

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO TROPICAL ARGILOSO COM
CIMENTO E ZEÓLITO SINTÉTICO COMO SOLUÇÃO EM
PAVIMENTAÇÃO NO AMAZONAS**

DANIEL JARDIM ALMEIDA

MANAUS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIEL JARDIM ALMEIDA

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO TROPICAL ARGILOSO COM
CIMENTO E ZEÓLITO SINTÉTICO COMO SOLUÇÃO EM
PAVIMENTAÇÃO NO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais para Pavimentação.

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS

2018

Ficha catalográfica

A447e Almeida, Daniel Jardim
Estabilização de solo tropical argiloso com cimento e zeólito sintético como solução em pavimentação no Amazonas / Daniel Jardim Almeida. 2018
103 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Pavimentação. 2. Geotecnia. 3. Zeólito Sintético. 4. Solo-Cimento. I. Campelo, Nilton de Souza II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO TROPICAL ARGILOSO COM CIMENTO E ZEÓLITO SINTÉTICO COMO SOLUÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO NO AMAZONAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais para Pavimentação.

Aprovado em 29 de março de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^o. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, D.Sc. – Universidade Federal do Ceará/UFC
(Examinador Externo)

Prof^a. Samantha Coelho Pinheiro, D.Sc. – Universidade do Estado do Amazonas/UEA
(Examinadora Externa)

Prof^o. Nilton de Souza Campelo, D.Sc. – Universidade Federal do Amazonas/UFAM
(Examinador interno)

À família, minha fonte de força e motivação.

AGRADECIMENTOS

Completar todas etapas do mestrado é uma longa jornada e certamente envolve o trabalho de muitas pessoas. Este é o momento de agradecer todos que contribuíram para minha pesquisa durante esse processo.

Primeiramente a Deus, por me proporcionar viver e poder contribuir com o bem estar das pessoas agora e no futuro, através desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Nilton Campelo, por me supervisionar, dando-me total liberdade para experimentar verdadeiramente a pesquisa científica.

Aos demais professores do PPGEC-UFAM, por terem contribuído, cada um na área específica, para melhor execução desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAM e aos Técnicos Zeca, Reinaldo, Nilson e Jorge pelo apoio nos experimentos realizados.

Aos colegas da UFAM que tornaram esse jornada mais agradável e proveitosa.

À Universidade Federal do Amazonas e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES, pela oportunidade e financiamento à realização deste mestrado.

Ao Professor Prof. Heber Oliveira pelo apoio e exemplo como profundo conhecedor do tema, e ao INBEC por ter proporcionado este encontro.

Ao engenheiro Christophe e às empresas Powercem Technologies e Fertrading Group pela apoio e profissionalismo inspirador.

À MIZU, ao INPA, ao CPRM, ao SENAI, ao 2º Grupamento de Engenharia/Exército Brasileiro e à Universidade Nilton Lins que contribuíram fortemente para a conclusão deste projeto.

À minha família, por acreditar em mim e apoiar incondicionalmente.

“Não há nada mais fraco e submisso que a água, mas também não há nada melhor para combater aquilo que é duro e forte”

Lao Tzu

RESUMO

Situações atípicas no estado do Amazonas, que contribuem para a deterioração acelerada dos pavimentos convencionais, despertam a necessidade de desenvolver soluções específicas. Este estudo buscou identificar as alterações nas propriedades mecânicas e microestruturais de solo tropical com cimento (8,20 %) e aditivo químico a base de zeólito sintético, denominado Roadcem® (RC) em diferentes taxas (0 %, 0,087 % e 0,174 %). Os teores de umidade na compactação foram variados em 0 %, 30 % e 60 % da umidade ótima. O processo de cura foi realizado de três formas: via úmida, submersa e sob ciclos de molhagem e secagem. Após caracterização dos materiais, realizou-se ensaios de compressão não-confinada e tração por compressão diametral, perda de massa pelo ensaio de durabilidade e investigação das alterações microscópicas. Adicionalmente, foi proposto procedimentos sistemáticos de execução de obra de estabilização do solo de subleito com cimento e RC. Um trecho experimental foi construído, projeto estrutural desenvolvido e seu desempenho mecânico avaliado. Um modelo de regressão, considerando os resultados de resistência à compressão do material, indicou máxima resistência predita para condição de cura sob ciclos de durabilidade ($R^2 = 0,85$), com 0,174 % de RC e 0 % de acréscimo de umidade, no valor de 5,97 MPa. Nas amostras com excesso de água, as reações químicas que promovem a maior interação entre os grãos não ocorrem na mesma intensidade. No ensaio de durabilidade, amostras com 0,174 % de RC reduziram a perda de massa em 0,6 % para as moldadas na umidade ótima e indicou redução na taxa de absorção para todas umidades na compactação. Cristais de etringita e menor ocorrência de fraturas foi observada apenas em amostras com aditivo RC. Os procedimentos de obra propostos descreveram de maneira ampla as etapas afim de obter sucesso na execução de estabilização de solos de subleito. A resistência à compressão das amostras extraídas do trecho experimental obteve média de 3,01 MPa para 28 dias e não houve evolução de trincas superficiais. De modo geral, os resultados indicaram que a adição do aditivo RC contribui com a conservação das propriedades mecânicas nas condições estudadas.

