figura 5-8, é possível ser verificado que o tempo de cura é um indicador importante de resistência à compressão nas misturas solo-cal. Em idades de cura de 7 dias nenhuma mistura resistiu a desmoldagem dos corpos de prova.

Misturas com o teor de umidade de 170% somente puderam ser desmoldadas próximo aos 28 dias de cura (Figura 5-7).

Nas Figura 5-9 e Figura 5-10, para teores de umidade de 100% e 135%, respectivamente, pode ser observado que o cimento atingiu resultados em média três vezes superiores às misturas com adição de cal.

Para teores de umidade de 120% e teores de agentes cimentantes (cal e cimento) variando entre 10% e 35%, a combinação de cimento e cal, na proporção de 50%/50% considerando 7 dias (Figura 5-11), 28 dias (Figura 5-12) e 90 dias (Figura 5-13) de cura, oferecem ótimos resultados tendo desempenho superior a dosagens com somente cal aos 7 dias de cura e valores próximos as misturas com somente cimento. Verifica-se também que aos 28 dias de cura a mistura de cimento/cal ainda obtém resultados inferiores à curva de cimento (Figura 5-12) e aos 90 dias de cura supera as a curva de cimento com teores de cal+cimento acima de 30% (Figura 5-13).

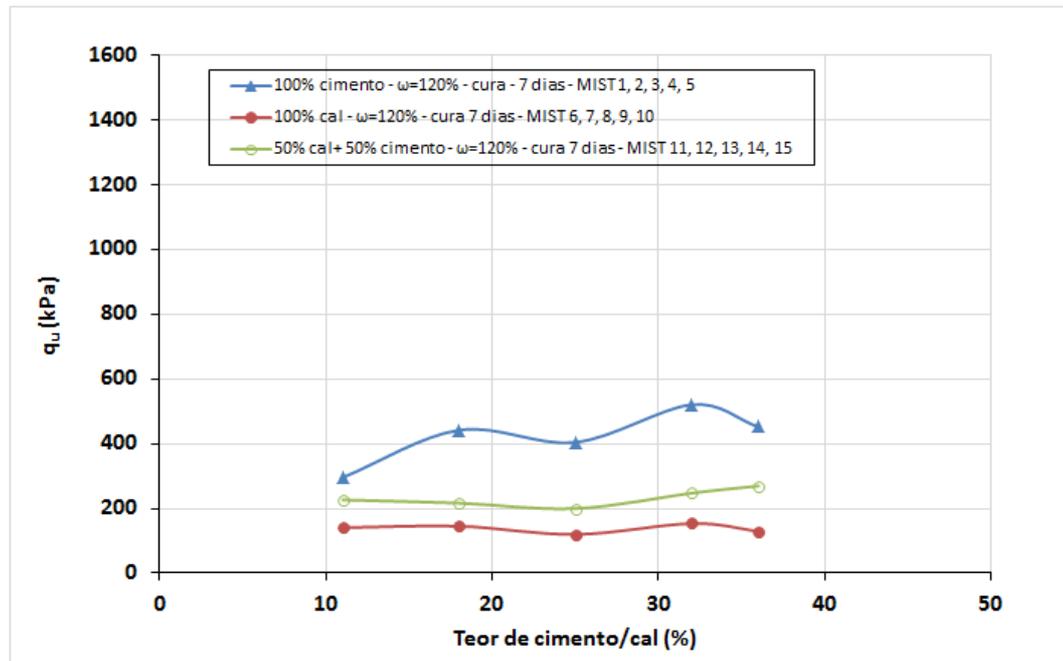


Figura 5-11: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$

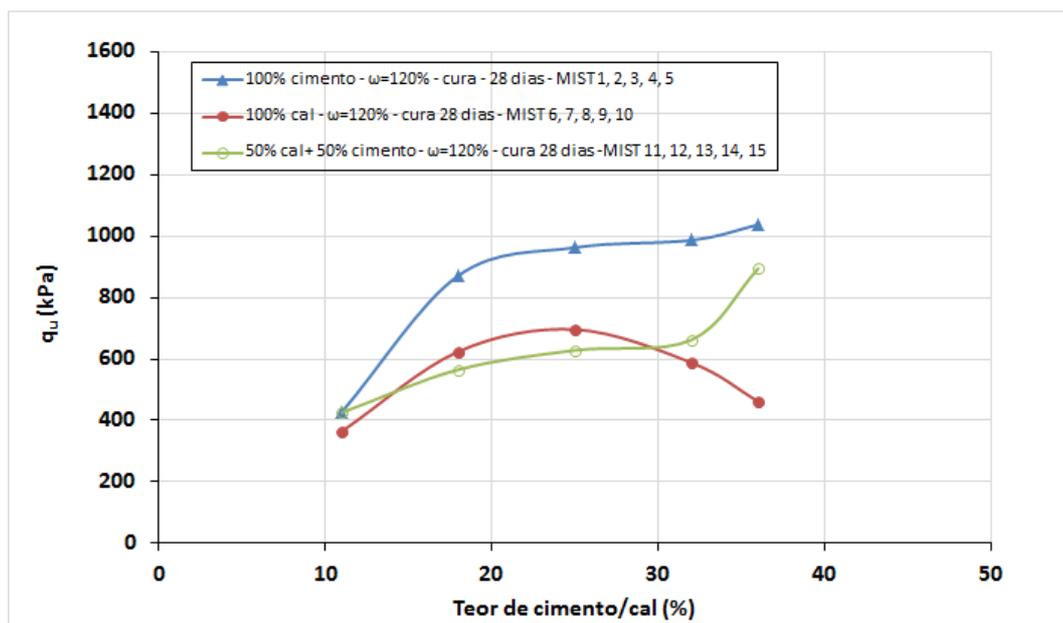


Figura 5-12: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$

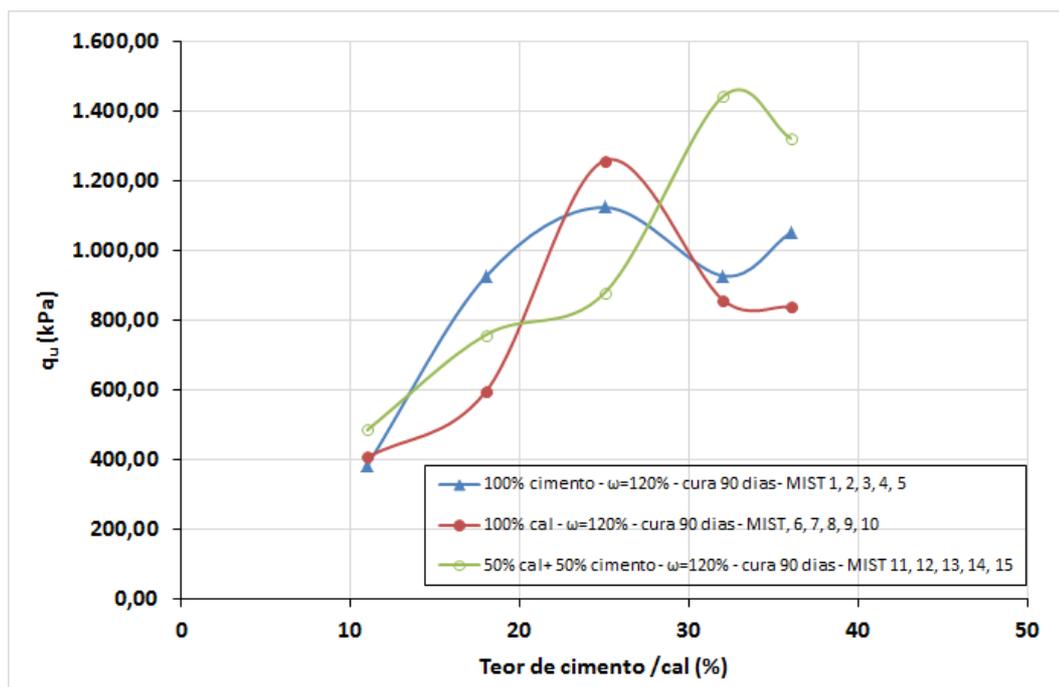


Figura 5-13: Comparação da curva de resistência à compressão simples aos 90 dias de cura do solo siltoso, $\omega=120\%$

5.3. ENSAIOS DE CRAVAÇÃO

O ensaio para determinação da tensão máxima de cravação foi realizado para misturas com agentes cimentantes (cimento Portland, cal virgem, combinação de cal virgem+cimento em proporção 50%-50%) e solo siltoso, caulim e bentonita, caulim e bentonita com resíduo de folhas de eucalipto moídas (nos teores de 5% e 20%) e caulim e bentonita com turfa (nos teores de 5% e 20%), para tempos de cura de 7, 14, e 28 dias, e umidades de 100%, 120%, 135%, 170%, e 205%.

A Figura 5- apresenta uma combinação de todos os pontos das misturas (813 pontos), sendo em geral três resultados de cada ensaio de compressão simples (q_u) e tensão de cravação (q_e). Cada resultado q_u combina com três de resultados q_e , e cada resultado de q_e combina com três resultados q_u . Diversos resultados da Figura 5-14 se sobrepõem devido a grande quantidade de pontos.

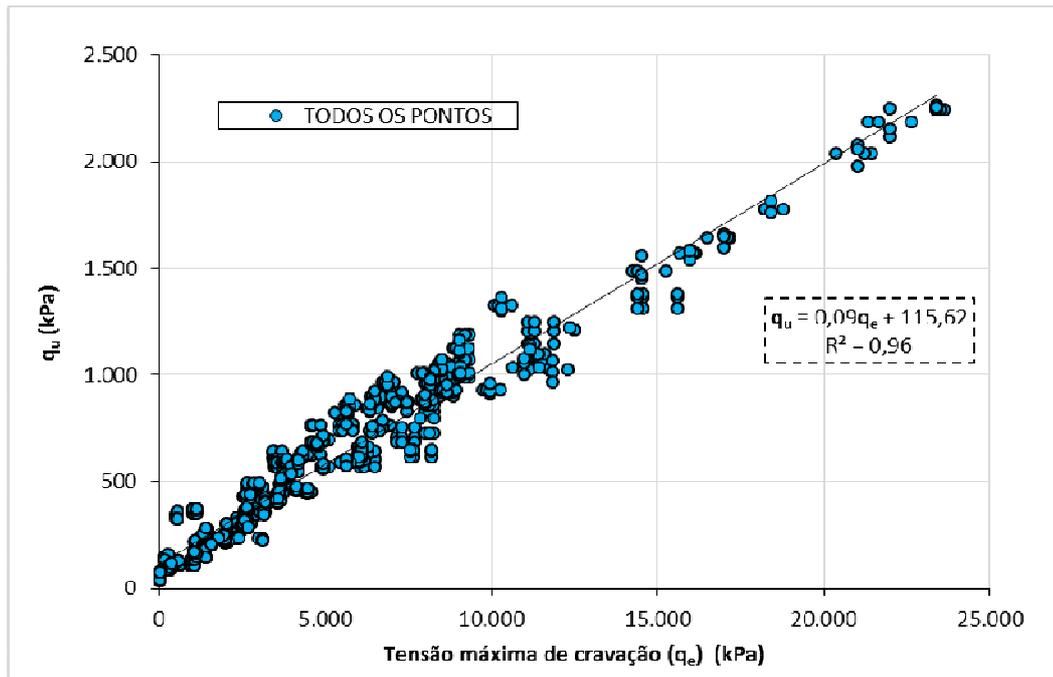


Figura 5-14: Resistência à compressão simples (q_u) versus tensão de cravação (q_e) de todos os pontos combinados

A Figura 5-15 apresenta os mesmos resultados da Figura 5-14, utilizando, no entanto, os valores médios das triplicatas de cada ensaio de compressão simples (q_u) e tensão de cravação (q_e).

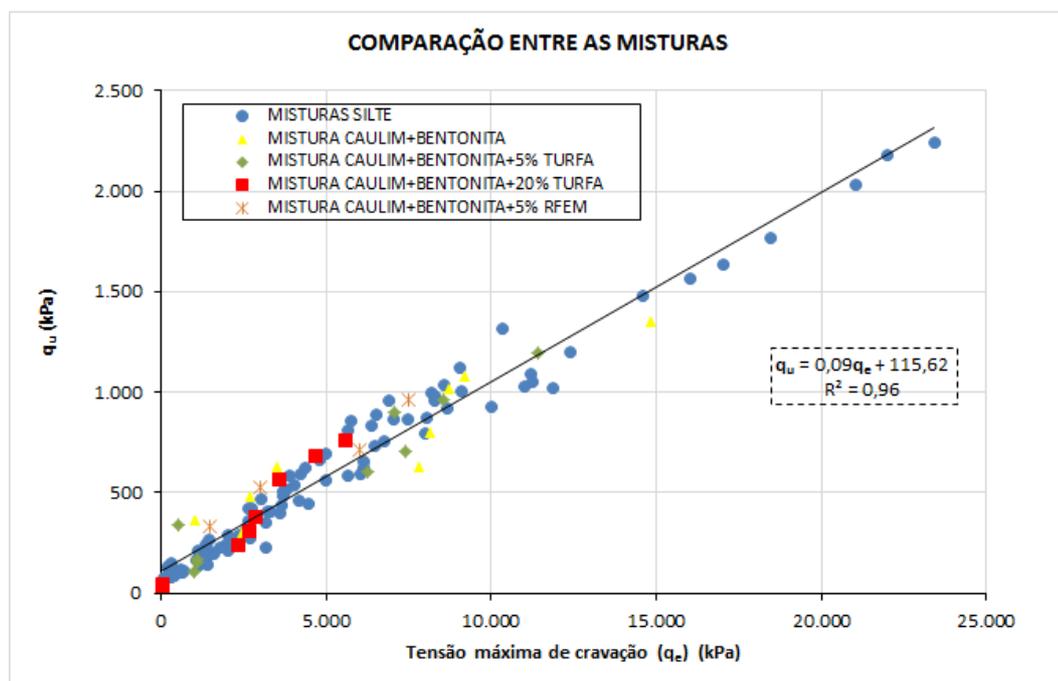


Figura 5-15: Resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média

Observa-se nas Figura 5-14 e Figura 5-15 que independente do tipo de solo ou agente cimentante, todos os pontos podem ser representados por única uma reta única que representa a relação q_u versus q_e , exibindo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96, o qual significa variabilidade baixa dos resultados representados pela reta.

Nas Figura 5-32, Figura 5-33 e Figura 5-34 verifica-se que o teor de umidade é o principal responsável pela variação da resistência. A Figura 5-32 mostra nitidamente a diferença de resistência em função da umidade do solo com misturas de cimento. Para a umidade de 100% a tensão de cravação varia entre valores de 10.000kPa e 25.000kPa, para a umidade de 135% varia entre valores de 3.200kPa e 10.000kPa, e para a umidade de 170% valores inferiores a 3.200kPa. A quantidade de cimento (Figura 5-33) e o tempo de cura (Figura 5-34) não desmostraram influenciar muito, ou seja, existir alguma diferença clara. Nota-se que a quantidade de cimento Portland que se destaca com resultados melhores é 350-450 kg por m^3 , como se observa na Figura 5-33.

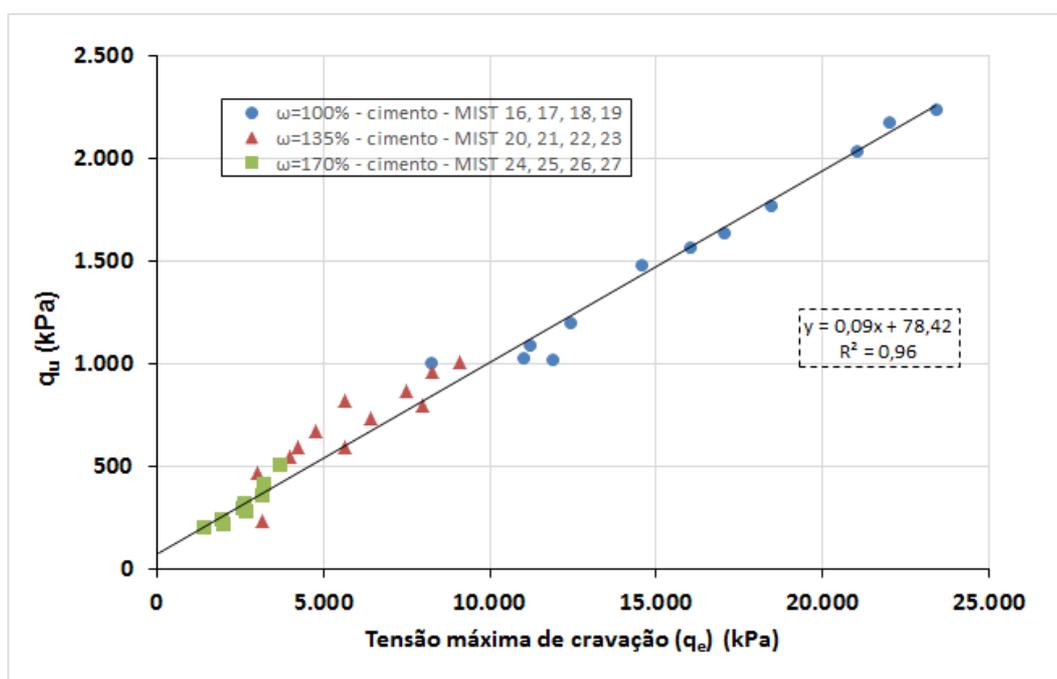


Figura 5-16: Comparação das umidades, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100%, 135%, 170% do silte

