

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME PEPLOW PIUZZI

**CONSIDERAÇÕES SOBRE A PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA DE
SOLOS MELHORADOS COM CIMENTO E FIBRAS DE POLIPROPILENO**

CURITIBA – PR

2017

GUILHERME PEPFLOW PIUZZI

**CONSIDERAÇÕES SOBRE A PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA DE
SOLOS MELHORADOS COM CIMENTO E FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Civil,
no Curso de Engenharia Civil, Setor de
Tecnologia, da Universidade Federal
do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Roberta
Bomfim Boszczowski.

CURITIBA – PR

2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre estiveram presentes e incentivaram os meus estudos.

Aos meus professores, por todos os ensinamentos transmitidos, os quais foram fundamentais para minha formação. Especialmente ao professor Dr. Vítor Pereira Faro e ao professor Dr. Nilo Cesar Consoli, que sempre foram bastante solícitos em sanar minhas dúvidas referentes aos seus artigos e pesquisas.

A minha orientadora, Profa. Dra. Roberta Bomfim Boszczowski, pela liberdade na escolha do tema, assim como pelo grande auxílio na elaboração deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas, pelo companheirismo e por tornarem os dias mais felizes. Em especial para minha amiga e mestranda Jordana Furman, que me auxiliou na execução de alguns ensaios, assim como na revisão deste documento.

À empresa Fugro in Situ Brasil, por fornecer a bentonita utilizada, assim como ao mestrando Tennison F. S. Júnior pelo fornecimento da caracterização dela.

À empresa Maccaferri, pelo fornecimento das fibras de polipropileno utilizadas, assim como pelos esclarecimentos técnicos.

À Cia. de Cimentos Itambé pelo fornecimento do cimento.

RESUMO

Há interesse do mercado na aplicação de solos melhorados para o dimensionamento de fundações de redes de transmissão (BOSZCZOWSKI et al., 2010). Nesse contexto, a aplicação de solos melhorados com fibras de polipropileno e cimento CPV-ARI no reaterro de fundações do tipo sapata e de grelhas metálicas dessas estruturas foi investigada. Podendo ser adicionados ao solo através de misturas superficiais, o cimento e as fibras mostram potencialidades para aplicação em obras de difícil acesso, nas quais a utilização de grandes equipamentos é inviabilizada. Para a viabilização do método, é necessário se entender a complexidade de se calibrar um método de dosagem, devido às inúmeras variáveis das misturas (CONSOLI et al, 2011). Com o objetivo de se prever a resistência de solos melhorados com fibras de polipropileno e cimento CPV-ARI, Consoli et al. (2017) desenvolveu uma fórmula que correlaciona as quantidades utilizadas desses materiais com as resistências à compressão simples e à tração das misturas. Essa fórmula é ajustada através de um coeficiente α . Com o intuito de averiguar os fatores que influenciam no valor de α , o presente trabalho testou 6 dosagens diferentes, totalizando 84 corpos de prova. Foi verificado que a resistência das fibras de polipropileno tem grande influência no valor do coeficiente. O tempo de cura dos corpos de prova também influencia no valor de α , mas de forma bem menos expressiva. Também foi possível verificar a proporcionalidade entre a resistência à compressão simples e à tração sugeridas por Consoli et al. (2017). Quando comparados com solos não-melhorados, a adição apenas de fibras de polipropileno (proporção de 0,05%) não resultou em ganhos expressivos na resistência à tração. Por outro lado, a inclusão das fibras proporcionou um aumento da ductibilidade do solo. Quando comparados com solos não-melhorados, a adição de fibras de polipropileno e cimento resultou em ganhos expressivos na resistência à compressão simples e à tração.

Palavras-chave: Solos melhorados. Fibras de polipropileno. Fundações de torres de transmissão.

ABSTRACT

Soil improvement techniques as part of the design of transmission towers' foundations are being studied by the market (BOSZCZOWSKI et al., 2010). In this context, the application of soil improvements using admixtures of polypropylene fibres and cement type III in the backfill of spread footings and grillage foundation of these structures was investigated. Considering the admixture of these material can be performed by surface mixing, the cement and fibres show potential application in construction sites with difficult access, in which the use of large equipment is unfeasible. In order to make this alternative applicable, it is necessary to understand the complexity of calibrating a dosage method, due to the numerous mixtures' variables (CONSOLI et al, 2011). With the objective of predicting the resistance of improved soils with polypropylene fibres and CPV-ARI cement, Consoli et al. (2017) has developed an equation which ties the amounts of these materials used to the unconfined compression strength and to the tensile strength of the blends. This equation is adjusted by a coefficient α . The assessment of the key factors that influence the value of α was done by the following search, which carried out tests on 6 different mixtures, totalizing 84 specimens. The results indicate that the tensile strength of the polypropylene fibres has a great influence on the coefficient value. Regarding the effect of the curing time of the specimens on the value of α , it was found to be much less expressive. It was also possible to verify the proportionality between the unconfined compressive strength and the tensile strength suggested by Consoli et al. (2017). When compared to unimproved soils, the addition of 0.5% polypropylene fibres alone did not result in significant gains in tensile strength. On the other hand, the inclusion of the fibres provided an increase in soil ductility. When compared with unimproved soils, the addition of polypropylene fibres and cement resulted in significant gains in both unconfined compression strength and tensile strength.

Keyword: Soil improvement. Polypropylene fibres. Foundations of transmission towers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - SUBSTITUIÇÃO DE SOLO	15
FIGURA 2 - EXECUÇÃO DE DRENOS VERTICAIS	16
FIGURA 3 - EXECUÇÃO DE COMPACTAÇÃO DINÂMICA	17
FIGURA 4 - INJEÇÃO DE ADITIVOS	17
FIGURA 5 - ANALOGIA ENTRE ESTACAS E FIBRAS	19
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, DADA A RAZÃO ENTRE CIMENTO E POROSIDADE, PARA UMA PORCENTAGEM ESPECÍFICA DE FIBRAS	23
FIGURA 7 - EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, COM A RAZÃO AJUSTADA ENTRE CIMENTO E POROSIDADE, PARA UMA PORCENTAGEM ESPECÍFICA DE FIBRAS	23
FIGURA 8 – PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA.....	26
FIGURA 9 - VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PREVISIBILIDADE	27
FIGURA 10 - ESCAVAÇÃO MANUAL PARA A EXECUÇÃO DE FUNDAÇÃO	29
FIGURA 11 - FUNDAÇÃO DO TIPO SAPATA DE UMA TORRE DE TRANSMISSÃO	29
FIGURA 12 - MÉTODO DE CONE.....	30
FIGURA 13 - MÉTODO DE BALLA (1961)	30
FIGURA 14 - FUNDAÇÃO DO TIPO GRELHA METÁLICA UMA TORRE DE TRANSMISSÃO	31
FIGURA 15 - GRELHA METÁLICA COM BLOCO DE CONCRETO.....	32
FIGURA 16 - JAZIDA DE AREIA.....	33
FIGURA 17 - EXTRAÇÃO DA AREIA	34
FIGURA 18 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	35
FIGURA 19 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DA BENTONITA.....	36
FIGURA 20 – GRANULOMETRIA DO SOLO	37
FIGURA 21 – DADOS PARA OBTENÇÃO DA DENSIDADE DOS GRÃOS	40
FIGURA 22 - PRENSA UTILIZADA.....	41
FIGURA 23 - EMARANHADO EVIDENTE DAS FIBRAS.....	49
FIGURA 24 - EMARANHADO MENOS EVIDENTE DAS FIBRAS.....	50

FIGURA 25 - CORPO DE PROVA SENDO MOLDADO	51
FIGURA 26 - CORPOS DE PROVA EM CURA	52
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO ENTRE GRÁFICO SEM E COM CORREÇÕES PARA O ESPÉCIME NC2-5 (7 DIAS DE CURA)	55
FIGURA 28 - RUPTURA DO TIPO CÔNICA.....	57
FIGURA 29 - RUPTURA DO TIPO CÔNICA BIPARTIDA.....	57
FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SEM MELHORAMENTO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES.....	58
FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS APENAS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES	59
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SEM MELHORAMENTO SUBMETIDOS À TRAÇÃO.....	60
FIGURA 33 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS APENAS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDOS À TRAÇÃO....	61
FIGURA 34 - INÍCIO DAS FISSURAS PROVENIENTES DOS ESFORÇOS À TRAÇÃO DURANTE O ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	62
FIGURA 35 - TRAÇÃO DAS FIBRAS VISÍVEL ATRAVÉS DA FISSURA CAUSADA PELA DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DO CORPO DE PROVA	62
FIGURA 36 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES	64
FIGURA 37 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO SUBMETIDOS À TRAÇÃO	65
FIGURA 38 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	66
FIGURA 39 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	67
FIGURA 40 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (7 DIAS DE CURA)	71
FIGURA 41- PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO $\Delta \sim 30$ E $A=2,45$ (7 DIAS DE CURA)	72

FIGURA 42 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (7 DIAS DE CURA).....	75
FIGURA 43 - REVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (7 DIAS DE CURA).....	76
FIGURA 44 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (7 DIAS DE CURA).....	77
FIGURA 45 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (7 DIAS DE CURA).....	78
FIGURA 46 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (7 DIAS DE CURA).....	79
FIGURA 47 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (14 DIAS DE CURA)	81
FIGURA 48 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (14 DIAS DE CURA).....	82
FIGURA 49 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (14 DIAS DE CURA).....	83
FIGURA 50 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (14 DIAS DE CURA).....	84
FIGURA 51 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (14 DIAS DE CURA).....	85
FIGURA 52 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (14 DIAS DE CURA).....	86

FIGURA 53 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (28 DIAS DE CURA)	88
FIGURA 54 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (28 DIAS DE CURA)	89
FIGURA 55 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (28 DIAS DE CURA)	90
FIGURA 56 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (28 DIAS DE CURA)	91
FIGURA 57 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (28 DIAS DE CURA)	92
FIGURA 58 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (28 DIAS DE CURA)	93
FIGURA 59 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS (28 DIAS DE CURA) UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (7 DIAS DE CURA)	94
FIGURA 60 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (7 DIAS DE CURA)	97
FIGURA 61 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 7 DIAS DE CURA)	97
FIGURA 62 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 7 DIAS DE CURA)	98
FIGURA 63 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 7 DIAS DE CURA)	99

FIGURA 64 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 7 DIAS DE CURA).....	99
FIGURA 65 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (14 DIAS DE CURA).....	102
FIGURA 66 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 14 DIAS DE CURA).....	102
FIGURA 67 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 14 DIAS DE CURA).....	103
FIGURA 68 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 14 DIAS DE CURA).....	104
FIGURA 69 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 14 DIAS DE CURA).....	105
FIGURA 70 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (28 DIAS DE CURA).....	107
FIGURA 71 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 28 DIAS DE CURA).....	107
FIGURA 72 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 28 DIAS DE CURA).....	108
FIGURA 73 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 28 DIAS DE CURA).....	109
FIGURA 74 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 28 DIAS DE CURA).....	109
FIGURA 75 - RESULTADOS FINAIS.....	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PENEIRAMENTO DA AREIA	35
TABELA 2 – GRANULOMETRIA DO SOLO	37
TABELA 3 – DOSAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	43
TABELA 4 - NOMENCLATURA DAS MISTURAS.....	48
TABELA 5 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (7 DIAS DE CURA)	70
TABELA 6 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (14 DIAS DE CURA)	80
TABELA 7 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (28 DIAS DE CURA)	87
TABELA 8 - VARIAÇÃO DE A DECORRENTE DO TEMPO DE CURA	93
TABELA 9 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (7 DIAS DE CURA)	96
TABELA 10 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (14 DIAS DE CURA)	101
TABELA 11 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (28 DIAS DE CURA)	106
TABELA 12 - ANÁLISE DE R ² PARA ESCOLHA DA MELHOR EQUAÇÃO DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA (7 DIAS DE CURA)	111
TABELA 13 - PARÂMETROS DO SOLO ESTUDADO PARA USO NA EQUAÇÃO (34).....	113
TABELA 14 - VARIAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS PREVISTAS E OBTIDAS	116

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVAS	12
1.2 OBJETIVOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 MELHORAMENTOS DE SOLOS	14
2.1.1 MELHORAMENTO DE SOLO COM FIBRAS.....	18
2.1.2 MELHORAMENTO DE SOLO COM FIBRAS E CIMENTO.....	20
2.2 FUNDAÇÕES DE TORRES DE TRANSMISSÃO	27
2.2.1 SAPATAS.....	29
2.2.2 GRELHAS METÁLICAS.....	31
3 MATERIAIS.....	33
3.1 AREIA.....	33
3.2 BENTONITA.....	36
3.3 SOLO	36
3.4 FIBRAS	38
3.5 CIMENTO.....	38
4 MÉTODOS	39
4.1 ENSAIOS	39
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS.....	39
4.1.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	41
4.1.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	42
4.2 CORPOS DE PROVA	42
5 RESULTADOS E ANÁLISES	53
5.1 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA	58
5.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	58
5.1.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	60
5.2 INFLUÊNCIA DO CIMENTO NOS CORPOS DE PROVA.....	63
5.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	63
5.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	64
5.2.3 TEMPO DE CURA	65

5.3 AJUSTE DA EQUAÇÃO DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA.....	67
5.3.1 COEFICIENTES SUGERIDOS POR CONSOLI ET AL.....	67
5.3.2 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO.....	72
5.3.3 NOVOS COEFICIENTES A.....	73
5.3.4 CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO	95
5.4 EQUAÇÕES FINAIS	110
5.4.1 PARA SOLOS GENÉRICOS.....	111
5.4.2 PARA O SOLO DESTE ESTUDO	113
5.5 RETROANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS OBTIDAS	115
5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EQUAÇÃO DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA	116
6 CONCLUSÕES	118
6.1 SOLOS MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO	118
6.2 APLICABILIDADE DE SOLOS MELHORADOS COM CIMENTO E FIBRAS DE POLIPROPILENO EM FUNDAÇÕES DE TORRES DE TRANSMISSÃO	118
6.3 PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA DE SOLOS MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO.....	119
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
7.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO.....	120
7.2 CORRELAÇÃO COM TESTE DE PLACAS	120
8 REFERÊNCIAS.....	121
ANEXO 1 – PENEIRAMENTO DA AREIA	129
ANEXO 2 – MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO	131
ANEXO 3 – COMPACTAÇÃO DO SOLO	133
ANEXO 4 – CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS.....	135
ANEXO 5 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO	137
ANEXO 6 – DOSAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	139
ANEXO 7 – CONTROLE DOS CORPOS DE PROVA	141
ANEXO 8 – ENSAIOS DA PRENSA	143
ANEXO 9 – RESUMO DAS RESISTÊNCIAS MÁXIMAS	172

1 INTRODUÇÃO

Na área científica, como um todo, são notórias as contínuas inovações que acontecem ao longo do tempo. Na engenharia civil, incluindo a área de geotecnia, essa ambição por novas tecnologias também está presente.

Os solos vêm sendo aprimorados desde a antiguidade. E como exemplo disso, há registros da utilização de lã de lhama no reforço das estradas Incas (PALMEIRA, 1992). Hoje, não é difícil notar as diferentes ramificações desta área da engenharia: basta verificar os diversos catálogos de empresas geotécnicas. É possível listar tecnologias como compactação mecânica, solos grampeados, injeção de cimento, mistura profunda com cinzas volantes, entre várias outras.

Um dificultador, contudo, dessas tecnologias modernas é a necessidade recorrente da utilização de equipamentos de grande porte, ou transporte de grande quantidade de materiais até o local da obra. Sendo assim, obras de difícil acesso ficam inviabilizadas de terem algumas soluções de solo melhorado como alternativa para a diminuição das obras de fundação. Esse objetivo está sendo buscado, inclusive, por empresas operadoras de linhas de transmissão (BOSZCZOWSKI et al., 2010), as quais buscam alternativas para a execução das fundações das torres de suas redes de energia através de tecnologias de melhoramento de solo que sejam facilmente aplicadas a áreas de difícil acesso

Neste contexto, solo melhorado com fibras de polipropileno e cimento é uma tecnologia atraente: a mistura desses materiais não requer grandes equipamentos; o peso carregado em cimento não é grande, tendo em vista a pequena porcentagem em massa que normalmente é misturada ao solo (CONSOLI et al. 2011); a massa das fibras de polipropileno é desprezível.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Há interesse do mercado em alternativas de melhoramentos de solos com fibras e cimento. Há estudos qualitativos da influência das fibras e cimento na resistência do solo. Não há ainda, contudo, métodos de dosagem consagrados que consigam correlacionar, com exatidão, a resistência dos

solos melhorados com a quantidade de fibras e cimento utilizados na mistura – abrangendo a totalidade das diversas características que cada um desses materiais pode apresentar. Portanto, são necessários estudos mais aprofundados neste tema, para que a tecnologia possa ser difundida e aplicada com segurança.

1.2 OBJETIVOS

Quanto à aplicabilidade de solos melhorados em obras de fundações de linhas de transmissão, este trabalho investigou o comportamento de solo proveniente do litoral do estado do Paraná quando misturado com cimento CPV-ARI e fibras de polipropileno, em diferentes proporções.

Consoli et al. (2017) desenvolveu um método de dosagem capaz de prever a resistência à compressão simples e à tração de solos melhorados com fibras de polipropileno e cimento CPV-AR. Consoli et al. (2017) utilizou fibras de polipropileno com uma resistência à tração específica.

Desta forma, este trabalho utilizou um solo e cimento cujas características respeitam os limites estipulados por Consoli et al. (2017) para a aplicação de seu método. Por outro lado, foram utilizadas fibras de polipropileno com resistência à tração diferente daquelas utilizadas pelo pesquisador. Outra variação foi o tempo de cura: foram realizados testes com 7, 14 e 28 dias de cura, contra ensaios de 7 dias de cura realizados por Consoli et al. (2017). Assim, objetivou-se também perceber a influência do tempo de cura e da resistência das fibras no método de Consoli et al. (2017).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados aqui alguns itens de relevância para este trabalho. Serão abordadas técnicas de melhoramento de solo, assim como características básicas sobre fundações de torres de transmissão. Com essas informações, será verificada a potencialidade do uso de solo melhorado através de mistura superficial (no caso, com cimento e fibras), dado os tipos de fundações mais recorrentes nessas estruturas.

2.1 MELHORAMENTOS DE SOLOS

Uma das preocupações da engenharia geotécnica é garantir que o solo seja capaz de resistir aos esforços solicitantes de uma determinada obra. Muitas vezes, o solo não é capaz de resistir mecanicamente, em seu estado natural, a essas solicitações. Dessa forma, se faz necessário realizar algum tipo de intervenção. A maioria dos projetos de fundação foca em considerar as características do solo existente para o dimensionamento, devendo-se aumentar as dimensões da fundação, ou optar por soluções mais complexas. Contudo há uma diferente abordagem: pode-se tentar melhorar as características do solo para minimizar o tamanho das obras de fundação de uma estrutura, o que resulta, muitas vezes, em uma solução mais econômica (CODUTO et al., 2016).

Segundo Coduto et al. (2016), as técnicas de melhoramento do solo podem ser subdivididas em duas categorias. A primeira reúne métodos cujo objetivo é melhorar a resistência ao cisalhamento, intensificar a coesão e/ou aumentar o ângulo do atrito do solo, de modo que este tenha sua compressibilidade reduzida. De modo geral, as alternativas comumente utilizadas para este objetivo envolvem densificar o solo a partir da adição de algum material que, ao ser misturado a este, aumenta a resistência. O segundo grupo é composto por alternativas que objetivam diminuir ou até mesmo eliminar potencialidades de instabilidades futuras, como liquefação por terremotos, aumento de volume de solos expansíveis. Para mitigar esses efeitos deletérios, normalmente se estuda modos de alterar quimicamente a estrutura do solo.

Este trabalho irá focar na primeira categoria de melhoramento de solos, uma vez que a intenção é encontrar alternativas que diminuam o tamanho das fundações necessárias para a estabilidade de torres de telecomunicação e energia de áreas de difícil acesso.

Para este objetivo, existem algumas técnicas abordadas por Coduto et al. (2016). A primeira é a remoção e substituição de solo (FIGURA 1). Esta técnica de melhoramento de solo é uma das mais antigas, e consiste em retirar o solo com características de resistência indesejadas, e substituí-lo por solos de melhores características, trazidos de áreas de empréstimo de outras regiões.

FIGURA 1 - SUBSTITUIÇÃO DE SOLO



FONTE: ROADDEX NETWORK (2017)

Uma segunda alternativa é a pré-compressão do solo. Também uma alternativa antiga, que consiste em carregar um solo com através da construção de um aterro temporário. A sobrecarga criada pelo aterro é capaz de consolidar o solo, aumentando a sua resistência e diminuindo sua a tendência ao recalque, já que os grãos de solos são aproximados, aumentando o contato, e, conseqüentemente o atrito interno (CODUTO et al., 2016).

Outra opção é a construção de drenos verticais, os quais também possuem o objetivo de consolidar o solo (FIGURA 2). A maioria dos solos quando submetidos a uma carga, levam anos para expulsar a água de seu interior, e permitir a aproximação dos seus grãos. Enquanto esse processo está ativo, o solo sofre recalque. Ao introduzir drenos verticais, o caminho que a água precisa percorrer para ser expulsa do solo é drasticamente diminuído:

anteriormente, a água teria que percolar pelo solo, verticalmente, até a superfície; já com os drenos, basta que ela se desloque horizontalmente para o dreno mais próximo para ser conduzida rapidamente para fora do solo (CODUTO et al., 2016).

FIGURA 2 - EXECUÇÃO DE DRENOS VERTICAIS



FONTE: HAYWARD BAKER (2017)

Ainda com o objetivo de consolidar o solo, a tecnologia de densificação pode ser mencionada. A densificação consiste em introduzir fortes vibrações ao solo, sendo mais apropriada para areias (FIGURA 3). As vibrações podem ser induzidas por estacas introduzidas no solo e vibradas; por impacto (compactação dinâmica), ao se levantar, com ajuda de guias, grandes blocos de concreto, e soltá-los ao chão; ou ainda por meio de detonação de explosivos (CODUTO et al., 2016).

FIGURA 3 - EXECUÇÃO DE COMPACTAÇÃO DINÂMICA



FONTE: HAYWARD BAKER (2017)

Ao invés de se tentar consolidar o solo mecanicamente, aditivos podem ser injetados com o objetivo de preencher os vazios (FIGURA 4). Esta técnica é chamada de injeção de aditivos e é normalmente feita com a injeção sob pressão de cimento, silicatos ou resinas, com o objetivo de endurecer dentro do solo, enrijecendo-o (BOSZCZOWSKI et al., 2010).

FIGURA 4 - INJEÇÃO DE ADITIVOS



FONTE: BOSZCZOWSKI et al. (2010)

Tem-se ainda a alternativa de mistura superficial, que é normalmente feita com cimento, formando uma estrutura chamada de solo-cimento, comparável a um concreto fraco, mas suficiente para aumentar a resistência, diminuir a compressibilidade e condutividade hidráulica do solo (CODUTO et al., 2016).

Dadas tantas alternativas de melhoramento do solo, não se deve, contudo, esquecer-se da justificativa deste trabalho, que retoma aos problemas de transporte de material para a execução de fundações das torres de transmissão em áreas de difícil acesso. Dessa forma, atendo-se ao fato de que os principais tipos de fundações de torres de transmissão requerem reaterro (GONTIJO, 1994), a técnica de mistura superficial parece ser coerente. Ao poder ser realizada em um solo que já é retirado como parte do próprio processo de construção das fundações, a mistura é eficiente, pois não requer uma intervenção totalmente separada da construção das fundações.

2.1.1 Melhoramento de solo com fibras

Historicamente, os solos são melhorados com fibras há muito tempo. Alguns indícios da utilização dessa técnica retomam à construção da Grande Muralha da China – com a utilização de fibras vegetais-, e à construção das estradas incas – com a utilização de lã de lhama. (PALMEIRA, 2007).

Grandes avanços nesta área só vieram a acontecer, contudo, durante a Segunda Guerra mundial, devido a necessidades militares, na construção de rotas com solos de baixa capacidade (CLAUMANN, 2007).

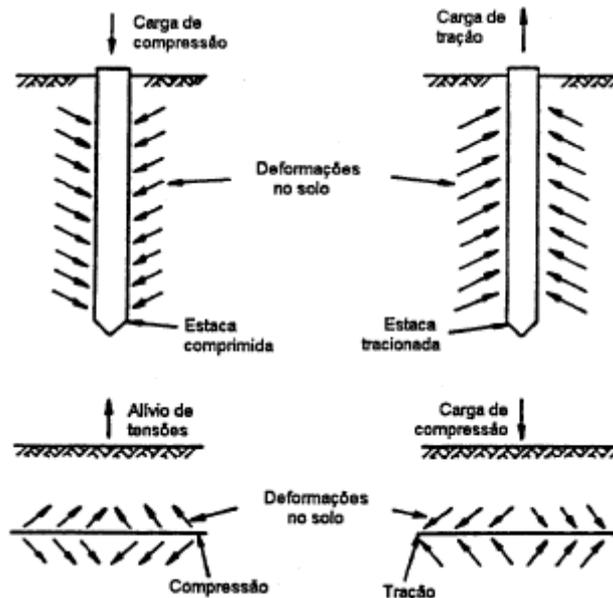
As fibras podem ser classificadas como naturais, poliméricas, minerais e metálicas. Dentre as fibras naturais, pode-se listar as de cana-de-açúcar. Quanto as poliméricas, tem-se como exemplos as de polipropileno, polietileno e poliéster. As mineiras são representadas pelas de carbono, vidro e amianto. As metálicas mais comuns são as de aço (CASAGRANDE, 2001).

Atualmente, as fibras de polipropileno têm sido consideradas as mais promissoras, devido a sua alta resistência à tração, inerência à água e flexibilidade de aplicação (TRINDADE, et al., 2004).

Uma das explicações sobre a interação das fibras com o solo é analogamente inversa ao comportamento de uma estaca cravada (McGOWN et al., 1978). As estacas estão ora comprimidas, ora tracionadas – dependendo dos esforços externos -, de forma que durante o seu carregamento, induzem deformações ao solo. Em solos melhorados, esforços externos causam a deformação do solo, que por sua vez geram esforços nas fibras. Sendo assim,

esforços de compressão geram esforços de compressão nas estacas. Por outro lado, solos comprimidos geram tração nas fibras (FIGURA 5).

FIGURA 5 - ANALOGIA ENTRE ESTACAS E FIBRAS



FONTE: McGOWN et al., 1978

Morel et al. (1997) mostram que a adição de fibras ao solo aumenta a resistência da mistura, além de aumentar a ductibilidade, comparativamente a solos não melhorados. Essas características podem ser explicadas por Hannant (1994), que afirma que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, sendo benéficas às propriedades mecânicas do solo, principalmente após a sua ruptura.

Gray et al. (1989) sugerem que solos melhorados com fibras aleatoriamente dispostas, favorecem o comportamento isotrópico da mistura.

Segundo Taylor (1994), o desempenho dos solos melhorados com fibras é influenciado: pelo teor de fibra (quanto maior o teor, maior a resistência pós-fissuração); pelo módulo de elasticidade das fibras (se muito elevado, há maior probabilidade de arrancamento das fibras); pela aderência das fibras (quanto maior a aderência, menor as fissuras); pela resistência das fibras (quanto maior a resistência, maior a ductibilidade do solo melhorado, desde que não haja o arrancamento delas); e pelo comprimento das fibras (quanto mais compridas, maior a resistência da mistura, visto que o arrancamento é dificultado). Vale ressaltar que quanto ao comprimento das fibras, Consoli et al. (2009), até certo

ponto, ele é de fato favorável. Contudo, comprimentos acima de 24 mm, em fibras muito finas (com diâmetros inferiores a 0.05 mm) começam a ser desfavoráveis à resistência das misturas. Isso ocorre, pois a mistura das fibras se torna muito difícil, e emaranhados são muito presentes.

Já nas aplicações das fibras de polipropileno em campo, Boszczowski (2007) mostra o resultado de ensaios de placas em solos melhorados com diferentes tipos de fibras. As fibras de polipropileno se destacaram por aumentarem a resistência do solo em valores de recalques elevados.

2.1.2 Melhoramento de solo com fibras e cimento

De modo geral, apenas a adição sozinha de cimento ao solo gera pouco acréscimo de resistência à tração e à flexão, além de implicar em um aumento da característica frágil das misturas (GÜLLÜ, 2015).

Para contrapor o comportamento frágil de solos melhorados apenas com cimento, a introdução de fibras à mistura pode ser realizada (TANG et al., 2007). Para contrapor o pouco ganho de resistência à tração e à flexão de solos melhorados apenas com cimento, a adição de fibras é vantajosa. Isso se verifica para mistura com até 10% de cimento (CAI et al., 2006; CONSOLI et al., 2010 apud OLIVEIRA, 2015).

O problema dessa técnica, contudo, é a complexidade de se estipular um método de dosagem, devido às inúmeras variáveis das misturas. Dentre elas, pode-se listar a quantidade e tipo de cimento, as características e quantidade de fibras (CONSOLI et al, 2011).

Quando se produz um concreto, vários componentes devem ser levados em consideração para se obter a fluidez e resistência desejadas. Esses componentes englobam o tipo e a quantidade de cimento utilizado, a quantidade de água utilizada, as características dos agregados, a presença ou não de aditivos. Todas essas variáveis tornam a elaboração de um método para a previsão das características do concreto extremamente importante (TUTIKIAN et al., 2011).