Palavras-chave: Pavimentação. Geotecnia. Zeólito Sintético. Solo-Cimento.

ABSTRACT

Atypical situations in Amazonas State, which contribute to the accelerated deterioration of conventional pavements, raise the need to develop specific paving solutions. This work aims to identify changes of the mechanical and microstructural properties of tropical soil with cement (8.20%) and chemical additive based on synthetic zeolite, called Roadcem® (RC) at different rates (0%, 0.087% and 0.174%). Changing its moisture condition during compaction (0%, 30% and 60% of optimum moisture) and different curing conditions (wet, submerged and under cycles of durability), in order to represent the expected conditions of the execution. After extensive characterization of the materials used, non-confined compression tests and diametral compression stress, mass loss through the durability test and investigation of microscopic changes were performed. Systematic procedures for soil stabilization work with cement and RC are also proposed. An experimental stretch was built, structural design developed and its mechanical performance evaluated. A regression model considering the results of compressive strength of the material for condition of curing under cycles of durability ($R^2 = 0.85$) indicated maximum resistance predicted for 0.174 % RC and 0% increase of moisture, in the value of 5, 97 MPa. With excess water, the chemical reactions that promote the greatest interaction between the grains do not occur at the same intensity. Rates of 0.174% RC reduced the mass loss to 0.6% for samples molded at optimal moisture in the durability test. Ettringite crystals and lower occurrence of fractures was observed only in samples with RC additive in microstructural analysis. The proposed work procedures describe in a broad way the steps to be successful in the execution of subgrade soil stabilization with cement and RC additive. The resistance of the samples extracted from the experimental section reach 3,01 MPa after 28 days curing and the track presented with no surface cracks evolution. Thus, the results indicated that RC additive contributed with mechanical properties conservation under studied conditions.

Keyword:Paving. Geotechnics. Amazonas. Synthetic Zeolite. Soil-Cement.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 HIPÓTESES TESTADAS.....	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 AMAZONAS E PAVIMENTAÇÃO	16
2.2 SOLOS TROPICAIS	19
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO <i>IN SITU</i> EM REGIÕES CRÍTICAS	24
2.4 UTILIZAÇÃO DO ADITIVO DE ZEÓLITOS SINTÉTICOS	25
2.5 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE SOLO-CIMENTO-RC.....	26
2.6 INTERFERÊNCIA DA UMIDADE E CONDIÇÃO DE CURA	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 MATERIAIS	32
3.1.1 Solo Tropical	32
3.1.2 Aditivo Roadcem® (RC).....	40
3.1.3 Cimento Portland.....	41
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	42
3.2.1 Fatores controláveis.....	42
3.2.2 Variáveis de resposta.....	43
3.2.3 Programa de ensaios	43
3.3 PREPARAÇÃO DOS CPs	45
3.4 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS	48
3.4.1 Ensaio de resistência à compressão não-confinada	48

3.4.2 Ensaio de tração por compressão diametral	49
3.4.3 Ensaio durabilidade	49
3.4.4 Microscopia eletrônica por varredura	51
3.5 METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE CASO	53
4 RESULTADOS LABORATORIAIS	55
4.1 ENSAIO DE DURABILIDADE	55
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA	61
4.2.1 Ajuste do modelo e análise ANOVA	62
4.2.2 Efeito dos fatores através de análise gráfica	64
4.2.3 Gráfico de otimização dos efeitos	67
4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	69
4.3.1 Ajuste do modelo e análise ANOVA	70
4.3.2 Efeito dos fatores através de análise gráfica	72
4.3.3 Gráfico de otimização dos efeitos	74
4.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO SOLO-CIMENTO-RC	75
5 APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO-RC NO AMAZONAS	79
5.1 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO	79
5.1.1 Concepção Inicial	79
5.1.2 Execução De Obra	83
5.1.3 Avaliação e Monitoramento	86
5.2 TRECHO EXPERIMENTAL	86
5.2.1 Projeto Estrutural	86
5.2.2 Resultados de obra	88
5.2.3 Levantamento de produção e custo	90
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1 CONCLUSÕES	91
6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	93