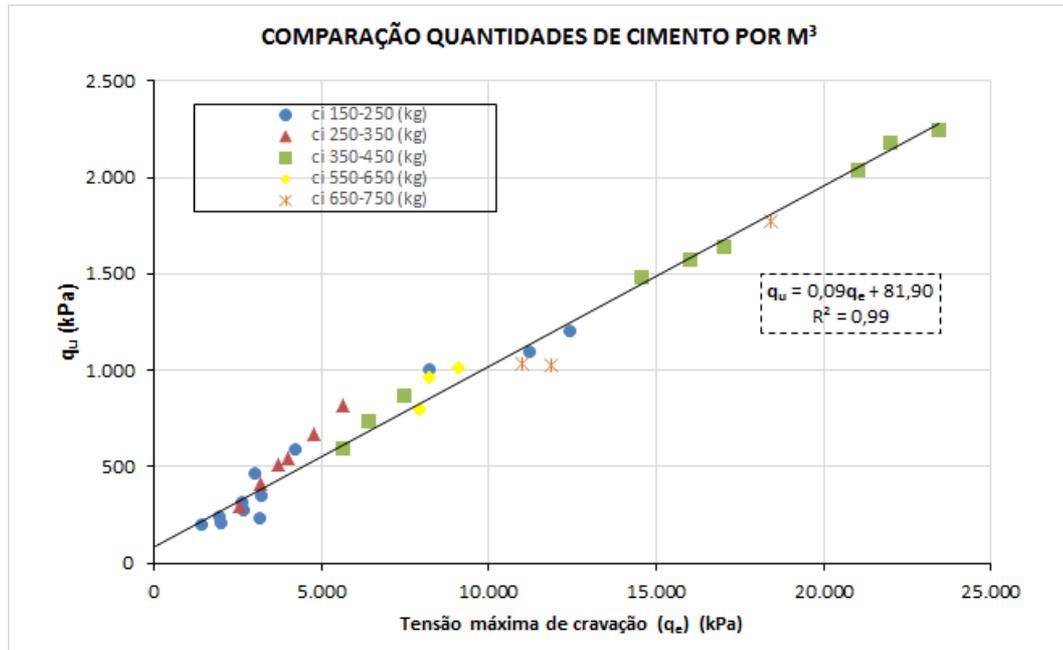


Figura 5-17: Comparação das quantidades de cimento por m³, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100%, 120%, 135%, 170% do silte

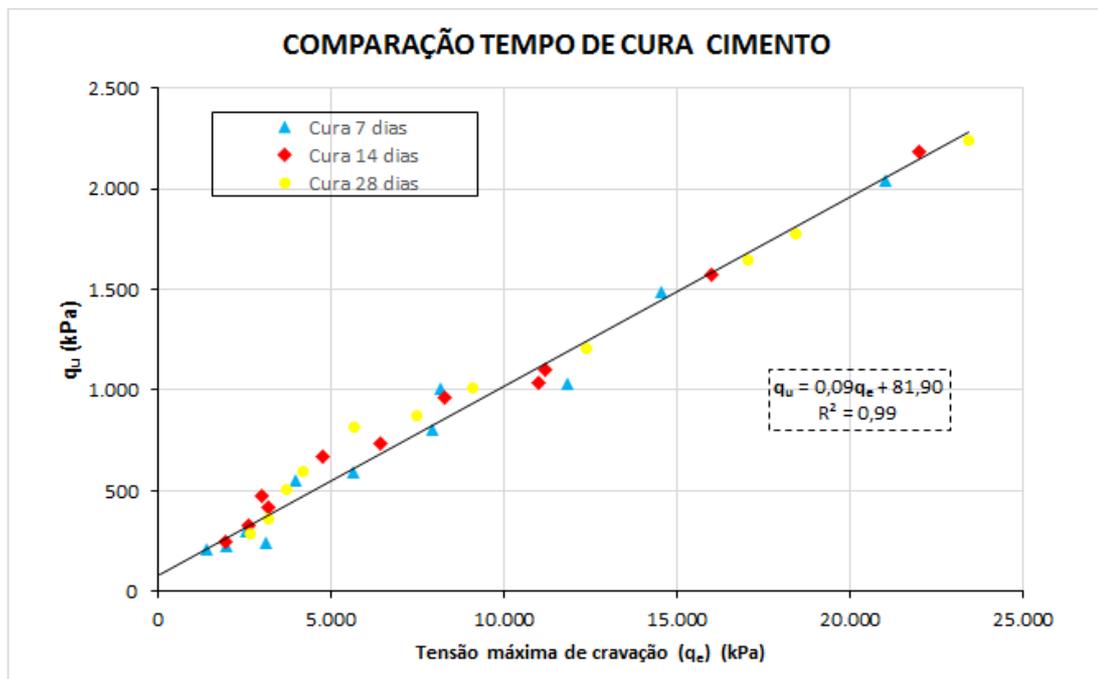


Figura 5-18: Comparação dos tempos de cura, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidades 100%, 135%, 170% do silte

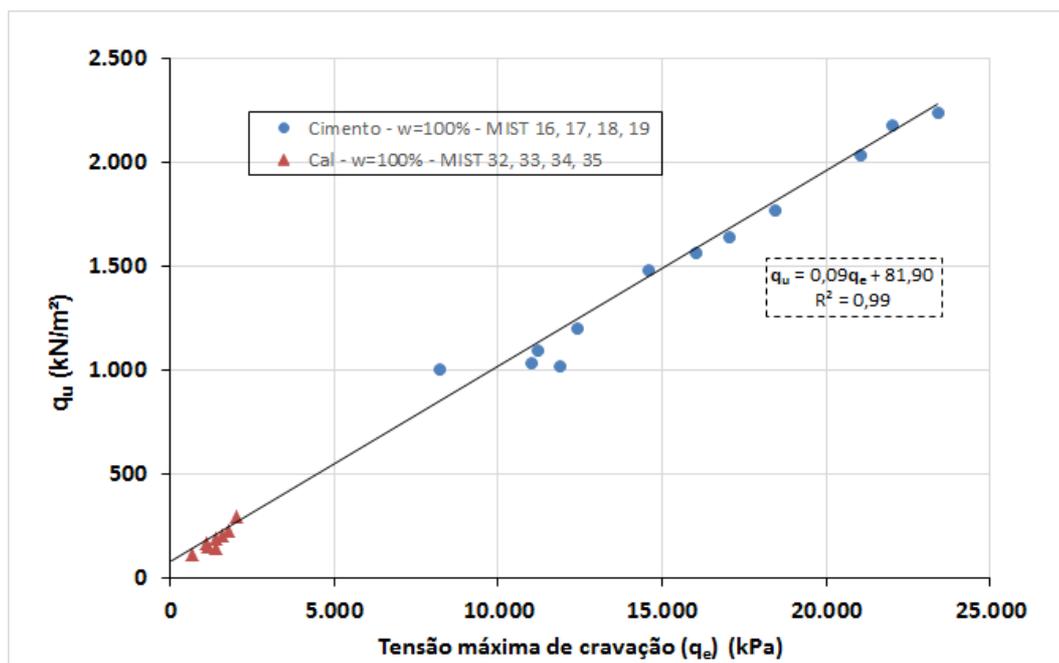


Figura 5-19: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 100%, solo siltoso

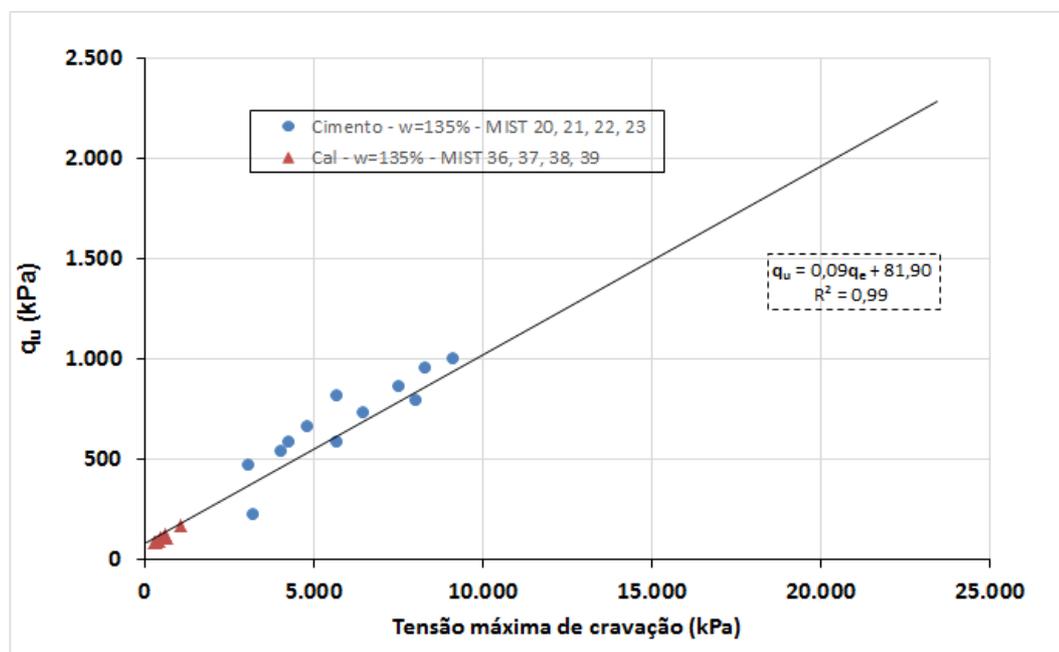


Figura 5-20: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 135%, solo siltoso

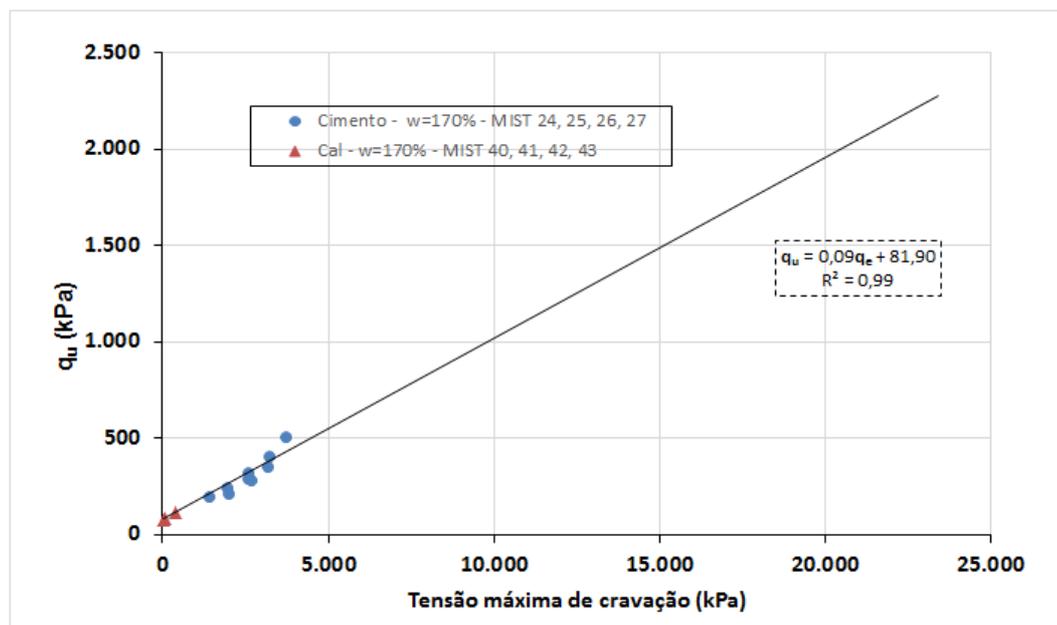


Figura 5-21: Comparação entre adição de cimento e cal, resistência à compressão simples média versus tensão de cravação média, umidade 170%, solo siltoso

As Figura 5-19, Figura 5-20 e Figura 5-21 apresentam resultados de resistência à compressão simples (q_u) média versus tensão de cravação média (q_e) de misturas de solo com distintos teores de cimento Portland ou cal via com umidades de mistura de 100%, 135% e 170%, respectivamente. As misturas com cal apresentam desempenho bem inferior às misturas com cimento Portland para umidades de mistura iguais a 100%. Conforme aumenta a umidade a diferença diminui entre os dois tipos de adição. A proporção de redução de resistência das misturas com cal com a variação do teor de umidade, é bem inferior às misturas com adição de cimento.

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram realizados para verificação de possíveis relações entre os mesmos e ensaios de compressão simples (Figura 5-22) e cravação (Figura 5-23). A partir de ensaios de tração por compressão diametral, verificou-se que a razão entre a resistência à tração por compressão diametral (q_t) e a resistência à compressão simples (q_u) (Figura 5-22) é em média 20% para a umidade de 120% aos 7, 28 e 90 dias de cura. Na Figura 5-23, verifica-se que a resistência à compressão simples (q_u) é cerca de 2% da resistência à cravação (q_e).

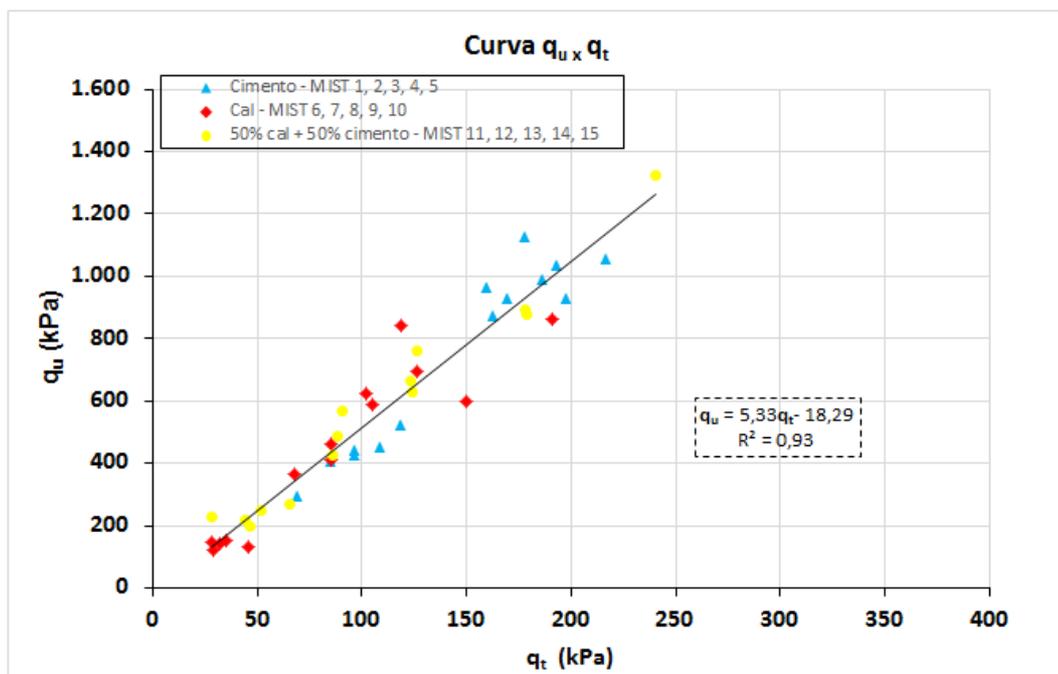


Figura 5-22: Resistência a tração vs compressão simples

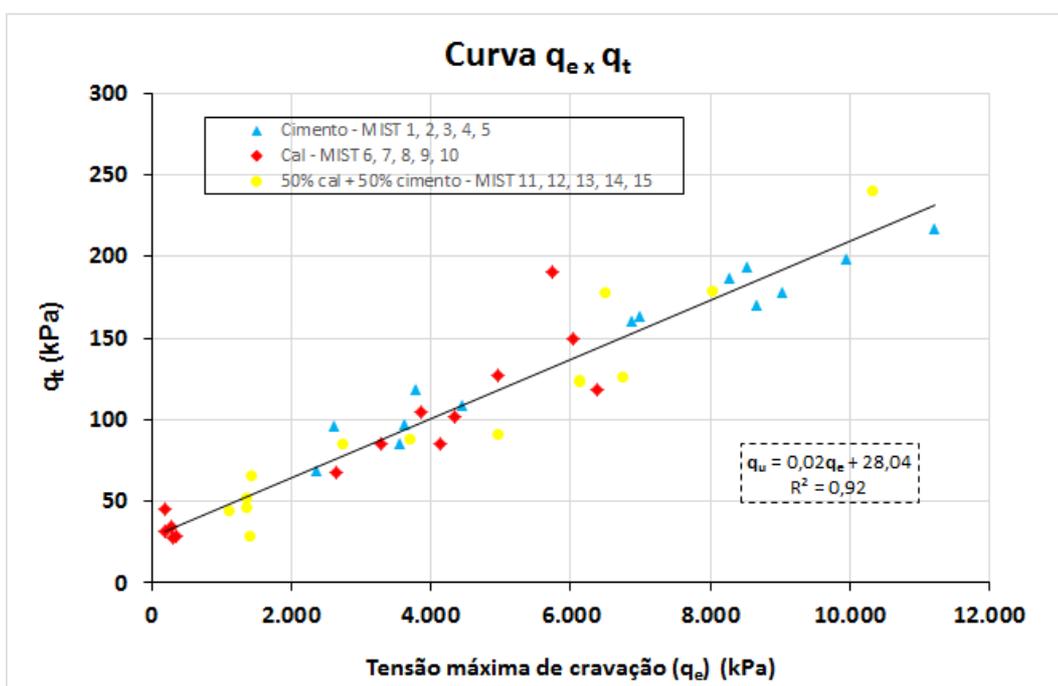


Figura 5-23: Resistência a tração vs tensão resistência à cravação

Na maioria dos ensaios de resistência à compressão simples realizados observou-se um modo de ruptura frágil com a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos, sendo que para os corpos de prova com maior porcentagem de cal e maior umidade, a ruptura foi mais frágil, ocorrendo às vezes abaulamento ou efeito barril dos corpos de prova. Não foram

notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos de prova com mesma relação teor de cimento ou cal.

5.4. MISTURA CAULIM, BENTONITA E CAL

Os resultados apresentados nas misturas caulim-bentonita-cal hidratada confirmam os resultados apresentados nos estudos realizados por National Lime Association (2004) e Lovato (2004) que indicam que misturas com solos orgânicos não apresentam resultados satisfatórios de melhoramento das propriedades mecânicas. Segundo Thompson (1966), o mecanismo que melhor justifica ausência de cimentação seria o efeito de “máscara” provocados pelos cátions orgânicos sobre as partículas de argila, impedindo a dissolução da sílica e alumina.

Na primeira reação dá-se hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio. Na segunda reação dá-se a recarbonatação da cal hidratada só ao ar e em presença do dióxido de carbono.

Na adição de cal hidratada na mistura com o teor de 5% de folha de eucalipto moída, 70% de caulim e 30% de bentonita não foi possível atingir um nível de resistência à compressão não-confinada que pudesse ser observado pelos equipamentos utilizados aos 7 e 28 dias de cura. Utilizaram-se teores de cal-hidratada de 5%, 10% e 30%.

Nas misturas com cal virgem obteve-se aumento de resistências realizadas nas misturas MIST-63 a MIST-69, verificando-se ainda que o teor ótimo de cal é por volta de 10-15%. Com aumento da adição de cinza o teor de cal poderá ser superior a 30%.