Neste contexto, as leis de Abrams, de Lyse e de Molinari transformaram o método de dosagem do concreto – que deixou de ser não experimental (com traços arbitrários, definidos pela experiência), para se tornar um método

racional, baseado em estudos teórico-práticos. Dessa forma, possibilitou-se a criação de misturas econômicas, elevando em consideração os materiais e condições de serviços disponíveis (TUTIKIAN et al., 2011).

Esse mesmo raciocínio de padronizar, estabelecendo um procedimento prático, para se obter misturas com as características desejadas, é necessário nos estudos de melhoramento do solo com fibras (TEIXEIRA, 1995).

Teixeira (1995) salientou a importância da quantidade de fibras inseridas em um solo para se obter as características de resistências almejadas, e que, como qualquer adição química aplicada solo, deve-se dosar de forma correta a quantidade de fibras para que seja adquirida a maior quantidade de ganhos possíveis nos desempenhos mecânicos.

Neste contexto, Consoli et al. (2011, 2017) estuda métodos para se prever a resistência dos solos à compressão e à tração, quando melhorados com fibras de polipropileno e cimento CPV-ARI.

Consoli (2011) elaborou um método para se plotar em um único gráfico as resistências à compressão simples de solos melhorados com cimento e fibras de polipropileno, em função da quantidade de cimento e fibras de cada mistura. Para este estudo, variou-se a quantidade de fibras e cimentos utilizados, mas manteve-se o mesmo solo para todos os corpos de prova. Para tanto, Consoli et al. (2011) concluiu que o comprimento das fibras e o ajuste da razão entre a quantidade de cimento e a porosidade da mistura (C_{iv}/η) são parâmetros chave para a avaliação da resistência à compressão simples e à tração.

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{1 + C/100 + F/100} \right] * \left[\frac{1/100}{\gamma_{s_s}} + \frac{C/100}{\gamma_{s_c}} + \frac{F/100}{\gamma_{s_f}} \right] \right\} \quad (1)$$

Sendo:

η = porosidade da mistura (sem dimensão);

γ_d = densidade relativa da mistura, dada pela massa específica seca/massa específica da água (sem dimensão);

C = porcentagem de cimento em massa (sem dimensão);

F = porcentagem de fibras em massa (sem dimensão);

γ_s = densidade relativa dos grãos do solo (sem dimensão);

γ_c = densidade relativa do cimento (sem dimensão);

γ_f = densidade relativa das fibras (sem dimensão).

$$C_{iv} = 100 * \frac{C * \gamma_d}{(1 + C) * \gamma_c} \quad (2)$$

Sendo:

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova) (sem dimensão);

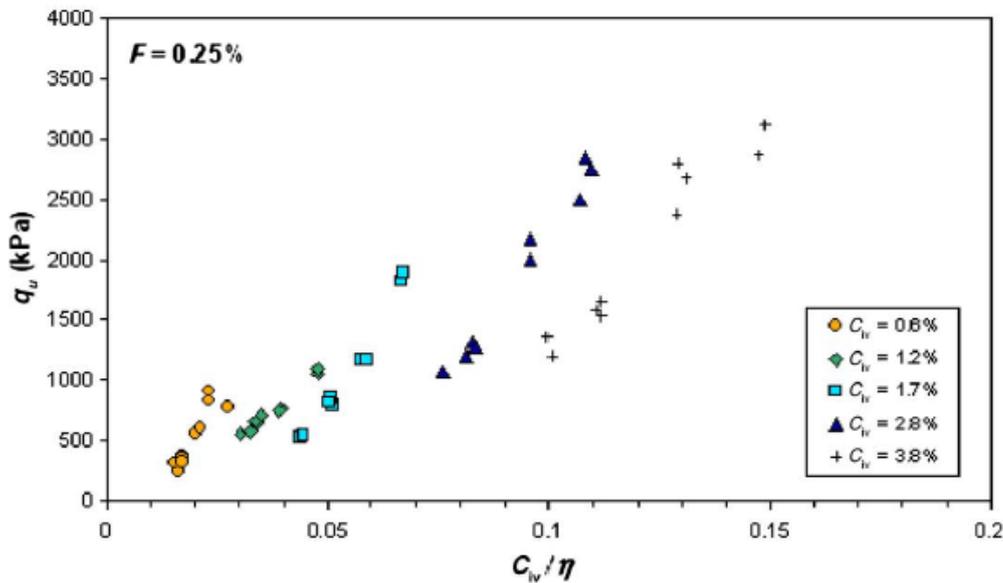
γ_d = densidade relativa da mistura, dada pela massa específica seca/massa específica da água (sem dimensão);

C = porcentagem de cimento em massa (sem dimensão);

γ_c = densidade relativa do cimento (sem dimensão);

Segundo Consoli et al. (2011), pode-se perceber que quando uma variedade de misturas, para uma dada porcentagem de fibras, é plotada em um gráfico - que correlaciona a resistência à compressão simples pela razão entre a quantidade de cimento e a porosidade da mistura -, os dados se agrupam em misturas de mesma porcentagem de cimento. Essa afirmação pode ser verificada na FIGURA 6.

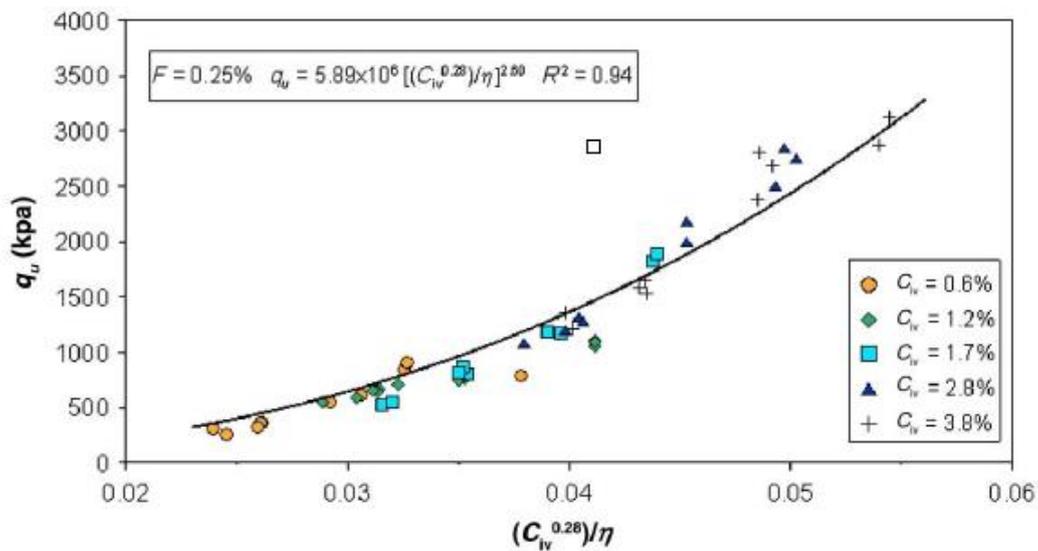
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, DADA A RAZÃO ENTRE CIMENTO E POROSIDADE, PARA UMA PORCENTAGEM ESPECÍFICA DE FIBRAS



FONTE: CONSOLI et al. (2011).

Quando esse gráfico tem as abscissas ajustadas por um coeficiente – que eleva o valor de C_{iv} das misturas, resultando em $(C_{iv}^{0.28})/\eta$ –, é possível ter uma única curva para todos os pontos (CONSOLI et al., 2011). Essa afirmação pode ser verificada na FIGURA 7.

FIGURA 7 - EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, COM A RAZÃO AJUSTADA ENTRE CIMENTO E POROSIDADE, PARA UMA PORCENTAGEM ESPECÍFICA DE FIBRAS



FONTE: CONSOLI et al. (2011).

Assim, ficou comprovado ser possível achar um padrão para as curvas de resistência, dado a razão ajustada entre a quantidade de cimento e a porosidade da mistura. Contudo, a porcentagem de fibras não é levada em conta nesta padronização. A partir desta conclusão, Consoli et al. (2011) conseguiu desenvolver um modelo de fórmula para encontrar o valor da resistência à compressão simples e à compressão diametral da mistura, mas que era função da porcentagem de fibras e específica para um tipo único de solo, não podendo ser generalizada.

O ajuste da abcissa C_{iv}/η por 0,28 (resultando em $C_{iv}^{0,28}/\eta$) foi amplamente investigado por Festugato et al. (2017). Observou-se que o valor de coeficiente (0,28) talvez seja função das características do solo e do cimento utilizados na mistura. Isso foi afirmado, pois, independente da porcentagem de fibras utilizadas, o valor de 0,28 era o melhor ajuste das abscissas para se correlacionar as resistências dos solos melhorados ao valor de C_{iv}/η .

Consoli (2017) desenvolveu um método mais abrangente, com o qual é possível ajustar uma única curva capaz de correlacionar a resistência à compressão simples - ou à tração de solos melhorados com cimento e fibras de propileno para tempo de cura de 7 dias – com o valor de Δ , dado pela equação (3). Neste estudo, as conclusões podem ser aplicadas a uma gama muito maior de solos: é necessário apenas que este possua, no mínimo, 10% de finos. Para tanto, um coeficiente experimental foi introduzido aos conceitos de Consoli (2011): α , como mostrado na equação (4).

$$\Delta = \frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \quad (3)$$

Como conclusão, Consoli et al. (2017) desenvolveu uma fórmula mais genérica, testando vários solos:

$$\frac{q_u}{q_u[\text{para um } \Delta \text{ conhecido}]} \text{ ou } \frac{q_t}{q_t[\text{para um } \Delta \text{ conhecido}]} = \Delta^\alpha \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-\alpha} \quad (4)$$

Sendo:

q_u = resistência à compressão simples (kPa);

q_t = resistência à tração (kPa);

Δ = valor usado para determinar q_u , conforme equação (3) (sem dimensão);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão);

α = parâmetro influenciado pela mistura escolhida como parâmetro (Δ conhecido) (sem dimensão).

A equação (4) será chamada de equação de previsibilidade da resistência, neste trabalho.

O ajuste da equação de previsibilidade é realizado da seguinte maneira:

- Plota-se as resistências e o valor de Δ de cada mistura;
- Escolhe-se uma das misturas para calibrar α , de modo que a equação resultante esteja bem ajustada aos demais pontos;

Para fins didáticos, Consoli (2017) escolheu, dentre suas várias misturas, $\Delta=30$ e obteve $\alpha=2,45$, chegando na seguinte fórmula:

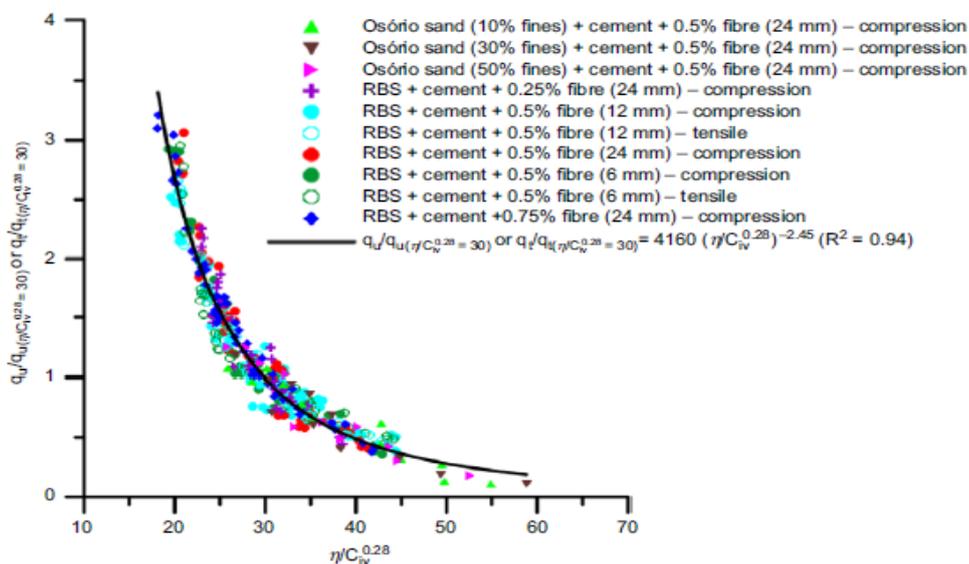
$$\frac{q_u}{q_u[\Delta = 30]} \text{ ou } \frac{q_t}{q_t[\Delta = 30]} = \Delta^{2,45} \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-2,45} \quad (5)$$

Verificar na FIGURA 8 como esta equação se ajusta bem a uma gama de fibras e porcentagens de cimento utilizados, para 4 tipos de solos testados. Assim, é possível se prever qual será a resistência à compressão ou à tração de um solo melhorado com fibras de polipropileno, através de um único ensaio: de uma mistura com Δ igual ou próximo a 30. Essa afirmação é válida, contudo, para a gama de parâmetros que foi utilizada por Consoli et al. (2017).

Esses parâmetros são:

- Solos com, no mínimo 10% de finos;
- Fibras de polipropileno, com 0.023 de diâmetro e comprimento de 6mm a 24 mm, variando de 0.25% a 0.75%;
- Cimento CPV-ARI, variando de 0.5% a 7%;
- Razão ajustada entre a porcentagem de cimento e a porosidade da mistura ($C_{iv}^{0.28} / \eta$) entre 15 e 80.

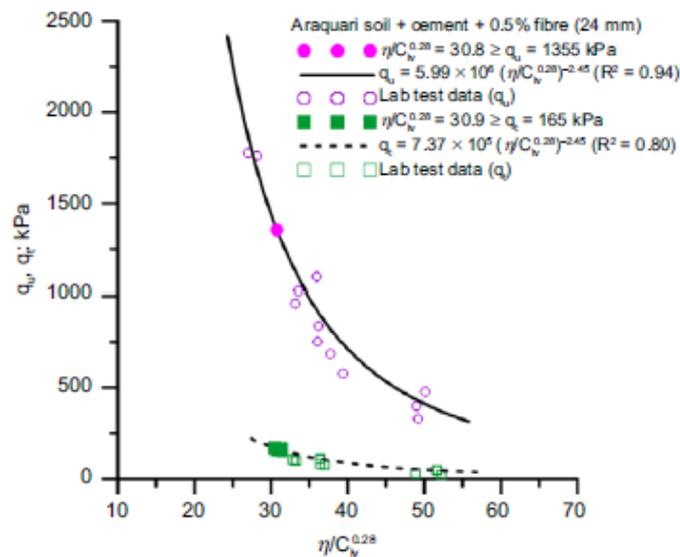
FIGURA 8 – PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA



FONTE: CONSOLI et al. (2017).

Consoli (2017) verificou a equação (5) para outros 2 tipos solos. Ou seja, dosou misturas com Δ próximo a 30 e testou-as à compressão simples e à tração. Substituiu esses valores à equação (mantendo-se o coeficiente $\alpha=2,45$). Um desses resultados pode ser verificado na FIGURA 9. Como pode-se verificar, o método foi validado com sucesso, pois a equação (5) se ajustou bem, de fato, às resistências das misturas dos novos solos melhorados.

FIGURA 9 - VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PREVISIBILIDADE



FONTE: CONSOLI et al. (2017).

A FIGURA 9 demonstra como Consoli et al. (2017) afirmou existir uma proporcionalidade entre a resistência à compressão simples e à tração de solos melhorados com cimento e fibras. Essa afirmação é justificável, pois foi possível utilizar o coeficiente α – ajustado utilizando os dados de compressão simples das misturas – também para as fórmulas de previsão de resistência à tração, sem alteração.

2.2 FUNDAÇÕES DE TORRES DE TRANSMISSÃO

De acordo com Chagas (2004), são tipos de fundações das torres de transmissão:

- Tubulões em solo;
- Tubulões em rocha;
- Sapatas;
- Blocos;
- Blocos sobre estacas;
- Blocos ancorados em rocha;
- Grelhas metálicas

Sabe-se que, dada a combinação de carregamento, as fundações das torres são submetidas à esforços de arrancamento, criando solicitações de tração no solo (CHAVES, 2004).

Os esforços de tração são provenientes dos momentos de tombamento das torres. Esses momentos são gerados principalmente pela carga de vento nos cabos e nas torres, mas podem ocorrer através da ruptura de cabos, causando um desequilíbrio dos esforços nas torres (ORLANDO, 1985).

Dado que a maior parcela dos esforços máximos (na ordem de 80%) nas torres de transmissão é decorrente dos esforços de vento e ruptura de cabos (PALADINO, 1972), a verificação ao arrancamento nos projetos é a situação mais crítica, salvo em solos excepcionalmente fracos (DANZIGER, 1985).

Dada essa possibilidade de alternância dos esforços atuantes nos pés, de acordo com a direção da rajada de vento, as quatro fundações são iguais (CHAGAS, 2004), devendo ser dimensionadas quanto à compressão e tração máxima. (PALADINO, 1972)

Pequenas deficiências da fundação em relação à compressão geram pequenos recalques, sem consequência à integridade das torres. Ou seja, quanto aos esforços de compressão, eventuais falhas de dimensionamento causam deformações lentas, possibilitando tempo para reparos (PALADINO, 1972).

Por outro lado, deficiências em relação ao dimensionamento das fundações contra o arrancamento são críticas. Isso se deve ao fato de que, pequenos levantamentos dos pés, na ordem de 3 cm, são suficientes para gerar a ruptura do solo (PALADINO, 1972).

Dado um dos objetivos desse trabalho - focar em alternativas de melhoramento de solos para o dimensionamento de fundações de torres de transmissão em lugares de difícil acesso -, as fundações abordadas serão as sapatas e grelas metálicas. Essas são alternativas que exigem reaterro (CHAVES, 2004). Ou seja, são as alternativas nas quais o melhoramento de solo poderia se valer do próprio processo construtivo das fundações para ser aplicado. Como dito no item 2.1, ao poder ser realizada em um solo que já é retirado como parte do próprio processo de construção das fundações, a mistura é eficiente, pois não requer uma intervenção totalmente separada da construção das fundações. Além disso, são alternativas que não requerem o

uso de grandes máquinas, podendo ser executadas manualmente, como ilustrado na FIGURA 10.

FIGURA 10 - ESCAVAÇÃO MANUAL PARA A EXECUÇÃO DE FUNDAÇÃO

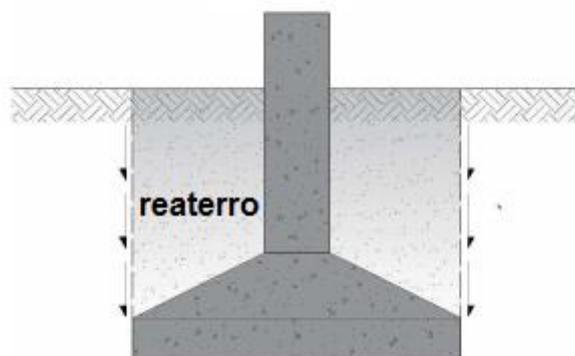


FONTE: WF FUNDAÇÕES (2017)

2.2.1 Sapatas

Conforme a FIGURA 11, as sapatas são fundações diretas, ou seja, que se assentam em cotas pouco profundas, pois o solo superficial apresenta tensões admissíveis compatíveis com o projeto. São executadas em concreto armado, de forma que distribuem as cargas transmitidas pela torre de forma distribuída ao solo (CHAVES, 2004).

FIGURA 11 - FUNDAÇÃO DO TIPO SAPATA DE UMA TORRE DE TRANSMISSÃO



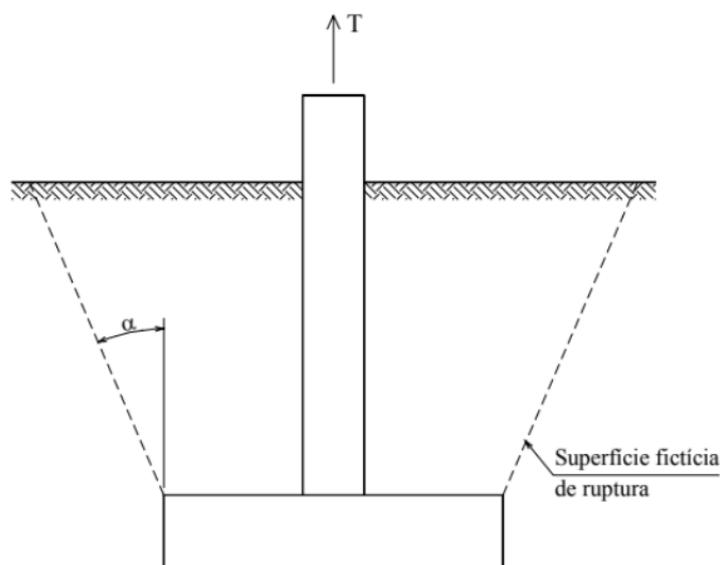
FONTE: adaptado de DANZIGER (1983)

A concretagem da sapata deverá ser seguida do reaterro. O reaterro deverá ser executado com umidade ótima, sendo que as suas características

geotécnicas devem ser iguais ou melhor àquelas do terreno original. Esse cuidado deve ser realizado por causa dos esforços de arrancamento das sapatas. (CHAVES, 2004).

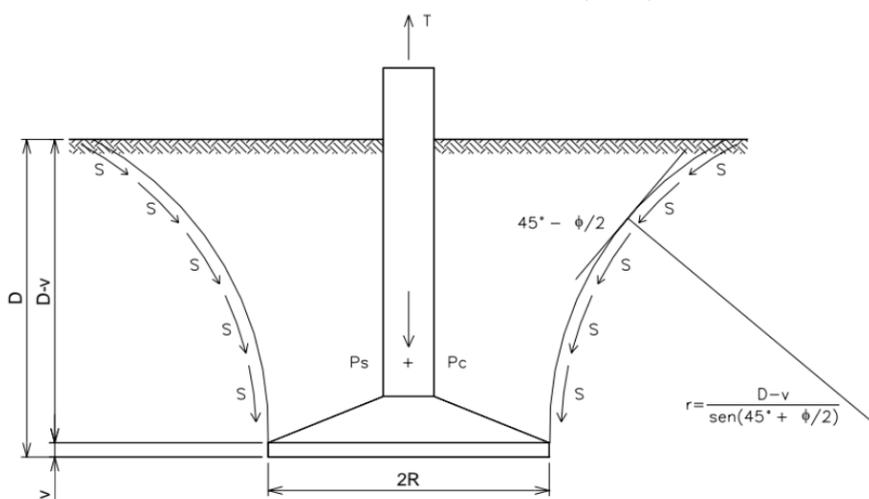
Quanto ao dimensionamento ao arrancamento, pode-se listar diferentes métodos, como o método de cone (FIGURA 12), o método do cilindro de atrito, o método de Balla (1961), conforme FIGURA 13, entre outros.

FIGURA 12 - MÉTODO DE CONE



FONTE: GARCIA (2005)

FIGURA 13 - MÉTODO DE BALLA (1961)



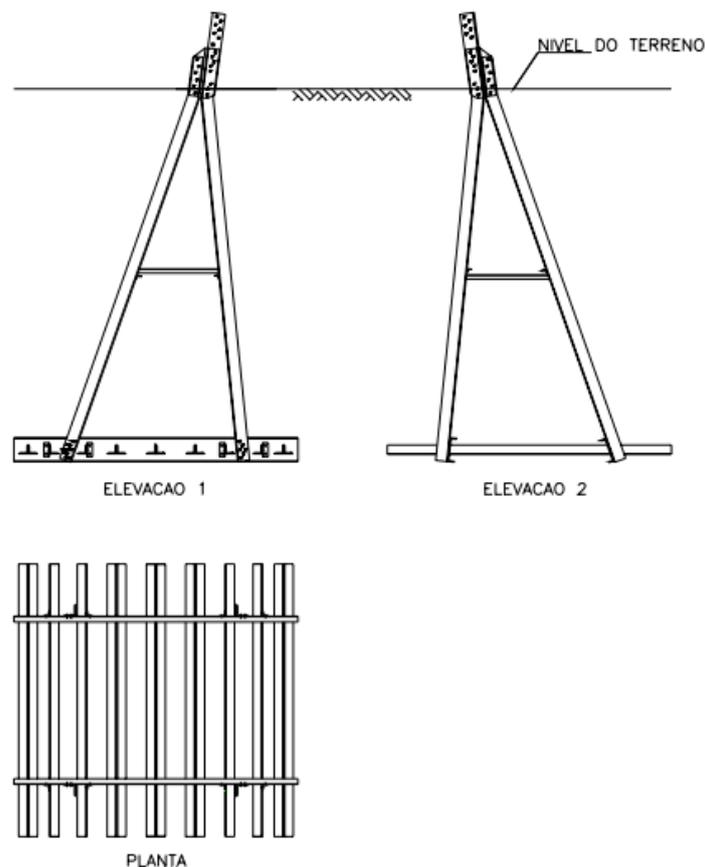
FONTE: GARCIA (2005)

Em todos esses métodos, o dimensionamento das fundações ao arrancamento leva em consideração o peso do solo de reaterro, limitado pelas superfícies de ruptura. As superfícies de ruptura são definidas através das características do solo reaterro como intercepto de coesão e ângulo de atrito. Logo, há influência da qualidade do reaterro no dimensionamento das sapatas (GARCIA, 2005).

2.2.2 Grelhas metálicas

Conforme a FIGURA 14, as grelhas também são fundações diretas. Segundo Gontijo (1994), as grelhas têm sido muito utilizadas como fundação, já que assim como as torres, também são metálicas.

FIGURA 14 - FUNDAÇÃO DO TIPO GRELHA METÁLICA UMA TORRE DE TRANSMISSÃO



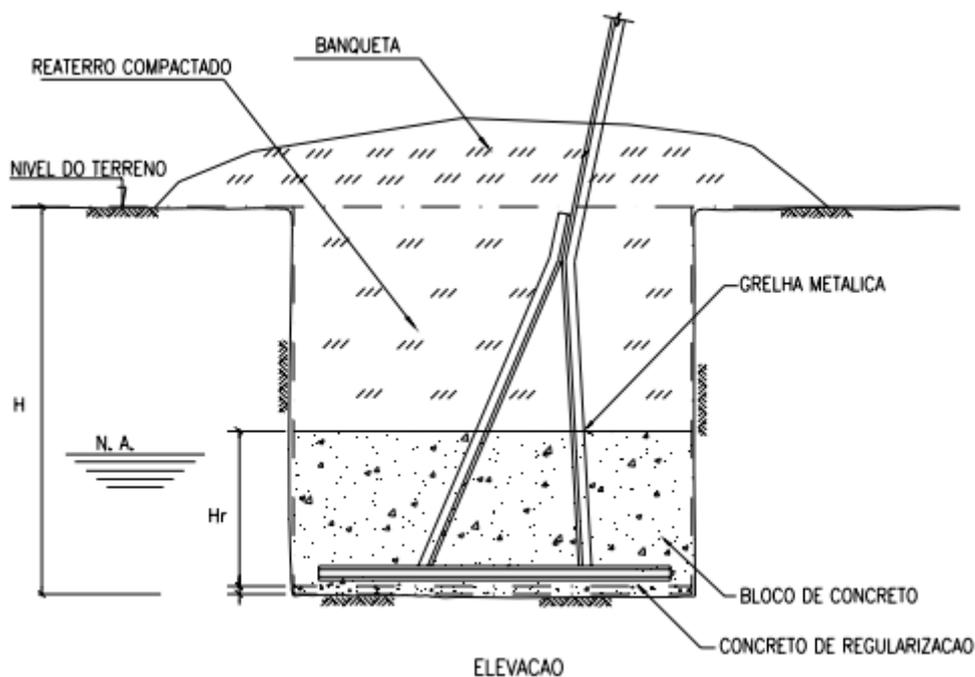
FONTE: CHAVES (2004)

O posicionamento das grelhas deverá ser seguido do reaterro, assim como nas sapatas. Eventualmente, a parte inferior do grela poderá ser

concretada, conforme FIGURA 15, constituindo uma laje, ou um bloco. Essa eventual concretagem é recomendada para a dissipação mais homogênea das tensões de compressão ao solo. Outra funcionalidade do concreto é proteger o metal da grelha contra elevações no nível de água. Quanto ao arrancamento, o concreto ajuda no peso da fundação.

Todas as verificações de estabilidade das grelhas são idênticas às de uma sapata (CHAVES, 2004). Dessa forma, há influência da qualidade do reaterro no dimensionamento das grelhas

FIGURA 15 - GRELHA METÁLICA COM BLOCO DE CONCRETO



FONTE: CHAVES (2004)

3 MATERIAIS

A seguir, serão descritos os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova. As normas utilizadas para a caracterização do solo serão esclarecidas, assim como as propriedades das fibras e cimentos usados para o aprimoramento da mistura.

3.1 AREIA

A areia foi escolhida para ser representativa do solo encontrado no litoral do estado do Paraná. Sendo assim, foi extraída de uma jazida de areia, localizada nas coordenadas 25°36'02"S e 48°25'32"O, no município de Pontal do Sul (PR), conforme FIGURA 16 e FIGURA 17:

FIGURA 16 - JAZIDA DE AREIA



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 17 - EXTRAÇÃO DA AREIA



FONTE: o autor (2017).

A areia foi trazida para Curitiba, em sacos de r fia, onde foi secada a 100 C, em estufa, durante 24 horas. Após a secagem, a areia foi armazenada em bombonas, devidamente fechadas, para garantir o controle da umidade.