REFERÊNCIAS	94
APÊNDICES	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Pulso dos principais rios do Amazonas (adaptado de JUNK <i>et al.</i> , 2014).	16
Figura 2 (a) Ciclos de precipitação anual (GRIMM, 2011) e (b) Radiação Solar média anual (PEREIRA <i>et al.</i> , 2006).	17
Figura 3 Cráton Amazônico segundo a concepção de Tassinari (1996).	18
Figura 4 Fotografias microscópicas de um solo saprolítico (a) e de um solo laterítico (b) respectivamente - aumento de 3000x e 10.000x (TAKEDA, 2006).	21
Figura 5 Ábaco para caracterização da atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).	23
Figura 6 Efeito da carga sobre um pavimento flexível (DNER, 1979).	25
Figura 7 Custo de Manutenção Pavimento Tradicional vs Pavimento Solo-cimento-RC em função da idade do pavimento (GERSONUIS e EGYED, 2012).	26
Figura 8 Efeito do RC na redução de retração (a) e no ganho de resistência à compressão (b) em função da dosagem (WU, 2015).	27
Figura 9 Relação entre a durabilidade e o índice de plasticidade (WALKER, 1995).	28
Figura 10 Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland (Fonte: SCRIVENER, 1989).	29
Figura 11 Resultados de ensaio para o solo argiloso estabilizado com cimento portland de Tipo I e cal hidratada por tipo de cura (TINGLE, 2003).	30
Figura 12 Alterações na resistência à compressão não-confinada para diferentes temperaturas de cura, durante 180 dias (SATO, NISHIMOTO & SUZUKI, 2006).	31
Figura 13 Coleta do solo no trecho do estudo de caso.	32
Figura 14 Distribuição granulométrica do solo pelo método de espalhamento à laser.	34
Figura 15 Curva de compactação do solo.	34
Figura 16 Espectro de difração de raios-X para amostras de solo natural e aditivo RC.	35
Figura 17 Localização do solo no ábaco para caracterização da fração argila.	37
Figura 18 Gráficos de determinação dos coeficientes c' e d'	38
Figura 19 Posição do solo na tabela de Classificação MCT (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).	39
Figura 20 Posição do solo no ábaco de classificação MCT proposto por Vertamatti (1988). .	39

Figura 21 Curva granulométrica do aditivo RC.	41
Figura 22 Separação do solo (a), aditivo RC (b) e cimento (c) para moldagem.	45
Figura 23 Homogeneização do solo-cimento-RC.	46
Figura 24 Procedimento de moldagem com detalhe no molde bi-partido preenchido com material compactado.	47
Figura 25 Condição de cura submersa.	47
Figura 26 CP capeado levado à ruptura por compressão não confinada.	48
Figura 27 CP durante ensaio de RTCD.	49
Figura 28 Processo de escovação aplicando força correspondente a 15 N.	51
Figura 29 Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura.	52
Figura 30 Localização do trecho experimental. (Fonte: Própria, 2016).....	53
Figura 31 Extração de CPs da pista (a) e aspecto final (b).....	54
Figura 32 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas na umidade ótima de compactação.	56
Figura 33 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30%.	56
Figura 34 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo na umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60%.	56
Figura 35 Massa absoluta de amostras solo-cimento-RC moldadas na umidade ótima de compactação.	58
Figura 36 Massa absoluta das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30 %.	58
Figura 37 Massa absoluta das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60 %.	58
Figura 38 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 0 %.	60
Figura 39 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30 %.	60
Figura 40 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60 %.	60
Figura 41 Análise dos resíduos para amostras de RCNC.	63