A Figura 5-24 mostra que a resistência a compressão não-confinada diminui conforme aumenta o teor de cal de 10% para 20% e 50% com teor de cinza de 50%. No entanto para as misturas MIST-66 e MIST-67, onde é aumentado o teor de cinza para 100%, com o aumento do teor de cal, aumenta-se a resistência a compressão não-confinada. Nota-se também um pequeno retardo de pega aos 7 dias na mistura MIST-66 que contém 20% de cal virgem.

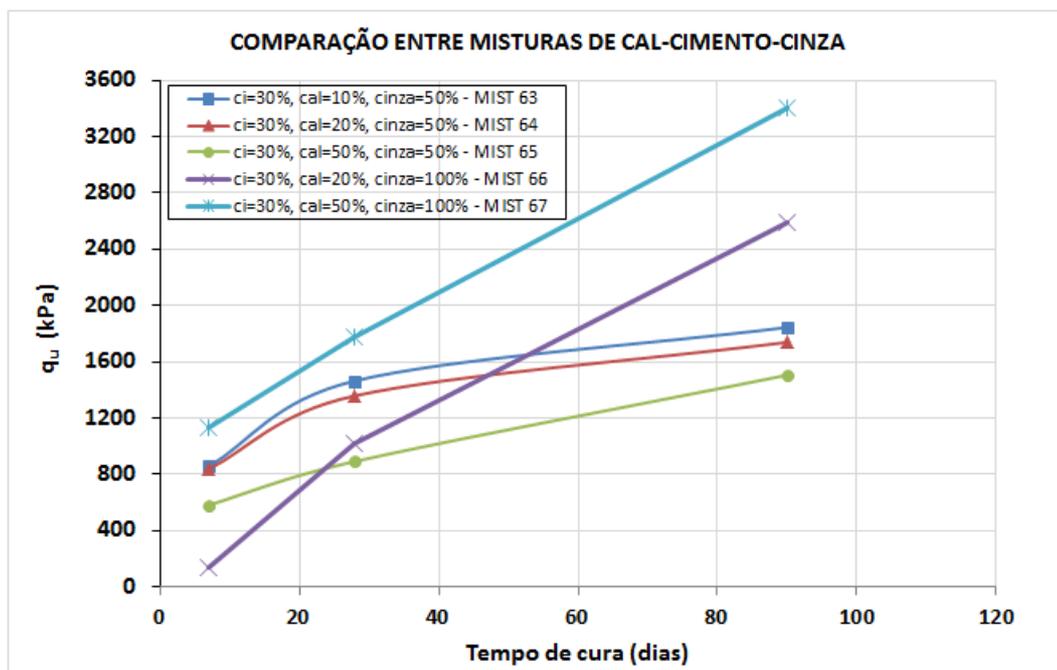


Figura 5-24: Resistência de ruptura à compressão não-confinada versus tempo de cura das misturas com cal

No caso da mistura MIST-85, no tempo cura de 7 dias não foi possível desmoldar os corpos de prova pois estavam moles. Aos 28 dias apresentou aumento de resistência, valor inferior aos corpos de prova com adição de cimento. O valor obtido para a mistura com 15% de cal foi de 349,0 kN/m², 27% menor que a mistura (MIST-48) que teve 10% de adição de cimento Portland.

5.5. SOLO CAULIM, BENTONITA, TURFA E CIMENTO

As misturas MIST-48 a MIST-50 (Tabela 4-4) mostram que a adição do cimento melhora significativamente a resistência à compressão simples do solo. A Figura 5-25 corresponde aos resultados da mistura com umidade de 100% e teores de cimento 10%, 30%, 50%. No ANEXO A podem ser encontradas maiores informações sobre as curvas da Figura 5-25.

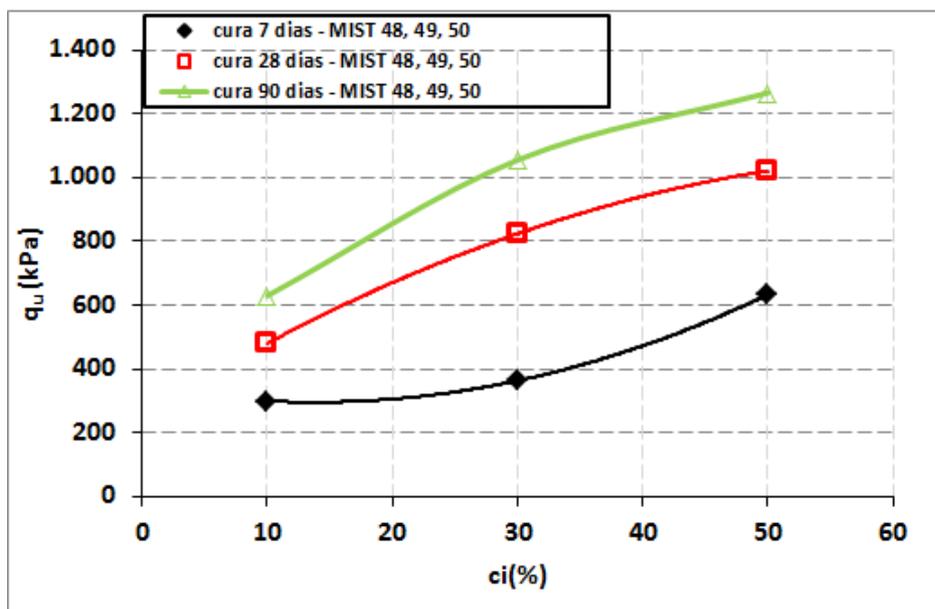


Figura 5-25: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de cimento versus resistência à compressão simples

Os teores de cimento que apresentaram maior eficácia foram os valores de $c_i=30\%$ (185 kg/m^3) e 50% (266 kg/m^3). Na fase de imersão dos corpos de prova com $c_i=10\%$ (72 kg/m^3) notou-se que as laterais dos corpos de prova soltaram partículas de solo devido ao ressecamento facial das laterais.

As misturas com turfa (MIST-51 a 56 da Tabela 3-5) apresentam resultados dos ensaios com adição de turfa para simulação dos efeitos dos teores de matéria orgânica nos solos. Nas Figura 5-26 e Figura 5-27 podem ser visualizados os resultados das misturas com e sem adição de turfa (teores de 5% e 20%, respectivamente), umidade de 100% e tempos de cura 7, 28, e 90 dias. Tais resultados mostram que teores de cimento de 10% não apresentam resultados satisfatórios.

O tempo de cura é outro fator de grande relevância. Na Figura 5-26, os 28 dias de cura, a mistura com teor de 30% de cimento e 5% de turfa obteve resultado inferior à mistura sem turfa. No entanto aos 90 dias de cura a mistura com adição de 5% de turfa atingiu resultado similar à mistura sem turfa com teores de 30% e 50% de cimento.

A adição de 20% de turfa diminuiu drasticamente a até 40% da resistência a compressão simples, conforme mostra a Figura 5-27. A resistência aumenta conforme aumenta o teor de cimento, porém não se iguala a resistência das misturas sem adição de turfa.

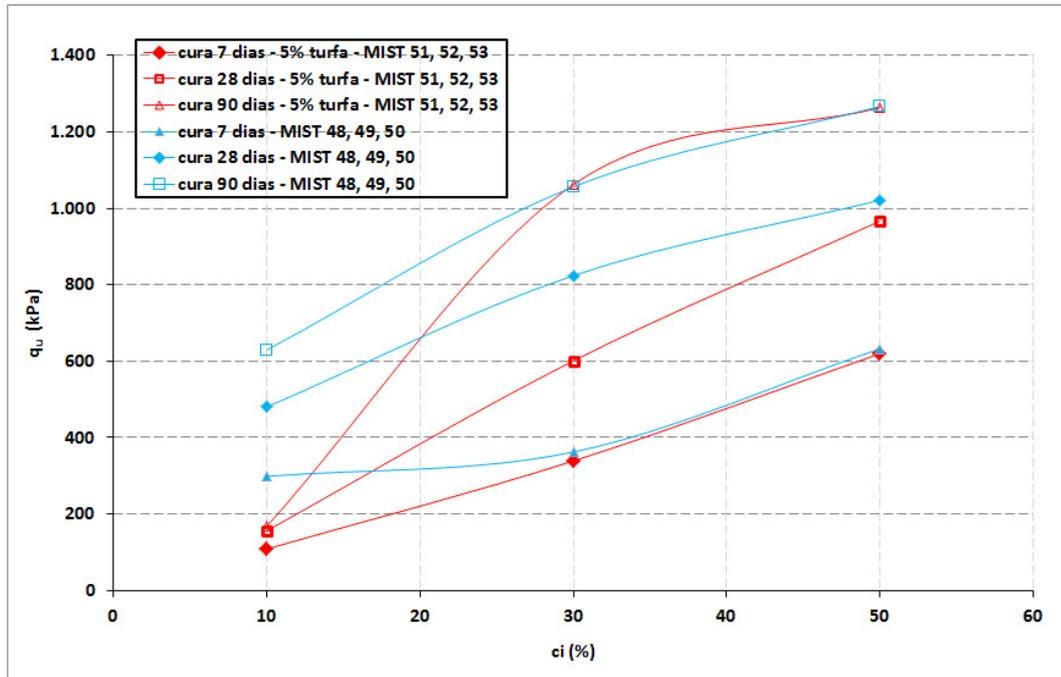


Figura 5-26: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 5%, teor de cimento versus resistência à compressão simples

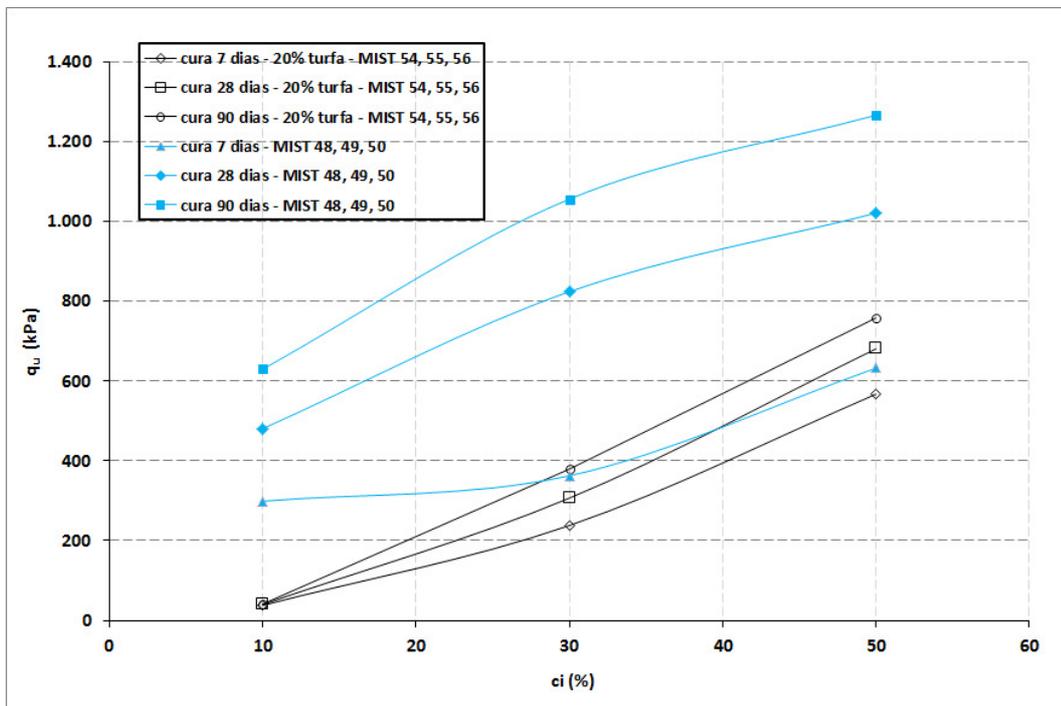


Figura 5-27: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples

A Figura 5-28 demonstra que teores altos de turfa reduzem drasticamente suas propriedades mecânicas, podendo ser um fator decisivo na dosagem.

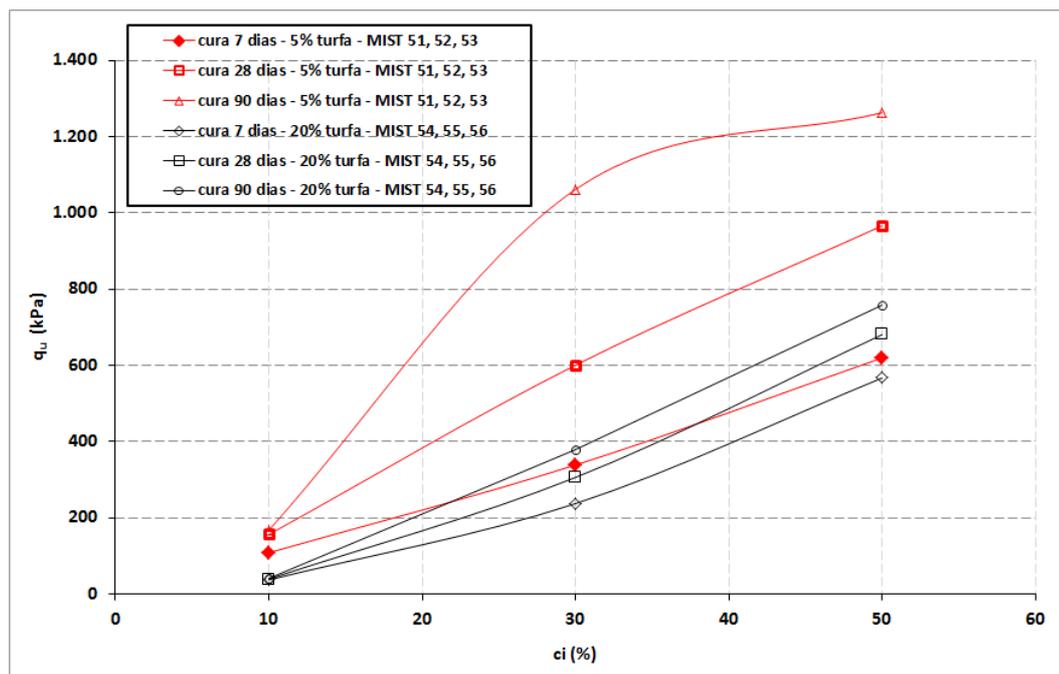


Figura 5-28: Comparação da curva de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura, teor de turfa de 5% e 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples

5.6. ÁCIDO CLORÍDRICO

As misturas que se encontram entre MIST-70 e MIST-72 (Tabela 3-5) alcançaram pH=3 com adição de ácido clorídrico. Os ensaios realizados com essas misturas não apresentaram alteração da resistência à compressão simples (Figura 5-29). Tal fato pode ser parcialmente explicado com adição de pequenas quantidades de cimento/cal na mistura, provocando aumento rápido do pH para valores da ordem de 12,5. Quando o silicato tricálcio (C_3S) é misturado com água (Equação 5-2), estes são rapidamente libertados na solução de íons de cálcio (Ca^{2+}) e íons de hidróxido (OH^-), originando em poucos minutos um aumento do pH para valores acima de 12.



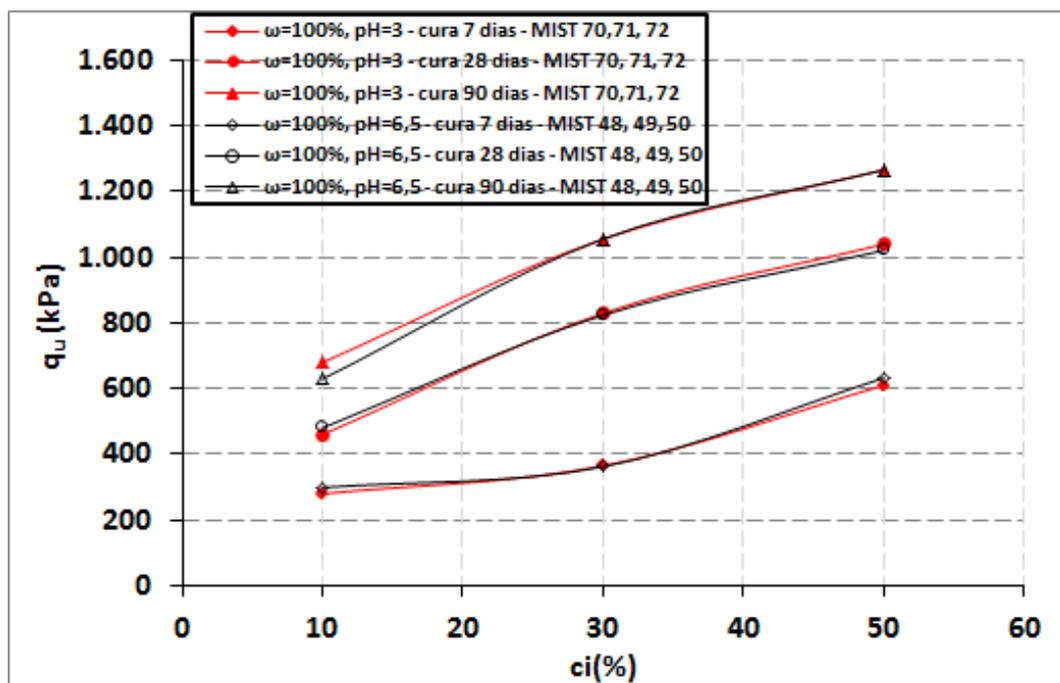


Figura 5-29: Comparação da curva com pH=3 e pH=6,5 da mistura com teor de 70% caulim, 30% bentonita, e teor de cimento $c_i=10\%$, $c_i=30\%$ e $c_i=50\%$, $\omega=100\%$

De acordo com os ensaios mostrados nas Figura 5-30 e Figura B. 1 (Anexo B), com adição de 0,65g o pH elevou de 3 para 13, o qual confirma as evidências discutidas no parágrafo anterior.