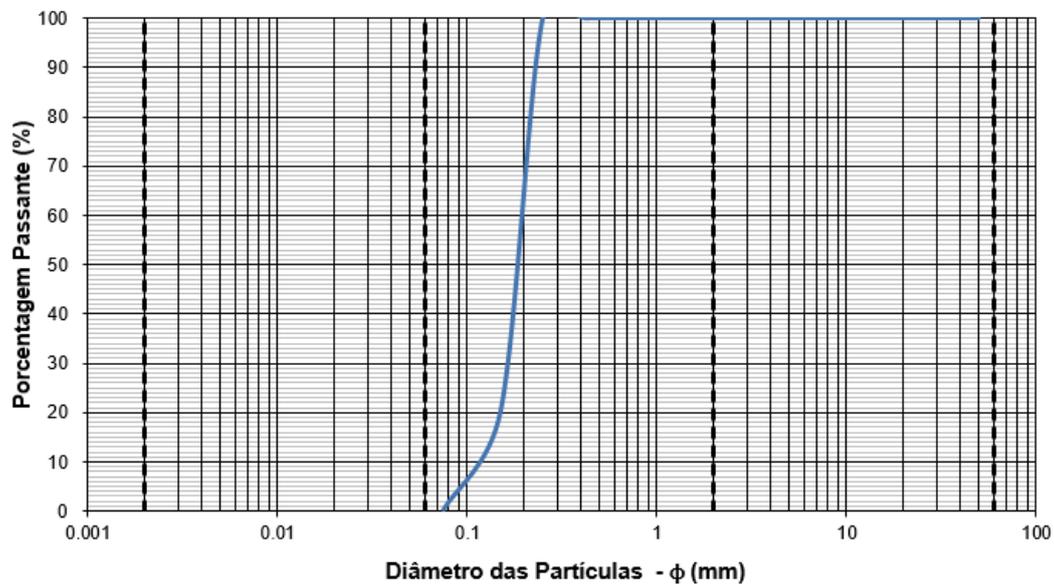
Os dados da curva granulométrica da areia podem ser vistos na TABELA 1. A curva granulométrica da areia está representada FIGURA 18. Como pode-se observar, menos de 1% do material passou pela peneira de número 200, com abertura de 0,075mm. A descri o do ensaio de granulometria será feita no item 4.1.1 deste trabalho. Para os dados completos do peneiramento podem ser consultados no ANEXO 1

TABELA 1 - PENEIRAMENTO DA AREIA

PENEIRAS		MATERIAL PASSANTE (%)
(MM)	ASTM	
50	2	100.00
38	1 1/2"	100.00
25	1"	100.00
19	3/4"	100.00
9.5	3/8"	100.00
4.8	4	100.00
2	10	100.00
1.2	16	100.00
0.6	30	99.99
0.42	40	99.96
0.25	60	99.81
0.15	100	20.29
0.075	200	0.34

FONTE: O AUTOR (2017).

FIGURA 18 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA



FONTE: o autor (2017).

Atendo-se ao fato que a única restrição às características do solo abordada por Consoli et al. (2017) é que ele tenha, no mínimo, 10% de finos, foi necessário aumentar a quantidade de material passante na peneira número

200 da areia estudada. Para isto, optou-se por misturar a areia com bentonita, a qual será abordada no item 3.2 deste trabalho.

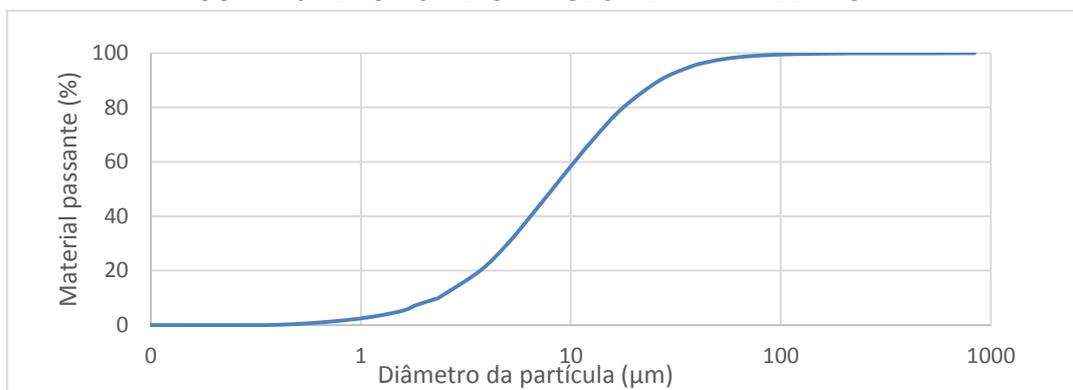
3.2 BENTONITA

A bentonita foi fornecida pela empresa Fugro in Situ Brasil®. A bentonita foi secada a 100°C, em estufa, durante 24 horas. Após a secagem, a bentonita foi armazenada em caixa plástica selada, devidamente fechadas, para garantir o controle da umidade – visto a alta absorção do material.

Inicialmente, tentou-se realizar a caracterização granulométrica da bentonita através de peneiramento fino. Contudo, dada as características desse material, grânulos se formavam e impediam a realização do ensaio.

Dessa forma, a curva granulométrica apresentada na FIGURA 19 é mérito de Júnior (2017), que realizou a caracterização da mesma bentonita através da técnica de raio à laser. O equipamento utilizado na análise foi o S3500 da fabricante Microtrac®.

FIGURA 19 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DA BENTONITA



3.3 SOLO

Para a obtenção de, no mínimo, 10% de finos, foi escolhida a razão de 80% de areia para 20% de bentonita, em massa seca. Essa mistura será chamada de “solo” para o restante deste trabalho, o qual resultou em uma mistura com 20,27% de finos, conforme pode ser percebido na TABELA 2.

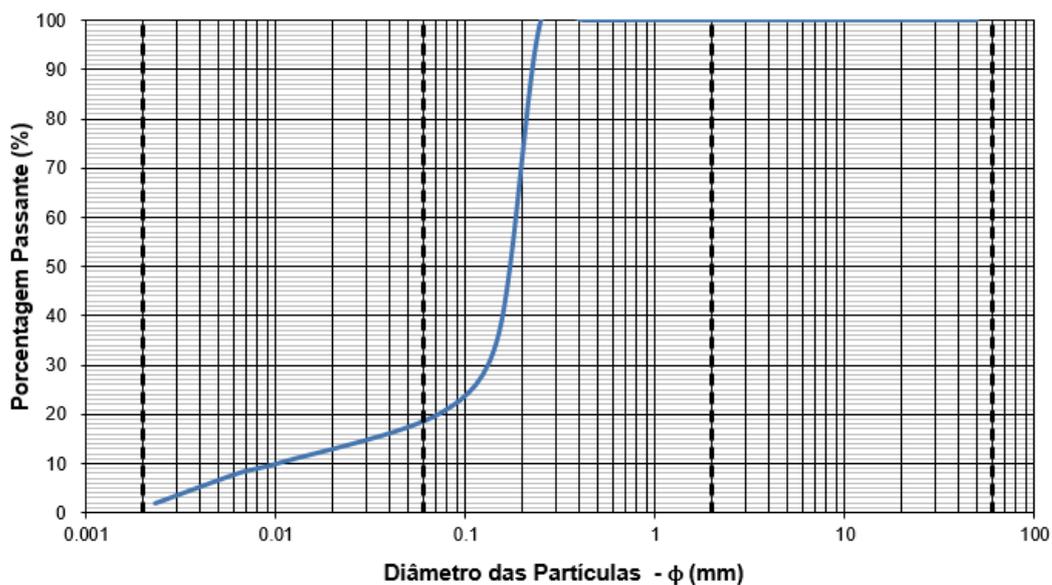
TABELA 2 – GRANULOMETRIA DO SOLO

Porcentagem materiais (%)		Peneiras		Material passante (%)			Material retido (%)
Areia	Bentonita	(mm)	ASTM	Areia	Bentonita	Mistura	Mistura
80	20	50	2	100.00	100	100	0
		38	1 1/2"	100.00	100	100	0
		25	1"	100.00	100	100	0
		19	3/4"	100.00	100	100	0
		9.5	3/8"	100.00	100	100	0
		4.8	4	100.00	100	100	0
		2	10	100.00	100	100	0
		1.2	16	100.00	100	99.99	0.01
		0.6	30	99.99	100	99.98	0.02
		0.42	40	99.96	100	99.97	0.03
		0.25	60	99.81	100	99.85	0.15
		0.15	100	20.29	100	36.23	63.77
		0.075	200	0.34	100	20.27	79.73

FONTE: o autor (2017).

Com esta razão entre os materiais, a curva granulométrica do solo que será melhorado com fibras de polipropileno e cimento CPIV-ARI está representada na FIGURA 20. As porcentagens passantes referentes aos diâmetros inferiores a 0,075 mm foram ajustadas aos dados da FIGURA 19.

FIGURA 20 – GRANULOMETRIA DO SOLO



FONTE: o autor (2017).

O valor da massa específica dos grãos do solo é de $2,68 \text{ g/cm}^3$ (nas fórmulas deste trabalho, dado como γ_s). Os dados do ensaio podem ser vistos no ANEXO 2. A massa específica aparente seca máxima (γ_d) é de $1,74 \text{ g/cm}^3$, enquanto a umidade ótima do solo é de $16,5\%$ (W_{ot}). Os dados completos para o ensaio de compactação podem ser verificados no ANEXO 3.

3.4 FIBRAS

As fibras utilizadas são constituídas de polipropileno, com 24mm de comprimento. Elas foram fornecidas pela empresa Maccaferri. Essas fibras recebem a nomenclatura de FibroMac24® e são utilizadas na em argamassas e concretos para reduzirem a fissuração por retração e assentamento. Além disso têm aplicação nesses materiais para ganhos de resistência ao fogo, impacto e desgaste (MACCAFERRI, 2009). As especificações técnicas estão contidas no ANEXO 4.

3.5 CIMENTO

O cimento utilizado é o de categoria CP5-ARI, ou seja, de alta resistência inicial. Ele foi fornecido pela Cia de Cimentos Itambé. As especificações técnicas estão contidas no ANEXO 5.

4 MÉTODOS

A seguir, serão descritas as etapas que compõem o preparo e a ruptura dos corpos de prova, com as suas devidas considerações.

4.1 ENSAIOS

Nos próximos itens, serão descritos os ensaios realizados pelo autor.

4.1.1 Caracterização de solos

A análise granulométrica foi executada de acordo com a norma ABNT NBR 7181:2016. O peneiramento grosso (peneiras de 50 mm a 2 mm) e o peneiramento fino (peneiras de 2 mm a 0,075 mm), foram feitos em sequência, através da utilização da série normal de peneiras.

Quanto aos ensaios de densidade dos grãos, é de conhecimento geral que para encontrar a densidade de algo, faz-se necessário saber a relação peso/volume do material. Para os grãos do solo, esse raciocínio não muda:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (6)$$

Sendo:

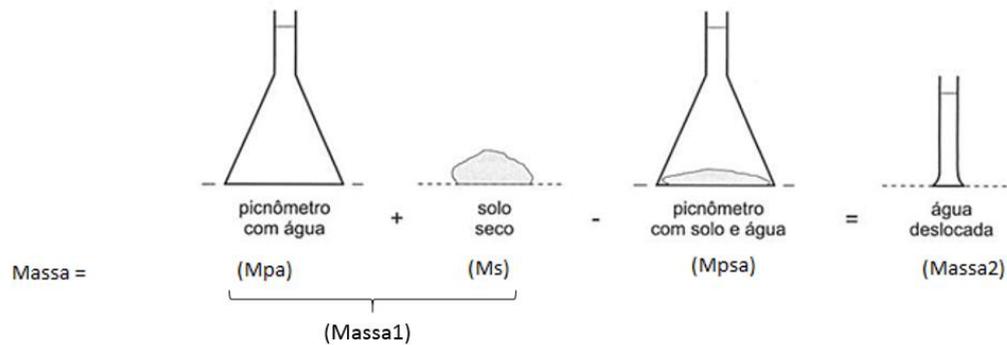
D_s = densidade dos grãos;

M_s = massa dos sólidos;

V_s = volume dos sólidos.

Para encontrar o denominador da fórmula, utiliza-se a os conceitos da lei de Arquimedes, ou seja, é necessário determinar o volume dos sólidos pela massa de água deslocada. Para isso, utiliza-se picnômetros.

FIGURA 21 – DADOS PARA OBTENÇÃO DA DENSIDADE DOS GRÃOS



FONTE: alterada de PINTO (2006)

A relação entre volume dos sólidos e peso da água deslocada, pode ser entendida seguindo um roteiro das explicações descritas por Pinto (2006):

Se a massa de partículas fosse colocada no picnômetro previamente cheio de água até a linha demarcatória, sem que nada de água se perdesse, ter-se-ia:

$$\text{Massa}_1 = M_s + M_{pa} \quad (7)$$

Sendo:

M_s = massa dos sólidos;

M_{pa} = massa do picnômetro mais água até a linha demarcatória.

Contudo, a adição do solo ocasionará um excesso em relação à linha demarcatória. Por outro lado, se as partículas fossem adicionadas ao picnômetro, e a água fosse adicionada posteriormente de modo que atingisse a linha demarcatória sem ultrapassá-la, teríamos M_{psa} . Então, a massa de água que não poderia ser incorporada ao picnômetro, porque o espaço já estaria ocupado por partículas, seria de:

$$\text{Massa}_2 = M_s + M_{pa} - M_{psa} \quad (8)$$

Esta massa de água ocuparia um volume que é dado pela divisão de seu valor pela massa específica de água.

Seguindo esse mesmo raciocínio, utilizou-se como parâmetro a norma DNER-ME 093:1994. É importante salientar que foram tomados cuidados para ferver a mistura de água e areia adicionadas ao picnômetro, para retirar bolhas de ar contidas no solo; assim como deixar o conjunto esfriar para evitar que correntes de convecção alterassem a medição realizada pela balança altamente sensível.

Uma vez com este dado em mãos, pôde-se realizar o ensaio de compactação de acordo com a ABNT NBR 7182:2016. Com esse ensaio, foi possível definir a massa específica aparente seca máxima, e a umidade ótima do solo.

4.1.2 Ensaio de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram feitos na prensa de argamassas EMIC®, marca INSTRON Brasil®, disponível no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – FIGURA 22.

Essa prensa foi escolhida devido à resistência prevista que os corpos de prova teriam. Foram realizados ensaios testes, para a escolha da célula de carga mais adequada.

FIGURA 22 - PRENSA UTILIZADA



FONTE: o autor (2017)

A velocidade da prensa foi definida em 1,14 milímetros por minuto, a mesma atualizada por Consoli et al. (2017). Uma bolacha de Neoprene foi utilizada na face superior dos corpos de prova para dissipação uniforme das tensões em sua superfície.

4.1.3 Ensaio de compressão diametral

Assim como nos ensaios de compressão simples, os ensaios de compressão diametral também foram feitos na prensa de argamassas EMIC®, marca INSTRON Brasil®, disponível no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), da UFPR.

A velocidade da prensa também foi fixada em 1,14 mm/min, novamente a mesma velocidade usada por Consoli et al. (2017) para o ensaio.

Para esse ensaio, seguiram-se as premissas da norma DNIT 136:2010. A resistência à tração é obtida através da equação XX (Krishhnayya et al., 1974 apud Villar et al., 2007):

$$q_t = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (9)$$

Sendo:

q_t = resistência à tração (MPa);

F= força registrada pela prensa (N);

D= diâmetro do corpo de prova;

H= altura do corpo de prova.

4.2 CORPOS DE PROVA

Todos os corpos de prova foram compactados com a umidade ótima do solo, seguindo o que foi feito por Consoli et al. (2017). Quanto à porcentagem de cimento utilizada, optou-se por fazer corpos de prova variando de 0 a 5% em massa em relação à massa seca de solo. Quando à porcentagem de fibra utilizada, optou-se por utilizar 0% (para controle) e 0,5% em massa em relação

à massa seca de solo e cimento de cada corpo de prova. O resumo dos diferentes tipos de misturas pode ser visto na TABELA 3. A dosagem detalhada de cada corpo de prova pode ser verificada no ANEXO 6.

TABELA 3 – DOSAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Definição da mistura					
Mistura	Solo	Cimento CPV-ARI	Fibra	Ensaio	Categoria
C1-1	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão simples	Controle
C1-2	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão simples	Controle
C1-3	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão simples	Controle
C1-4	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão diametral	Controle
C1-5	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão diametral	Controle
C1-6	80% areia + 20% bentonita	0%	0.00%	Compressão diametral	Controle
C2-1	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão simples	Controle
C2-2	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão simples	Controle
C2-3	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão simples	Controle
C2-4	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão diametral	Controle
C2-5	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão diametral	Controle
C2-6	80% areia + 20% bentonita	0%	0.50%	Compressão diametral	Controle

NC1-1	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-2	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-3	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-4	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-5	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-6	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-7	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-8	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-9	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-10	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-11	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-12	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-13	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-14	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-15	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC1-16	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-17	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC1-18	80% areia + 20% bentonita	1%	0.50%	Compressão diametral	Não controle

NC2-1	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-2	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-3	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-4	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-5	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-6	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-7	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-8	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-9	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-10	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-11	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-12	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-13	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-14	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-15	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC2-16	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-17	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC2-18	80% areia + 20% bentonita	2%	0.50%	Compressão diametral	Não controle

NC3-1	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-2	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-3	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-4	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-5	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-6	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-7	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-8	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-9	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-10	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-11	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-12	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-13	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-14	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-15	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC3-16	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-17	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC3-18	80% areia + 20% bentonita	3%	0.50%	Compressão diametral	Não controle

NC4-1	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-2	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-3	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-4	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-5	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-6	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-7	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-8	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-9	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-10	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-11	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-12	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-13	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-14	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-15	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão simples	Não controle
NC4-16	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-17	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle
NC4-18	80% areia + 20% bentonita	5%	0.50%	Compressão diametral	Não controle

FONTE: o autor (2017).

Como se pode observar, cada uma das misturas foi repetida algumas vezes. As misturas de controle, sem cimento, foram repetidas 6 vezes, cada: 3 para ensaios de compressão simples, e 3 para ensaios de compressão diametral. Já para os ensaios com cimento, cada mistura foi realizada 18 vezes: 3 para ensaios de compressão simples, e 3 para ensaios de compressão diametral, para 7, 14 e 28 dias de cura. Deste modo, foram feitos 84 corpos de prova, ao todo.

Nos seguintes itens desse trabalho, os valores de resistência usados nas fórmulas serão referentes ao valor médio de cada mistura. Dessa forma, será utilizada uma nomenclatura simplificada, mostrada na TABELA 4.

TABELA 4 - NOMENCLATURA DAS MISTURAS

MISTURA	SOLO	CIMENTO CPV-ARI	FIBRA
C1	80% AREIA + 20% BENTONITA	0%	0.00%
C2	80% AREIA + 20% BENTONITA	0.50%	0.00%
NC-1	80% AREIA + 20% BENTONITA	0.50%	1.00%
NC-2	80% AREIA + 20% BENTONITA	0.50%	2.00%
NC-3	80% AREIA + 20% BENTONITA	0.50%	3.00%
NC-4	80% AREIA + 20% BENTONITA	0.50%	5.00%

FONTE: o autor (2017).

Para a homogeneização de cada mistura, realizou-se um teste para se verificar a facilidade de integração das fibras ao solo e cimento, dependendo da ordem com a qual os itens são misturados.

Inicialmente, seguiram-se as orientações de Neto et al. (2016): incorporou-se água ao solo com o cimento, antes de se adicionar as fibras. Com isso, pode-se verificar que, de fato, a mistura resultava mais uniforme do

que se fosse tentado misturar as fibras ao solo e cimento secos, para apenas depois, adicionar água. Contudo, mesmo assim, o solo melhorado ainda apresentava vários emaranhados das fibras (FIGURA 23). Desse modo, optou-se por realizar um experimento: misturaram-se as fibras à água, de modo que fosse possível desemaranhá-las antes da adição ao solo e cimento. Notou-se um resultado melhor, que pode ser observado na (FIGURA 24). Sendo assim, este último método de homogeneização foi o escolhido para ser replicado na mistura de todos os corpos de prova.

FIGURA 23 - EMARANHADO EVIDENTE DAS FIBRAS



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 24 - EMARANHADO MENOS EVIDENTE DAS FIBRAS



FONTE: o autor (2017).

Para a confecção dos corpos de prova, usaram-se moldes de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Tomou-se o cuidado de untar as faces dos moldes com vaselina industrial para facilitar a retirada dos corpos de prova sem danificá-los.

Quanto à quantidade de mistura a ser colocada em cada molde, sabe-se que o volume de cada corpo de prova é de 196.35cm^3 , e conhece-se a umidade ótima do solo. Sendo assim, pode-se calcular a massa esperada que cada corpo de prova teria, caso fossem constituídos apenas de solo e água, através da fórmula:

$$\text{Massa corpo de prova} = \text{massa específica úmida} * \text{volume corpo de prova} \quad (10)$$

$$\text{Massa corpo de prova} = \gamma_d * \left(1 + \frac{W_{ot}}{100}\right) * \text{volume corpo de prova} \quad (11)$$

Sendo:

γ_d = massa específica aparente seca máxima;

W_{ot} = umidade ótima do solo.

Logo, tem-se:

$$\text{Massa por corpo de prova} = 1.74 \text{ g/cm}^3 * \left(1 + \frac{16.5}{100}\right) * 196.35 \text{ cm}^3 \quad (12)$$

$$\text{Massa por corpo de prova} = 398 \text{ g}$$

Essa massa por corpo de prova foi utilizada para todas as misturas, as quais foram colocadas dentro dos moldes por golpes de soquetes, conforme FIGURA 25. Tomou-se o cuidado de preparar misturas para executar, no máximo, 6 corpos de prova por vez, a fim de se evitar a perda de água e dificuldade de homogeneização. Também foi dada atenção para a compactação uniforme do solo melhorado dentro dos moldes.

FIGURA 25 - CORPO DE PROVA SENDO MOLDADO



FONTE: o autor (2017).

É importante salientar que há uma simplificação em relação à massa do solo melhorado utilizado nos corpos de prova: considerou-se que para todos eles - independente da porcentagem de cimento e fibras - a umidade ótima, a massa específica aparente seca máxima, e, conseqüentemente, a massa por corpo de prova, são as mesmas. Acreditou-se que, devido ao baixo percentual, em massa, de cimento e fibras utilizados nas misturas, esses valores não iriam variar significativamente. Essa hipótese foi confirmada ao se perceber que era possível preencher os moldes com as misturas - empregando-se a mesma

energia durante a compactação-, sem que sobrasse ou faltasse material para se atingir a massa por corpo de prova desejada. Para comprovar esta afirmação, é possível perceber no ANEXO 7 que a massa por corpo de prova variou menos de 8%, dentre todas as misturas.

Durante o tempo de cura, os corpos de prova foram envolvidos em papel filme e armazenados em câmara seca (23°C, 50-55% de umidade), conforme FIGURA 26, até serem testados. Não foi realizado submersão em água, para saturação do corpo de prova, por 24 horas antes do ensaio.

FIGURA 26 - CORPOS DE PROVA EM CURA



FONTE: o autor (2017).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, serão descritos os resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral de todos os corpos de prova listados na TABELA 3. Concomitantemente, serão feitas análises pertinentes para o propósito deste trabalho.

Todos os gráficos gerados pela prensa estão disponíveis no ANEXO 8. É importante salientar, contudo, que estes gráficos estão plotados em força, e não tensão. No caso dos ensaios de compressão diametral, a tensão calculada pela prensa não possui significado, pois a força deve ser convertida para tensão conforme explicado no item 4.1.3. No caso dos ensaios de compressão simples, o cálculo de tensão feito pela máquina é coerente, contudo, possui algumas imprecisões, e por isso não foram os valores utilizados para o restante das análises.

Estes erros são:

- A não desconsideração dos pontos nos quais a força registrada é zero, quando a célula de carga ainda não se encostou aos corpos de prova;
- A não correção da área transversal das prensas, a qual é alterada devido ao achatamento dos corpos de prova.

Para a correção destes erros, executou-se:

- A exclusão dos pontos nos quais se percebe que a prensa ainda não está em contato com os corpos de prova (definição do verdadeiro ponto inicial, referente ao início efetivo da compressão dos corpos de prova);
- A correção da deformação vertical registrada – para que a deformação inicial (zero), coincida com o novo ponto inicial;
- Correção da área dos corpos de prova, em função da deformação vertical corrigida registrada, segundo o raciocínio: sabe-se que o volume do corpo de prova não se altera, independente do seu formato, logo o volume sempre será:

$$V = H * \pi * \frac{D^2}{4} \quad (13)$$

Sendo:

V = volume em qualquer momento do ensaio;

H = altura do corpo de prova em qualquer momento do ensaio;

D = diâmetro do corpo de prova em qualquer momento do ensaio.

Sabe-se também que, inicialmente, o corpo de prova possui altura de 10 cm, a qual decresce com o passar do ensaio de compressão simples de acordo com a fórmula:

$$H = 10 - d \quad (14)$$

Sendo:

H = altura do corpo de prova em qualquer momento do ensaio;

d = deformação (em centímetros).

Como o volume não muda, em qualquer momento dos ensaios, temos que:

$$V_{inicial} = V \quad (15)$$

Sendo:

$V_{inicial}$ = volume no início do ensaio;

V = volume em qualquer momento do ensaio.

No início dos ensaios, o diâmetro e altura dos corpos de prova estão inalterados (5 cm e 10 cm, nesta ordem), logo:

$$V_{inicial} = 10 * \pi * \frac{5^2}{4} = V = (10 - d) * \pi * \frac{D^2}{4} \quad (16)$$

Sendo:

V_{inicial} = volume no início do ensaio;

V = volume em qualquer momento do ensaio;

d = deformação (em centímetros);

D = diâmetro do corpo de prova em qualquer momento do ensaio.

Reorganizando os termos, temos:

$$\pi * \frac{D^2}{4} = A = \frac{62.5 * \pi}{(10 - d)} \quad (17)$$

Sendo:

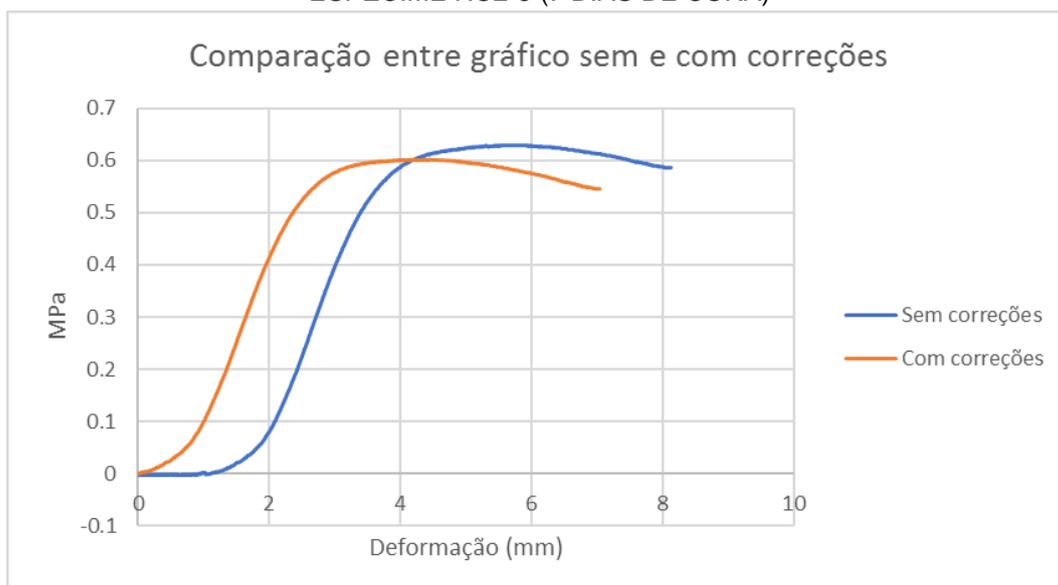
D = diâmetro do corpo de prova em qualquer momento do ensaio;

A = área do corpo de prova em qualquer momento do ensaio;

d = deformação (em centímetros).

Para demonstrar a importância dessas correções, a FIGURA 27 mostra 2 curvas de ruptura referentes ao corpo de prova NC-2 (7 dias de cura).

FIGURA 27 – COMPARAÇÃO ENTRE GRÁFICO SEM E COM CORREÇÕES PARA O ESPÉCIME NC2-5 (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Pode-se perceber que além da diferença de formato das curvas, há uma mudança na resistência máxima à compressão simples. A curva em vermelho mostra os pontos plotados pela prensa, sem a aplicação das correções mencionadas. Para ela, a resistência máxima seria aproximadamente de 0.629 kPa. Após a aplicação das correções, a curva em verde mostra que a verdadeira resistência é aproximadamente de 0.603 kPa, uma alteração de - 4.31%. Caso essas diferenças (por vezes negativas, e por outras, positivas) não fossem contabilizadas em todos os corpos de prova, os resultados - que serão mencionados nos próximos itens - poderiam mudar significativamente.