Figura 42 Gráfico de efeitos para amostras de RCNC.	64
Figura 43 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura úmida para RCNC.	66
Figura 44 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura sob ciclos de durabilidade para RCNC.	66
Figura 45 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura submersa para RCNC.	66
Figura 46 Previsão de resistência máxima para amostras nas condições de cura úmida (a), cura sob ciclos de durabilidade (b) e cura submersa (c) para RCNC.	68
Figura 47 Gráfico de efeitos para amostras de RTCD.	70
Figura 48 Análise dos resíduos para amostras de RTCD.	71
Figura 49 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura úmida RTCD para RTCD.	73
Figura 50 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura sob ciclos de durabilidade para RTCD.	73
Figura 51 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura submersa para RTCD.	73
Figura 52 Previsão de resistência máxima para amostras nas condições de cura úmida (a), cura sob ciclos de durabilidade (b) e cura submersa (c) para RTCD.	74
Figura 53 Imagens MEV de solo estabilizado com cimento sem (a) e com (b) aditivo RC para condição de cura submersa com 28 dias.	77
Figura 54 Imagens MEV de solo estabilizado com cimento sem (a) e com (b) aditivo RC para condição de cura com ciclos de durabilidade com 28 dias.	78
Figura 55 Espalhamento manual do RC (a) e homogeneização com solo <i>in situ</i> utilizando-se de recicladora (b). (Fonte: Própria 2016).	84
Figura 56 Etapas de compactação (a), abaulamento (b), acabamento final (c) e cura (d). (Fonte: Própria, 2016)	85
Figura 57 Aspecto final da seção teste com 1 dia de conclusão em 10/16 (a) e após 490 dias em 02/18 (b).	88
Figura 58 Regeneração de trincas 1mm.	88
Figura 59 Comparativo de resistência à compressão para amostras moldadas em laboratório, durante a obra e extraídas diretamente da pista.	89
Figura 60 Tensão de ruptura do ensaio de RTCD para amostras moldadas em laboratório. ...	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Superfície específica de alguns argilominerais (adaptado de FABBRI, 1994).	22
Quadro 2 Atividade dos argilominerais em função do coeficiente de atividade (FABBRI, 1994).	23
Quadro 3 Propriedades geotécnicas do solo.	33
Quadro 4 Composição química do solo.	35
Quadro 5 Propriedades químicas do solo.	36
Quadro 6 Parâmetros para classificação MCT.	38
Quadro 7 Composição química do aditivo RC determinada por análise FRX.	40
Quadro 8 Caracterização do cimento.	41
Quadro 9 Variáveis de respostas do programa experimental.	43
Quadro 10 Codificações das amostras.	44
Quadro 11 Resultado da resistência sob diferentes condições para RCNC.	61
Quadro 12 Resultados ANOVA para RCNC.	62
Quadro 13 Testes de normalidade para amostras de RCNC.	64
Quadro 14 Resultado da resistência sob diferentes condições para RTCD.	69
Quadro 15 Resultados ANOVA para RTCD.	70
Quadro 16 Testes de normalidade para amostras de RTCD.	72
Quadro 17 Procedimentos para caracterização do subleito (Adaptado de POWERCEM, 2015)	80
Quadro 18 Capacidade de suporte por tipo de solo (GERSONUIS & CHRISTOPHE, 2012).80	
Quadro 19 Dosagem de cimento e RC em função do tipo de solo (adatapado de Gersonuis & Egyed (2012).	81
Quadro 20 Ensaios pós obra. (Adaptado de MARJANOVIC <i>et al.</i> , 2009).	86
Quadro 21 Critérios de projeto para desenvolvimento de projeto.	87

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CA	Coeficiente de atividade
CP	Corpo-de-prova
CTC	Capacidade de troca catiônica
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração por raios-X
E_{dyn}	Módulo dinâmico
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios-X
h_{ot}	Teor de umidade ótimo
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice de suporte califórnia
Ki e Kr	Índice de intemperização
LL	Limite de liquidez
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
MEV	Microscopia eletrônica por varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
Psi	Libra-força por polegada quadrada
R	Raio de curvatura
R^2	Coeficiente de determinação
RC	Aditivo químico Roadcem®
RCNC	Resistência à compressão não-confinada
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
SE	Superfície específica total
SICRO	Sistema de custos rodoviários
SUCS	Sistema unificado de classificação dos solos
VA	Volume total de azul de metileno
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O estado do Amazonas apresenta-se com características singulares no que tange a execução de pavimentação viária. Tendo o principal modo de transporte o hidroviário (CARVALHO e SANTOS, 2015), características únicas perfazem essa região no que tange o desenvolvimento rodoviário onde apenas 4% das rodovias avaliadas CNT (2017) são consideradas ótimas ou boas. A dificuldade em garantir qualidade e prazo de execução onde o regime pluviométrico é intenso, em áreas de várzea que estão sujeitas à inundações, com solos de características geralmente plásticas e baixa capacidade de suporte devido à sua formação geológica, tornam limitadas as chances de sucesso dos projetos tradicionais de pavimentação (VILLIBOR e NOGAMI, 2009). Assim, novos materiais e técnicas executivas de pavimentação, que confirmam à obra maior resistência, impermeabilidade, vida útil e redução do custo de manutenção, vem ganhando cada vez mais espaço no cenário amazonense.