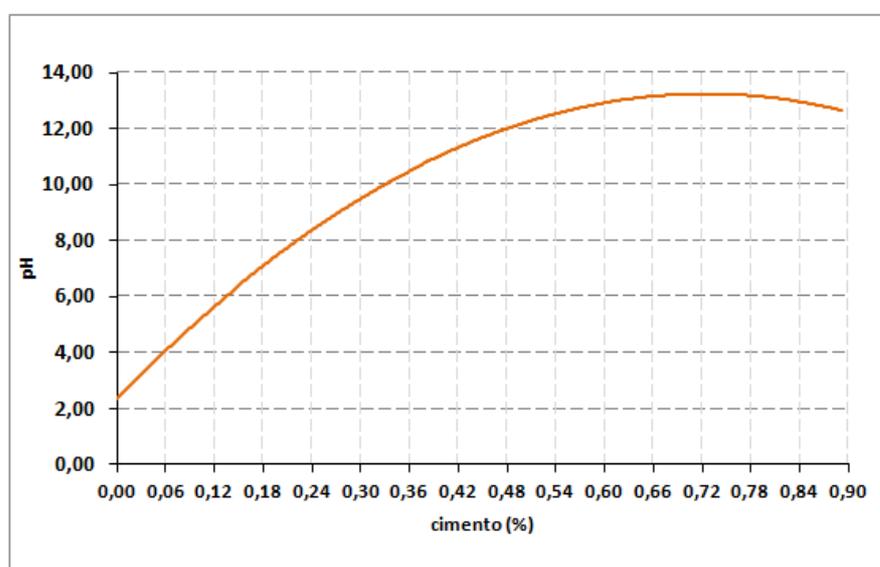


Figura 5-30: pH versus material

5.7. TURFA LÍQUIDA

A turfa líquida utilizada na agricultura apresentou pH alcalino e seus resultados foram iguais as misturas sem turfa líquida.

5.8. ÁCIDO HÚMICO

O ácido húmico no estado sólido (po de cor branca) adquirido da Sigma Aldrich foi testado primeiramente para verificar sua solubilidade com água potável para que permitisse a mistura com o solo. De acordo com os resultados obtidos não foi possível dissolver o pó de cor branca na água. Após esse ensaio testou-se outras soluções para dissolução do ácido húmico e verificou-se que seria possível sua dissolução com base, no entanto a solução tornava-se alcalina, motivo pela qual não é objetivo da presente pesquisa.

A mistura com ácido húmico extraído da leonardita apresentou redução da resistência a compressão não-confinada. Conforme é mostrado na Figura 5-31, na cura aos 7 dias não é afetada pelo ácido húmico, no entanto aos 28 dias ocorre um decréscimo de aproximadamente 11% da resistência com adição de 4% de ácido húmico.

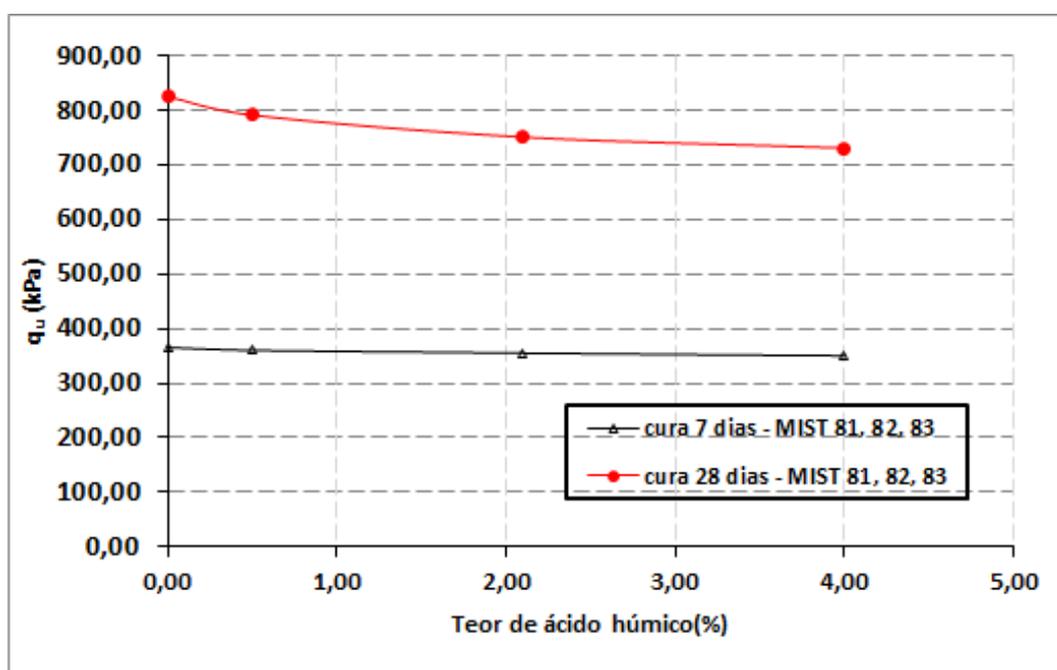


Figura 5-31: Teor de ácido húmico versus resistência não-confinada MIST 86 a 88 (Tabela 3-5)

O ácido húmico teoricamente pode estar impedindo a hidratação de parte do silicato tricálcio (C_3S) através da formação de uma película no entorno das partículas de solo-cimento. No ácido húmico com $pH=12$, as carboxilas dissociam podendo também impedir as reações de hidratação conforme o modelo ilustrativo da estrutura das carboxilas dissociadas (Figura 5-32).

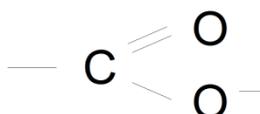


Figura 5-32: Modelo de estrutura das carboxilas dissociadas

De acordo com ASHWORTH (1964) os compostos orgânicos exibem grande afinidade por íons metálicos (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} e Fe^{3+}) e podem gerar compostos insolúveis e relativamente inertes devido à dissociação em meio aquoso com íons negativamente carregados.

O fenômeno pode ser explicado devido a afinidade química que existe entre o cálcio e os componentes orgânicos, que reagem com $Ca(OH)_2$ e formam reações insolúveis. Como acontece com o cimento, se forma uma camada em volta das partículas impedindo assim sua hidratação, (YUMUS, D. et al., 2011).

5.9. SOLO-CIMENTO-FOLHAS DE EUCALIPTO MOÍDA

Os resultados das misturas (MIST-57 a MIST-62) com resíduo de folha de eucalipto moída (RFEM) apresentam padrões que merecem atenção. A resistência à compressão simples aos 7 dias é bem inferior ao solo normal melhorado com cimento. Porém, com aumento do tempo de cura o solo atinge resistências próximas ao solo sem RFEM.

Os resultados apresentados correspondem a ensaios realizados em amostras com umidade de 100%, acrescidas da adição de 5% e 20% de RFEM.

A Figura 5-33 mostra que a diferença de resistência média do solo com 5% de RFEM aos 28 dias é o dobro do solo sem RFEM, e com solo com 20% de RFEM aos 28 dias praticamente

não atingiu melhoramento. Aos 90 dias de cura o solo com 5% RFEM obteve aumento que chegou a resultado 25% mais baixo que o solo sem RFEM, no entanto no solo com teor de 20% de RFEM ocorreu aumento de resistência muito baixo.

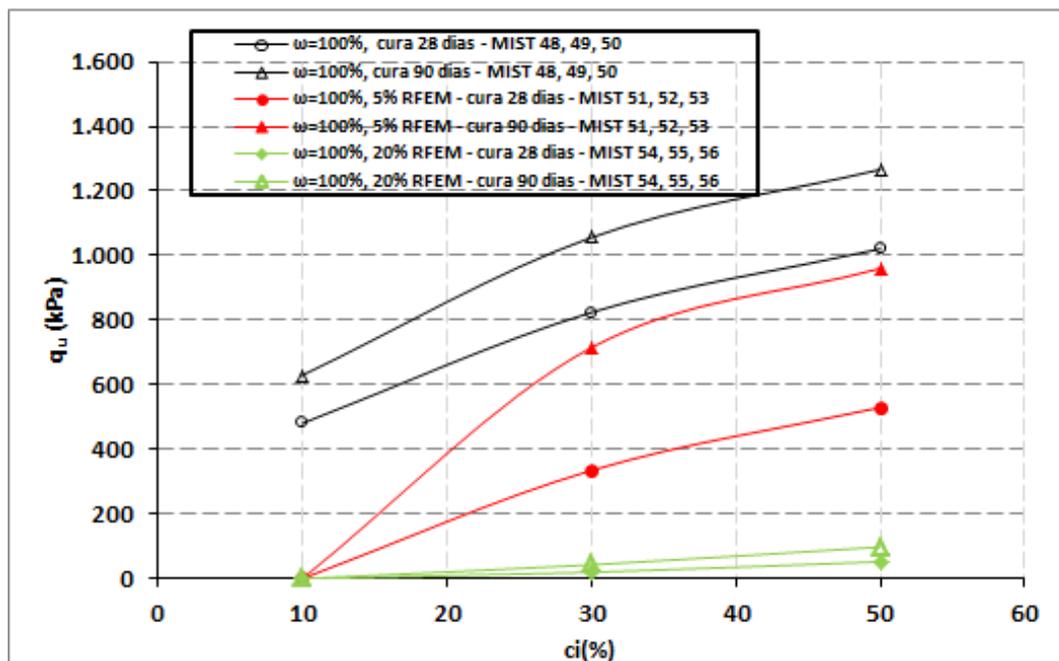


Figura 5-33: Comparação da curva de resistência à compressão aos 28 e 90 dias de solo com teor de RFEM de 5% E 20%, teor de cimento versus resistência à compressão simples

Verifica-se que teores inferiores a 30% de cimento não mostraram uma evolução nas propriedades dos solos com RFEM. Nota-se ainda que o período de cura exerce influência significativa no aumento de resistência de solos com RFEM melhorados com cimento.

Na Figura 5-33 destaca-se principalmente o aumento de resistência aos 90 dias com 5% de RFEM, que atingem valores similares às misturas que não contém RFEM. As razões podem ser diversas, pois esse efeito ainda não é completamente entendido. De acordo com o citado na secção 2.11.2, na fase inicial de hidratação do cimento pode estar ocorrendo um retardamento da pega dos silicatos e aluminatos. O silicato tricálcio é responsável por quase 60% da resistência inicial. Após alguns dias o silicato dicálcio torna-se também um grande responsável pela resistência da mistura.

Nas misturas de concreto quando a disponibilidade de íons aluminato e sulfato são baixas, a pasta de cimento permanece trabalhável, então ela somente começará a enrijecer quando os espaços ocupados pela água começarem a ser preenchidos com cristais de etringita. No caso

das misturas com folhas de eucalipto moídas pode estar ocorrendo uma redução de íons aluminato e sulfato nos primeiros dias de cura. Conforme aumenta o tempo de cura e inicia o preenchimento dos vazios com cristais de etringita a mistura adquire taxa superior de aumento de resistência.

De acordo com a revisão bibliográfica as folhas de eucalipto são ricas em ácido tânico, chegam a teores até 60% de sua composição. Além do ácido tânico, existe na superfície das folhas de eucalipto uma cera protetora que serve como um impermeabilizante para que as águas escoem sobre sua superfície. Essa cera pode ser caracterizada como óleos essenciais, substâncias lipofílicas (+- hidrofólicas) que criam um “ambiente” lipofóbico, impedindo o contato entre os reagentes para ocorrer a cimentação. Outro fator que pode interferir como no caso do ácido húmico é devido à dissociação cujo pka do ácido tânico é 10. Segue abaixo uma ilustração da dissociação dos íons (Figura 5-34).

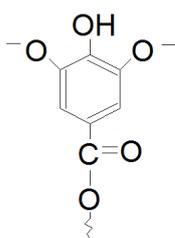


Figura 5-34: Desenho ilustrativo da dissociação de íons do ácido tânico com $\text{pH} \leq 10$

Além dos motivos citados acima, o índice de aromaticidade $I_{\text{C}=\text{C}}/I_{\text{C}=\text{H}}$ (1630/2920), calculado a partir das intensidades dos espectrogramas pode indicar umas das grandes diferenças químicas de comportamento entre os efeitos do resíduo de eucalipto e a turfa. O resíduo de eucalipto ($I_{\text{C}=\text{C}}/I_{\text{C}=\text{H}} = 4,69$) é muito mais aromático que a turfa ($I_{\text{C}=\text{C}}/I_{\text{C}=\text{H}} = 2,59$), assim poderá formar películas mais densas que imperiram a hidratação do cimento. A Tabela 5-1 apresenta as intensidades e os índices de aromaticidade da turfa, do ácido húmico e do resíduo de eucalipto.

Tabela 5-1: Intensidades e índice de aromaticidade

DESCRIÇÃO	IR								RELAÇÃO
	2920	1720	1640	1510	1450	1330	1220	1120	1630/2920
TURFA	10,64	26,24	27,58	4,16	4,04	1,56	9,14	8,72	2,59
ÁCIDO HÚMICO	11,34	26,23	27,64	4,24	3,82	0,00	7,76	11,70	2,44
EUCALIPTO	5,98	9,36	28,08	8,13	6,18	8,86	3,91	11,51	4,69

5.10. ÁCIDO SULFÚRICO

Na primeira dosagem foram utilizados 10% de ácido sulfúrico da massa da argila caulim. Quatro corpos de prova foram moldados, correspondendo a 0%, 3%, 7% e 12% de cimento. A umidade ótima média medida no final da mistura foi de $\pm 9\%$. O pH medido foi de 1,2. Durante a mistura, notou-se que ocorreu aumento de temperatura do solo, o que pode ser explicado devido às reações que ocorrem entre a água e o ácido sulfúrico. A reação de hidratação do ácido sulfúrico é altamente exotérmica. A reação do ácido sulfúrico e da água consiste na formação de íons hidrônio.

A diluição de ácido sulfúrico em água gera a variação de entalpia negativa, quando há liberação de energia em forma de calor. Ácidos dissolvidos em água geram reação exotérmica. Entalpia quer dizer o conteúdo global de energia (calor) de um sistema. A variação de entalpia ocorre quando um sistema sofre uma transformação química e, portanto a variação de entalpia é a quantidade de calor que se pode medir, à pressão constante, em uma reação química, (Sabdella, 2000).

Na segunda etapa do trabalho diminui-se o teor de ácido sulfúrico, utilizando 0,1% - pH 2,0. Quatro corpos de prova foram moldados, correspondendo a 0%, 3%, 7% e 12% de cimento. A umidade ótima média obtida no final da mistura foi de 17,5%.

O corpo de prova que não continha adição de cimento desmanchou-se na submersão. Os resultados de compressão não-confinada das misturas com cimento estão mostrado na Figura 5-. A Figura 5- também compara os resultados dos ensaios realizados por Rosa (2009) sem adição de ácido sulfúrico, podendo-se observar que não ocorreu diferença significativa entre estes ensaios. Na plotagem do gráfico utilizou-se a Equação 5-3 proposta por Rosa (2009) para comparação dos resultados obtidos nesse trabalho. Essa equação é aplicável somente para peso específico de $15,0\text{kN/m}^3$:

$$q_u = 368,42 * ci + 259,26$$

Equação 5-3

onde ci= teor de cimento

A resistência à compressão não-confinada da mistura de 3% cimento foi de 1084kPa, 20% inferior ao resultado obtido sem adição de ácido sulfúrico. Na mistura de caulim com 7% de cimento a resistência não-confinada foi de 2888kPa, correspondente a um aumento de 1,7% comparado com o ensaio sem adição de ácido sulfúrico. Na mistura que continha 12% de

cimento, $q_u = 4906 \text{ kPa}$, correspondente a um aumento de 4,6% de resistência não-confinada com adição de ácido sulfúrico. Verifica-se por estes resultados que a adição de 0,1% de ácido sulfúrico afeta o pH mas não altera a resistência do solo (Figura 5-35).

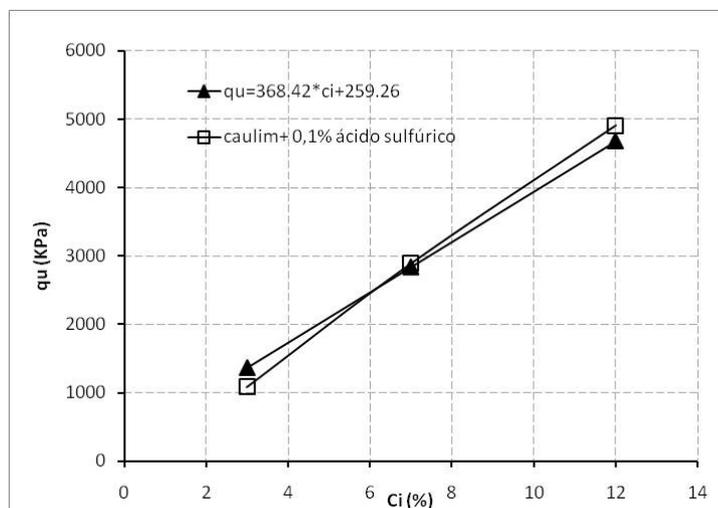


Figura 5-35: Resistência de ruptura à compressão simples versus porcentagem de cimento

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

6.1. EQUIPAMENTO PARA PREVISÃO DE CARGA

O novo equipamento para previsão de resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados apresentou excelente desempenho e precisão facilitando o processo de amostragem.

- Os resultados de tensão de cravação têm relação única com resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, independente do tipo de solo, teor de cimento/cal, tempo de cura e umidade.

6.2. SOLO-CIMENTO

De acordo com os ensaios realizados, conclui-se que a taxa de ganho de resistência mecânica é maior até 7 dias devido a hidratação primária do cimento. Em alguns casos a resistência aumentou cerca de 4 vezes aos 90 dias comparado com a resistência aos 7 dias. Em média ocorreu aumento de 2 vezes da resistência no período de tempo entre 7 e 90 dias.

- Na utilização de teores de cimento abaixo de 10% não se pode definir uma taxa de aumento de resistência devido à influência da fragilidade das amostras durante o processo de moldagem, desmoldagem e ensaio de compressão simples.
- O teor de umidade é um fator de grande influência no melhoramento de solos. Quanto maior a umidade menor a resistência.
- A quantidade de cimento que melhor apresentou resultados foi entre 350-450 kg/m³.

6.3. CAL

- De forma geral, a cal virgem atingiu resultados de resistência bem inferiores às adições de cimento.

- Verificou-se que as adições de cal somente fizeram efeito perceptível ao equipamento utilizado a partir de 14 dias de cura em umidades abaixo de 135%.
- Nas misturas com 5% turfa com a combinação de material pozolânico e cal obtiveram ótimos resultados.
- Nas misturas do silte com 50% cal virgem e 50% cimento a combinação foi eficaz, sendo que aos 28 dias de cura apresentou resultados inferiores, mas aos 90 dias de cura seus resultados ultrapassaram os valores das outras misturas.
- A cal virgem em teores acima de 20-30% não contribuiu para o aumento da resistência do solo nas misturas com caulim, bentonita e turfa. No entanto para as misturas com silte tiveram aumentos de resistência próximos às adições de cimento.