Todos os dados de resistência máxima de cada corpo de prova estão no ANEXO 9. Para saber se as variações entre os resultados dos corpos de prova de uma mesma mistura e tempo de cura são aceitáveis, comparou-se os valores do coeficiente de variação dos ensaios de compressão simples com valores da bibliografia. Segundo Bruce (2000 apud EVANS et al., 2017), testes de compressão simples em corpos de prova constituídos de solos misturados possuem coeficiente de variação próximos a 0,3 – podendo chegar a até 0,7, dependendo da mistura. O coeficiente de variação é calculado pela equação:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (18)$$

Sendo:

CV= Coeficiente de variação;

s= desvio padrão dos dados;

\bar{x} = média dos dados.

Como pode ser observado no ANEXO 9, o maior coeficiente de variação foi de 0,185. Logo, considerou-se haver uma variação aceitável entre os ensaios, corroborando a afirmação de que a produção dos corpos de prova teve um bom controle.

Quanto à classificação das rupturas observadas nos corpos de prova submetidos à compressão simples, de acordo com a ABNT NBR 5739:2007, foram recorrentes o tipo A (cônica, conforme FIGURA), e o tipo B (cônica bipartida, conforme Figura).

FIGURA 28 - RUPTURA DO TIPO CÔNICA



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 29 - RUPTURA DO TIPO CÔNICA BIPARTIDA



FONTE: o autor (2017).

5.1 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA

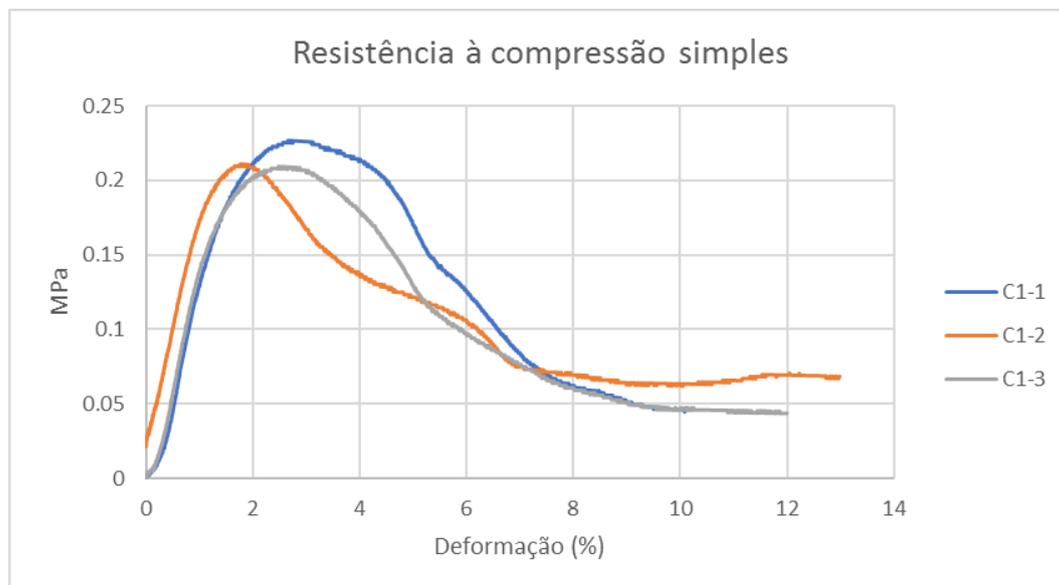
Para poder contabilizar a influência das fibras no comportamento à ruptura por compressão simples e diametral do solo, realizaram-se os ensaios de controle. Como previamente mencionado na TABELA 4, os corpos de prova de controle possuem a seguinte nomenclatura:

- C1 para corpos de prova constituídos apenas de solo, sem adição de fibras e/ou cimento;
- C2 para corpos de prova constituídos de solo e fibras, sem cimento.

5.1.1 Resistência à compressão

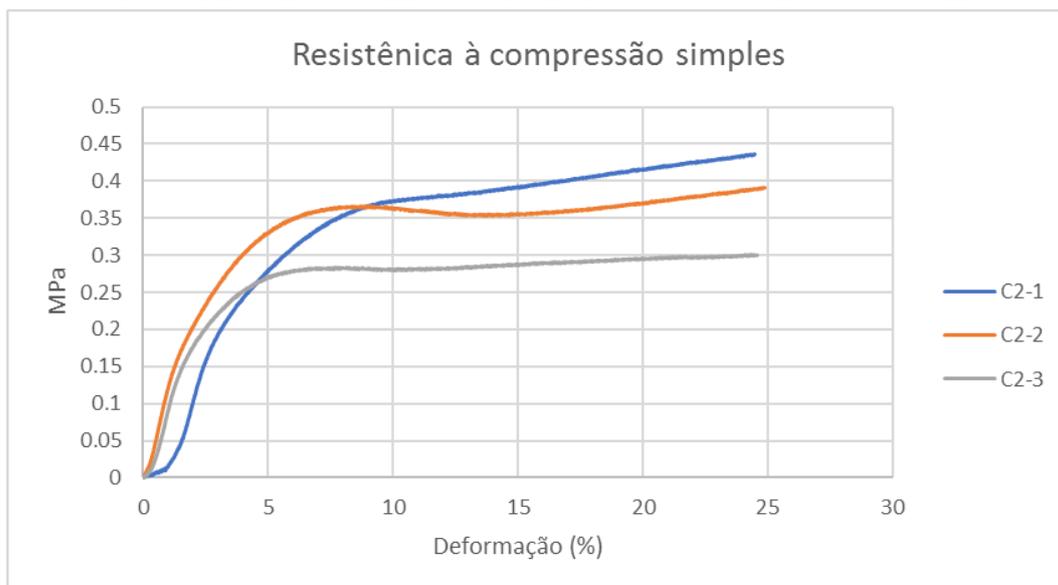
Os gráficos das FIGURAS 3030 30 e 3031 mostram o comportamento da curva de ruptura à compressão simples dos corpos de prova C1 e C2 (cada qual com 3 exemplares, resultando nos corpos C1-1, C1-2, C1-3, C2-1, C2-2 e C2-3).

FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SEM MELHORAMENTO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS APENAS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES



FONTE: o autor (2017).

Pode-se perceber que os corpos de prova de solo melhorado com fibras possuem uma resistência máxima maior que os corpos de prova constituídos apenas por solo.

Também é possível perceber que as curvas dos corpos de prova com fibras não possuem pico, mas apresentam um platô de resistência. Sendo assim, definiu-se que a ruptura dos corpos de prova melhorados com fibras aconteceu por deformação, e para isso definiu-se o valor de 15 mm (15%) como a deformação máxima.

Comparativamente, os corpos de prova sem fibra tiveram ruptura muito mais abrupta quando comparado com os corpos de prova sem fibras. Logo, os corpos de prova constituídos apenas por solo apresentam comportamento frágil.

Essas características corroboram com o que foi descrito por Crockford et al., (1993), o qual concluiu que os solos melhorados por fibras têm grande aplicabilidade em obras que sejam suscetíveis a grandes deformações, como no reforço de base cimentadas de pavimentos rodoviários. Essa recomendação foi feita justamente, porque - como se observa também no gráfico da FIGURA 31 -, solos melhorados com fibras tem um comportamento mais dúctil, com uma resistência residual (após a ruptura) superior à de solos não melhorados.

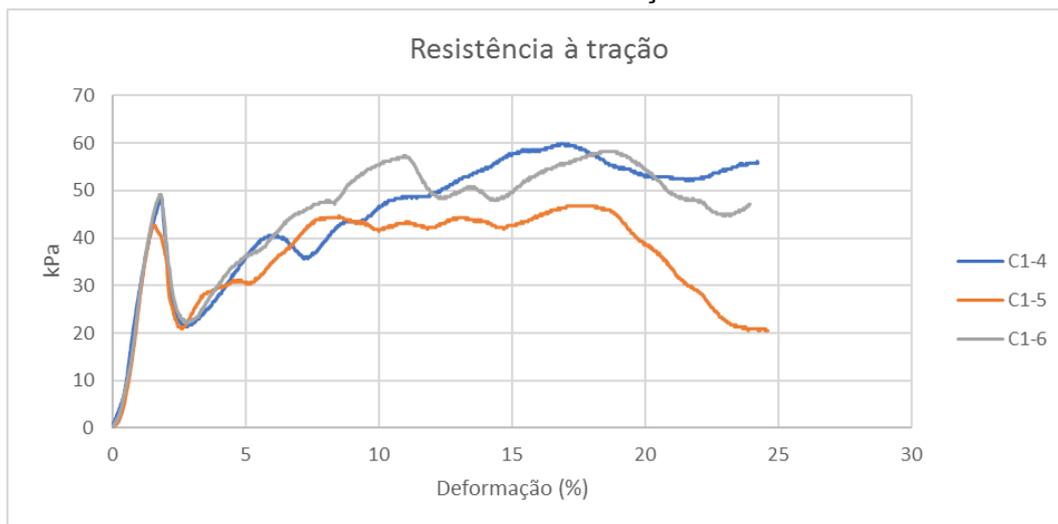
Em suma, a adição de fibras resultou em um aumento de 62% na resistência à compressão dos corpos de prova (ver ANEXO 9, para maiores informações).

5.1.2 Resistência à tração

Como explicado em 4.1.3, as resistências à tração foram estimadas a partir do ensaio de compressão diametral dos corpos de prova.

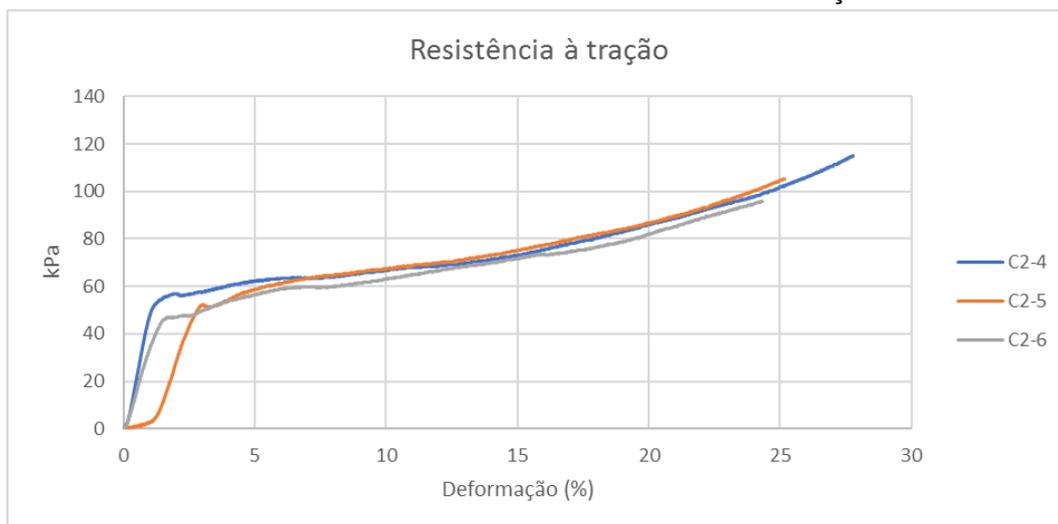
Assim como nos ensaios de compressão simples, os gráficos apresentados nas FIGURAS 32 e 33 mostram o comportamento da curva de ruptura à compressão simples dos corpos de prova C1 e C2 (cada qual com 3 exemplares, resultando nos corpos C1-4, C1-5, C1-6, C2-4, C2-5 e C2-6).

FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SEM MELHORAMENTO SUBMETIDOS À TRAÇÃO



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 33 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS APENAS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO SUBMETIDOS À TRAÇÃO



FONTE: o autor (2017).

Pode-se perceber que o comportamento à tração dos solos melhorados e não melhorados com fibras se assemelha aqueles à compressão simples. Ou seja, percebe-se que os corpos de prova de solo melhorado com fibras possuem uma resistência máxima maior que os corpos de prova constituídos apenas por solo.

Comparativamente, os corpos de prova sem fibra tiveram ruptura muito mais abrupta quando comparado com os corpos de prova sem fibras. Logo, os corpos de prova constituídos apenas por solo apresentam comportamento rígido. Sendo assim, essas características corroboram, novamente, com as conclusões de Crockford et al. (1993).

A diferença de comportamento mais significativa é que agora os corpos de prova com fibras apresentam um pequeno pico quando a deformação está em torno de 1% a 2,5%, aproximadamente, como apresentado na FIGURA 33. Esse pico antecede o aparecimento das primeiras fissuras nos corpos de prova, conforme FIGURA 34. Além desse pico, a face do corpo de prova que está sendo solicitado acaba se achatando (FIGURA 35– perceber, contudo, como é possível ver as fibras serem solicitadas à tração, como se “costurassem” o solo.), e os resultados já não são mais representativos. Dessa forma, considerou-se a como resistência máxima os picos iniciais apresentados em ambos os casos (sempre inferiores a 5% de deformação, como poderá ser

observado também nos corpos de prova melhorados com fibra e cimento, nos itens a seguir).

FIGURA 34 - INÍCIO DAS FISSURAS PROVENIENTES DOS ESFORÇOS À TRAÇÃO DURANTE O ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 35 - TRAÇÃO DAS FIBRAS VISÍVEL ATRAVÉS DA FISSURA CAUSADA PELA DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DO CORPO DE PROVA



FONTE: o autor (2017).

Em suma, a adição de fibras resultou em um aumento de 10% na resistência à tração dos corpos de prova (ver ANEXO 9, para maiores informações). Observa-se assim que a adição de fibras de polipropileno não acarretou em um ganho expressivo de resistência à tração. Isso pode ser justificado, porque o rompimento do solo em testes de compressão diametral ocorre em baixas deformações, as quais são insuficientes para mobilizar as fibras (CORREIA et al., 2015 apud OLIVEIRA, 2006).

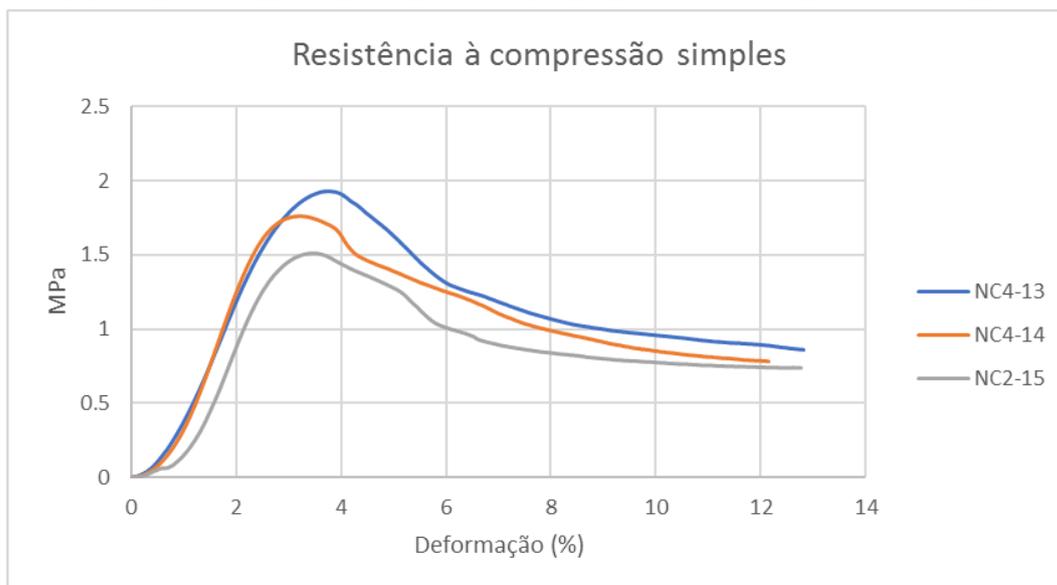
5.2 INFLUÊNCIA DO CIMENTO NOS CORPOS DE PROVA

A influência da adição de cimento CPV-ARI aos corpos de prova será abordada a seguir. Para essa análise, serão comparadas as características das curvas de ruptura dos solos sem melhoramento, dos solos melhorados com fibras, e dos solos melhorados com fibras e cimento.

5.2.1 Resistência à compressão

O gráfico da FIGURA 36 demonstra um comportamento típico dos corpos de prova melhorados com fibras e cimento submetidos à compressão simples. Esse exemplo refere-se à mistura NC-4 (28 dias de cura). Perceber como adição de cimento às misturas resulta num comportamento menos dúctil do material, assemelhando-se ao solo não melhorado. Por outro lado, a resistência residual não é tão inferior à resistência máxima registrada, como no solo não melhorado (vide FIGURA 30) – essa característica, contudo, é consequência das fibras, como explicado anteriormente.

FIGURA 36 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES



FONTE: o autor (2017).

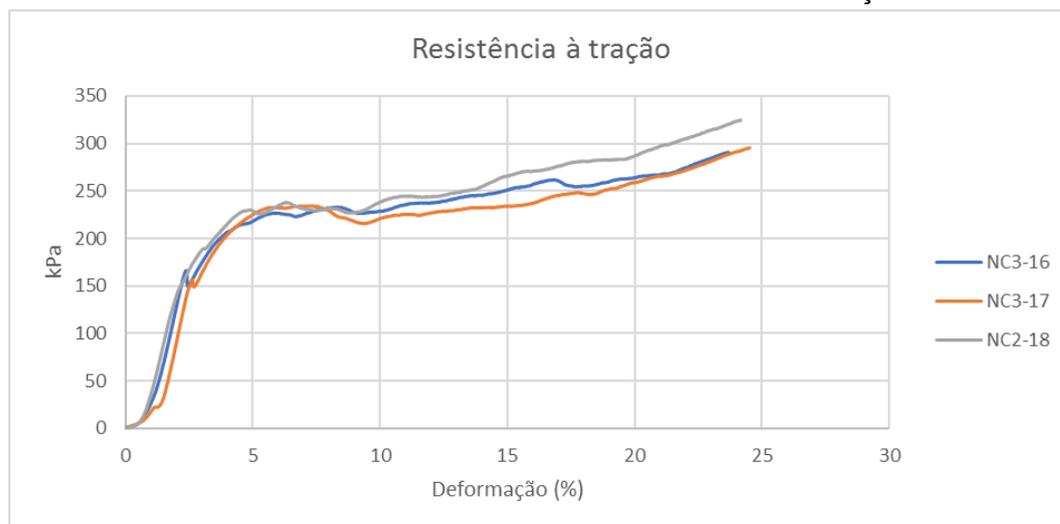
Dessa forma, podemos dizer que a adição de cimento CPV-ARI ao solo aumentou a sua resistência à compressão, e deixou o material mais frágil. Em suma, a adição de cimento e fibras resultou em um aumento de até 400% na resistência à compressão dos corpos de prova melhorados apenas com fibras (ver ANEXO 9, para maiores informações).

5.2.2 Resistência à tração

O gráfico da XX demonstra um comportamento típico dos corpos de prova melhorados com fibras e cimento submetidos à tração. Esse exemplo refere-se à mistura NC-3 (28 dias de cura). À primeira vista, ele sugere uma grande interferência do comportamento dos corpos de prova que contém cimento, em comparação àqueles sem: o gráfico é crescente durante todo o ensaio.

Contudo, observando a presença do primeiro pico, sabemos que os resultados além dele não são representativos, pois há grande deformação do corpo de prova - como dito anteriormente.

FIGURA 37 - COMPORTAMENTO DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO SUBMETIDOS À TRAÇÃO



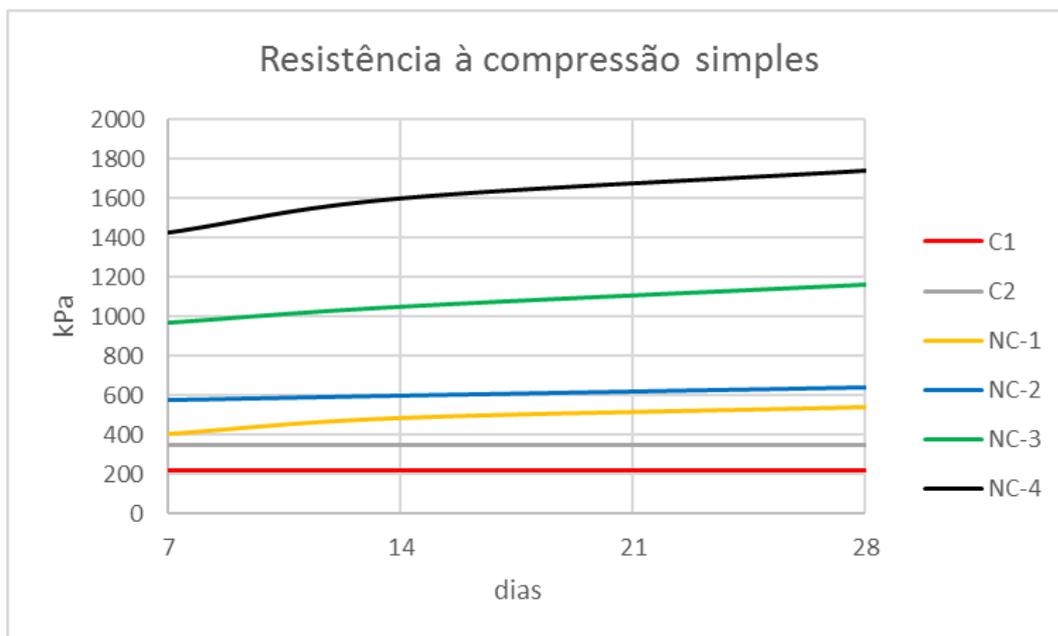
FONTE: o autor (2017).

Dessa forma, podemos dizer que a adição de cimento CPV-ARI ao solo aumentou a sua resistência à tração. Em suma, a adição de cimento e fibras resultou em um aumento de até 420% na resistência à tração dos corpos de prova melhorados apenas com fibras (ver ANEXO 9, para maiores informações).

5.2.3 Tempo de cura

No gráfico da FIGURA 38, tem-se o valor médio de resistência de cada mistura à compressão simples, em função do tempo de cura. É possível notar que há um aumento na resistência à compressão simples dos corpos de prova, com o passar do tempo.

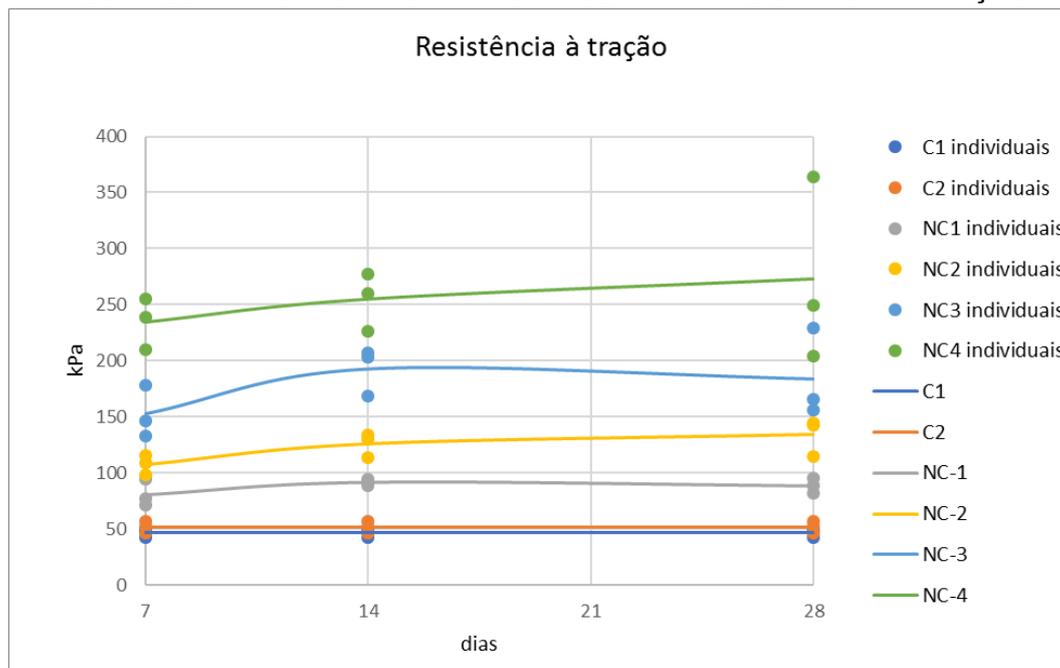
FIGURA 38 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES



FONTE: o autor (2017).

No caso da resistência à tração, à primeira vista há um aumento de resistência entre o 7º e o 14º dia, mas uma pequena queda entre o 14º e 28º dia, conforme FIGURA 39. Contudo, quando se adiciona ao mesmo gráfico a variação dos resultados individuais (e não apenas as médias), observa-se que é possível dizer que houve uma estabilização da resistência à tração em função do tempo de cura, nas últimas datas – dada a dispersão dos resultados. Mesmo assim, entre o 7º e o 28º dia cura, pode-se dizer que houve ganho de resistência à tração.

FIGURA 39 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO



5.3 AJUSTE DA EQUAÇÃO DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA

Nos próximos itens, serão abordadas as análises necessárias para se definir uma equação de dosagem para resistências à compressão simples e à tração.

5.3.1 Coeficientes sugeridos por Consoli et al.

Como foi mencionado em 2.1.2, Consoli et al. (2017) criou um método de dosagem para se obter valores desejados de resistência à tração e à compressão simples de um solo melhorado com fibras de polipropileno e cimento CPV-ARI, para tempo de cura de 7 dias. Para isso, criou a equação (4), que pode ser reescrita como:

$$\frac{q_u}{q_u[\text{para um } \Delta \text{ conhecido}]} \text{ ou } \frac{q_t}{q_t[\text{para um } \Delta \text{ conhecido}]} = \frac{\Delta^\alpha}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0.28}} \right]^\alpha} \quad (19)$$

Sendo:

q_u = resistência à compressão simples (kPa);

q_t = resistência à tração (kPa);

Δ = valor usado para determinar q_u , conforme equação (3) (sem dimensão);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão);

α = parâmetro influenciado pela mistura escolhida como parâmetro (Δ conhecido) (sem dimensão).

O expoente 0,28 depende do solo e do cimento utilizados (FESTUGATO et al., 2017). O coeficiente α depende do Δ conhecido: uma mistura é escolhida para calibrar a equação, de modo que esta se ajuste às resistências das demais misturas. Essa calibração é feita através do coeficiente α . Consoli et al. (2017) utilizou uma mistura $\Delta = 30$, e obteve um $\alpha = 2,45$.

O solo estudado por este trabalho possui mais de 10% de finos, como mencionado em 4.2. O cimento utilizado é semelhante aos utilizados por Consoli et al. (2017). Desta forma, o expoente 0,28 foi adotado para este trabalho.

Como foi explicado em 2.1.2, as fibras utilizadas por Consoli et al. (2017) possuíam as seguintes características:

- Resistência à tração = 120 Mpa;
- Módulo de elasticidade = 3 GPa;
- Comprimento = 6 mm a 24 mm;
- Espessura = 0,023 mm.

Enquanto as fibras deste trabalho possuem as seguintes características:

- Resistência à tração = 300 Mpa;
- Módulo de elasticidade = 3 GPa;
- Comprimento = 24 mm;
- Espessura = 0,018 mm.

Assim, percebe-se que não possuem muita variação quanto à geometria. Contudo, possuem resistências à tração significativamente diferentes. Inicialmente, acreditou-se que seria possível que a diferença na resistência entre as fibras não causasse grande influência nos resultados. Ou seja, que o $\alpha = 2,45$ pudesse ser aplicado também aos corpos deste estudo – ao se utilizar uma mistura com Δ próximo a 30.

Esta hipótese foi levantada pelo fato de que a resistência esperada à compressão e à tração dos corpos de prova é muito inferior à resistência das fibras (seja em relação às de 120 MPa ou em relação às de 300 Mpa de resistência à tração). Sendo assim, acreditava-se que os corpos de prova pudessem romper antes de solicitar as fibras suficientemente para que a diferença de resistência destas influenciasse os resultados. Esse cenário poderia acontecer caso os corpos de prova permitissem o “escorregamento” das fibras em seu interior, e que estas não chegassem a romper. Contudo, como pôde-se observar na FIGURA 35, as fibras estão, na verdade, bastante tracionadas no interior dos corpos de prova – logo, não conseguem “escorregar” entre os grãos do solo, como na hipótese citada.