Em especificações de serviços de estabilização de solo cimento (DNIT, 2010) observa-se que características admissíveis de solo, potencial de impermeabilização e influência da água, não são considerados e limitam sua aplicabilidade em regiões sem possibilidade de troca de solo ou de realização de estabilização granulométrica. A partir dessa condição, é possível a utilização de novas técnicas de estabilização.

A técnica de pavimentação através da estabilização do solo *in situ* do subleito com cimento e aditivos químicos a base de zeólitos sintéticos, vem sendo alvo de estudos internacionais quando aplicado em regiões de condições extremas (GERSONUIS e EGYED, 2012). A minimização das etapas de trabalho, a capacidade do aditivo de estabilizar solos argilosos e a conservação da resistência adquirida mesmo quando submerso durante chuvas críticas, mostra-se como uma técnica promissora a ser aplicada na região do Amazonas.

Os solos tropicais, em função das características intrínsecas dos seus processos pedogenéticos, ou seja, do grau de laterização, frequentemente apresentam variação no seu comportamento hidráulico e mecânico, mesmo para casos onde a plasticidade e granulometria são semelhantes. Assim, relacionar o desenvolvimento das propriedades mecânicas de solos tropicais estabilizados com cimento e aditivos químicos a base de zeólitos sintéticos mostra-se relevante, necessitando de maiores investigações.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de solo argiloso tropical estabilizado com cimento e aditivo químico a base de zeólito sintético (Roadcem® (RC)) em aplicações de base de pavimento sujeitos a condições críticas encontradas no estado do Amazonas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar o grau de evolução pedológica de laterização do solo e correlacionar suas propriedades geotécnicas e físico-químicas;
- b) Para diferentes teores de aditivo RC e variando as condições de cura e umidade de compactação submeter o material a ensaios de resistência à compressão não-confinada (RCNC), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), estudo de perda de massa por ensaio de durabilidade e estudos das alterações microestruturais por imagens de microscopia eletrônica de varredura;
- c) Propor procedimentos de execução de obra de pavimentação com a estabilização de solo do subleito com cimento e RC, explanando as fases da execução para se desenvolver pavimento resistente à chuvas e inundações, adaptado às condições regionais identificadas e, associando o mínimo de informação e dados necessários para desenvolvimento de um projeto de qualidade;
- d) Avaliar a eficiência da técnica e sua adequabilidade por meio de um estudo de caso constituído da construção de uma seção teste de 70 m.

1.4 HIPÓTESE TESTADA

O aditivo RC incrementa o desempenho mecânico e químico do solo, sendo assim, uma opção viável de estabilização de solo tropical do subleito como base de pavimento em regiões críticas no Amazonas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente pesquisa foi executada em sete etapas, a seguir descritas: (1) identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão da literatura existente sobre o assunto; (3) planejamento do programa experimental; (4) realização dos ensaios previstos no programa experimental; (5) análise dos resultados; (6) determinação de procedimentos executivos de obra; (7) estudo de caso.

A primeira etapa consistiu na discussão a respeito dos benefícios e dos problemas relacionados aos solos estabilizados com cimento vislumbrando sua aplicação na pavimentação no Amazonas. A partir daí, delineou-se um projeto de pesquisa que buscasse as respostas para

as principais dúvidas levantadas. A síntese desta discussão, os objetivos, as hipóteses a serem testadas e as etapas deste trabalho são apresentadas no Capítulo 1.

A segunda etapa consistiu em uma revisão da literatura existente a respeito do tema deste trabalho. Tal revisão é apresentada no Capítulo 2. Procurou-se na literatura trabalhos científicos que pudessem fornecer subsídios para o desenvolvimento de um programa experimental adequado à pesquisa proposta.

Na terceira etapa, destinada ao capítulo 3 é apresentada a descrição dos materiais e métodos, além da descrição dos materiais utilizados na pesquisa, dos detalhes da preparação dos corpos-de-prova (CP) e das técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios e caracterização do solo tropical.