Os resultados mostraram que as misturas resultantes da adição de cal virgem não tiveram melhoramento das propriedades físicas em misturas de solo com folha de eucalipto moídas que puderam ser avaliadas pelos equipamentos empregados nos ensaios. A explicação para o fato de a cal não apresentar ganhos de resistência à compressão simples significativos exige estudo químico mais profundo. Tal efeito já foi relatado em outros estudos realizados por Ingles & Metcalf (1972) e USACE (1994). Nem sempre a cal tem efeito eficaz no melhoramento das propriedades mecânicas. Ingles & Metcalf (1972) relatam que a cal tem pouco efeito em solos com altos teores de matéria orgânica, podendo ter efeitos mais positivos do que outros aglomerantes em solos argilosos. Segundo USACE (1994), solos com média à alta plasticidade são mais reativos a cal.

6.4. ÁCIDO CLORÍDRICO

O ácido clorídrico possibilitou a identificação do fenômeno que acontece durante o contato entre ele e o cimento. Conforme a revisão bibliográfica, silicato tricálcio (C_3S) é misturado com água, é rapidamente libertado na solução de íons de cálcio (Ca^{2+}) e íons de hidróxido (OH^-), originando em poucos minutos um aumento do pH para valores acima de 12. Isso pode ser visualizado nos resultados mostrados nas Figura 5-30. Nos resultados apresentados o pH de valor 2 sobe para 12 com adição de uma porção muito pequena de cimento.

Verifica-se que o pH não interferiu na resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados nos materiais utilizados.

6.5. FOLHA DE EUCALIPTO

O estudo realizado sobre a influência de algumas características do solo com folhas de eucalipto moídas permitiu concluir que a matéria orgânica exerce elevada influência sobre o comportamento mecânico do solo estabilizado. Este comportamento é consequência do fato de a matéria orgânica induzir no solo um teor de água mais elevado e maior porosidade. O valor de pH não demonstrou influência conforme descrito acima.

O tempo de cura influencia drasticamente no melhoramento de solos com matéria orgânica. As misturas com RFEM chegam a atingir valores de resistência aos 90 dias próximos às misturas sem RFEM com teores de cimentos acima de 30%.

Notou-se que as misturas com matéria orgânica (folha de eucalipto moída) apresentaram características retardadoras da pega. Quanto menor o tempo de cura, menor a resistência à compressão simples.

O índice de aromaticidade e outras substâncias que contém na folha de eucalipto podem interferir como verificado nos resultados comparados com as adições de turfa.

A quantidade mínima a ser utilizada encontra-se em perfeita concordância com os ensaios realizados por Axalsson et al. (2002) que recomenda teores entre 150-250kg/m³ para turfas. No caso da mistura utilizada (teores de matéria orgânica de 5%), teor de cimento de 10% não apresentou resultados consistentes. Considerando isso recomenda-se utilizar teores de cimento acima de 250kg/m³.

6.6. ÁCIDO HÚMICO

A mistura com adição de 4% de ácido húmico extraído da leonardita apresentou redução da resistência à compressão não-confinada aos 28 dias o qual ocorreu um decréscimo de 11% em relação a mistura sem adição de ácido húmico. Existem diversas suposições para tal comportamento, por exemplo, dissociação das carboxilas, afinidade por íons metálicos que geram compostos insolúveis, afinidade do cálcio com componentes orgânicos. Deverá ser realizado um estudo químico mais profundo do fenômeno para um melhor entendimento.

6.7. ÁCIDO SULFÚRICO

De acordo com a bibliografia pesquisada existem diversos métodos para identificação do “ponto de fixação de cal”, porém conforme os ensaios realizados por Consoli et al (1997), o método mais adequado é o de Hilt e Davidson (1996) para solos com matéria orgânica e alta umidade. Nessa pesquisa tentou-se utilizar essa técnica para identificação do ponto de fixação para identificação da acidez, no entanto não se obteve nenhum resultado coerente.

Baseado nos resultados obtidos dos ensaios realizados concluiu-se que:

Teores elevados de ácido sulfúrico continuaram reagindo na presença de água, como no caso quando o corpo de prova foi submerso no tanque de água destilada e desmanchou-se. Durante o processo de mistura se observou o aumento da temperatura, resultando em reação exotérmica gerada entre a água e o ácido sulfúrico, que teve como consequência a redução da umida.

As misturas de caulim, cimento com adição de pequenas quantidades de ácido sulfúrico não demonstraram interferir na resistência do solo mesmo atingindo $\text{pH}=2,0$.

6.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resistência à compressão não confinada de estabilizações realizadas à base de cimento Portland e cal pode ser estimada a partir de métodos expeditos, bastante úteis em fase de pré-dimensionamento e na elaboração do estudo laboratorial conducente à otimização da estabilização, mas ainda requer ensaios laboratoriais.

Com a utilização do novo equipamento pode-se reduzir significativamente o tempo assim como números de ensaios, pois existe uma relação linear entre os resultados de compressão simples, tração por compressão diametral e cravação. Esse novo ensaio pode ser implantado facilmente em qualquer laboratório e lugar por ser simples, prático e preciso.

6.9. SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta pesquisa e ampliar o conhecimento sobre o novo ensaio e o equipamento, o autor sugere os seguintes tópicos:

- Verificação dos efeitos das diferentes espessuras de camadas e profundidades de cravação do novo equipamento;
- Realizar estudo profundo sobre a teoria para determinação da capacidade de carga para fundações rasas com bases circulares com relação ao fator N_c de capacidade de carga;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. L. **The engineering behavior of a Canadian Muskeg**. Proceedings, sixth International conference on soil mechanics and foundation engineering, Montreal, Canada, 1, pp 3-7, 1965.

AHNBERG, H., JOHANSSON, S.E, RETELIUS, A. and LJUNGKRANTZ, C. **Cement and lime for deep stabilization of soils – a chemical/physical study of stabilization effects**. Swedish Geotechnical institute, Linköping, Report No. 48 (in Swedish), 1995.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, “ACI Comitê 116.R-00. **Cement and concrete terminology**. ACI manual of concrete practice, part 1, Detroit: American Concrete Institute, p. 73, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2166 (2000). **Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil**.

ANDRADE, E.N. **O eucalipto**. 2ª edição. Cia. Paulista de estradas de ferro, 1961.

ANDREJKO, M.J., FIENE, F. and COHEN, A.D. **Comparation of asching techniques for determination of the inorganic content of peats, “testing and organic soil**. ASTM STP 820, P. M. Jarret, Ed., American Society of Testing and Materials, pp. 5-20, 1983.

ANDROMALOS, K.B., and BAHNER, E.W. **The application of various deep mixing methods for excavation support systems. Grouting and Ground treatment (GSP 120)**, p. 515-526, Proceedings of the third international conference, February 10-12, 2003.

ARMAN, A. **A definition of organic soil (an engineering identification)**. Engineering research Bulletin No. 101, Louisiana state university, division of engineering research, for Louisiana department of highways, 1969.

ARMESTO, L., BAHILL, A., VEIJONEN, K, CABANILLAS, A. and OTERO, J. **Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed. Biomass and Bioenergy**. 23, 2002.

ASHWORTH, M.R.F. **Titrimetric organic analysis**. Interscience Publishers, EUA, 1964. p. 287-290.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12024: **Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12777: **Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não-confinada**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13600: **Solo Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: **Solo – Determinação do limite de plasticidade**, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo – Análise Granulométrica**, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 2011.

ASTM Standard D2487, **Standard Practice for Classification of soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System)**, Vol. 04.08.

AXELSSON, K., JOHANSSON S.E. and ANDERSON, R. **Stabilization of organic soil by cement and pozzolanic reaction – Feasibility study**. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3, 2002.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Containes**. 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

BABASAKI, R., KAWASAKI, T., NIINA, A., MUNECHIKA, R. and SAITOH, S. **Study of deep mixing method using cement hardening agent (part 0)**. Proceedings of the 15th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 713-716, 1980.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção I e II Apostila Curso de Engenharia Civil**, Pontifca Universidade Católica do Paraná, 1999.

BELL, F.G. **Lime stabilization of clay minerals and soils**. Engineering Geology 42, p. 223-237, 1996.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R.; MUIRA, N.; BALASUBRAMANIAN, A. S. **Soft ground improvement: In Lowland and Other Environments**. New Work: American Society of Civil Engineers, 1996.

BIJEN, J., SELST, R. **Cement equivalent factors for fly ash**. Cement and concrete research, v. 23, p. 1029-1039, 1993.

BLOOMFIELD, C.; KELSO, W.I.; PRUDEN, G. **A comparison of the compositions and properties of natural and laboratory-prepared humified organic matter.** Soil Biology and Biochemistry, Oxford, V.7, p.313-317, 1975.

BONOMALUWA, B.B., PALUTNICOWA, T.A. **The formation of soil and humus.** *Translated by Wei K.Z. Agricultural Publishing House, Beijing*, p. 140-141, 1987.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, LONDON. BS:1377-7 (1990). **Methods of test for soils for civil engineering purpose – part 8: shear strength tests (effective stress).**

BRUCE, D.A., BRUCE, M.E.C., and DIMILLIO, A.F. **Dry mix methods: a brief overview of international practice. “Dry deep mix methods for deep soil stabilization, Proceedings of the International Conference on Dry Deep Mix Methods for deep Soil Stabilization,** Ed. By Bredenberg, G. Holm, and B. Broms, Stockholm, Sweden, October 13-15, p. 15-25, 1999.

BRUNETON, J. **Farmacognosia – Fitoquímica plantas medicinais.** 2 ed. Espanã: Editorial Acríbia s. A., 2001, p. 365-400.

BUJANG, B. K. et al. **Efect of chemical admixtures on the engineering properties of tropical peat soils.** American Journal of Applied Sciences 2 (7): 1113-1120, 2005.

BUJANG, B.K. et al. **Effect of chemical admixtures on the engineering properties of tropical peat soil.** *American journal of applied Sciences* 2 (7): 1113-1120, 2005.

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

CENTURIONE, S.L., MORINGOLO, V., & PECCHIO, M. **Cadeia de transformações cristal químicas de minerais naturais em cimento Portland e concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 47, 2003, João Pessoa-PB.

CESP. Turfa. In: **Minerais Energéticos: Carvão, turfa, rochas oprígenas.** Série pesquisa e desenvolvimento 014, São Paulo: CESP, 1985: 20-41.

CHEN, H., WANG, Q. **The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement.** *Bull Eng. Geo. Env.*, p 445-448, 2006.

CHIKYALA, S. R. **Effect of calcium based treatment on organic soil behavior.** 133 p. Master degree thesis. University of Texas. Texas. Arlington, 2008.

CHRISTENSEN, B. T. **Decomposability of organic matter in particle size fraction from field soil with straw incorporation.** Soil biology Biochemistry, Oxford, v.19, n.4, p.429-435, 1987.

CLASEN, H. A. C. et al. **Ácido húmico e fúlvico do carvão da jazida de candiota**. *Rev. Bras. De AGROCIÊNCIA*, V4, p. 35-40, 1998.

CLOUGH, G.W.; SITAR, N.; BACHUS, R.C.; RAD, N.S. **Cemented sands under static loading**. *Journal of Geotechnical Engineeringdivision*, New York: v. 107, n.6, p. 799-817, 1981.

CONSOLI, C. C., THOMÉ, A. and CERATTI, J. A. P. **Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures**, *Recent Development in Soil Pavement Mechanics*. p. 217-222, 1997.

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.197-2005, 2007.

CONSOLI, N.C., VENDRUSCOLO, M.A., PRIETTO, P.D.M. **Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber**. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, New York: ASCE, v.129, n.1, p.96-101, 2003.

CORDEIRO,G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana de açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORTELLAZZO, G., & COLA, S. **Geotechnical characteristics of two Italian peats stabilized with binders**. Proceedings of the international conference on Dry mix methods for deep soil stabilization/ Stockholm/ Sweden/ 13-15 th October, pp. 93-100, 1999.

COSTA, A. F. **Farmacognosia**. 5 ed. Lisboa Calouste Gulbenkian, 1994, v. 1.

COSTA, C. N. **Disciplina de fundamentos de geotecnia**. Capítulo 4 – produtos de alteração das rochas. DEC-FCT da Universidade Nova Lisboa, Lisboa, p. 16 (consultado em junho de 2011 e disponível em: http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Geotecnia/Fundamentos_Geotecnia/4_alteracao.pdf), 2006.

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

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Vol. 1, 2ª edição, LNEC, Lisboa, p. 401, 1988.

DICK, D.P., GOMES, B. and ROSINHA, P.B. **Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico**. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:603-611, 1998.

DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. **Química da matéria orgânica do solo**. In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. *Química e Mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

DUCHAUFOR, P. **Pedology**. London: George Allen & Unwin Pub. Inc., 1977. 448p.

EDIL, T. B. and DHOWIAN, A. W. **At-rest lateral pressure of soils**. Journal of Geotechnical Engineering, 107, No. GT2, PP. 201-217, 1981.

EDIL, T. B. and STAAB, D. A. **Practitioner' guide for deep-mixed stabilization of organic soils and peat**. Final report. The National Deep Mixing Research Program, project Number NDM302, p.60, 2005.

EDIL, T. B., & WANG, X. **Shear strength and K_0 of peats and organic soils**, Geotechnics of highwater materials: ASTM special technical publication, 1274 (2000), pp.209-225.

EMBRAPA. CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos. 4^a**. Aprox. Rio de Janeiro, EMBRAPA-CNPS, 1997, 169p.

EMBRAPA. SNLCS. **Cr terios para distin o de classes de solos e de fases de unidade de mapeamento**; normas emu so pelo SNLCS. Rio de Janeiro. 1988a. 67p. (Documentos, n11).

EUROSOILSTAB. **Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils**. Design guide soft soil stabilization. CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177, Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Comission, pp. 94, 2001.

FARIA, E. F. **Predic o da exotermia da rea o de hidrata o do concreto atrav s de modelo termo-qu mico e modelo de dados**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro. 130 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

FARIAS FILHO, J., ROLIM, J.S., TOLEDO FILHO, R.D. **Potencialidades da metac olinita e do tijolo queimado mo do como substitutos parciais do cimento Portland**. Revista Brasileira de Engenharia Agr cola e Ambiental, Campina Grande, Pb. V.4 n.3 UFPB, P. 437-444, 2000.

FASSBENDER, H.W., ALPIZAR, L., HEUVELDOP, J. FOLSTER, H. and ENRIQUEZ, G. **Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with in Costa Rica**. Inventory of organic matter and nutrients. Agrofor. Sys. 4, p. 175-189, 1986.

FEUERHAMEL, M. R. **Comportamento de solos refor ados com fibras de polipropileno**. *Disserta o de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS*, 2000.

FORSÉN, L. **Proceedings of the international symposium on chemistry of cements, Stockholm**, p. 298, 1983.

FOX, C.A. **Micromorphological caracterizarion of histosolos**. In: Douglas, L.A.; Thompson, M.L. (Eds.). Soil micromorphology and soil classification. Madison: ASA/SSSA, 1985.

FRAKLIN, A. G. ASCE, A. A., OROZCO, L. F. & SEMRAU, R. **Compaction and strenght of slightly organic soils**. Journal of the soil mechanics and foundation division, 99(7), pp. 541-557, 1973.

FRANCHI, J.G., LIMA, J.R.B. **Aplicação de turfa na recuperação de solos degradados pela mineração de areia**. São Paulo: EPUSP, 2000. 19p. – (Boletim técnico da escola politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/124).

FUCHSMAN, C.H. Peat – **Industrial chemistry and technology**. New York, Academic Press, 1980.

GABBO, L.A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios X e qualificação por resfriamento do Rietveld**. 157p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, 2003.

GOMES, C. F. **Argilas, o que são e para que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian.

GORHAM, E. **Development of peatlands**. Quarterly review of biology, 32, 145-66, 1957.

HARTLÉN, J.; WOLSKI, W. **Embankments on organic soils**. Amsterdam: Elsevier, 1996.

HARVEY, I. M. **Analysis of hydrolysable tannins**. Animal feed science and technology, v.91, p. 3-20, 2001.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras de contenção de resíduos**. 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRS, Porto Alegre.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime soil mixture**. Highway Research Board, 304, p. 99-138, 1961.

HORPIBULSUK, S. **Analysis and assessment of engineering behavior of cement stabilized clays**. PhD. Dissertation, Saga University, Saga, Japan, 2001.

HORPIBULSUK, S., MIURA, N. and NAGARAJ, T. S. **Assessment of strength developments in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis**. Géotechnique, Vol 53, No. 4, p. 439-444, 2003.

IHSS – International Humic Substances Society

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: Principle and practice**. Melbourne: Butterworths, 1972.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Pesquisa de turfa e linhito no Vale do Paraíba**. São Paulo, IPT, 1979, (Relatório 11.572).

IPCC, **Relatório Buildings and the climate change**, 2007 disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>.

IRGA – **Instituto Riograndense do Arroz**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br>

JANZ, M. and JOHANSSON, S. E. **The function of different binding agents in deep stabilization**. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 9, Linköping, Sweden, p. 47, 2002.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2013. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JOHNSTON, C. T., TOMBÁ CZ, E. **Surface Chemistry of soil minerals, In: Soil mineralogy with environmental applications**. (Eds. J.B. Dixon, D.G. Schulze) soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 37-67, 2002.

JOISEL, A. **Admixtures for ciment**, publicado pelo autor, Soisy, France, 1973.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. **Caracterização de solos orgânicos do Rio Grande do Sul: Propriedades morfológicas e físicas como subsídios à classificação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.13, p.227-236, 1989.

KIHARA, Y. Et al. **A Microscopia do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2, 1990, São Paulo.

KOSKINEN, W. C., & HARPER, S. S. (1990). **The retention process: Mechanisms**. In H. H. Cheng (Ed.), *Pesticides in the soil environment: Processes, impacts, and modeling* (pp. 51–77). Madison, WI: Soil Science Society of America.

KUBIENA, W. L. **Micromorphological features of soil geography**. New Brunswick: Rutgers University Press, 1970. 168p.

KUMADA, K. **Chemistry of soil organic matter**. Japan Sci. Soc. Press, Tokyo, 1987.

LAMBE, T. W. and WHITMAN, R. V. (1979). **“Soil mechanics”**. *John Wiley and Sons*, SI Version, New York.

LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O., and PHEENEY, P. E. **Geotechnical classification of peats and organic soils**. In testing peats and organic soils, ASTM STP 820. Edited by P. M. Jarrett. American Society for Testing and Materials, pp.37-51, 1983.