A influência da resistência das fibras observada durante a ruptura dos corpos de prova foi comprovada quando tentou-se aplicar o coeficiente $\alpha = 2,45$ aos corpos de prova do presente estudo. Para isto, fez-se a seguinte análise:

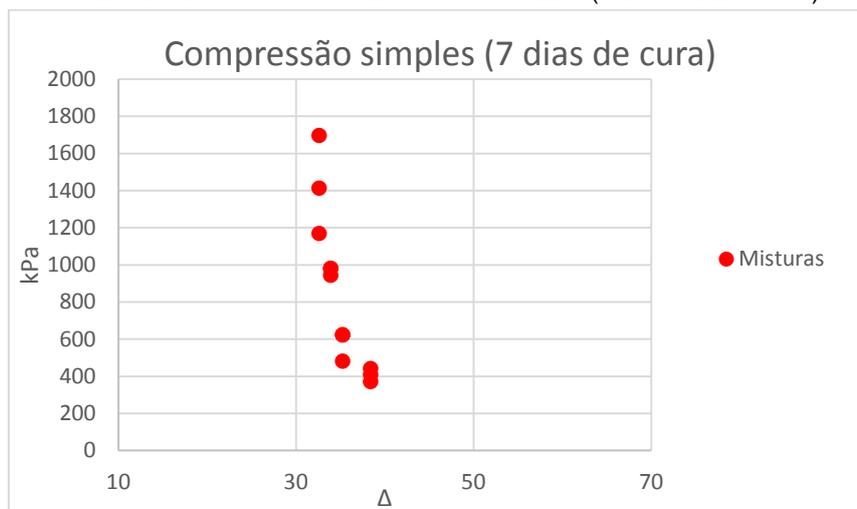
- Plotou-se todos os corpos de prova testados à compressão simples em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas representam a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas representam os Δ 's. A TABELA 5 e a FIGURA 40 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 7 dias de cura - o mesmo tempo de cura utilizado por Consoli et al. (2017);

TABELA 5 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (7 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	γ_d	γ_{ss}	γ_{sc}	γ_{sf}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-1										408.765	
NC1-2	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	440.864	406.813
NC1-3										370.810	
NC2-1										480.912	
NC2-2	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	622.002	575.834
NC2-3										624.589	
NC3-1										944.258	
NC3-2	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	979.960	968.699
NC3-3										981.881	
NC4-1										1697.023	
NC4-2	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	1412.778	1426.352
NC4-3										1169.256	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 40 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

- Em seguida, escolheu-se a mistura cujo Δ mais se aproxima ao Δ utilizado por Consoli et al. (2017) para se calibrar a fórmula que deverá prever a resistência das demais misturas. Sendo assim, escolheu-se a mistura NC-4, pois esta possui Δ igual a 32,61 (~30).
- O valor de Δ da mistura NC-4, assim como sua resistência média, foram substituídos na equação (19), dando origem à fórmula:

$$\frac{q_u}{1426,352} = \frac{32,61^{2,45}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{2,45}} \quad (20)$$

Sendo:

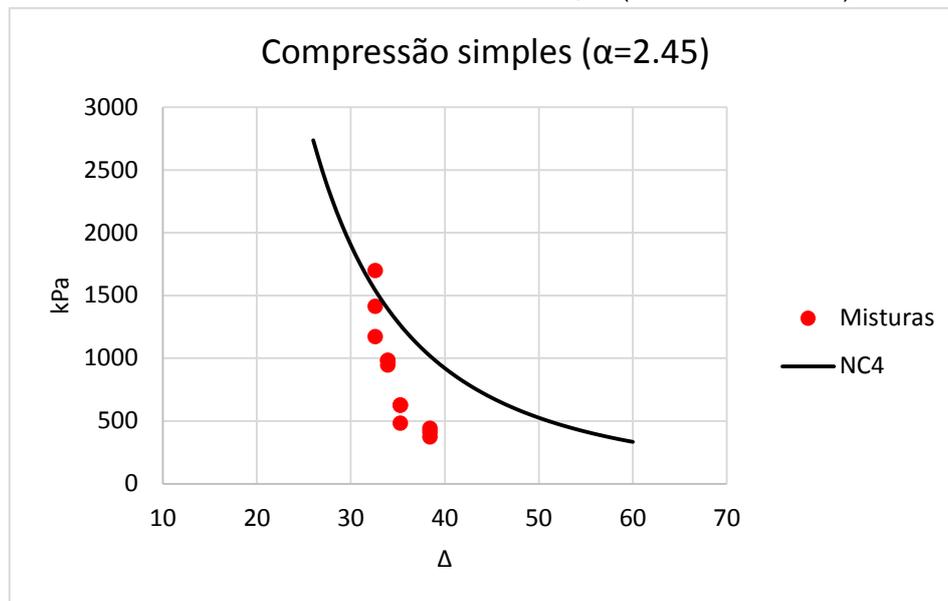
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

- Em seguida, plotou-se a equação (20) no gráfico da FIGURA 40, de acordo com a FIGURA 41.

FIGURA 41- PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO $\Delta \sim 30$ E $A=2,45$ (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Como se pode observar na FIGURA 41, a equação de previsão da resistência - equação (20) - não se ajustou bem aos demais corpos de prova testados. Assim, entendeu-se que, de fato, a fibra utilizada influencia no coeficiente α . Logo, o coeficiente $\alpha = 2,45$ não poderia ser utilizado para este estudo.

Matematicamente, este mau ajuste da curva pode ser demonstrado a partir do valor Coeficiente de determinação (R^2). Considerações sobre esse coeficiente serão feitas no item a seguir.

5.3.2 Coeficiente de determinação

O coeficiente é calculado através da equação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (21)$$

Sendo:

y = valor observado;

\hat{y} = valor estimado;

\bar{y} = média dos valores observados;.

O coeficiente de determinação é muito utilizado para se verificar o quão bem um modelo matemático é se ajusta aos dados.

No caso da análise de regressão linear, representa o quanto da variação total das ordenadas é explicado pelas abcissas, de acordo com o modelo matemático ajustado aos dados (ESTEVES, 2008). Segundo Esteves (2008):

“Tradicionalmente, R^2 aplica-se apenas a relações lineares (Motulsky & Ransnas, 1987). Embora seja possível calcular R^2 após o ajuste dum modelo não-linear (cf. Cameron & Windmeijer, 1997) alguns autores (Douglas Bates, University of Wisconsin (E.U.A.), e Bill Venables, The University of Adelaide (Austrália), comunicação pessoal) advertem para as dificuldades com o cumprimento de alguns pressupostos subjacentes àquele coeficiente. Sendo assim, o resultado de R^2 deve ser usado com cuidado. ”

Valores aceitáveis para R^2 são difíceis de serem definidos, pois dependem da área de estudo dos dados que estão sendo analisados. Contudo, Chin (1998) recomenda – para casos gerais - os seguintes parâmetros:

- $R^2 \geq 0,67$: ajuste forte;
- $0,33 \leq R^2 < 0,67$: ajuste mediano;
- $R^2 < 0,33$: ajuste fraco.

Dessa forma, as análises a seguir levarão em consideração esses valores para o julgamento da qualidade do ajuste.

5.3.3 Novos coeficientes α

Uma vez que $\alpha = 2,45$ se mostrou incapaz de gerar uma fórmula de previsão da resistência contundente, novos valores para este coeficiente foram testados. Para isso, utilizou-se a operação Solver® do Microsoft Excel®. Para

cada uma das misturas (NC1-, NC-2, NC-3 E NC-4), estipulou-se como objetivo o maior valor que R^2 poderia ter, variando-se o valor de α .

Essa análise foi feita para todos os tempos de cura: 7, 14 e 28 dias. Assim, foi possível observar a influência do tempo de cura no coeficiente α . Como levantado por Consoli et al. (2017), há a dúvida se, independentemente da idade dos corpos de prova, o valor de α das equações de previsão de resistência se mantêm inalterado.

5.3.3.1 Tempo de cura de 7dias

Abaixo, representa-se cada uma das equações resultantes:

- NC-1

Utilizando-se a mistura NC-1 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 7,299$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{406,813} = \frac{38,44^{7,299}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{7,299}} \quad (22)$$

Sendo:

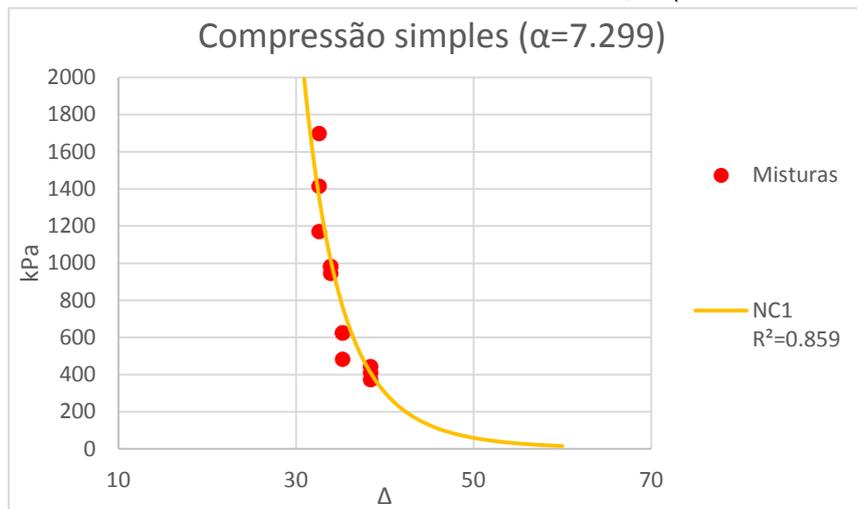
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão).

Plotando-se a equação (22) no gráfico da FIGURA 40, tem-se a FIGURA 42.

FIGURA 42 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,859.

- NC-2

Utilizando-se a mistura NC-2 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 11,506$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{575,834} = \frac{35,27^{11,506}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{11,506}} \quad (23)$$

Sendo:

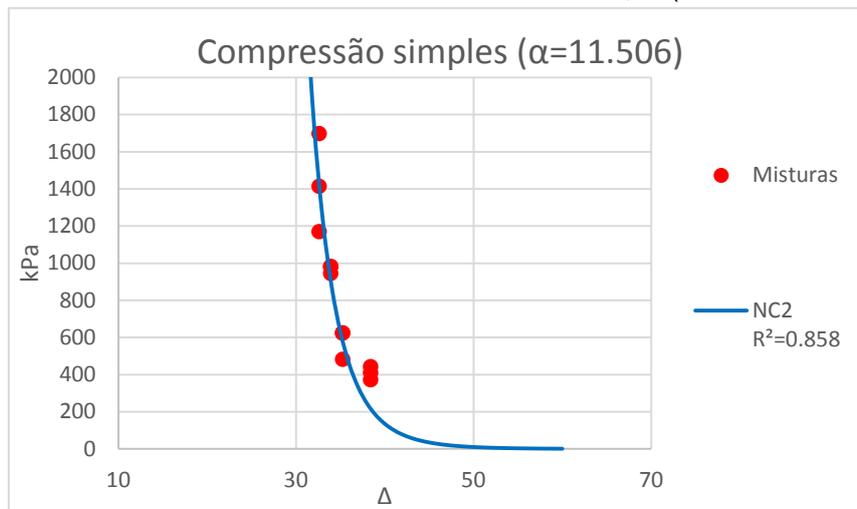
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (23) no gráfico da FIGURA 40, tem-se a FIGURA 43.

FIGURA 43 - REVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,859.

- NC-3

Utilizando-se a mistura NC-3 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,304$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{968,699} = \frac{33,94^{9,304}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,304}} \quad (24)$$

Sendo:

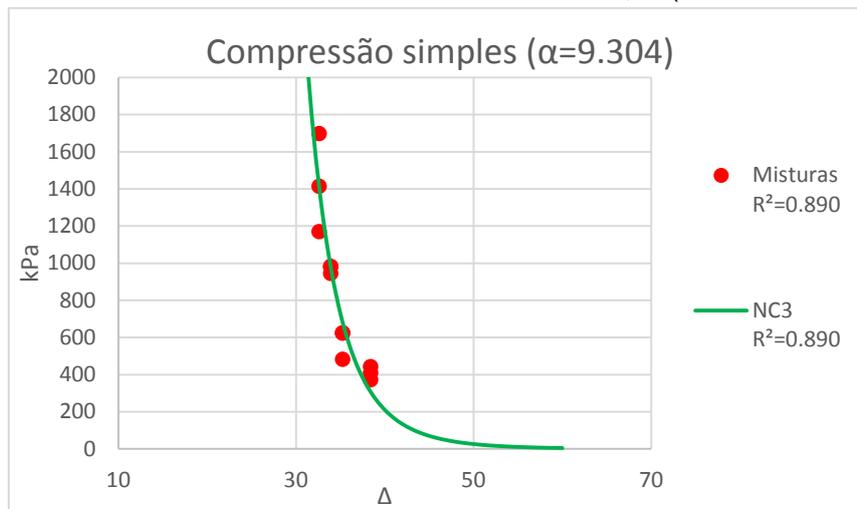
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão).

Plotando-se a equação (24) no gráfico da FIGURA 40, tem-se a FIGURA 44.

FIGURA 44 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,890.

- NC-4

Utilizando-se a mistura NC-4 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,569$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{1426,352} = \frac{32,61^{9,569}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,569}} \quad (25)$$

Sendo:

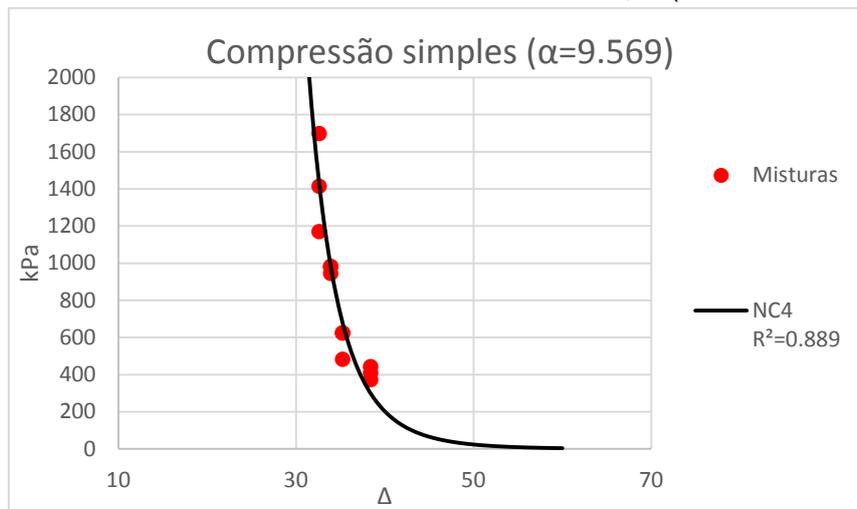
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (25) no gráfico da FIGURA 40, tem-se a FIGURA 45.

FIGURA 45 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (7 DIAS DE CURA)



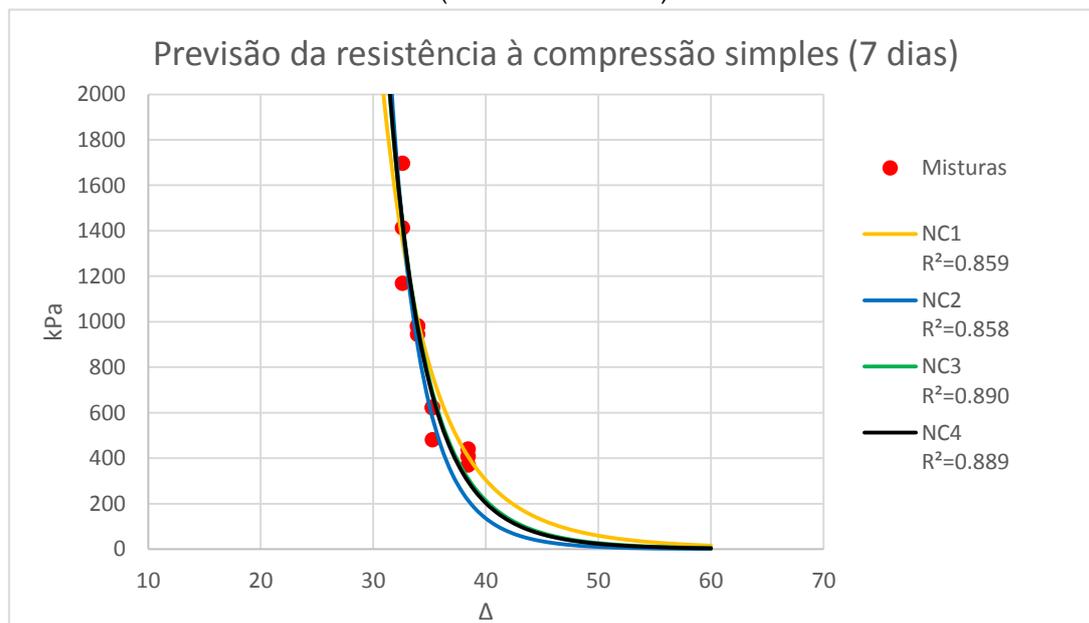
FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,889.

5.3.3.2 Comentários sobre Tempo de cura de 7 dias

Em resumo, é possível plotar as equações (22), (23), (24) e (25) em um único gráfico. De acordo com o gráfico da FIGURA 46, é possível perceber que dependendo da mistura utilizada (Δ escolhido) para se ajustar à equação (19) - a fim de se prever a resistência das demais misturas -, diferentes coeficientes de determinação são obtidos.

FIGURA 46 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (7 DIAS DE CURA).



FONTE: o autor (2017).

Neste contexto, pode-se notar que as misturas com menores Δ (misturas com maiores % de cimento) geraram equações melhor ajustadas, conforme o gráfico da FIGURA 46. Apesar disto, todas as misturas resultaram em equações com coeficientes de determinação altos.

5.3.3.3 Tempo de cura de 14 dias

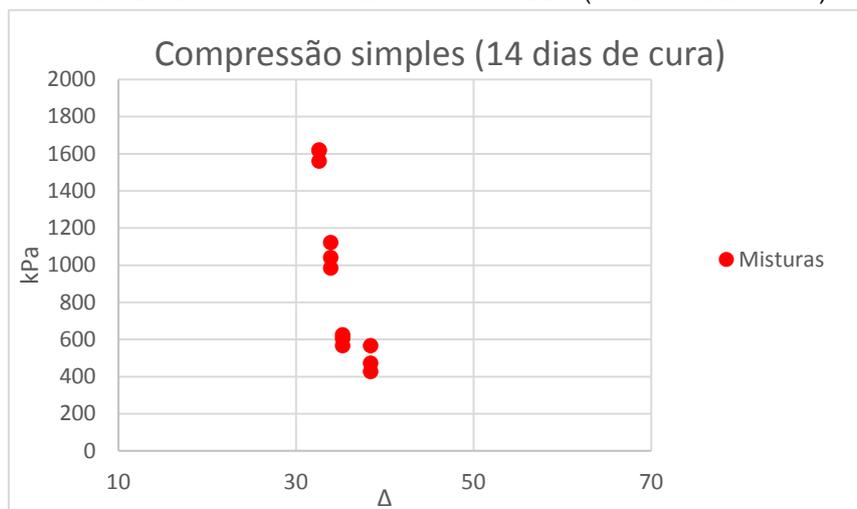
Assim como feito para os corpos de prova com 7 dias de cura, plotou-se todos os corpos de prova testados à compressão simples, com 14 dias de cura, em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas são a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas são o Δ . A TABELA 6 e a FIGURA 47 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 14 dias de cura.

TABELA 6 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (14 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	Y_d	Y_{S_s}	Y_{S_c}	Y_{S_f}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-7										565.369	
NC1-8	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	470.492	487.224
NC1-9										425.811	
NC2-7										565.009	
NC2-8	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	602.772	597.366
NC2-9										624.317	
NC3-7										983.555	
NC3-8	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	1039.041	1048.013
NC3-9										1121.445	
NC4-7										1619.407	
NC4-8	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	1558.076	1597.516
NC4-9										1615.065	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 47 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (14 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

A seguir, representa-se cada uma das equações resultantes:

- NC-1

Utilizando-se a mistura NC-1 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 6,723$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{487,224} = \frac{38,44^{6,723}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{6,723}} \quad (26)$$

Sendo:

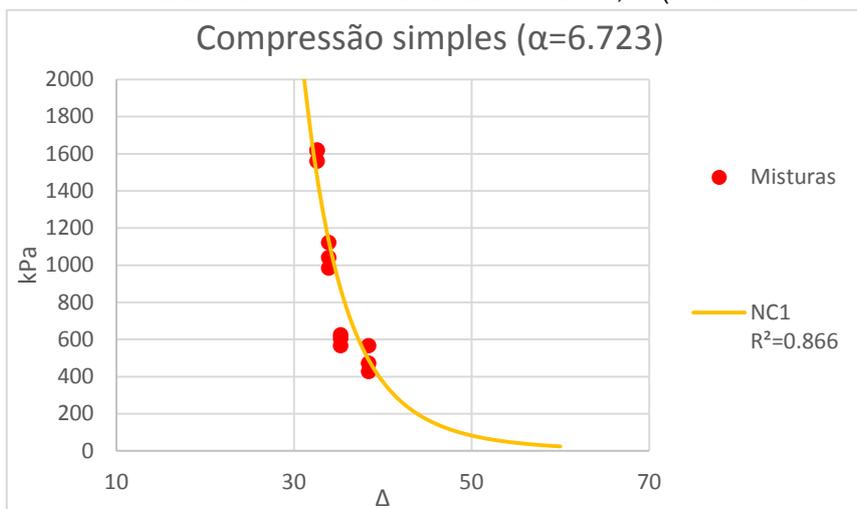
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (26) no gráfico da FIGURA 47, tem-se a FIGURA 48.

FIGURA 48 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (14 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,866.

- NC-2

Utilizando-se a mistura NC-2 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 12,449$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{597,366} = \frac{35,27^{12,449}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{12,449}} \quad (27)$$

Sendo:

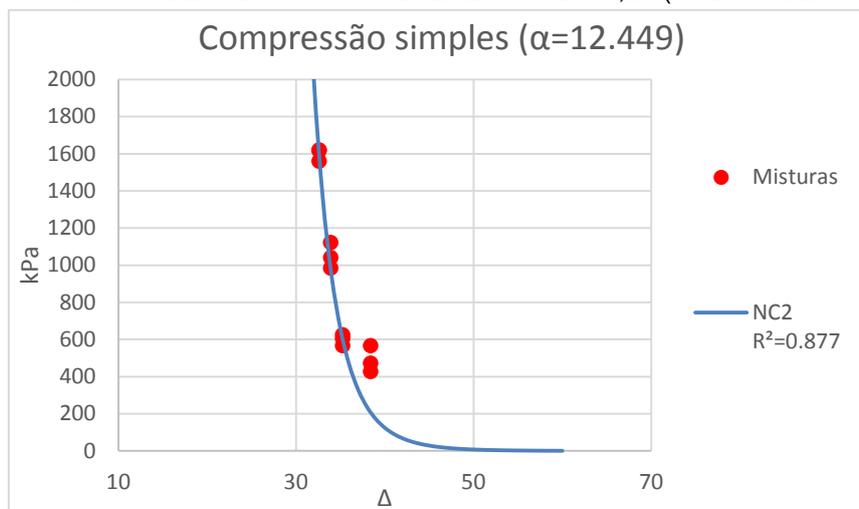
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (27) no gráfico da FIGURA 47, tem-se a FIGURA 49.

FIGURA 49 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (14 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,877.

- NC-3

Utilizando-se a mistura NC-3 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,700$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{1048,013} = \frac{33,94^{9,700}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,700}} \quad (28)$$

Sendo:

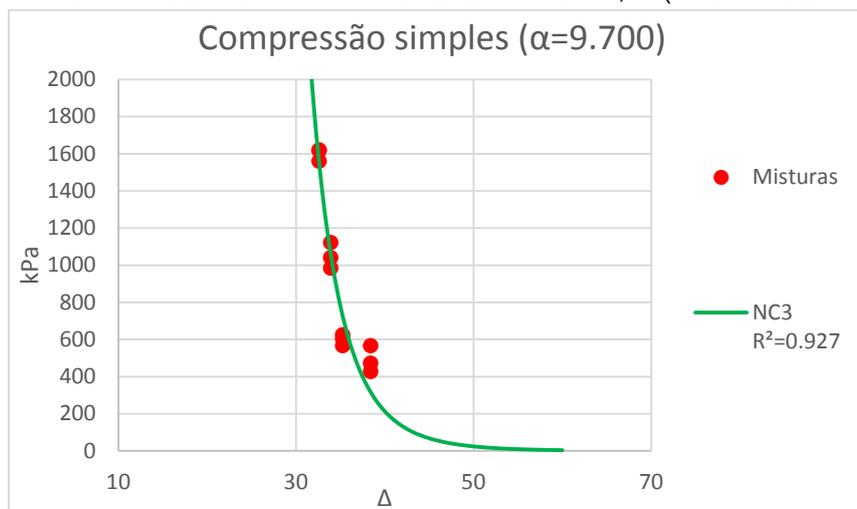
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (28) no gráfico da FIGURA 47, tem-se a figura FIGURA 50.

FIGURA 50 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (14 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,927.

- NC-4

Utilizando-se a mistura NC-4 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,935$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{1597,516} = \frac{32,61^{9,935}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,935}} \quad (29)$$

Sendo:

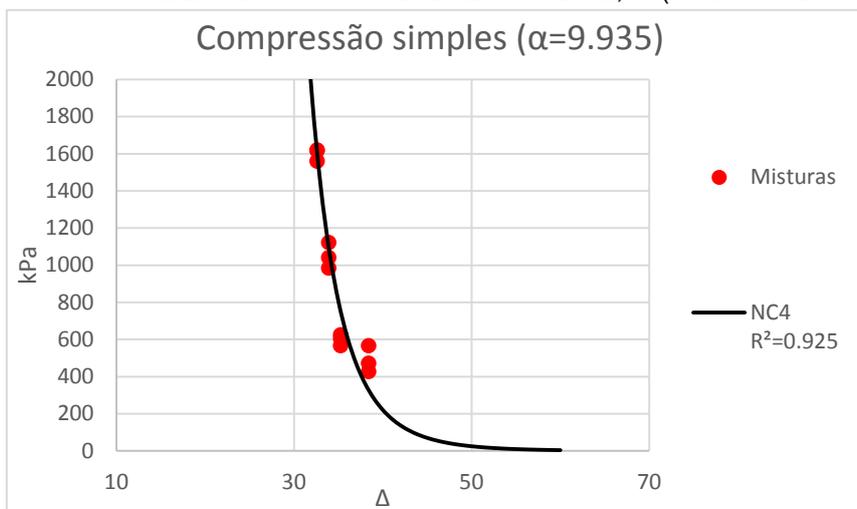
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (29) no gráfico da FIGURA 47, tem-se a FIGURA 51.

FIGURA 51 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (14 DIAS DE CURA)



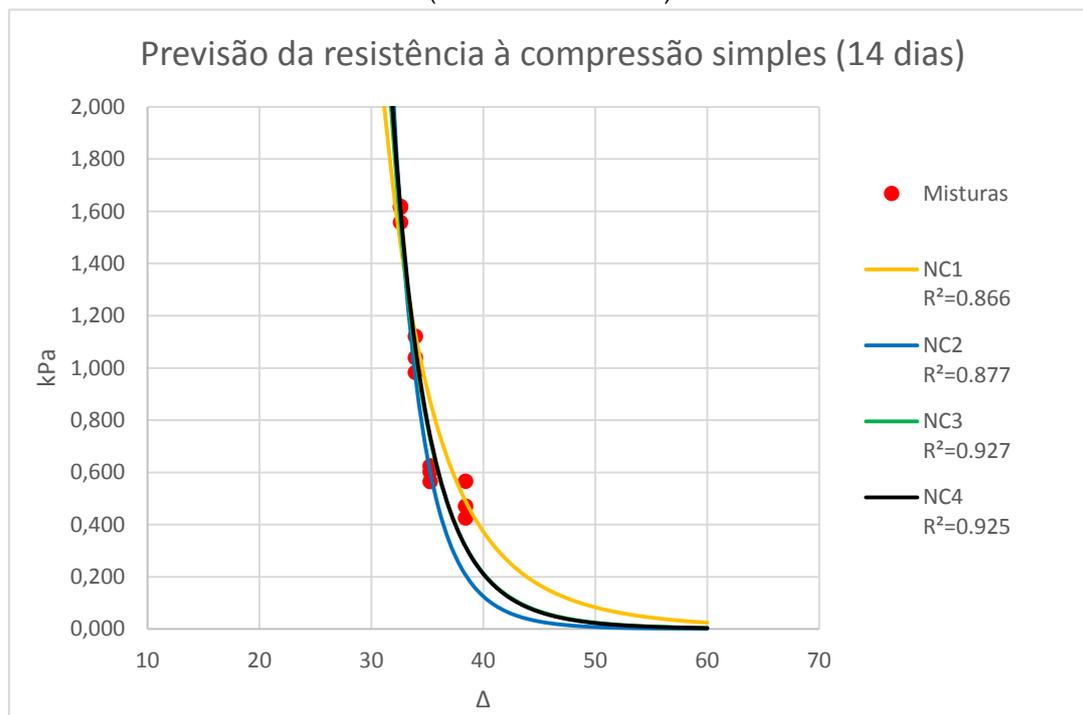
FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,925.

5.3.3.4 Comentários sobre Tempo de cura de 14 dias

Em resumo, é possível plotar as equações (26), (27), (28) e (29) em um único gráfico. De acordo com o gráfico da FIGURA 52, é possível perceber que dependendo da mistura utilizada (Δ escolhido) para se ajustar à equação (19) - a fim de se prever a resistência das demais misturas -, diferentes coeficientes de determinação são obtidos. Essa característica é semelhante ao ocorrido para os corpos de prova de 7 de cura.

FIGURA 52 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (14 DIAS DE CURA).



FONTE: o autor (2017).

Neste contexto, pode-se notar que as misturas com menores Δ (misturas com maiores % de cimento) geraram equações melhor ajustadas, conforme o gráfico da FIGURA 52. Apesar disto, todas as misturas resultaram em equações com coeficientes de determinação altos. Essa característica também é semelhante ao ocorrido para os corpos de prova de 7 de cura.