LANDVA, A.O., KORPIJAAKKO, E.O., and PHEENEY, P.E. **Geotechnical classification of peat and organic soil**. In testing of peats and organic soils, ASTM STP 820. Edited by P.M. Jarrett. American Society for testing and Materials, pp. 37-51, 1983.

LECHOWICZ, Z. **Na evaluation of the increase in shear strength of organic soils**. Proceedings, International workshop on advances in understanding and modeling the mechanical behavior of peat, pp. 167-180, 1994.

LI, J.C.; HWANG, C.L.; YAO, H.L.; LEE, R.J. **A study of slag cement-bentonite slurry**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro. Proceedings Rotterdam: A.A. Balkema, v.3, p. 1499-1502.

LIMSIRI, C. **Very soft clay applied for road embankment: Modelling and optimisation approach**. Taylor & Fancis, p. 153, 2008.

LOPES, L. S. J. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

LOTHENBACH, B. **Thermodynamic modeling of the hydration of Portland cement**. Cement and Concrete research 36, p. 209-226 – EMPA – Laboratory for concrete and construction chemistry – Switzerland – Elsevier – 2006.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado á pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

LYNN, W.C.; MCKINZE, W.E.; GROSSMAN, R.B. **Field laboratory tests for characterization of Histosolos**. In: AANDAHL, A.R. (Ed.) Histosolos – their characteristics, classification an use. Madison: ASA/SSSA, 1974. P.11-20.

MAGDOFF, F. Building Soils for Better Crops: **Organic Matter Management**. Lincoln: Univ. of Negraska Press, 1992. 433p.

MALHOTRA, V.M. **Proceedings of the international Conference on Superplastificizers and other chemical admixtures in concrete**, SP-195, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2000.

MARINO, F.S.; KURTH, G.M. Turfa – **Um combustível à espera de utilização**. Energia fontes alternativas, v.20, n.4, p.64-71, 1982.

MARTINS, A. G. **Influência de fatores tecnológicos na avaliação analítica e farmacológica de extratos secos de Maytenus ilicifolia Martius ex Reiss**. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Programa de Pós Graduação em Ciências Farmacêuticas, Faculdade de Farmácia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

MASSAZA, F. **Pozzolana and pozzolanic ciments**. In: Hewlett, P. C. (ed.), Lea's Chemistry of cement and concret, 4th edition, Arnold Publishers, London, 1998.

MATOS FERNANDES, M. **Mecânica dos solos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol. I e II, 2002.

MEHTA, K. and MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MIESRI, G., STARK, T. D., AJILOUNI, M. A., CHEN, S. C. **Secondary compression of peat with or without surcharge**. Journal of geotechnical and geological engineering, ASCE, 123(5), pp. 411-421, 1997.

MITCHELL, J. K. & SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. John Wiley & Sons, Inc. 3rd ed., p. 577, 2005.

MME (Ministério de Minas e Energia), **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de não metálicos 2009** disponível em: <http://www.mme.gov.br>.

MODMOLTIN, C., JIANG, L., ONITSUKA, K. **Influence of humic and salt concentration on lime-stabilized ariake clays and microstructure research**. Chinese journal of geotechnical engineering. Vol. 26 No. 2, Mar. 2004.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1999.

MORRILL, L. G., MAHILUM, B.C., and MOHIUDDIN, S.H. **Organic compounds in soils: Sorption, degradation and persistence**. Ann Arbor Science Publishers/The Butterworth Group, Woburn, M.A., 1982.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime stabilization and lime modification. Lime treated soil construction manual**, Bulletin 326, 2004.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Part 2. Madison, Soil Science Society of America, 1982. p.539-579.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMMER, M.E., eds. Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.961-1010.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Part 2. Madison, Soil Science Society of America, 1982. p.539-579.

NEVES, E.N.S.A.C. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal: Modelos de comportamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Eng. Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, 1997.

NIEDER, R.; BENBI, D.K. **Carbon and nitrogen in the terrestrial environment**. Germany; Springer, 2008.

OADES, J.M. **An Introduction to Organic Matter in mineral Soils**. In: Mineral Environments. 2a ed. SSSA Book Series n. 1. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 89-159.

PRANDTL, L., 1920. **Härte plashercher Körper**. Nachrichten Ges. Wissenschaftler Göttingen (as referenced by Taylor, 1948).

PETRUCCI, E. **Materiais de Construção**, ed. Globo, Rio de Janeiro, 1979.

PICCOLO, A. **The supramolecular structure of humic substances**. Soil Science, v. 166, p. 810-832, 2001.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolâmico/Maria Tereza Fernandes Pouery**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre – RS, 2006.

PRUDÊNCIO, L.R.J., SANTOS, S., DAFICO, D.A. Coletânea HABITARE – vol 4. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, Ilustrado ISBN 85-89478-05-X, 2003.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARIA, S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation Research Record, Washington**, 1652, p. 215-227, 1999.

RADFORTH, N. W. **Classification of muskeg**. In: Macfarlane, I. C. (ed) Muskeg Engineering hand book. Canadian building series. University of Toronto press, 1969.

REGO, J.H.S. **Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. Goiânia. CMEC/UFG, Dissertação de Mestrado, 2001.

Revista Food Ingredients Brasil, nº 19 – 2011, p. 3. <http://www.revista-fi.com/materias>, consultado 19/10/2013.

RODELLA, A. & ALCARDE, J.C. **Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes**. Sci. Agric., 51:556-562, 1994.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING S. **Lime requirement for stabilization**. Transportation Research Board Annual Meeting, 79, 2000.

ROGES, C.D.F., GLENDINNING, S. & ROFF, T.E.J. **Lime modification of clay for construction expediency**. Proceedings of the institution of civil engineers: Geotechnical engineering, p.242-9, 1997.

ROSA, A.M. **Relatório de ensaios**. 2009.

ROSA, C.M., CASTILHOS, R.M., DICK, D.P., PAULETTO, E.A., GOMES, A.S. **Teor e qualidade de substâncias húmicas de planossolo sob diferentes sistemas de cultivo**. Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.6, p.1589-1595, 2008.

SAAB, S. C. **Caracterização da matéria orgânica em gleissolos por espectroscopias de EPR, RMN, IV e UV-Visível**. 1999, 111p. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

SAMPAIO, J.C. **Materiais de construção**. AEFEP – Universidade do Porto, 1978.

SANDELLA, A. **Química**. Editora Ática, p. 177-180, 2000.

SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. G.A. Santos & F.A.O. Camargo Editores, Porto alegre, 1999. 491p.

SANTOS, S. C., MELLO, J. C. P. **Taninos**. In: SIMÕES, C. M. O., SCHENKEL, E. P., GOSMANN, G., MENTZ, L. A., PETROVICK, P. R. Farmacognosia: da planta ao medicamento. 5. Ed. rev. ampl., Porto Alegre: UFRGS, Florianópolis, UFRS, 2003. Cap. 24, p. 615-656.

SCHNITZER, M. **Humic Substances: Chemistry and reactions**. In: Soil Organic Matter (Schnitzer, M. e Khan,S.U., Eds.) Elsevier Science Publishers, B. V. Amsterdam, p. 1-64, 1978.

SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. **“A state of the art structural concept for humic substances”**. Naturwissen Schaften, New York, 80:29, 1993.

SENESI, N.; LOFFREDO, E. **The Chemistry of Soil organic Matter**. In: SPARKS, D.L. (Ed.) Soil physical. Boca Raton: CRC Press. Cap.6, p.242-370, 1999.

SILVA, L.B., DICK, D.P., VASCONCELLOS, A.I. **Solos subtropicasi de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química**. Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.4, p.1167-1171, 2008.

SIMÓN, B. F.; CADAHIA, E.; CONDE, E. **Evolution of phenolic compounds of Spanish oak wood during natural seasoning**. First Results. Journal of agricultural food chemistry, 47, p. 1687 – 1694, 1999.

SIMPSON, A. J. **Determining the molecular weight, aggregation, structures and interactions of natural organic matter using diffusion ordered spectroscopy.** Magnetic Resonance in Chemistry, v.40, p.S72-S80, 2002a.

SIMPSON, A. J. et al. **Molecular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment.** Naturwissenschaften, v.89, p. 84-88, 2002b.

SNIC (**Relatório Nacional da indústria do cimento 2009**) disponível em: <http://www.snic.org.br>

Soil Survey Staff. **Keys to de soil taxonomy.** Washington: USDA. Soil Conservation Service. 1996. 644p.

SOON, Y.K. & ABOUD, S. **A comparison of some methods for soil organic carbon determination.** Comm. Soil Sci. Plant Anal., 22:943-954, 1991.

SPARKS, D. **Environmental soil chemistry.** San Diego: Academic Press, 1995.

STACH, E.; MACKOWSKY, M.-TH.; TEICHMÜLLER, M.; TAYLOR, G.H.; CHANDRA, D.; TEICHMÜLLER, R. **Stach's textbook of coal petrology.** 2nd ed. 1975. 428p. Gebrüder Borntraeger – Berlin – Stuttgart. P. 33-34.

STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbono, nitrogen, phosphorus, sulfú, micronutrientes.** New York: John Wiley, 1986, 380 p.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions.** 2ed. New York: J. Wiley, 1994. 496p.

STEVENSON, F.J. **Geochemistry of soil humic substances.** In: Aiken, G.R., McKnight, D.M., Wershaw, R.L. and MacCarthy, P. (Eds.) Humic substances in soil, sediment, and water. Geochemistry, Isolation, and Characterization. John Wiley and Sons, Inc., USA. pp 13-52, 1985.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reaction.** New York: Wiley, 1982.

TASHIMA, M.M. **Cinza de arroz altamente reativa: método de produção caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação (Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho” Ilha Solteira, 2006.

TAYLOR , H.F.W. **Cement chemistry.** London: Academic Press, 1990. 474 p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TAYLOR, H. F. W. **Energy efficiency and CO₂ emission reduction potentials and policies in the cement industry**. Cement chemistry, 2 ed. London: Thomas Telford, IEA, 2006.

TEIXEIRA, M. L.; SOARES, A. R.; SCOLFORO, J. R.S. **Variação do teor de tanino da casca de barbatimão**. Ciência Prática, v. 14, n. 2, p. 229, 1990.

TERASHI, M. **Theme lecture: deep mixing method – Brief state of the art**. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany Vol. 4, p. 2475-2478, 1997.

TERASHI, M., TANAKA, T., MITSUMOTO, T., NIIDOME, Y. And HOMMA, S. **Fundamental properties of lime and cement treated soils** (2nd report). Port and Harbour Research Institute, Report No. 19(1), 33-62, 1980.

TERZAGHI, K., PECK, R. B., and MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**, John Wiley & Sons, INC, New York, 1996.

TERZAGHI, K. (1943). **“Theoretical soil mechanics”**. *John Wiley and Sons*, New York.

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

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. **Lime reactivity of Illinois soils**. *Journal of soil mechanics and foundations div*, ASCE, 92(5): 67 – 92, 1966.

TREMBLAY, H.; DUCHESNE, J.; LOCAT, J.; and LEROUEIL, S. **Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement**. *Canadian geotechnical journal*. 39:535-546, 2002.

TRUGILHO, P. F.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; CARDOSO, D. P. **Determinação do teor de taninos na casca de Eucalyptus spp**. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 2. p. 246 - 254, jul./dez. 2003.

UDDIN, K. **Strength and deformation behavior of cement treated Bangkok clay**. PhD Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1994.

USACE – U. S. Army corps of engineers. **Design and construction of levees**. *Engineer manual* no 1110-2-1913, Appendix G: Use of soil cement for levee protection. Washington D.C., p.146-162, 2000. Citado em LOPES (2007).

USDA – United States Department of Agriculture. **Soil survey laboratory methods manual**. Washington: USDA National Soil Survey Center, 1996. 693p. (Soil Survey Investigation Report, n. 42).

VIEIRA, A.A.A.P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolâmica em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

VONK, B.F. **Some aspects of the engineering practice regarding peat in small polder dikes**. Advances in understanding and modeling the mechanical behavior of peat, pp. 389-402, 1994.

WINTER, D. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2013.

www.peatsociety.org, consultado junho de 2013.

XUN, Y. **The anti-influences and of containing organic matter on ciment soil strength**. *Build Science Research Sichuan* (3), p. 58-59, 2000.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

YUMUS, N. Z. M.; WANATOWSKI, D.; and STACE, L. R. **Effect of humic acid on physical and engineering properties of lime-treated organic clay**. *World academy of science, engineering and technology*, 59, 2011.

ANEXO A - ENSAIOS DA MISTURA CAULIM-BENTONITA CIMENTO, TEMPO DE CURA DE 7, 28 E 90 DIAS, $\omega=100\%$, TEOR DE CIMENTO DE 10%, 30% E 50%, pH=6,5.

Verifica-se na figura abaixo um aumento de 1,37 vezes a resistência com teor de 30% de cimento comparado ao teor de 10% de cimento. Utilizando teor de cimento de 50% ocorreu um aumento de 2 vezes comparado com o teor de cimento de 30%.

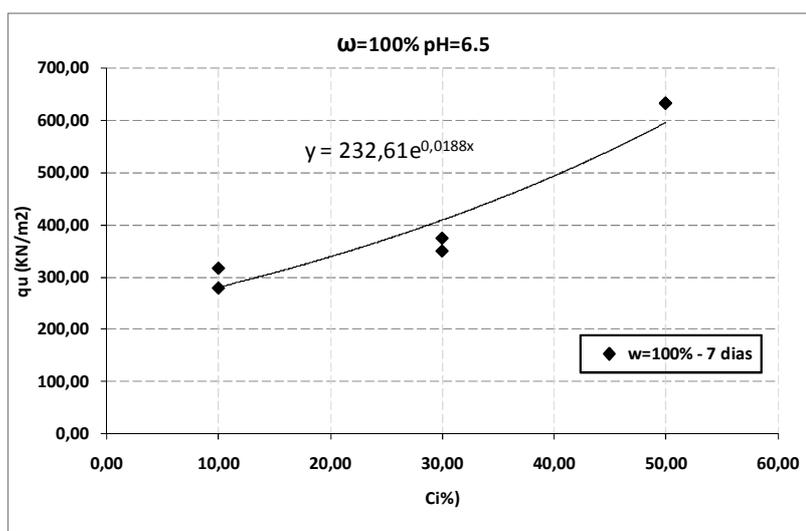


Figura A. 1: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 7 dias, $\text{pH}=6,5$ e $\omega=100\%$.

Verifica-se na figura abaixo um aumento de 1,6 vezes a resistência com teor de 30% de cimento comparado ao teor de 10% de cimento. Utilizando teor de cimento de 50% ocorreu um aumento de 2 vezes comparado com o teor de cimento de 30%.

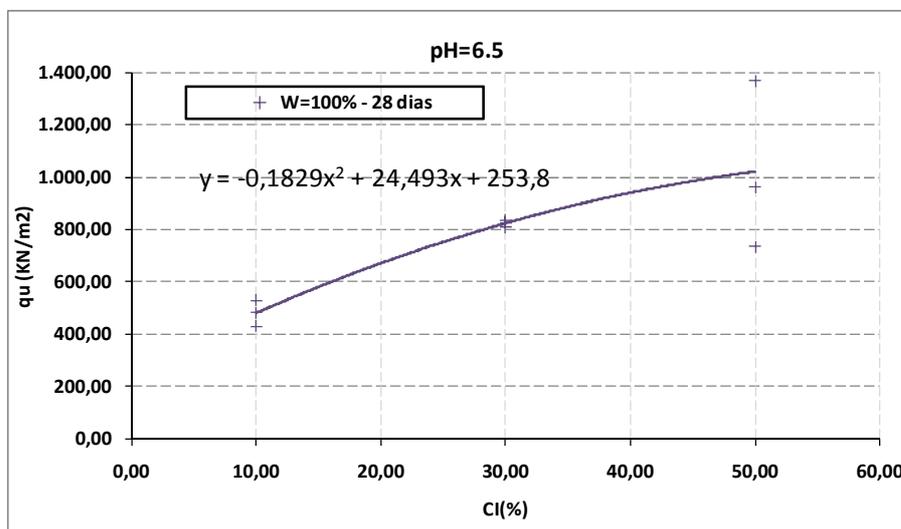


Figura A. 2: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 28 dias, pH=6,5 e $\omega=100\%$.

Verifica-se na figura abaixo um aumento de 1,21 vezes a resistência com teor de 30% de cimento comparado ao teor de 10% de cimento. Utilizando teor de cimento de 50% ocorreu um aumento de 3,36 vezes comparado com o teor de cimento de 30%.

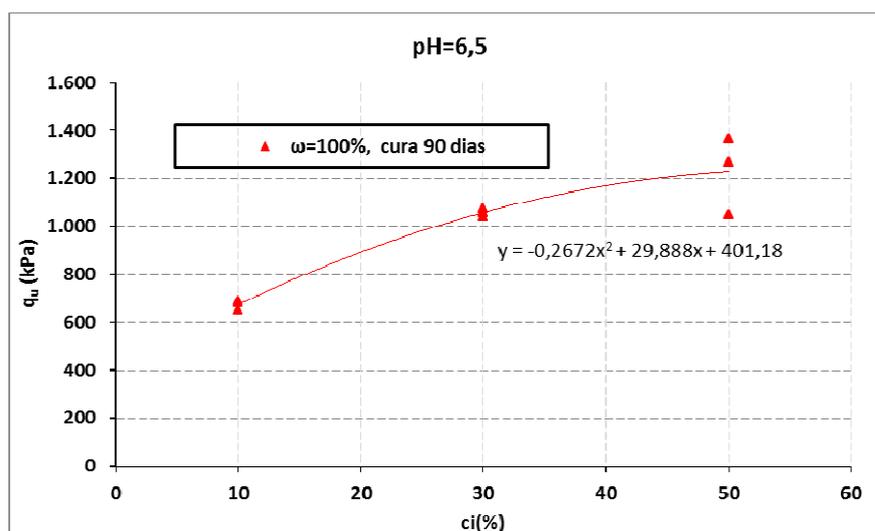


Figura A. 3: Teor de cimento CP V – ARI versus resistência à compressão simples aos 90 dias, pH=6,5 e $\omega=100\%$.