5.3.3.5 Tempo de cura de 28 dias

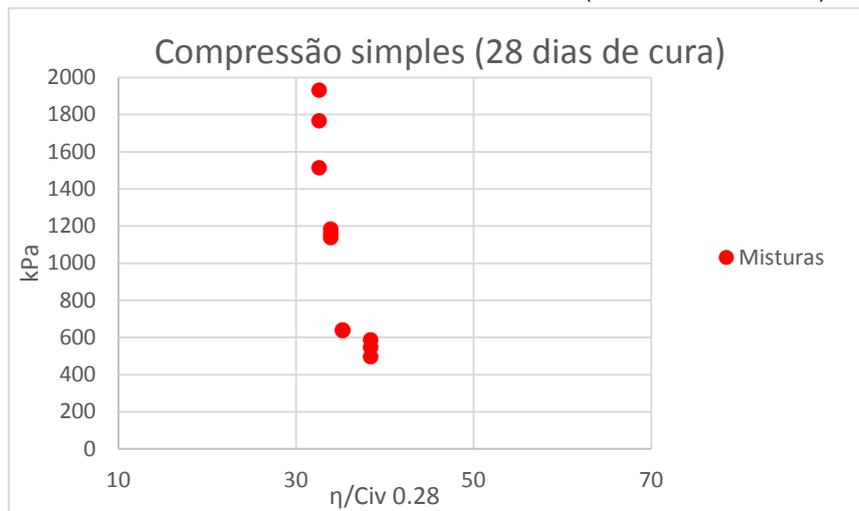
Assim como feito para os corpos de prova com 7 e 14 dias de cura, plotou-se todos os corpos de prova testados à compressão simples, com 28 dias de cura, em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas são a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas são o Δ . A TABELA 7 e a FIGURA 53 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 28 dias de cura.

TABELA 7 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES (28 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	Y_d	Y_{S_s}	Y_{S_c}	Y_{S_f}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-13										494.715	
NC1-14	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	545.882	542.145
NC1-15										585.838	
NC2-13										639.632	
NC2-14	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	636.431	637.850
NC2-15										637.489	
NC3-13										1136.197	
NC3-14	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	1183.211	1157.919
NC3-15										1154.348	
NC4-13										1929.338	
NC4-14	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	1765.460	1735.802
NC4-15										1512.608	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 53 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO SIMPLES (28 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Abaixo, representa-se cada uma das equações resultantes:

- NC-1

Utilizando-se a mistura NC-1 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 6,575$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{542,145} = \frac{38,44^{6,575}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{6,575}} \quad (30)$$

Sendo:

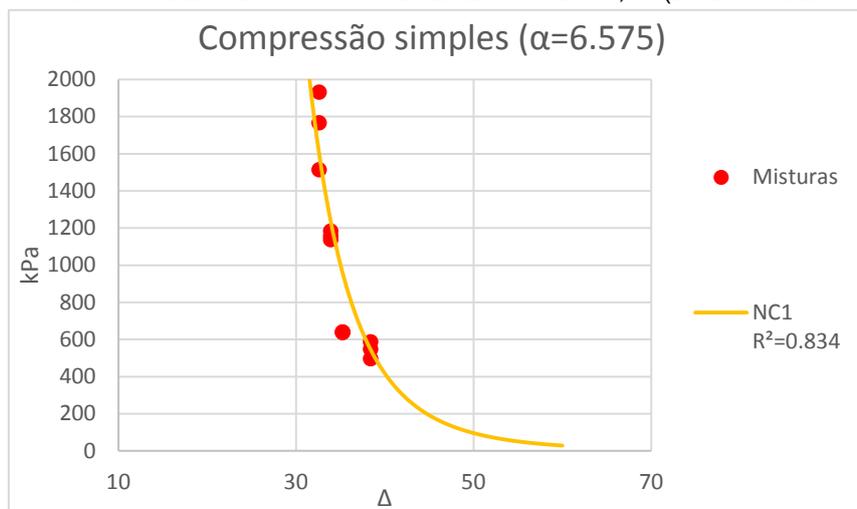
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (30) no gráfico da FIGURA 53, tem-se a FIGURA 54.

FIGURA 54 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (28 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,834.

- NC-2

Utilizando-se a mistura NC-2 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 12,720$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{637,851} = \frac{35,27^{12,720}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{12,720}} \quad (31)$$

Sendo:

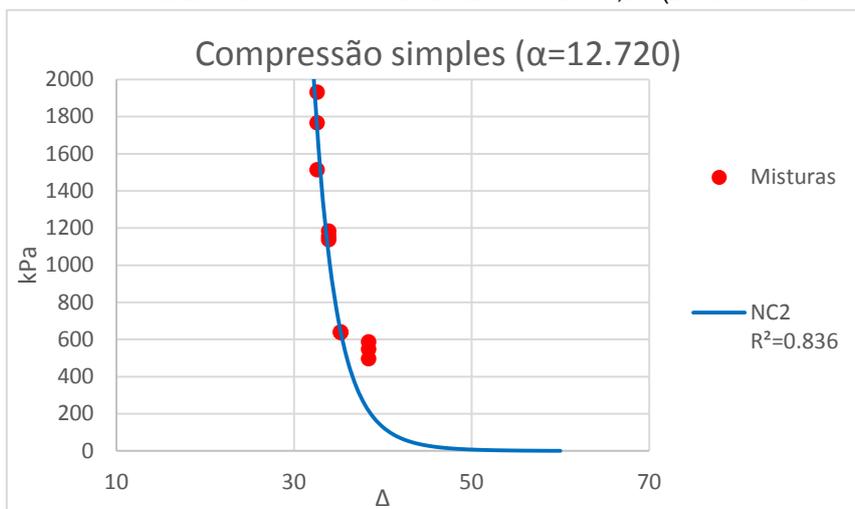
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (31) no gráfico da figura FIGURA 53, tem-se a FIGURA 55.

FIGURA 55 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=35,27$ (28 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,898.

- NC-3

Utilizando-se a mistura NC-3 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,473$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{1157,919} = \frac{33,94^{9,473}}{\left[\frac{H}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,473}} \quad (32)$$

Sendo:

Sendo:

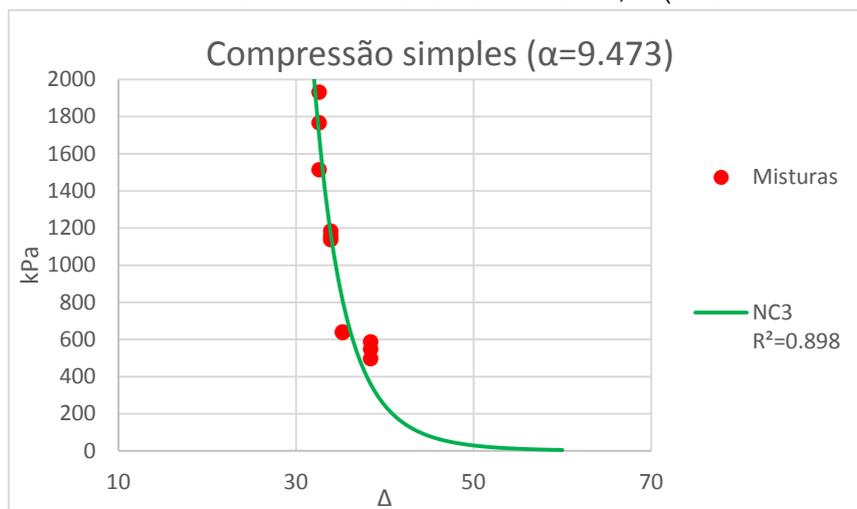
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (32) no gráfico da FIGURA 53, tem-se a FIGURA 56.

FIGURA 56 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=33,94$ (28 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,898.

- NC-4

Utilizando-se a mistura NC-4 para definir o coeficiente α , obtém-se:

$$\alpha = 9,826$$

Ou seja, utilizando-se esta mistura para ajustar a equação (19), tem-se:

$$\frac{q_u}{1735,802} = \frac{32,61^{9,826}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,826}} \quad (33)$$

Sendo:

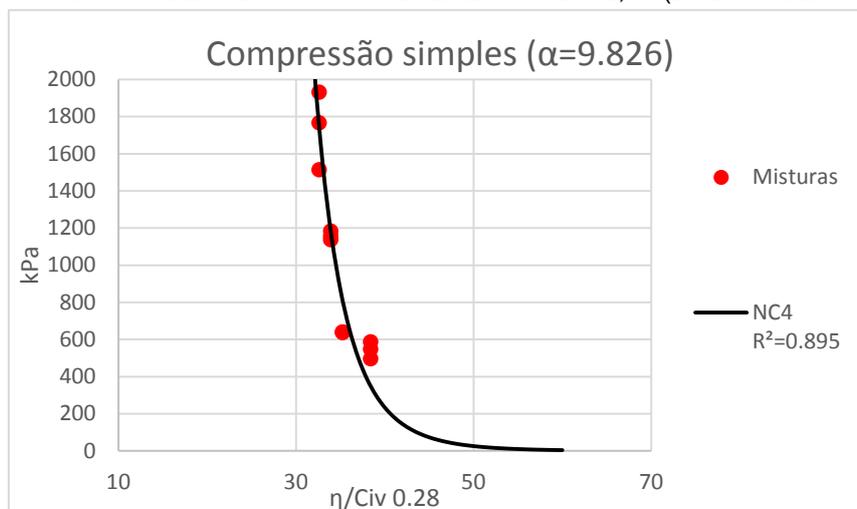
q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Plotando-se a equação (33) no gráfico da FIGURA 53, tem-se a FIGURA 57.

FIGURA 57 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=32,61$ (28 DIAS DE CURA)



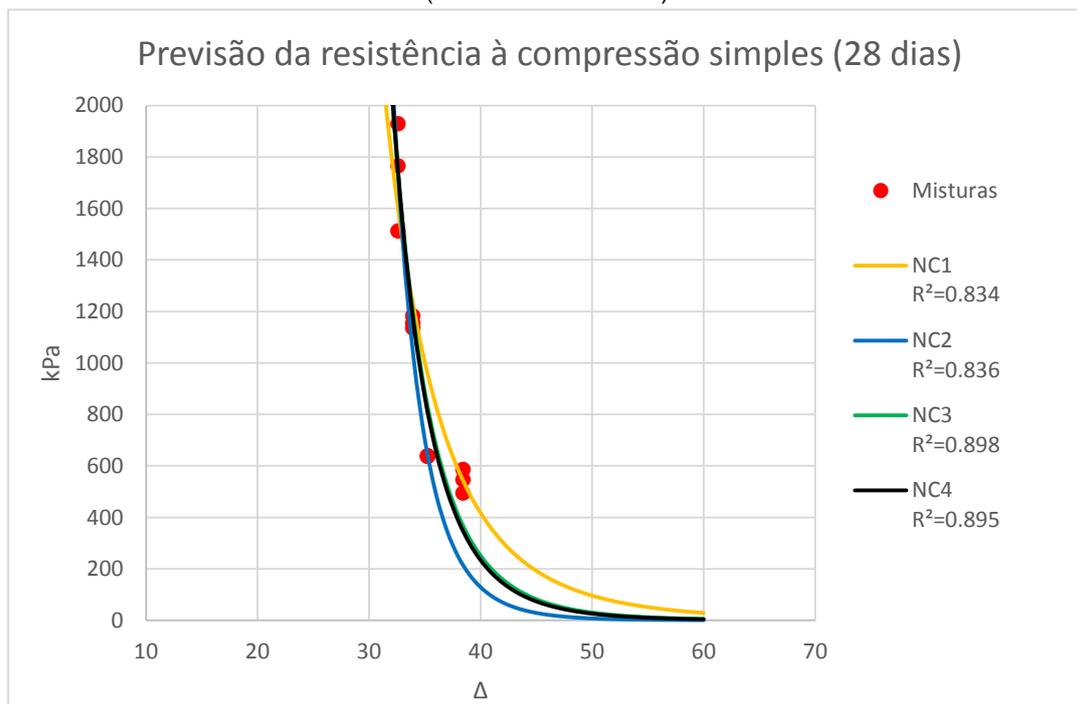
FONTE: o autor (2017).

Observar que o Coeficiente de determinação resultante é de 0,895.

5.3.3.6 Comentários sobre Tempo de cura de 28 dias

Em resumo, é possível plotar as equações (30), (31), (32) e (33) em um único gráfico. De acordo com o gráfico da FIGURA 58, é possível perceber que dependendo da mistura utilizada (Δ escolhido) para se ajustar à equação (19) - a fim de se prever a resistência das demais misturas -, diferentes coeficientes de determinação são obtidos. Essa característica é semelhante ao ocorrido para os corpos de prova de 7 e 14 dias de cura.

FIGURA 58 - RESUMO DAS CURVAS DE PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES UTILIZANDO COM REFERÊNCIA CASA UMA DAS MISTURAS (28 DIAS DE CURA).



FONTE: o autor (2017).

Neste contexto, pode-se notar que as misturas com menores Δ (misturas com maiores % de cimento) geraram equações melhor ajustadas, conforme o gráfico da FIGURA 58. Apesar disto, todas as misturas resultaram em equações com coeficientes de determinação altos. Essa característica também é semelhante ao ocorrido para os corpos de prova de 7 e 14 dias de cura.

5.3.3.7 Considerações sobre o tempo de cura

O quadro-resumo a seguir mostra a variação do α em função do tempo de cura de cada mistura:

TABELA 8 - VARIAÇÃO DE α DECORRENTE DO TEMPO DE CURA

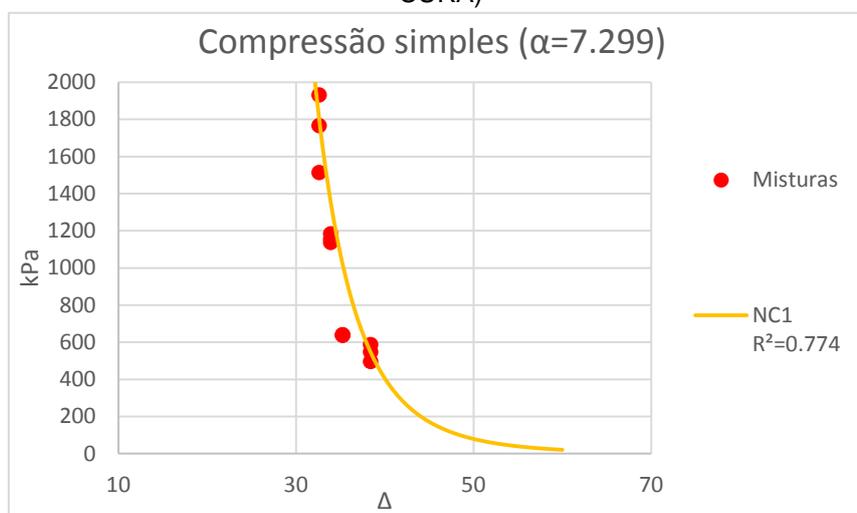
		Misturas			
		NC-1	NC-2	NC-3	NC-4
Tempo de cura (dias)	7	7.299	11.506	9.304	9.569
	14	6.723	12.449	9.700	9.935
	28	6.575	12.720	9.473	9.826
Variação máxima (%)		9.919	9.544	4.082	3.684

FONTE: o autor (2017).

É possível notar que o tempo de cura altera o valor de α em todas as misturas. Para saber se essa variação é grande o suficiente para impossibilitar a utilização de um único α para tempos de cura diferentes, realizou-se o seguinte método:

- Escolheu-se a mistura na qual a diferença do tempo de cura resultou no maior efeito em α : mistura NC-1 (entre 7 e 28 dias de cura). Ou seja, o pior caso.
- Com a mistura NC-1, plotou-se a equação (22) ($\alpha=7.299$, referente ao tempo de cura de 7 dias desta mistura), no gráfico da FIGURA 53 (com os valores da resistência dos corpos de prova referentes a 28 dias de cura):

FIGURA 59 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS (28 DIAS DE CURA) UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA $\Delta=38,44$ (7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Como se pode observar, o Coeficiente de determinação resultante é de 0,774. Embora ainda alto, este valor é significativamente inferior aos coeficientes de determinação observados anteriormente. Desta forma, pode-se afirmar que utilizar um α obtido com um tempo de cura para se prever a resistência de outros tempos de cura pode não ser a melhor alternativa.

5.3.4 Correlação entre resistência à compressão simples e tração

Todos os coeficientes listados até o momento são provenientes da análise dos dados resistência à compressão simples dos corpos de prova. Consoli et al. (2017) mostrou existir uma proporcionalidade entre a resistência à compressão simples e à tração de solos melhorados com cimento e fibras. Essa proporcionalidade possibilita utilizar o coeficiente α – ajustado utilizando os dados de compressão simples das misturas – também para as fórmulas de previsão de resistência a tração, sem alteração.

Essa afirmação foi verificada para este estudo. Para isto, cada uma das misturas, para cada tempo de cura foi analisado.

5.3.4.1 Tempo de cura de 7 dias

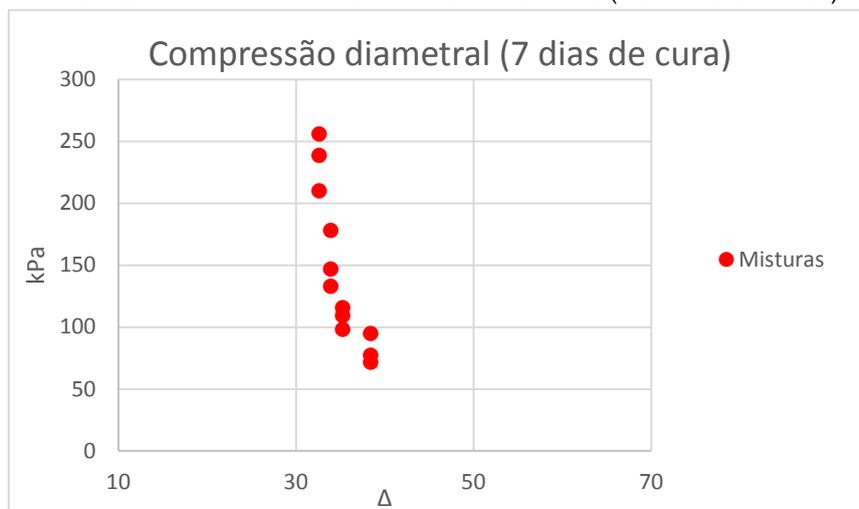
Assim como feito para os corpos de prova com 7 dias de cura testados à compressão simples, plotou-se todos os corpos de prova testados à tração, com 7 dias de cura, em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas são a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas são o Δ . A TABELA 9 e a FIGURA 60 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 7 dias de cura.

TABELA 9 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (7 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	γ_d	γ_{Ss}	γ_{Sc}	γ_{Sf}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-4										77.031	
NC1-5	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	71.294	80.991
NC1-6										94.649	
NC2-4										108.991	
NC2-5	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	115.546	107.488
NC2-6										97.927	
NC3-4										177.821	
NC3-5	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	146.690	152.424
NC3-6										132.761	
NC4-4										255.679	
NC4-5	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	238.465	234.645
NC4-6										209.792	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 60 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (7 DIAS DE CURA)

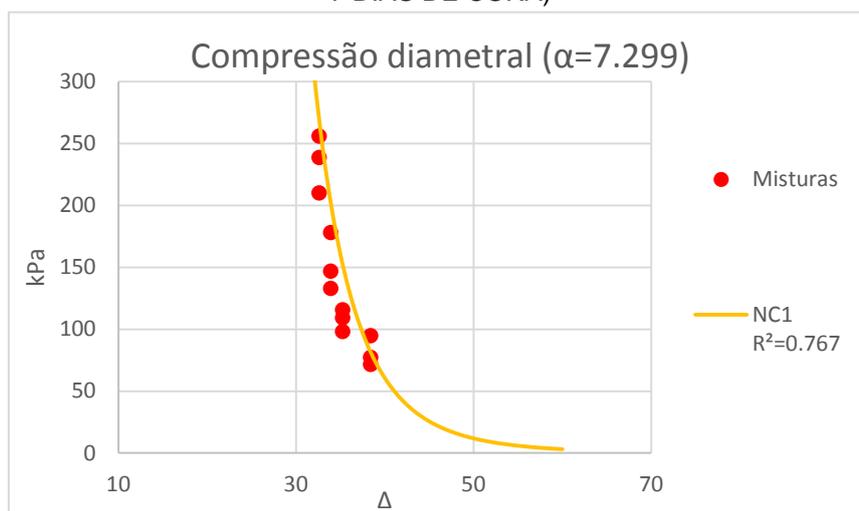


FONTE: o autor (2017).

- NC-1

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-1, equação (22), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 60, tem-se a FIGURA 61.

FIGURA 61 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 7 DIAS DE CURA)



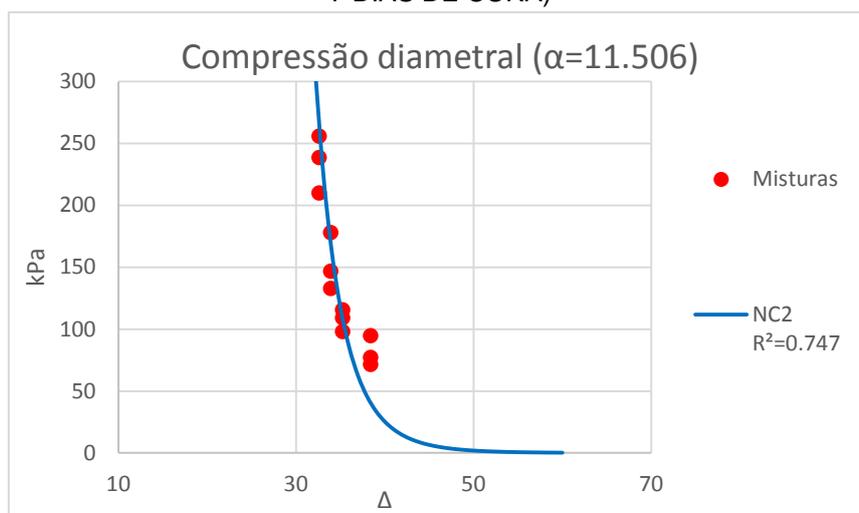
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (22) e os resultados à tração.

- NC-2

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-2, equação (23), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 60, tem-se a FIGURA 62.

FIGURA 62 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 7 DIAS DE CURA)

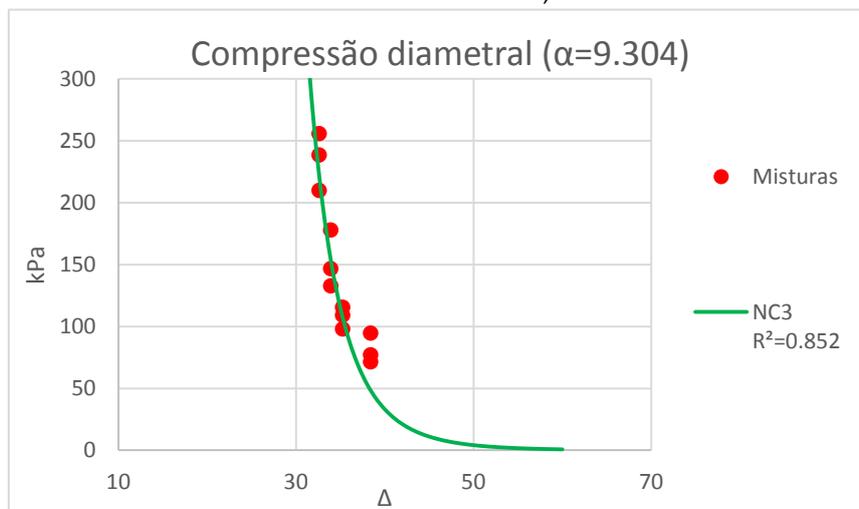


Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (23) e os resultados à tração.

- NC-3

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-3, equação (24), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 60, tem-se a FIGURA 63.

FIGURA 63 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 7 DIAS DE CURA)



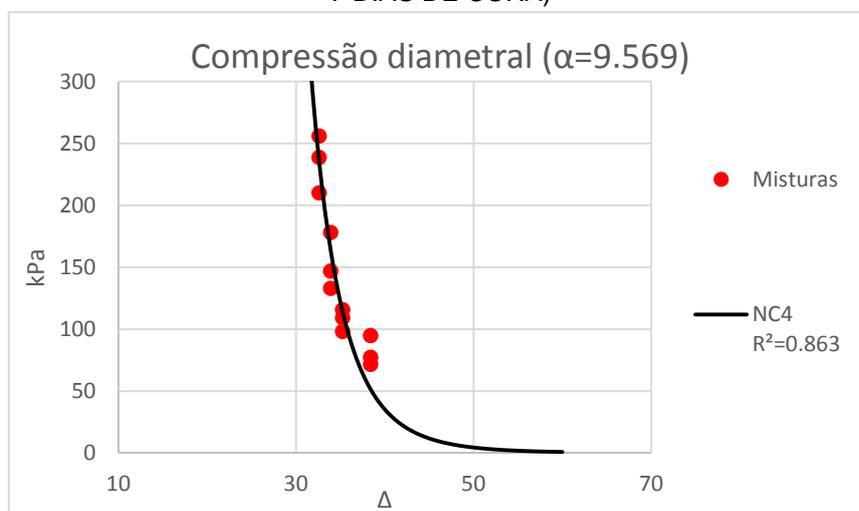
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (24) e os resultados à tração.

- NC-4

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-4, equação (25), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 60, tem-se a FIGURA 64

FIGURA 64 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 7 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (25) e os resultados à tração.

5.3.4.2 Tempo de cura de 14 dias

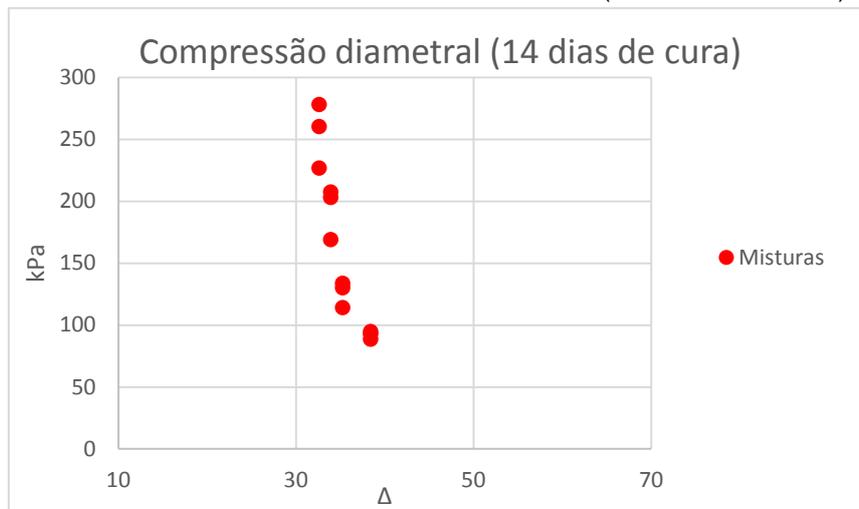
Assim como feito para os corpos de prova com 14 dias de cura testados à compressão simples, plotou-se todos os corpos de prova testados à tração, com 14 dias de cura, em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas são a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas são o Δ . A TABELA 10 e a FIGURA 65 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 14 dias de cura.

TABELA 10 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (14 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	Y_d	γ_{S_s}	γ_{S_c}	γ_{S_f}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-10										88.503	
NC1-11	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	92.600	91.917
NC1-12										94.649	
NC2-10										133.576	
NC2-11	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	129.883	125.788
NC2-12										113.907	
NC3-10										202.814	
NC3-11	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	207.322	192.981
NC3-12										168.806	
NC4-10										277.808	
NC4-11	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	226.586	254.860
NC4-12										260.187	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 65 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (14 DIAS DE CURA)

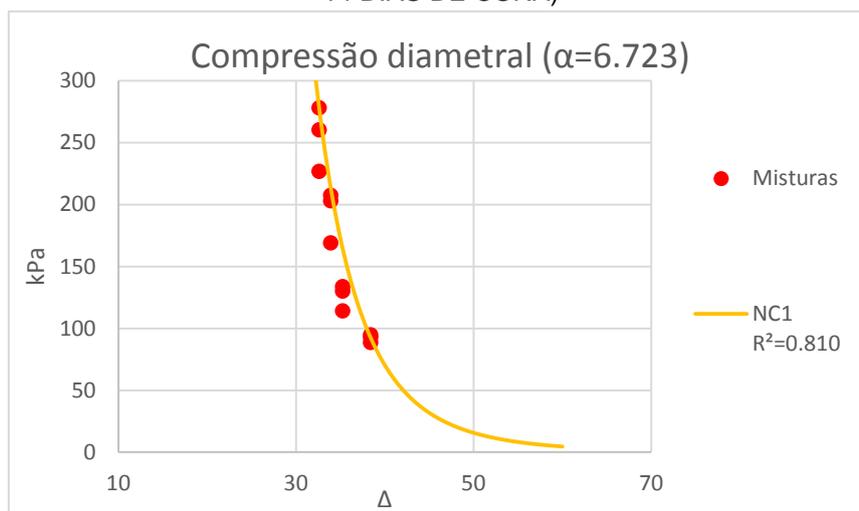


FONTE: o autor (2017).

- NC-1

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-1, equação (26), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 65, tem-se a FIGURA 66.