ANEXO B - ENSAIOS DE pH DOS MATERIAIS

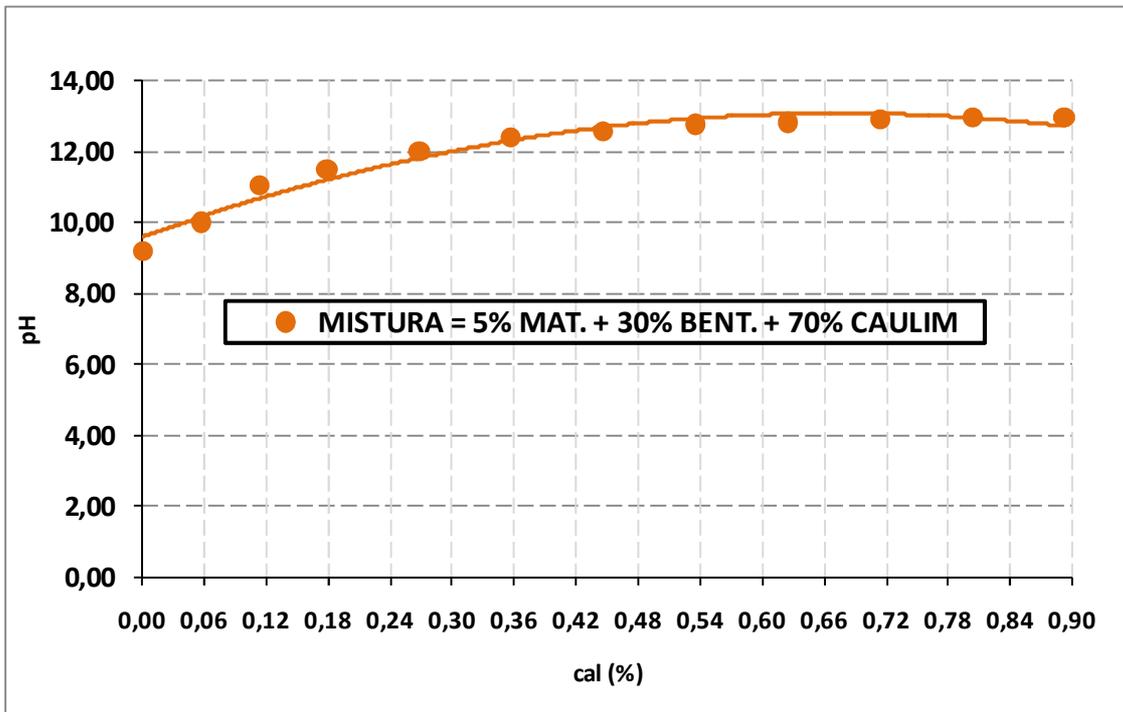


Figura B. 1: pH versus material.

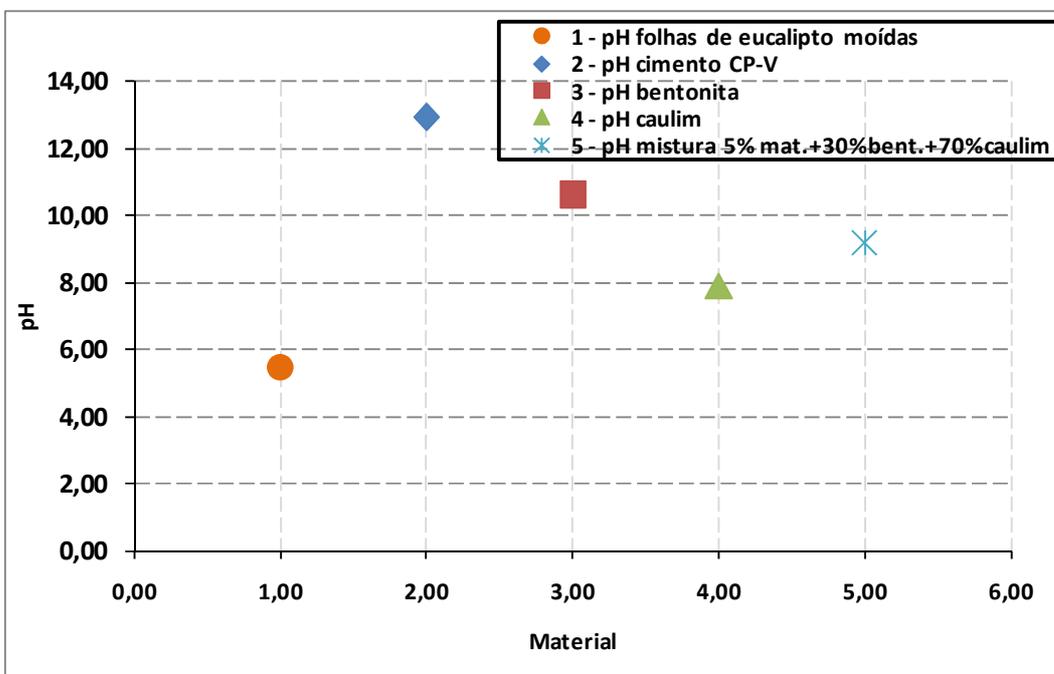


Figura B. 2: Figura mostra o pH da mistura de caulim, bentonita e matéria orgânica com pequenas adições de cal.

ANEXO C - PREPARO SOLUÇÕES

NaOH 0,5M

$$M=n/V \quad n=m/\underline{u}$$

Onde: M: Molaridade
 N: Número de mols
 V: Volume
 M: Massa
u= Massa molar

Sabe-se que $\underline{u}_{\text{NaOH}}=40\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ e quer-se $M=0,5\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$

Logo, pesa-se 20g de NaOH sólido e diluídos em 1 litro de H₂O

HCl 0,1M

$$\text{Diluição: } M_1V_1=M_2V_2$$

Onde: M₁:Concentração inicial
 V₁:Volume que se quer saber
 M₂:Concentração desejada
 V₂:Volume desejado

Para HCl 0,1M a partir de HCl 4 M para a solução de 1 litro:

$$4 \times V_1=0,1 \times 1 \rightarrow V_1=0,025\text{L}=25\text{ml} + 975\text{ml de H}_2\text{O}= 1 \text{ Litro de solução}$$

Para HCl 0,1M a partir de HCl concentrado:

$$M=\frac{d \times \text{pureza} \times 10}{\text{pm}} \rightarrow (1,181 \times 38,25 \times 10)/36,46= 12,4\text{M}$$

$$12,4 \times V_1=4 \times 1 \rightarrow V_1=322\text{ml} \rightarrow 4 \times V_1=0,1 \times 1 \rightarrow V_1=0,025\text{L}= 25\text{ml}$$

HF 10%

$$M_1V_1=M_2V_2$$

A partir de HF 40% p/ fazer 1 litro.

$$40 \times V_1 = 10 \times 1 \rightarrow V_1=250\text{ml} + 750\text{ml de H}_2\text{O} = 1 \text{ Litro de solução.}$$

HF / HCl 5/5%

Para solução de 1 litro, prepara-se 500 ml de HF 10% e 500ml de HCl 10%. Depois misturam as duas soluções.

HCl 10%

50 ml de HCl concentrado + 450ml de H₂O para solução de 500ml.

Solução Padrão / Frutose 300ppm

Para uma solução padrão de 300ppm:

Pesa-se 0,2g de frutose e coloca-se para secar a vácuo (\pm 1 dia);

Coloca-se 0,1875g em um balão de 250ml e diluir com HCl 0,1 M;

Aferir o balão e transferir a solução para frasco apropriado.

Para análise do preparo das concentrações se dá da seguinte forma:

$$M_1V_1=M_2V_2$$

Por exemplo, possui-se 3 balões de 10ml e 4 balões de 25ml.

Concentrações desejadas: 0, 30, 60, 90, 120, 210, 300ppm:

0ppm: balão de 25ml \rightarrow 25ml de HCl 0,1 M;

30ppm: balão de 10ml $\rightarrow M_1V_1=M_2V_2$ $300 \times V_1= 30 \times 10\text{ml} \rightarrow V_1=1\text{ml}$

60ppm: balão de 25ml $\rightarrow M_1V_1=M_2V_2$ $300 \times V_1= 60 \times 25\text{ml} \rightarrow V_1=5\text{ml}$

90ppm: balão de 10ml $\rightarrow M_1V_1=M_2V_2$ $300 \times V_1= 90 \times 10\text{ml} \rightarrow V_1=3\text{ml}$

120ppm: balão de 25ml $\rightarrow M_1V_1=M_2V_2$ $300 \times V_1= 120 \times 25\text{ml} \rightarrow V_1=10\text{ml}$

210ppm: balão de 10ml $\rightarrow M_1V_1=M_2V_2$ $300 \times V_1= 210 \times 10\text{ml} \rightarrow V_1=7\text{ml}$

300ppm: balão de 25ml \rightarrow 25ml de solução padrão

Solução Sulfocrônica

Pesa-se 32g de Dicromato de potássio e coloca-se para secar por 2 horas em estufa a 105°C.

Seco pesa-se 30,65g de Dicromato de potássio e coloca-se em um balão de 0,5L contendo 200ml de H₂O. Após, adiciona-se 80ml de ácido sulfúrico. Completa-se o volume do balão com H₂O.

Obs: o dicromato de potássio deve ser resfriado em dessecador antes de ir para o balão.

A solução deve ser guardada em vidro escuro e em geladeira.

ANEXO D - FOTOS DO MODO DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES, $\omega=100\%$, $\omega=135\%$ E $\omega=170\%$. TEOR DE CIMENTO/CAL DE 30%, 50%, 70% E 100%, AOS 7, 14, E 28 DIAS DE CURA.



$\omega=100\%$, 30% cimento, cura 7 dias.



$\omega=100\%$, 50% cimento, cura 7 dias.



$\omega=100\%$, 70% cimento, cura 7 dias.



$\omega=100\%$, 100% cimento, cura 7 dias.



$\omega=135\%$, 30% cimento, cura 7 dias.



$\omega=135\%$, 50% cimento, cura 7 dias.



$\omega=135\%$, 70% cimento, cura 7 dias.



$\omega=135\%$, 100% cimento, cura 7 dias.



$\omega=170\%$, 30% cimento, cura 7 dias.



$\omega=170\%$, 50% cimento, cura 7 dias.



$\omega=170\%$, 70% cimento, cura 7 dias.



$\omega=170\%$, 100% cimento, cura 7 dias.



$\omega=100\%$, 30% cimento, cura 14 dias.



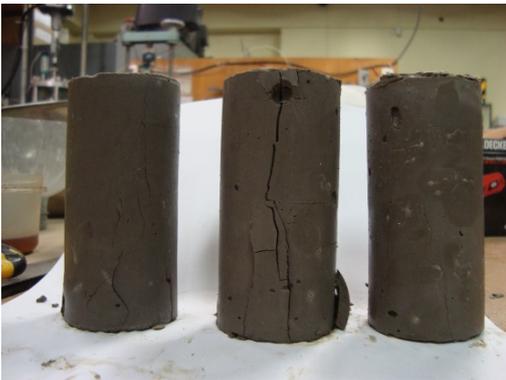
$\omega=100\%$, 50% cimento, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 70% cimento, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 100% cimento, cura 14 dias.



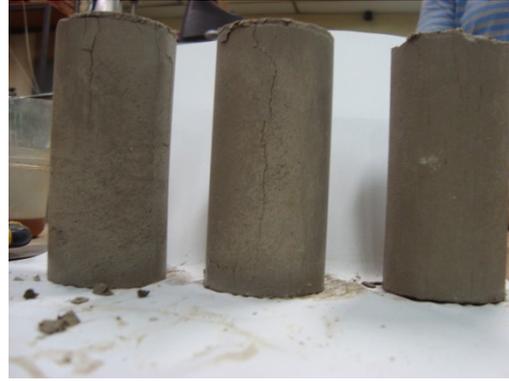
$\omega=135\%$, 30% cimento, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 50% cimento, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 70% cimento, cura 14 dias.



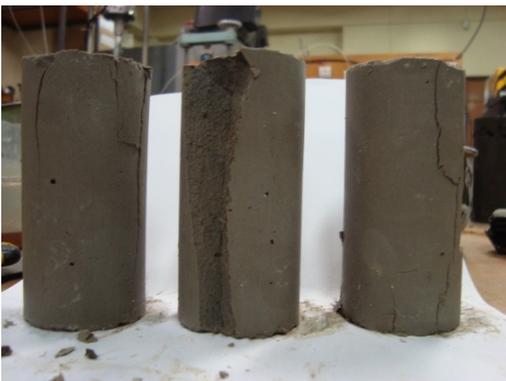
$\omega=135\%$, 100% cimento, cura 14 dias.



$\omega=170\%$, 30% cimento, cura 14 dias.



$\omega=170\%$, 50% cimento, cura 14 dias.



$\omega=170\%$, 70% cimento, cura 14 dias.



$\omega=170\%$, 100% cimento, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 30% cimento, cura 28 dias.



$\omega=100\%$, 50% cimento, cura 28 dias.



$\omega=100\%$, 70% cimento, cura 28 dias.



$\omega=100\%$, 100% cimento, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 30% cimento, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 50% cimento, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 70% cimento, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 100% cimento, cura 28 dias.



$\omega=170\%$, 30% cimento, cura 28 dias.



$\omega=170\%$, 50% cimento, cura 28 dias.



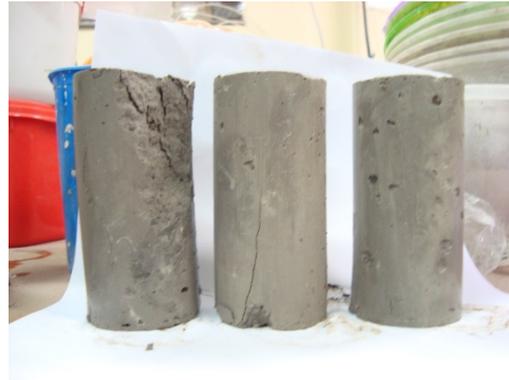
$\omega=170\%$, 70% cimento, cura 28 dias.



$\omega=170\%$, 100% cimento, cura 28 dias.



$\omega=100\%$, 30% cal, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 50% cal, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 70% cal, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 100% cal, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 30% cal, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 50% cal, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 70% cal, cura 14 dias.



$\omega=135\%$, 100% cal, cura 14 dias.



$\omega=100\%$, 30% cal, cura 28 dias.



$\omega=100\%$, 70% cal, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 30% cal, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 50% cal, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 70% cal, cura 28 dias.



$\omega=135\%$, 100% cal, cura 28 dias.



$\omega=170\%$, 30% cal, cura 28 dias.



$\omega=170\%$, 50% cal, cura 28 dias.

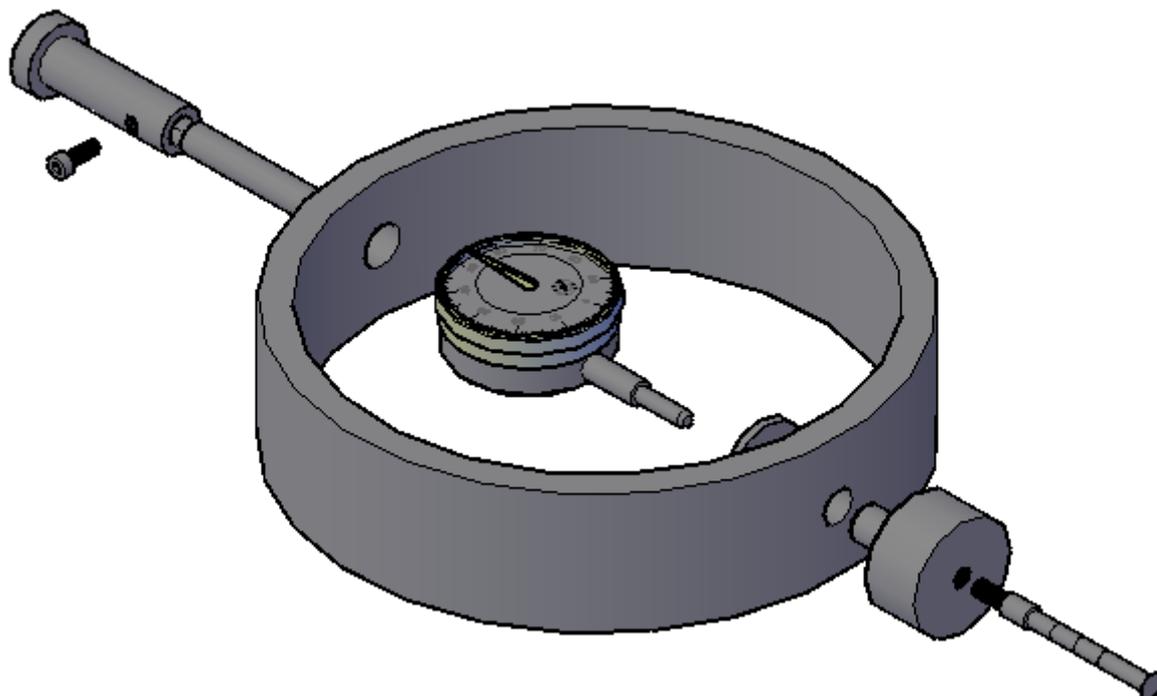


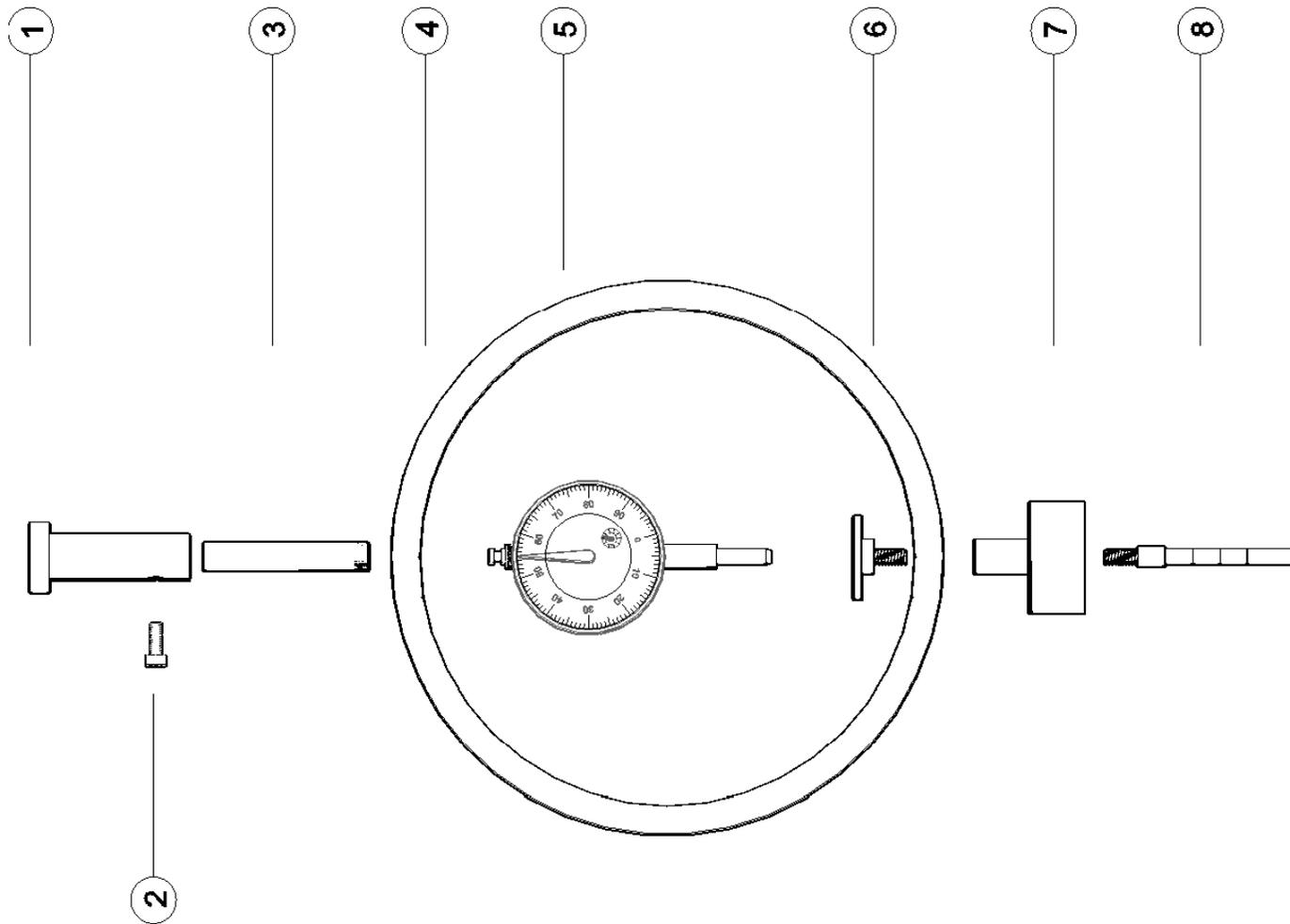
$\omega=170\%$, 70% cal, cura 28 dias.



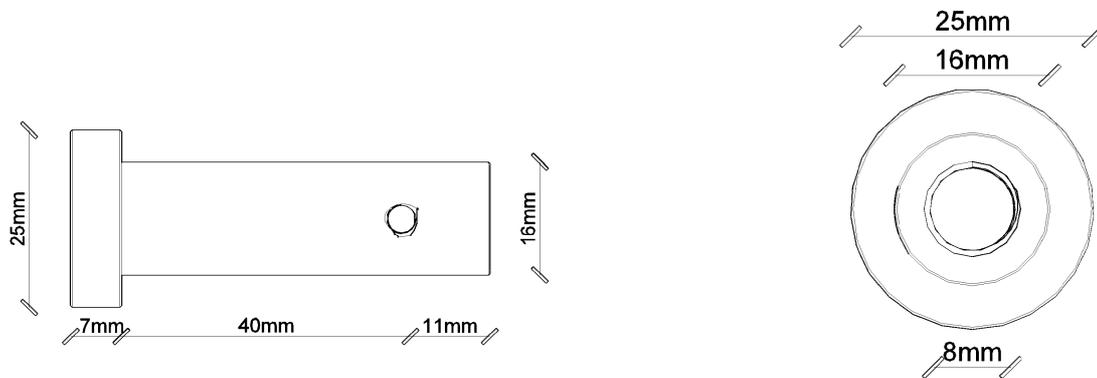
$\omega=170\%$, 100% cal, cura 28 dias.

ANEXO E - DETALHAMENTO EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE CRAVAÇÃO



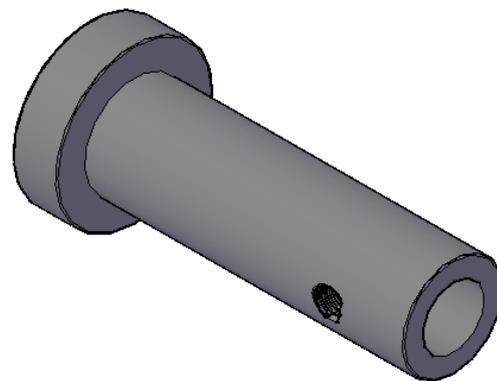
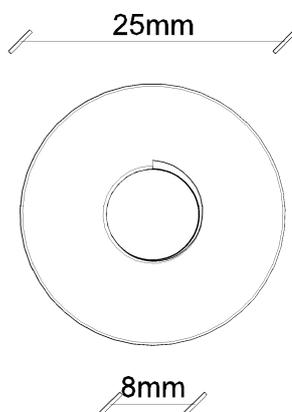


PEÇA 1 : Conexão de fixação entre a estrutura do equipamento de ensaio de compressão simples.



Vista Lateral

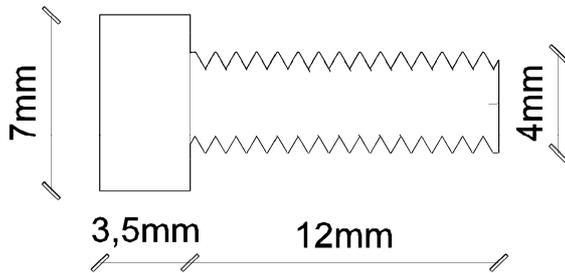
Vista de fundo



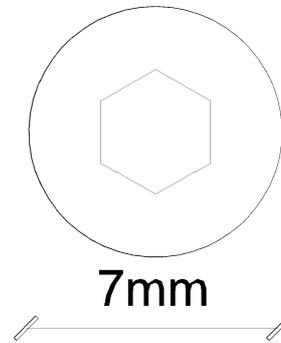
Vista de topo

Desenho esquemático

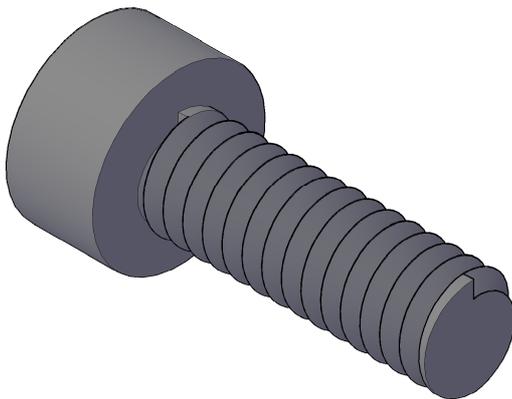
PEÇA 2 : Parafuso para fixação da peça 03.



Vista Lateral

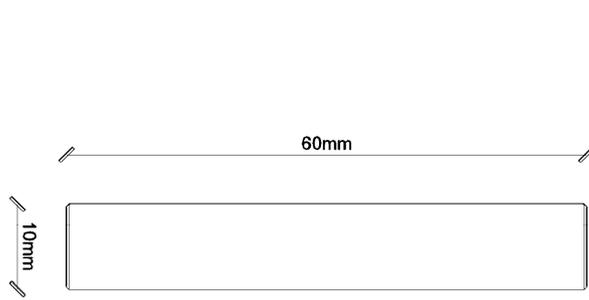


Vista de topo

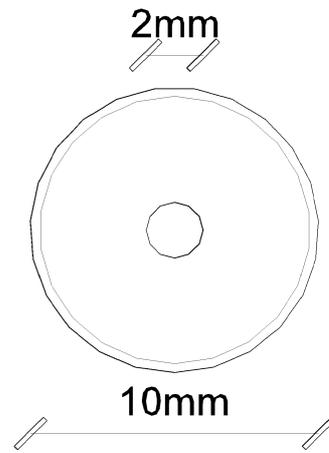


Desenho esquemático

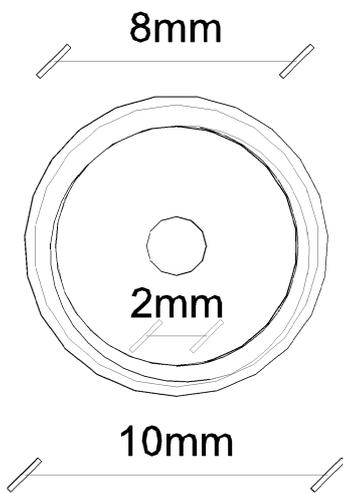
PEÇA 3 : Peça de regulação e fixação do relógio comparador (peça 5)



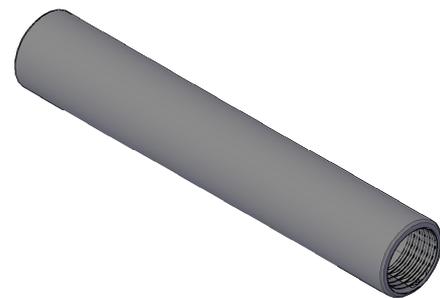
Vista Lateral



Vista de topo

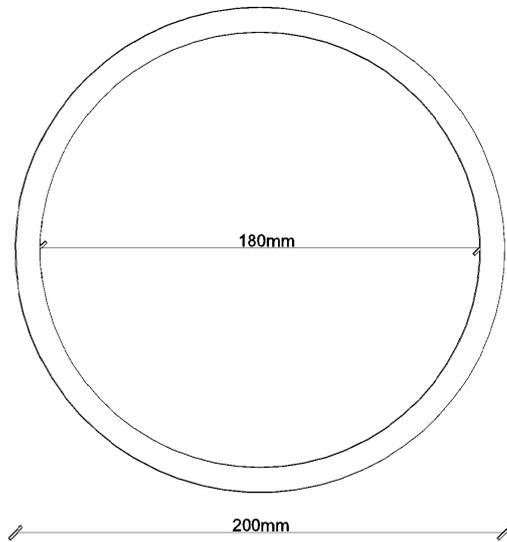


Vista fundo

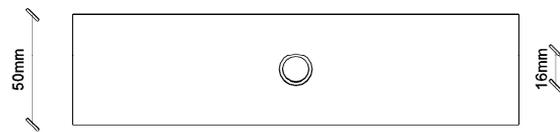


Desenho esquemático

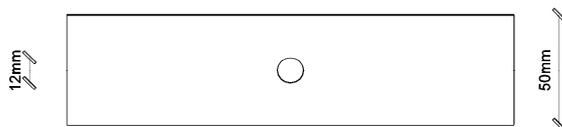
PEÇA 4: Anel dinamométrico de nylo de 10mm de espessura.



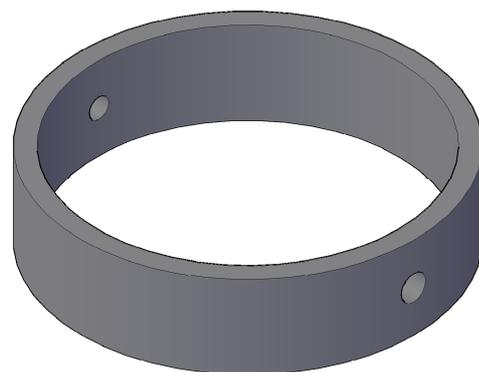
Vista topo



Vista de lateral 01

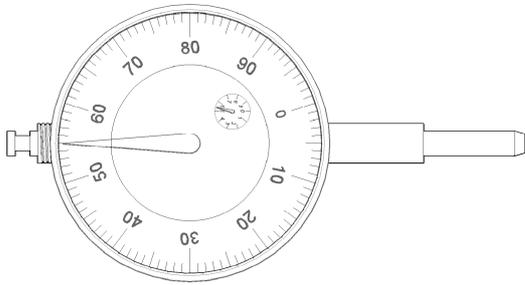


Vista lateral 02

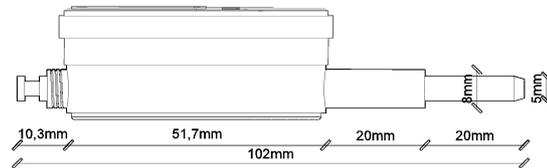


Desenho esquemático

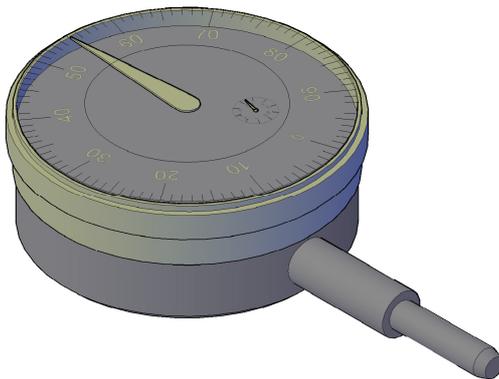
PEÇA 5 : Relógio comparador da marca Mitutoyo, precisão 0,01mm.



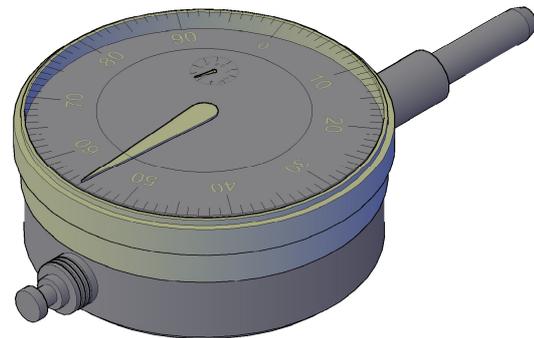
Vista topo



Vista lateral

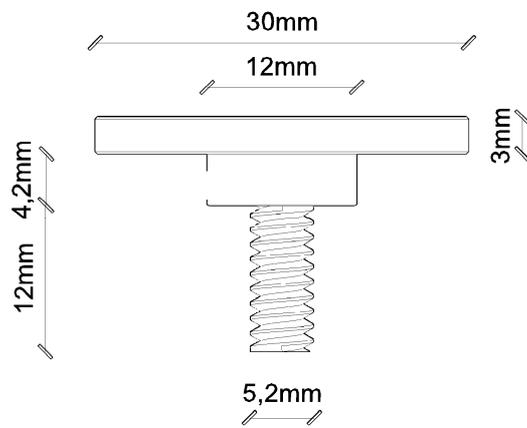


Desenho esquemático

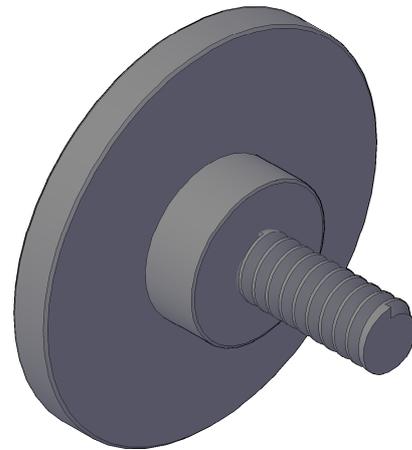


Desenho esquemático 02

PEÇA 6 : Peça de ajuste de altura entre o relógio comparador e anel de nylo.

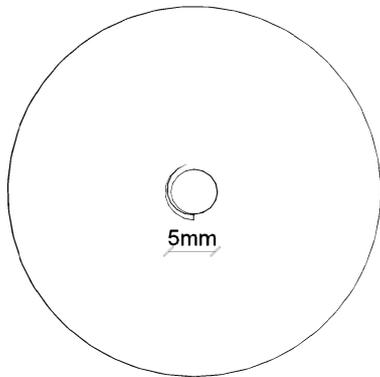


Vista lateral

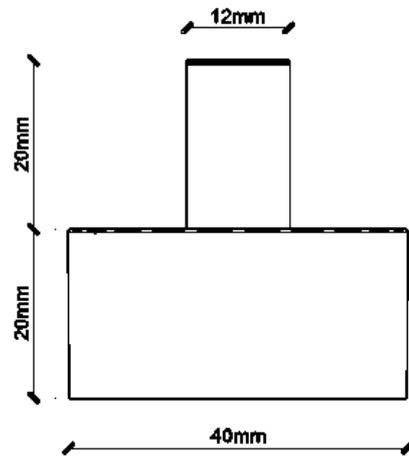


Desenho esquemático

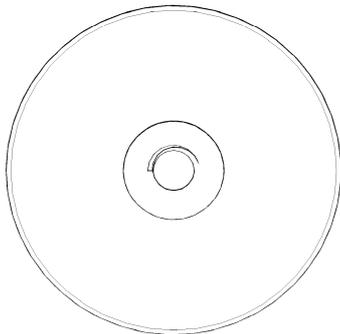
PEÇA 7 : Peça de fixação entre o anel e a estrutura do equipamento de ensaio de compressão simples.



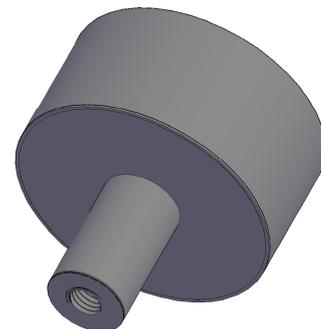
Vista topo



Vista lateral



Vista de fundo

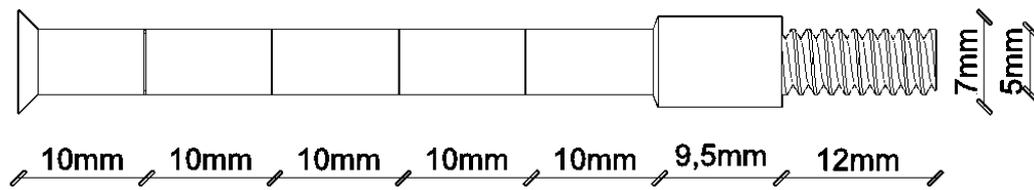


Desenho esquemático



Desenho esquemático

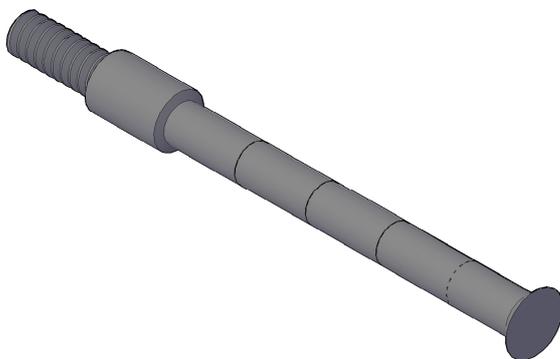
PEÇA 8 : Haste de cravação.



Vista lateral



Desenho esquemático



Desenho esquemático