FIGURA 66 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 14 DIAS DE CURA)



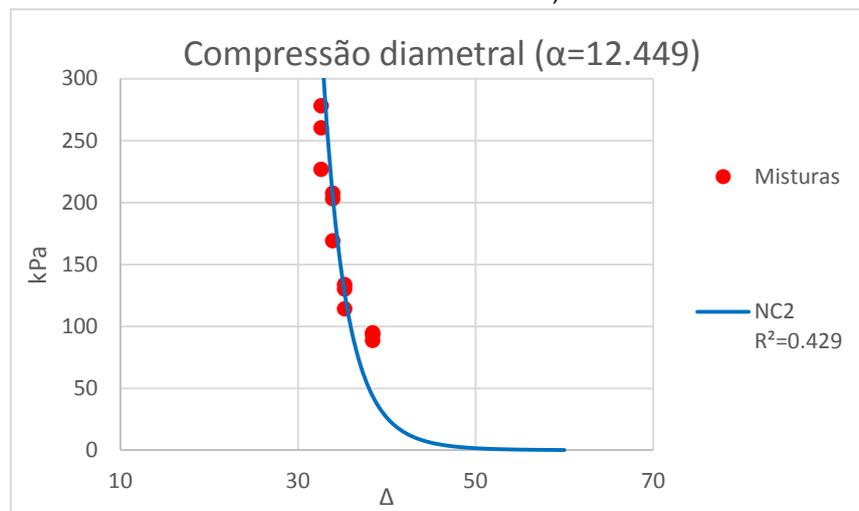
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (26) e os resultados à tração.

- NC-2

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-2, equação (27), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 65, tem-se a FIGURA 67.

FIGURA 67 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 14 DIAS DE CURA)

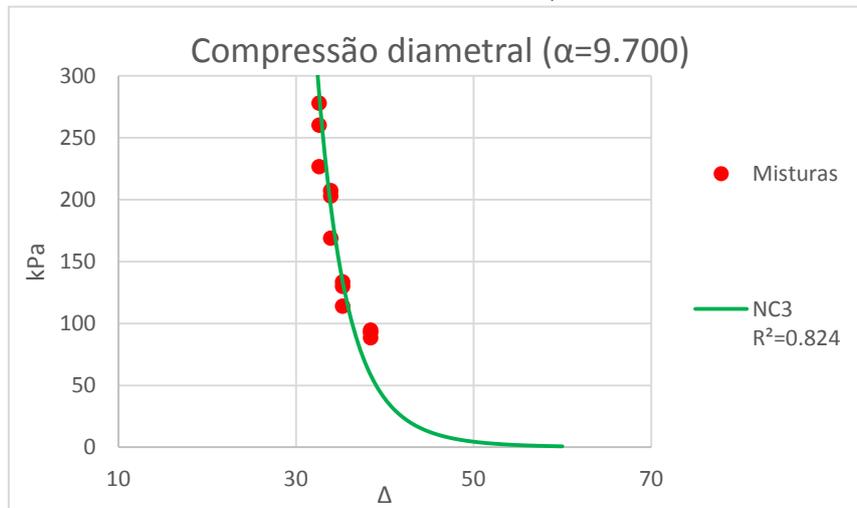


Observa-se que não há um bom ajuste (R^2 baixo) entre a equação (27) e os resultados à tração.

- NC-3

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-3, equação (28), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 65, tem-se a FIGURA 68.

FIGURA 68 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 14 DIAS DE CURA)



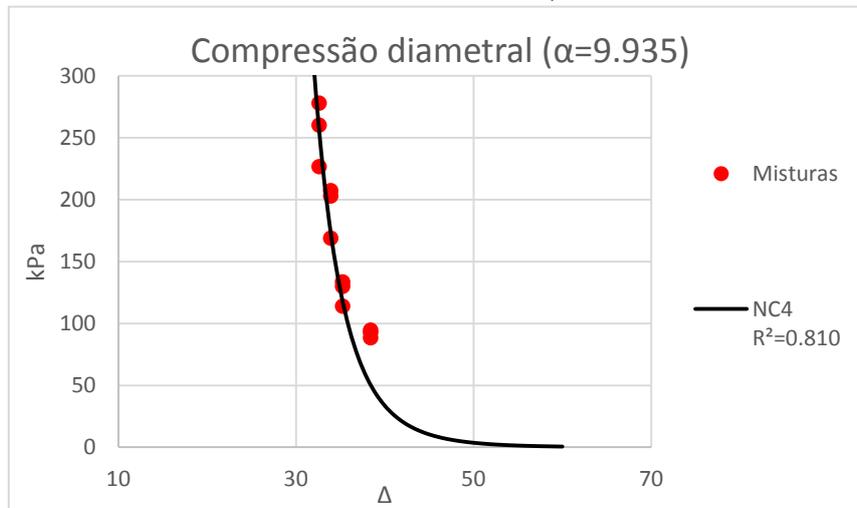
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (28) e os resultados à tração.

- NC-4

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-4, equação (29), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico FIGURA 65, tem-se a FIGURA 69.

FIGURA 69 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 14 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (29) e os resultados à tração.

5.3.4.3 Tempo de cura de 28 dias

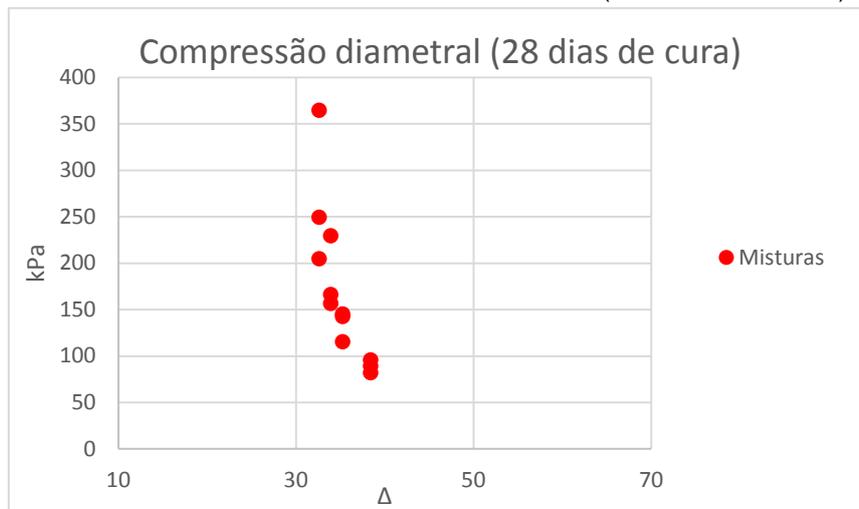
Assim como feito para os corpos de prova com 28 dias de cura testados à compressão simples, plotou-se todos os corpos de prova testados à tração, com 28 dias de cura, em um gráfico de eixos iguais aos da FIGURA 9, ou seja: as ordenadas são a resistência à compressão simples em kPa; as abcissas são o Δ . A TABELA 11 e a FIGURA 70 a seguir contém estas coordenadas para os corpos de prova com 28 dias de cura.

TABELA 11 - DADOS DOS CORPOS DE PROVA MELHORADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (28 DIAS DE CURA)

Corpos de prova	Y_d	Y_{Ss}	Y_{Sc}	Y_{Sf}	C (%)	F (%)	η dado pela equação (1)	Civ dado pela equação (2)	Δ dado pela equação (3)	Resistência (kPa)	Resistência média (kPa)
NC1-16										95.469	
NC1-17	1.74	2.681	3.09	0.91	1	0.5	97.864	28.155	38.44	81.947	88.776
NC1-18										88.913	
NC2-16										142.183	
NC2-17	1.74	2.681	3.09	0.91	2	0.5	97.335	37.540	35.27	115.137	134.122
NC2-18										145.047	
NC3-16										165.941	
NC3-17	1.74	2.681	3.09	0.91	3	0.5	96.817	42.233	33.94	156.519	183.970
NC3-18										229.450	
NC4-16										364.261	
NC4-17	1.74	2.681	3.09	0.91	5	0.5	95.810	46.926	32.61	204.457	272.613
NC4-18										249.122	

FONTE: o autor (2017).

FIGURA 70 - NUVEM DE PONTOS REFERENTE AOS DADOS DAS MISTURAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO DIAMETRAL (28 DIAS DE CURA)

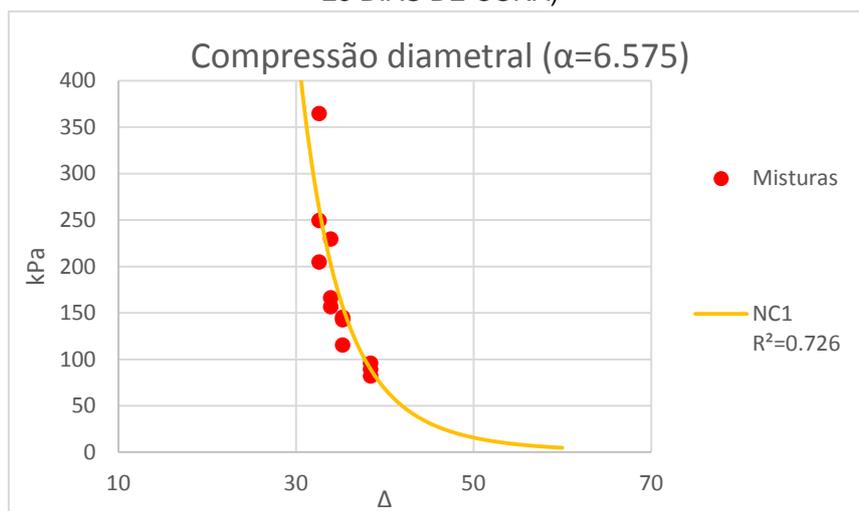


FONTE: o autor (2017).

- NC-1

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-1, equação (30), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 70, tem-se a FIGURA 71.

FIGURA 71 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=38,44$, 28 DIAS DE CURA)



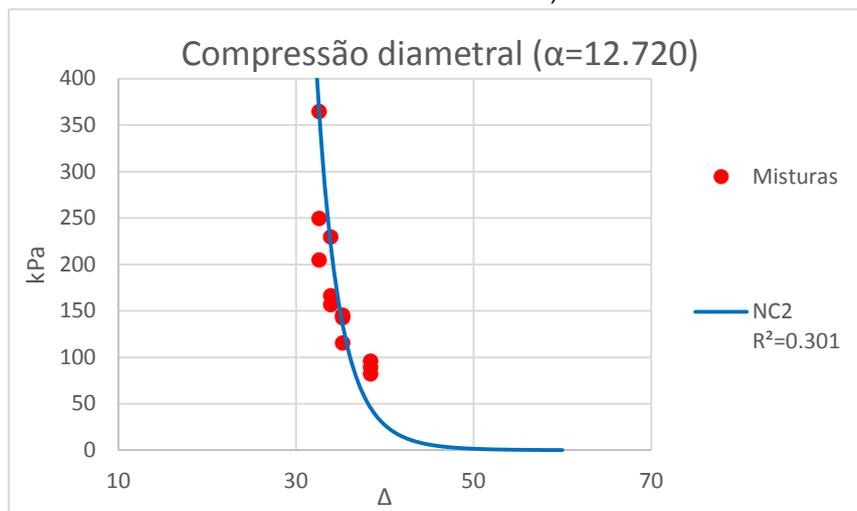
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (30) e os resultados à tração.

- NC-2

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-2, equação (31), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 70, tem-se a FIGURA 72.

FIGURA 72 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=35,27$, 28 DIAS DE CURA)



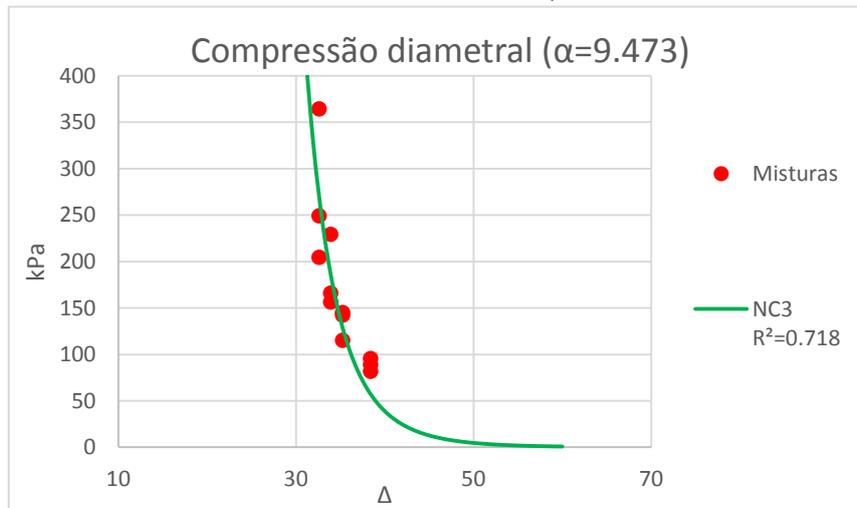
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que não há um bom ajuste (R^2 baixo) entre a equação (31) e os resultados à tração.

- NC-3

A equação de previsão de resistência utilizando a mistura NC-3, equação (32), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 70, tem-se a FIGURA 73.

FIGURA 73 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=33,94$, 28 DIAS DE CURA)



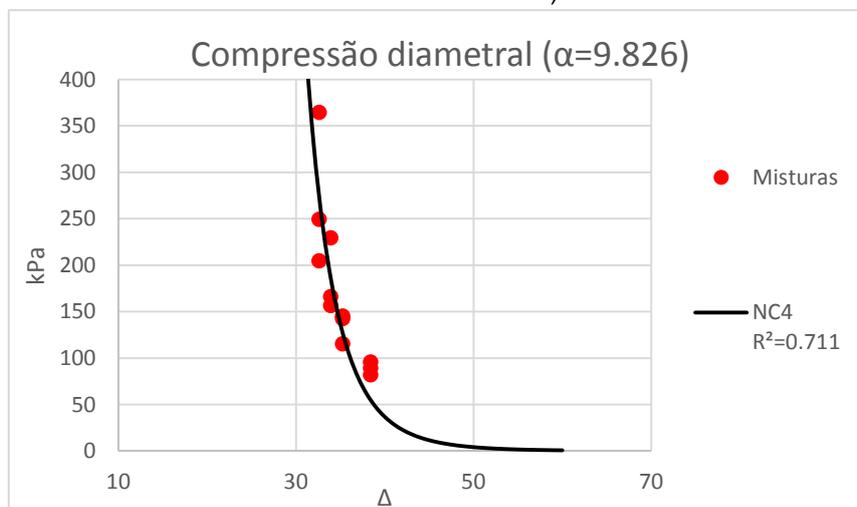
FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (32) e os resultados à tração.

- NC-4

A equação de previsão de resistência para a mistura NC-1, dada pela equação (33), foi ajustada utilizando-se os dados de resistência a compressão simples. Plotando-se esta mesma equação ao gráfico da FIGURA 70, tem-se a FIGURA 74.

FIGURA 74 - PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS UTILIZANDO CURVA AJUSTADA AOS DADOS DE COMPRESSÃO (REFERÊNCIA: $\Delta=32,61$, 28 DIAS DE CURA)



FONTE: o autor (2017).

Observa-se que há um bom ajuste (R^2 alto) entre a equação (33) e os resultados à tração.

5.3.4.4 Considerações sobre a proporcionalidade entre a resistência à compressão simples e à tração

Em resumo, o coeficiente α – ajustado utilizando os dados de compressão simples das misturas – se mostrou um bom coeficiente para ajustar, também, as fórmulas de previsão de resistência à tração. Essa afirmação é justificada pelo valor do Coeficiente de correlação ser alto, maior que 0,7.

Há, contudo, duas exceções - ou seja, misturas cujos α 's dos testes de compressão simples não se ajustaram bem aos dados dos testes de compressão diametral. Isso ocorreu para as misturas NC-2, para 14 e 28 dias de cura. Nestes 2 ensaios, os R^2 foram de 0,429 e 0,301, como pode ser observado nos gráficos da FIGURA 67 e FIGURA 72.

Tendo em vista que a verificação da correlação entre resistência à compressão simples e tração abordou 12 misturas (NC-1, NC-2, NC-3 e NC-4, todos com 7, 14 e 18 dias de cura), e só 2 apresentaram problema (NC-2 com 14 e 28 dias de cura, como explicado acima), acredita-se que tenha tido algum problema com estes corpos de prova. Essa hipótese se fortalece quando se observa que ambos são referentes a uma mesma mistura.

Desse modo, pode-se dizer que a proporcionalidade entre a resistência à compressão simples e à tração de solos melhorados com cimento e fibras - defendida por Consoli et al. (2017) – foi também demonstrada neste trabalho. Isto pode ser afirmado, porque foi possível utilizar o coeficiente α – ajustado utilizando os dados de compressão simples das misturas – também para as fórmulas de previsão de resistência à tração destas.

5.4 EQUAÇÕES FINAIS

Até o momento, a equação de previsibilidade – equação (14) – teve seu coeficiente α ajustado várias vezes, dependendo da mistura escolhida como

referência, do tempo de cura, e do ensaio realizado (ensaios de compressão simples ou tração). Do modo em que foram apresentados, as equações de previsibilidade transmitem uma sensação de complexidade muito grande do método de dimensionamento, o que pode não ser muito atrativo para a sua aplicação.

Desse modo, assim como feito por Consoli et al. (2017), este trabalho irá sugerir um único coeficiente α , como conclusão, para ensaios com 7 dias de cura.

5.4.1 PARA SOLOS GENÉRICOS

Para a escolha de um α , levou-se em conta o valor do Coeficiente de determinação mais elevado, tanto para a previsão das resistências de compressão simples e compressão diametral, com 7 dias de cura, (mantendo-se o mesmo α) dentre todas as análises feitas anteriormente, conforme TABELA 12.

TABELA 12 - ANÁLISE DE R^2 PARA ESCOLHA DA MELHOR EQUAÇÃO DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA (7 DIAS DE CURA)

R^2 (REFENTES A DADOS COM 7 DIAS DE CURA)			
	COMPRESSÃO SIMPLES	COMPRESSÃO DIAMETRAL	MÉDIA
NC-1	0.859	0.767	0.813
NC-2	0.858	0.747	0.803
NC-3	0.890	0.852	0.871
NC-4	0.889	0.863	0.876

FONTE: o autor (2017).

Sendo assim, o valor de α escolhido foi a da equação (25), que representa o ajuste feito da equação (19) através da mistura NC-4 (R^2 médio igual a 0,876, conforme TABELA 12), com 7 dias de cura.

Assim, a equação (19) pode ser reescrita como:

$$\frac{q_u}{q_u[\text{para } \Delta = 32,61]} \text{ ou } \frac{q_t}{q_t[\text{para } \Delta = 32,61]} = \frac{32,61^{9,569}}{\left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{9,569}} \quad (34)$$

Sendo:

q_u = resistência à compressão simples (kPa);

q_t = resistência à tração (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão)).

Desse modo, é possível dizer, em teoria, que a equação (34) pode ser usada para prever a resistência à compressão simples e à tração de uma variedade de solos melhorados (desde que tenham, no mínimo, 10% de finos) com cimento CPV-ARI e 0.5% de fibras de polipropileno (com características descritas no item 3.4). Há, contudo, a necessidade de validação dessa afirmação, utilizando-se outros solos, assim como feito por Consoli et al. (2017). Adicionalmente, mais misturas são necessárias para aumentar a precisão das equações.

Para a utilização da equação (34), para outros solos, basta que se faça o seguinte:

- Deve-se dosar uma mistura para que se tenha $\Delta \sim 32,6$;
- Essa mistura deve ser testada para compressão simples e compressão diametral;
- Os valores dessas resistências devem ser substituídos na equação (34);
- Agora, é possível utilizar a equação para prever a resistência de outras misturas (outros Δ 's) sem a necessidade de moldá-los e testá-los.

5.4.2 PARA O SOLO DESTE ESTUDO

Indo mais adiante, especificamente para o solo melhorado deste estudo, temos as informações da TABELA 13. Esses valores podem ser substituídos diretamente na equação (34).

TABELA 13 - PARÂMETROS DO SOLO ESTUDADO PARA USO NA EQUAÇÃO (34)

RESISTÊNCIAS (kPa)			
MISTURA	Δ	COMPRESSÃO SIMPLES	COMPRESSÃO DIAMETRAL
NC-4	32,61	1426,352	234,645

FONTE: o autor (2017).

Logo, para o solo melhorado deste estudo, a previsibilidade das resistências à compressão simples é dada por:

$$q_u = 4.32 * 10^{17} * \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-9,569} \quad (35)$$

Sendo:

q_u = resistência à compressão simples (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão).

E, para o solo melhorado deste estudo, a previsibilidade das resistências à tração é dada por:

$$q_u = 7,11 * 10^{16} * \left[\frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right]^{-9,569} \quad (36)$$

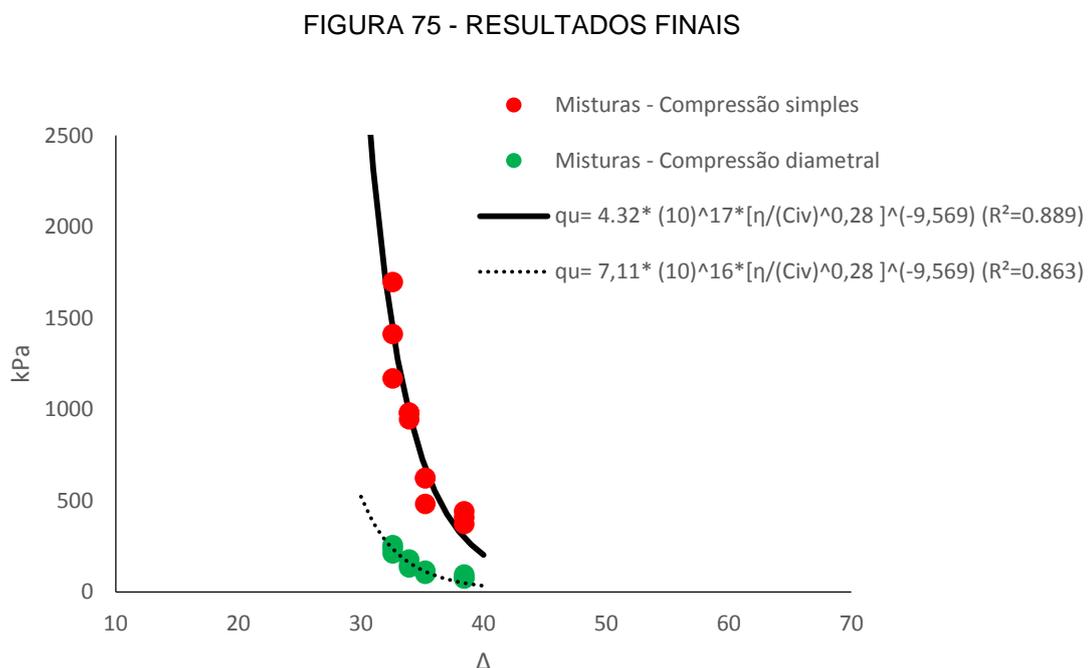
Sendo:

q_t = resistência à tração (kPa);

η = porosidade da mistura, calculado conforme equação (1) (sem dimensão);

C_{iv} = quantidade de cimento (expressa em relação ao volume total do corpo de prova, conforme equação (2) (sem dimensão).

Com estas informações, é possível plotar o gráfico da FIGURA 75.



Perceber como este gráfico é semelhante ao da FIGURA 9, desenvolvida por Consoli et al. (2017).

Desse modo, é possível dizer que, em teoria, as equações (35) e (36) podem ser usadas para prever a resistência à compressão simples e à tração do solo melhorado deste estudo - com 0.5% de fibras de polipropileno (com características descritas no item 3.4) e variando-se a porcentagem de cimento CPV-ARI. Há, contudo, a necessidade de validação dessa afirmação, utilizando-se porcentagens de cimento acima das verificadas por este estudo (maiores de 5%, em massa de solo seco). Mais misturas são necessárias para aumentar a precisão das equações.

5.5 RETROANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS OBTIDAS

O formato da equação desenvolvido por Consoli et al. (2017) se mostrou um bom método quando aplicado ao presente trabalho, levando-se em conta os coeficientes de determinação obtidos nos ensaios. Contudo, como foi mencionado em 5.3.2, a interpretação dos valores de R^2 deve ser feita com cautela.

Nesse sentido, serão avaliadas as diferenças entre as resistências previstas - através da equação (35) e da equação (36) – e obtidas, para as misturas com 7 dias de cura.

Como pode-se observar na TABELA 14, as maiores variações (39,8% e 27,17%) foram a favor da segurança, ou seja, as equações previram resistências inferiores àquelas obtidas. As maiores variações aconteceram na previsão da resistência das misturas com menores porcentagens de cimento. Por outro lado, as equações se mostraram pouco conservadoras para 4 misturas, para as quais previram resistências superiores àquelas obtidas. Estas variações foram pequenas ($< 5\%$), com exceção da maior variação para estes casos, que foi de -17,12%. Tendo em vista que qualquer método de dosagem contém coeficientes de segurança, considerou-se essa variação como aceitável.

Desse modo, pode-se dizer que mais misturas teriam sido necessárias para aumentar a precisão das equações. Como estão apresentadas, resultam principalmente em desperdício de material.

TABELA 14 - VARIAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS PREVISTAS E OBTIDAS

MISTURAS	RESISTÊNCIAS OBSERVADAS (kPa)		RESISTÊNCIAS PREVISTAS (kPa)		VARIAÇÃO (%)	
	COMPRESSÃO SIMPLES	TRAÇÃO	COMPRESSÃO SIMPLES	TRAÇÃO	COMPRESSÃO SIMPLES	TRAÇÃO
NC-1	406.81	80.99	296.28	48.74	27.17	39.8
NC-2	575.83	107.49	674.44	110.95	-17.12	-3.2
NC-3	968.70	152.42	973.15	160.09	-0.46	-5.0
NC-4	1426.35	234.65	1426.35	234.65	0	0

FONTE: o autor (2017).

5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EQUAÇÃO DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA

Dado o objetivo deste trabalho, as equações (35) e (36) têm por função dosar a quantidade de fibras e cimento para o melhoramento de solos em canteiros de obra de difícil acesso.

Sabe-se que nestes ambientes, o controle dos materiais empregados é dificultado. Assim, pode-se pensar na dificuldade de se obter uma boa homogeneização das fibras e cimento com o solo, nestas condições.

Dessa forma, realizou-se uma análise de sensibilidade da equação (35), no seguinte sentido: variações na porcentagem de fibras e cimento poderiam mudar bruscamente o valor da resistência esperada para o solo melhorado?

Essa equação foi determinada utilizando-se a mistura NC-4 (com 7 dias de cura) como parâmetro, ou seja:

- Resistência à compressão simples esperada (q_u) = 1426,352 kPa
- $C = 5\%$
- $F = 0,5\%$
- $\Delta = 32,61$

Considerando que um erro de dosagem em campo mudasse a quantidade de cimento e fibras na mistura em 20% para menos, teríamos:

- $C' = 4,0\%$

- $F' = 0,4\%$
- $\Delta' = 33,22$ - através das equações (1), (2) e (3)
- $q_u = 1194,57$ kPa - substituindo Δ' na equação (35)

Essa variação entre a resistência prevista e a obtida é de 16,25%.

Tendo em vista que qualquer método de dosagem contém coeficientes de segurança, considerou-se essa variação com aceitável.

6 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas a seguir são dependentes dos teores e das características dos materiais utilizados, além da quantidade de corpos de prova testados neste trabalho.

6.1 SOLOS MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO

- Solos melhorados com cimento CPV-ARI e fibras de polipropileno apresentam maior resistência à compressão simples e à tração que solos sem nenhum melhoramento;
- A introdução das fibras de polipropileno no solo implica num aumento da ductibilidade da mistura;
- A adição de 0.5% de fibras de polipropileno não resultou em um ganho expressivo na resistência à tração do solo;
- A introdução de cimento CPV-ARI no solo implica num aumento da fragilidade da mistura;
- O aumento da porcentagem de cimento CPV-ARI implicou no ganho de resistência à compressão simples e à tração do solo melhorado também com fibras de polipropileno;
- Há uma dificuldade na homogeneização das fibras ao solo, o que pode dificultar a aplicação em campo;
- Recomenda-se homogeneizar as fibras ao solo quando elas estão previamente misturadas à água.

6.2 APLICABILIDADE DE SOLOS MELHORADOS COM CIMENTO E FIBRAS DE POLIPROPILENO EM FUNDAÇÕES DE TORRES DE TRANSMISSÃO

- Levando-se em conta que o dimensionamento da fundação de uma torre de transmissão objetiva poucas deformações (CHAVES, 2004), a principal característica que as fibras de

polipropileno implicam ao solo (ductibilidade) talvez não seja pertinente;

- Conduto, dada a influência do intercepto coesivo e do ângulo de atrito do solo de reaterro no dimensionamento de sapatas e grelhas metálicas (GARCIA, 2005), há a necessidade de se verificar a influência das fibras nesses valores.
- A adição conjunta de cimento e fibras revelou-se ser muito interessante para esta aplicação, já que aumentou significativamente as resistências à compressão e à tração do solo melhorado.

6.3 PREVISIBILIDADE DA RESISTÊNCIA DE SOLOS MELHORADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E CIMENTO

- A precisão da equação de previsibilidade da resistência – equação (19) – é melhor quando as misturas com maiores porcentagens de cimento são utilizadas para calibrá-la;
- O coeficiente α da equação de previsibilidade da resistência – equação (19) – é fortemente influenciado pela resistência das fibras;
- O coeficiente α da equação de previsibilidade da resistência – equação (19) – é pouco influenciado pelo tempo de cura;
- O mesmo coeficiente α da equação que prevê a resistência à compressão simples pode ser usado na equação que prevê a resistência à tração, embora se perca um pouco da precisão (FIGURA 75). Há, contudo, uma ressalva: essa afirmação não foi verificada para 2 dos 12 ensaios realizados para se obter essa conclusão. Acredita-se que houve algum problema com os corpos de prova testados que apresentaram esse resultado discrepante – tendo em vista que ambos possuíam a mesma dosagem;
- Pequenos erros de dosagem não influenciam significativamente a resistência prevista do solo melhorado. Logo, o método sugerido

por Consoli et al. (2017) - através do formato da equação (19) – tem potencialidade para aplicação em campo.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Seria interessante validar a equação (34). Para isso, diferentes solos (com no mínimo 10% de finos) melhorados com cimento e fibras de mesmas características utilizados no atual trabalho poderiam ser testados conforme a metodologia apresentada.

Em teoria, a resistência à compressão simples e à tração deles poderia ser prevista pela equação (35), sem alterações no α , com um coeficiente de determinação alto.

7.2 CORRELAÇÃO COM TESTE DE PLACAS

Os ensaios de compressão simples e compressão diametral são utilizados para comparar a resistência e o comportamento de diferentes misturas. Contudo, os valores provenientes desses ensaios dificilmente podem ser convertidos, sem erro, para utilização no dimensionamento de fundações - embora existam estudos na área de fundações rasas, como os de Nascimento (2003).

Neste contexto, seria interessante correlacionar os resultados obtidos com ensaios de placas executados com as mesmas misturas. Tendo em vista que o ensaio de placas é um método direto para obtenção da capacidade do solo (VELLOSO et al., 2014), caso essa correlação fosse possível, um método direto da previsão da capacidade do solo melhorado poderia ser criado. Logo, a aplicabilidade do método desenvolvido por Consoli et al. (2017), e verificado aqui, poderia ser ainda maior.

8 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 2007.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações, 1996.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Análise Granulométrica, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182**: Ensaio de Compactação, 2016.

ASHCAR, R. **Recomendações e Informações Técnicas sobre Fundações de Linhas de Transmissão**. Anais do VIII Encontro Regional Latinoamericano do Cigré, Ciudad del Este, 1999.

BALLA, Á. **The Resistance to Breaking out of Mushroom Foundations for Pylons**. Proceedings from the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1, pp.569-576. Paris, 1961.

BOSZCZOWSKI, R. B.; CHAMECKI, P. R.; KORMANN, A. C. M.; SILVA, C. S.; PAVAN, C. B.; SCUSSIATO, T.; SELENKO, P. R.; ALESSI, Carla Carolina. RT LAME.002.2007-R0 - **Relatório Final Ano 1: Melhoria e Tratamento de Solos: Aplicações em Fundações de Torres de Transmissão**, 2007.

BOSZCZOWSKI, R. B.; SANCHEZ, P. F.; LAZARIM, T.P.; COLOGNESI, F. **Melhoramento e Tratamento de Solo Argiloso com o uso de Poliuretano Rígido Para Aplicação em Reforços de Fundações**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado. Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010.

BRUCE, D. A. **An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as used in Geotechnical Applications**. No. FHWA-RD-99-138. McLean, 2000.

CAI, Y.; SHI, B.; NG; C.W.W.; TANG, C. **Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayed soil**. Engineering Geology, 87, No. 3–4, 230–240, 2006.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno Visando o Uso com Base de Fundações Superficiais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

CHAVES, R. A. **Fundações de Torre de Linhas de Transmissão e de Telecomunicação**. 214 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

CHIN, W. W. **The partial least squares approach to structural equation modeling**. Modern methods for business research, Vol. 295 No.2, 295-336. Nova Jersey, 1998.

CIVIL ARCH. **Soil Improvement**. Disponível em: < <http://civilarc.com/soil-improvement/>>. Acesso em 28 jun, 2017.

CLAUMANN, C.D.S. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007

CODUTO, P. D.; KITCH, W. A.; YEUNG, M. R. **Foundation design. Principles and practice**. Volume 3. Editora Pearson. Estados Unidos, 2016.

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

CONSOLI, N. C.; ZORTÉA, F.; SOUZA, M.; FESTUGATO, L. **Studies on the Dosage of Fiber-reinforced Cemented Soils**. Journal of Materials in Civil Engineering, 23, No. 12, 1624–1632, 2011.

CONSOLI, N. C.; ZORTÉA, F.; SOUZA, M.; FESTUGATO, L. **Studies on the dosage of fiber-reinforced cemented soils**. Journal of Materials in Civil Engineering, 23, No. 12, 1624–1632, 2011.

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

CONSOLI, N. C.; MARQUES, S.; SAMPA, N. C.; BORTOLOTO, M. S.; SIACARA, A. T.; NIERWINSKI, H. P.; PEREIRA, F. S.; FESTUGATO, L. **A General Relationship to Estimate Strength of Fibre-reinforced Cemented Fine-grained Soils**. Geosynthetics International, 24, No. 4, 2017.

CORREIA, A. A. S., VENDA OLIVEIRA, P. J. & CUSTÓDIO, D. G. **Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilized with binders**. Geotextiles and Geomembranes, 43, No. 2, 97–106, 2015.

CROCKFORD, W. W.; GROGAN, W. P.; CHILL, D. S. **Strength and Life of Stabilized Layers Containing Fibrillated Polypropylene**. Transportation Research Record No. 1418, Performance-Related Testing and Evaluation of Characteristics of Aggregates and New Geomaterials, pp. 60e66, 1993.

DANZIGER, F. A. B. **Capacidade de Carga de Fundações Submetidas a Esforço Verticais de Tração**. 331 p. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 1983.

DANZIGER, F. A. B. **Práticas de Projeto e Execução de Fundações de Torres de Linhas de Transmissão**. Anais do I Encontro Regional sobre Linhas de Transmissão (COBEI/CELG). Goiânia, 1985.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **ME 093**: determinação da densidade real, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ME 136**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral, 2010.

ESTEVES, E. **Regressão não-linear utilizando a ferramenta Solver® do Microsoft Excel®**. Tecnovisão, Volume 18, 2008.

EVANS, J. C.; PIUZZI, G. P.; RUFFING, D. G. **Assessment of Key Properties of Solidified Fly Ash with and without Sodium Sulfate**. Grouting 2017: Jet Grouting, Diaphragm Walls, and Deep Mixing GSP. 289. Honolulu, 2017.

FESTUGATO, L.; MENDER, E.; BENEZRA, F.; KIPPER, E. A.; CONSOLI, N. C. **Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length**. Geotextiles and Geomembranes, 45, No. 1, 77–82, 2017

GARCIA, O. C. **Influência da Qualidade da Compactação dos Reaterros na Capacidade de Carga de Fundações Submetidas a Esforços de Tração**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

GONTIJO, C. R. **Cálculo de Torres para Linhas de Transmissão**. Instituto de Engenharia Aplicada Editora. Belo Horizonte, 1994.

GRAY, D. H.; MAHER, M. G. **Admixture stabilization of sands with random fibers**. Proc., Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Rio de Janeiro, 1363–1366, 1989.

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

HANNANT, L. **Fiber-reinforced cements and concretes**. In: J. M. ILLSTON. Construction Material; their nature and behavior. 2ed. J. M. Illston/E & FN Spon p.359-403. Londres, 1994.

HAYWARD BAKER. **Project: Walmart Supercenter**. Disponível em: <<http://www.haywardbaker.com/PROJECTS/WALMART-SUPERCENTER>>. Acesso em 28 jun, 2017.

HAYWARD BAKER. **Dynamic Compaction**. Disponível em: <<http://reports.mckinneydrilling.com/WHATWEDO/TECHNIQUES/GROUNDIMPROVEMENT/DYNAMICCOMPACTION/DEFAULT.ASPX?PRT=1>>. Acesso em 28 jun, 2017.

JÚNIOR, T. F. S. **Método para avaliação do volume de rejeito liberado do reservatório em cenário de ruptura de barragem**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

KRISHNAYYA, A. V. G.; EINSENSTEIN, Z. Brazilian tensile test for soils. Canadian Geotech. Journal, 11, pp. 632 642, 1974.

MACCAFERRI. **FibroMac Fibras de polipropileno**. Catálogo do fabricante, Jundiaí, 2009.

McGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. **Effect of inclusion properties on the behavior of sand**. Géotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346, 1978

MOREL, J. C.; AND GOURC, J. P. **Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements**. Geosynth. Int., 4(5), 481–508, 1997.

MOTULSKY, H.J.; RANSNAS, L. A. **Fitting Curves to Data using Nonlinear Regression: A Practical and Nonmathematical Review**. FASEB J, 1: 365-374, 1987.

NASCIMENTO, N. A.; PUPPI, R. F. K. **Fundação direta no solo residual de basalto - dois exemplos de aplicações e alguns comentários**. In: Engeopar 2003 - I Encontro Geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense, 2003, Maringá. Anais do I Engeopar - CD. Maringá, 2003.

NETO, P. S. L.; GONÇALVES, H. B. B.; OLIVEIRA, F. H. L.; AGUIAR, M. F. P. **Estudo de Utilização de Fibras de Polipropileno como Reforço de Solo para a Pavimentação Rodoviária**. Anais da 45ª RAP – Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, 2016.

OLIVEIRA, P. J. V. **Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilized**. Geosynthetics International 23(3):1-12, 2015.

ORLANDO, C. **Fundações Submetidas a Esforços Verticais Axiais de Tração. Análise de Provas de Carga de Tubulões em Areias Porosas**. Tese de Mestrado na Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1985.

PALADINO, L. **Fundações para Torres, das Linhas de Transmissão**. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. São Paulo, 1972.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos**. Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia. Geossintéticos 92. Brasília, p.1-12, 1992.

ROADDEX NETWORK. **Subgrade soils and topography**. Disponível em: <<http://www.roadex.org/e-learning/lessons/permanent-deformation/classifications-analysis-and-diagnostics/>>. Acesso em 28 jun, 2017.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. **Strength and Mechanical Behavior of Short Polypropylene Fibre Reinforced and Cement Stabilized Clayed Soil**. Geotextiles and Geomembranes, 25, No. 3, 194–202, 2007.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. Longman Scientific & Technical, 2ed, 284p. Londres, 1994.

TEIXEIRA, S. H. C.; BUENO, B. S.; LIMA, D. C. **Estudo do comportamento de solos reforçados com fibras aleatórias**. Relatório parcial PIBIC CNPQ/UFV, Viçosa, 1995.

TRINDADE, T. P.; LASBIK, I.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. **Latossolo vermelho – amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório**. Minas Gerais, 2004.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. Instituto dos Auditores Independentes do Brasil - IBRACON, Florianópolis, 2011.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. Volume completo. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2014.

VILLAR, L. F. S.; CAMPOS, T. M.P.; ZORNBERG, J.G. **Relationship between Tensile Strength as obtained by the Brazilian Test, Soil Suction, and Index Properties**. Proceedings of the Sixth Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Vol. 1, pp. 421-432, Salvador, 2007.

WF FUNDAÇÕES. **Fundação manual e abertura de base**. Disponível em: <<https://www.vwffundacoes.com.br/informacoes/>>. Acesso em 29 jun, 2017.

ANEXO 1 – PENEIRAMENTO DA AREIA



PENEIRAMENTO



ABNT NBR 7181:2016

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: AREIA

DATA DO ENSAIO: 21/08/2017

EXECUTADO POR: Guilherme P. Piuzei

Massa total de amostra seca ao ar (g) = -

Massa de material seco retido na peneira de 2,0 mm (g) = 0

Massa de material seco ao ar do peneiramento fino (g) = -

Massa total de amostra seca (g) = 1042.16

Peneiramento Grosso			
Peneiras		Material retido (g)	Porcentagem passando
(mm)	ASTM		
50.0	2	0.00	100.0
38.0	1 1/2"	0.00	100.0
25.0	1"	0.00	100.0
19.0	3/4"	0.00	100.0
9.5	3/8"	0.00	100.0
4.8	4	0.00	100.0
2.0	10	0.00	100.0

Peneiramento Fino			
Peneiras		Material retido (g)	Porcentagem passando
(mm)	ASTM		
1.20	16	0.00	100.0
0.60	30	0.15	100.0
0.42	40	0.38	100.0
0.25	50	1.93	99.8
0.15	100	830.73	20.3
0.075	200	1038.61	0.3

OBSERVAÇÕES: Sedimentação não realizada

ANEXO 2 – MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO



MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

DNER-ME 093/1994



IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: 80% Areia & 20% Bentonita

DATA DO ENSAIO: 23/08/2017

EXECUTADO POR: Guilherme P. Piuzei

Número Picnômetro	Massa picnômetro vazio (g)	Massa picnômetro + solo seco (g)	Massa picnômetro + solo + água (g)	Massa picnômetro + água (g)
13	27.44	37.39	93.65	87.41
9	28.94	42.47	95.94	87.51
11	28.95	37.65	88.72	83.27

Temperatura da água destilada (°C)	Densidade da água destilada (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
18.0	1.000	2.685
18.0	1.000	2.654
18.0	1.000	2.676
Massa específica (g/cm³) =		2.681

<-PONTO FORA DO INTERVALO

OBSERVAÇÕES:

ANEXO 3 – COMPACTAÇÃO DO SOLO

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: 80% Areia & 20% Bentonita

DATA DO ENSAIO: 25/08 - 29/08

EXECUTADO POR: Guilherme P. Piuzei

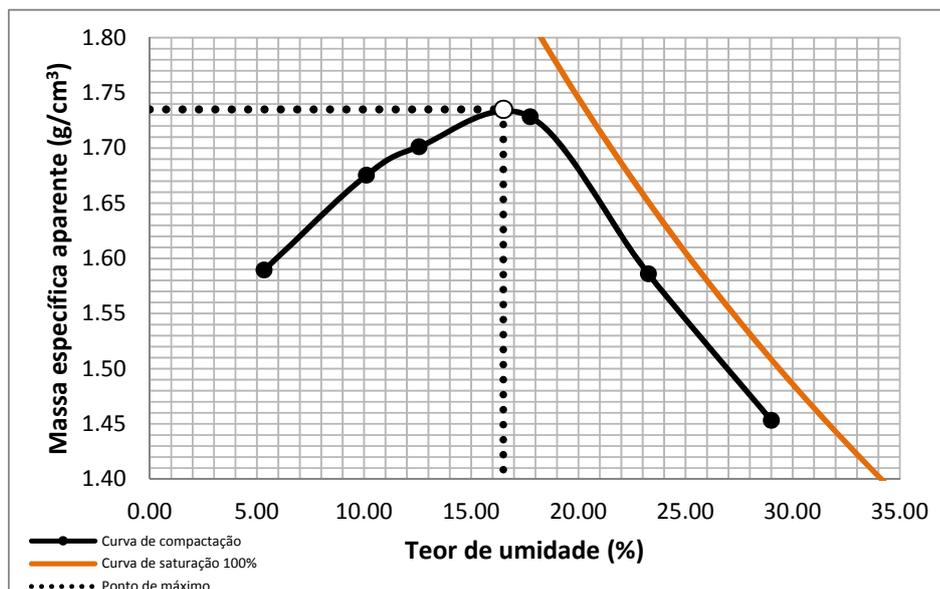
Dados do cilindro	
Número cilindro:	1
Altura (cm):	12.70
Diâmetro (cm):	10.00
Volume (cm ³):	997.46
Massa (g):	2380.00

Determinação da umidade inicial				
Número cápsula	Massa cápsula (g)	Massa cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Umidade (%)
1	14.8	23.6	23.6	0.00
999	14.68	20.89	20.89	0.00
Média (%) =				0.00

Massa específica dos grãos (g/cm ³):	2.68
--	-------------

Curva de compactação						
Ponto	1	2	3	4	5	6
Água adicionada (ml)	250	500	650	900	1200	1450
Massa cilindro + solo (g)	4050	4220	4290	4410	4330	4250
Massa solo (g)	1670.00	1840.00	1910.00	2030.00	1950.00	1870.00
Massa esp. aparente (g/cm ³)	1.67	1.84	1.91	2.04	1.95	1.87
Massa esp. aparente seca (g/cm ³)	1.59	1.68	1.70	1.73	1.59	1.45
Número cápsula	1	3	112	118	999	84
Massa cápsula vazia (g)	14.8	15.44	14.8	14.74	14.68	14.09
Massa cápsula + solo úmido (g)	99.93	86.69	101.82	122.72	78.21	104.07
Massa cápsula + solo seco (g)	95.62	80.15	92.11	106.44	66.22	83.84
Teor de umidade (%)	5.33	10.11	12.56	17.75	23.26	29.00

Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1.74
Umidade ótima (%)	16.5



OBSERVAÇÕES:

ANEXO 4 – CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS

FibroMac[®] 24

Fibras para Reforço do Concreto

Características técnicas

FibroMac[®] 24 é uma fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos indicada para o reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração.



Propriedades Físicas		
Diâmetro	µm	18
Seção		Circular
Comprimento	mm	24
Alongamento	%	80
Matéria-prima		polipropileno
Peso Específico	g/cm ³	0.91

Propriedades Mecânicas		
Temperatura de fusão	°C	160
Temperatura de ignição	°C	365
Resistência à tração	MPa (N/mm ²)	300
Módulo de Young	MPa	3 000

Aplicação		
Campos de aplicação indicados		concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos, revestimentos.
Frequência de fibras por kilo		180 000 000
Área superficial específica	m ² / kg	244
Dosagem (recomendação mínima)	g / m ³	600

Apresentação		
--------------	--	--

As fibras sintéticas FibroMac[®] 24 são acondicionadas em sacos hidrossolúveis de 600g.

ANEXO 5 – CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO

TIPO : CP V-ARI

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

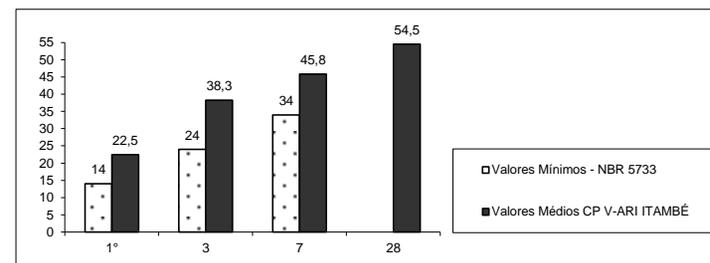
PERÍODO : ago/17
EMISSÃO : 02/10/2017

Data	Químicos										Físicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	h : min	h : min	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
02	4,28	18,84	2,90	59,88	4,29	3,14	3,25	0,53	0,84	0,67	0,50	03:15	04:00	30,5	4.410	0,04	0,30	21,8	36,6	46,0	54,9
04	4,38	19,00	2,95	59,99	4,29	3,10	3,22	0,50	0,97	0,66	0,00	03:20	04:00	30,8	4.340	0,06	0,30	22,3	38,4	46,7	55,7
08	4,37	18,88	3,07	61,23	3,80	3,23	3,41	0,56	0,82	0,69	0,00	03:20	04:00	30,8	4.380	0,04	0,30	22,0	37,3	44,4	54,6
10	4,48	19,33	3,00	60,60	3,98	3,35	3,40	0,56	0,90	0,68	0,00	03:30	04:15	31,0	4.400	0,05	0,30	24,1	40,2	46,3	55,6
14	4,27	18,83	2,93	59,79	3,78	3,39	3,60	0,62	0,78	0,68	0,50	03:10	04:00	30,6	4.430	0,02	0,30	23,0	37,1	45,3	53,6
16	4,29	18,91	2,97	60,04	3,90	3,33	3,37	0,62	0,77	0,68	0,50	03:20	04:00	30,2	4.440	0,03	0,30	22,4	39,0	46,2	54,5
18	4,40	19,09	3,09	59,76	3,84	3,25	3,37	0,59	0,84	0,71	0,00	03:05	03:45	30,5	4.420	0,05	0,30	22,8	39,5	46,8	55,5
22	4,23	18,76	2,87	60,20	4,05	3,32	3,25	0,59	0,60	0,69	0,50	03:10	04:00	30,1	4.430	0,04	0,20	22,6	37,1	45,4	52,8
24	4,21	18,81	2,92	59,94	3,95	3,27	3,35	0,59	0,85	0,69	0,50	03:10	04:00	30,5	4.400	0,04	0,30	22,0	39,8	46,6	55,3
28	4,20	18,84	3,05	60,17	3,90	3,26	3,31	0,59	0,87	0,69	1,00	03:30	04:00	30,5	4.400	0,04	0,20	23,3	38,4	45,1	53,3
30	4,35	19,13	2,98	60,29	4,10	3,24	3,26	0,59	0,90	0,70	0,50	03:25	04:00	30,8	4.320	0,05	0,20	20,9	37,5	45,0	53,6
Média	4,31	18,95	2,98	60,17	3,99	3,26	3,34	0,58	0,83	0,69	0,36	03:18	04:00	30,6	4.397	0,04	0,27	22,5	38,3	45,8	54,5
Sd	0,09	0,17	0,07	0,43	0,18	0,09	0,11	0,04	0,10	0,01	0,32	00:08	00:07	0,3	37,71	0,01	0,05	0,8	1,2	0,8	1,0
Min	4,20	18,76	2,87	59,76	3,78	3,10	3,22	0,50	0,60	0,66	0,00	03:05	03:45	30,1	4.320	0,02	0,20	20,9	36,6	44,4	52,8
Max	4,48	19,33	3,09	61,23	4,29	3,39	3,60	0,62	0,97	0,71	1,00	03:30	04:15	31,0	4.440	0,06	0,30	24,1	40,2	46,8	55,7

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,09 g/cm³ (NBR NM 23).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



ANEXO 6 – DOSAGEM DOS CORPOS DE PROVA

ANEXO 7 – CONTROLE DOS CORPOS DE PROVA

Definição da mistura					Controle dos corpos de prova			
Mistura	Solo	Cimento CP3	Fibra	Categoria de mistura/ensaio	Massa ideal do corpo de prova (g)	Massa antes da cura (g)	Massa antes do rompimento (g)	Teor de umidade após rompimento (%)
C1-1	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	413.11	409.96	15.763
C1-2	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	396.9	393.37	16.008
C1-3	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	402.06	399.26	15.369
C1-4	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	392.7	388.1	15.705
C1-5	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	398.03	395.13	15.691
C1-6	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.00%	Controle	398.0	397.24	395.73	15.111
C2-1	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	405.67	403.37	15.694
C2-2	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	407.14	405.13	16.359
C2-3	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	401.51	399.46	15.699
C2-4	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	395.51	393.67	15.117
C2-5	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	402.56	400.9	15.793
C2-6	80% litoral + 20% bentonita	0%	0.50%	Controle	398.0	400.07	398.75	15.686
NC1-1	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	394.44	386.91	13.898
NC1-2	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	401.12	395.62	14.721
NC1-3	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	395.27	390.56	14.022
NC1-4	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	394.2	389.2	14.286
NC1-5	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	394.35	389.67	14.757
NC1-6	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	404.09	400.34	14.592
NC1-7	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	399.24	390.99	13.482
NC1-8	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	401.3	389.71	12.671
NC1-9	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	390.01	380.09	13.567
NC1-10	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	399.16	389.37	13.473
NC1-11	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	389.75	381.31	12.955
NC1-12	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	390.95	384.32	13.488
NC1-13	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	396.49	382.57	12.117
NC1-14	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	393.38	379.77	11.749
NC1-15	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	401.35	383.44	10.842
NC1-16	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	393.79	374.27	10.178
NC1-17	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	393.3	377.95	11.315
NC1-18	80% litoral + 20% bentonita	1%	0.50%	Não controle	398.0	394.62	382.19	11.886
NC2-1	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	389.91	384.56	14.169
NC2-2	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	399.29	394.27	14.079
NC2-3	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	398.42	394.36	14.323
NC2-4	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	393.96	389.76	15.382
NC2-5	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	393	389.5	14.230
NC2-6	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	394.28	389.91	14.055
NC2-7	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	394.34	386.81	13.747
NC2-8	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	390.92	383.07	13.720
NC2-9	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	398	391.47	13.958
NC2-10	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	400.29	392.62	13.011
NC2-11	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	394.57	386.77	13.523
NC2-12	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	385.9	378.79	13.298
NC2-13	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	388.9	374.22	12.060
NC2-14	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	397.76	384.43	11.973
NC2-15	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	391.04	378.17	11.392
NC2-16	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	392.27	377.13	11.298
NC2-17	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	390.48	376.75	11.661
NC2-18	80% litoral + 20% bentonita	2%	0.50%	Não controle	398.0	403.3	390.87	12.089
NC3-1	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	394.3	388.77	13.195
NC3-2	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	394.5	389.15	13.595
NC3-3	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	398.86	394.09	13.228
NC3-4	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	398.87	393.62	13.420
NC3-5	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	388.49	383.66	13.669
NC3-6	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	389.99	386.34	13.681
NC3-7	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	388.18	379.38	12.698
NC3-8	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	396.16	386.41	12.034
NC3-9	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	402.89	394.18	12.690
NC3-10	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	399.31	392.99	12.950
NC3-11	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	402.64	394.78	12.486
NC3-12	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	398.97	391.12	12.295
NC3-13	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	395.45	377.93	10.730
NC3-14	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	402.43	385.87	10.501
NC3-15	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	397.2	383.5	10.714
NC3-16	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	394.29	379.65	10.353
NC3-17	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	390.15	371.78	9.128
NC3-18	80% litoral + 20% bentonita	3%	0.50%	Não controle	398.0	391.12	370.58	8.660
NC4-1	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	400.15	394.64	13.476
NC4-2	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	395.3	389.99	13.717
NC4-3	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	387.46	382.45	14.017
NC4-4	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	395.05	390.19	13.252
NC4-5	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	390.88	385.93	13.532
NC4-6	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	395.65	389.4	13.017
NC4-7	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	386.76	376.11	10.359
NC4-8	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	399.41	389.86	11.073
NC4-9	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	388.44	376.95	10.192
NC4-10	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	396.5	385.92	10.308
NC4-11	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	381.16	371.46	10.936
NC4-12	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	384.27	376.71	10.462
NC4-13	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	402.13	386.01	9.317
NC4-14	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	401.15	388.37	10.322
NC4-15	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	395.57	381.4	10.447
NC4-16	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	397.38	380.05	9.598
NC4-17	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	383.34	367.81	10.114
NC4-18	80% litoral + 20% bentonita	5%	0.50%	Não controle	398.0	396.37	382.02	10.005

ANEXO 8 – ENSAIOS DA PRENSA

ANEXO 9 – RESUMO DAS RESISTÊNCIAS MÁXIMAS

Corpode prova	Tempo de cura (dias)	Compressão simples				Corpode prova	Tempo de cura (dias)	Compressão diametral	
		Resistência (kPa)	Média (kPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação			Resistência (tração) (kPa)	Média (kPa)
C1-1	-	226.539				C1-4	-	48.349	
C1-2	-	210.914	215.610	9.496	0.044	C1-5	-	42.613	46.710
C1-3	-	209.377				C1-6	-	49.169	
C2-1	-	392.989				C2-4	-	56.953	
C2-2	-	367.185	349.163	55.094	0.158	C2-5	-	52.446	51.900
C2-3	-	287.315				C2-6	-	46.300	
NC1-1	7	408.765				NC1-4	7	77.031	
NC1-2	7	440.864	406.813	35.067	0.086	NC1-5	7	71.294	80.991
NC1-3	7	370.810				NC1-6	7	94.649	
NC1-7	14	565.369				NC1-10	14	88.503	
NC1-8	14	470.492	487.224	71.268	0.146	NC1-11	14	92.600	91.917
NC1-9	14	425.811				NC1-12	14	94.649	
NC1-13	28	494.715				NC1-16	28	95.469	
NC1-14	28	545.882	542.145	45.677	0.084	NC1-17	28	81.947	88.776
NC1-15	28	585.838				NC1-18	28	88.913	
NC2-1	7	480.912				NC2-4	7	108.991	
NC2-2	7	622.002	575.834	82.215	0.143	NC2-5	7	115.546	107.488
NC2-3	7	624.589				NC2-6	7	97.927	
NC2-7	14	565.009				NC2-10	14	133.576	
NC2-8	14	602.772	597.366	30.021	0.050	NC2-11	14	129.883	125.788
NC2-9	14	624.317				NC2-12	14	113.907	
NC2-13	28	639.632				NC2-16	28	142.183	
NC2-14	28	636.431	637.850	1.631	0.003	NC2-17	28	115.137	134.122
NC2-15	28	637.489				NC2-18	28	145.047	
NC3-1	7	944.258				NC3-4	7	177.821	
NC3-2	7	979.960	968.699	21.189	0.022	NC3-5	7	146.690	152.424
NC3-3	7	981.881				NC3-6	7	132.761	
NC3-7	14	983.555				NC3-10	14	202.814	
NC3-8	14	1039.041	1048.013	69.382	0.066	NC3-11	14	207.322	192.981
NC3-9	14	1121.445				NC3-12	14	168.806	
NC3-13	28	1136.197				NC3-16	28	165.941	
NC3-14	28	1183.211	1157.919	23.710	0.020	NC3-17	28	156.519	183.970
NC3-15	28	1154.348				NC3-18	28	229.450	
NC4-1	7	1697.023				NC4-4	7	255.679	
NC4-2	7	1412.778	1426.352	264.145	0.185	NC4-5	7	238.465	234.645
NC4-3	7	1169.256				NC4-6	7	209.792	
NC4-7	14	1619.407				NC4-10	14	277.808	
NC4-8	14	1558.076	1597.516	34.224	0.021	NC4-11	14	226.586	254.860
NC4-9	14	1615.065				NC4-12	14	260.187	
NC4-13	28	1929.338				NC4-16	28	364.261	
NC4-14	28	1765.460	1735.802	209.942	0.121	NC4-17	28	204.457	272.613
NC4-15	28	1512.608				NC4-18	28	249.122	