Na quarta etapa, ensaios experimentais foram realizados visando a determinação das características geotécnicas do solo cimentado com o aditivo RC. Nesta etapa buscou-se medir as respostas julgadas necessárias à avaliação dos efeitos da adição de RC ao solo-cimento visando sua aplicação na pavimentação.

A quinta etapa consistiu na análise e discussões dos resultados reunidas no capítulo 4.

Na sexta etapa, descrita no Capítulo 5, foram apresentadas propostas de procedimento executivo de obra e técnica de estabilização de solo-cimento-RC como solução em pavimentação no Amazonas. A sétima etapa, também no Capítulo 5, é apresentado o estudo de caso onde um trecho experimental foi construído, tendo o solo e cimento caracterizados, projeto estrutural desenvolvido e seu desempenho mecânico avaliado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AMAZONAS E PAVIMENTAÇÃO

Localizadas em planícies alagáveis denominadas de terras de várzea na bacia amazônica (PRANCE, 1979), grande parte das estradas no estado do Amazonas, em determinados períodos do ano, permanecem submersas ou sofrem com precipitação intensa, prejudicando a vida útil substancialmente. Conforme Hess (2010), a área de inundação do rio Solimões/Brasil, foi estimado entre 87.600 km² e 107.700 km². A flutuação sazonal é um padrão dos grandes rios amazônicos (Figura 1) definido por Junk *et al.* (1989) como pulso de inundação, esse fenômeno, que promove expansão lateral dos rios, é considerado previsível como resposta ao regime pluviométrico anual. No estudo de Ferreira-Ferreira *et al.* (2014) utilizaram-se de imagens de radar multitemporal PALSAR L-band combinadas com análise de imagem baseada em objetos, técnicas de *data mining* e dados de campo para derivar padrões de inundação na Amazônia central, entre o rio Solimões e rio Japurá/AM. Para um trecho de várzea baixa distribuída em 37,7% da área total analisada, observou-se que seu regime de inundação é de 120–180 dias por ano alagado, ao passo que a várzea alta (18,7 %), permanece alagado ao menos que 40 dias por ano.

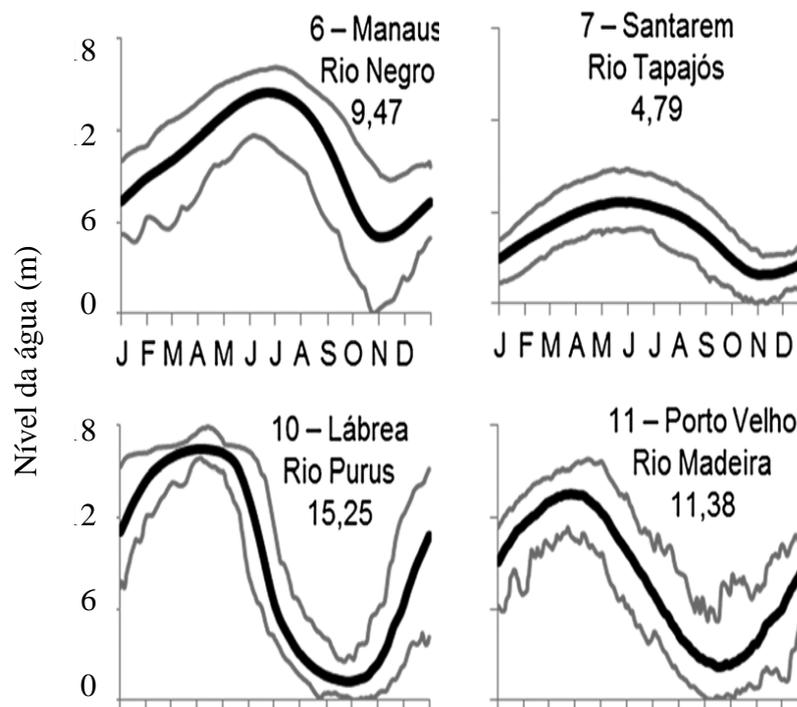


Figura 1 Pulso dos principais rios do Amazonas (adaptado de JUNK *et al.*, 2014).

Diferentemente do resto do Brasil, que possui clima tropical, no estado do Amazonas o que prevalece é o equatorial, proveniente da proximidade com a linha do Equador, caracterizado, assim, como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Com índices pluviométricos que podem chegar a 3.200 mm por ano e intensa irradiação solar (Figura 2), o Amazonas distingue-se do resto do país. A estação seca, necessária para obras de pavimentação e drenagem, decorre em um curto espaço de tempo, fazendo com que o período disponível para execução de obras seja limitado e variável por temporada.

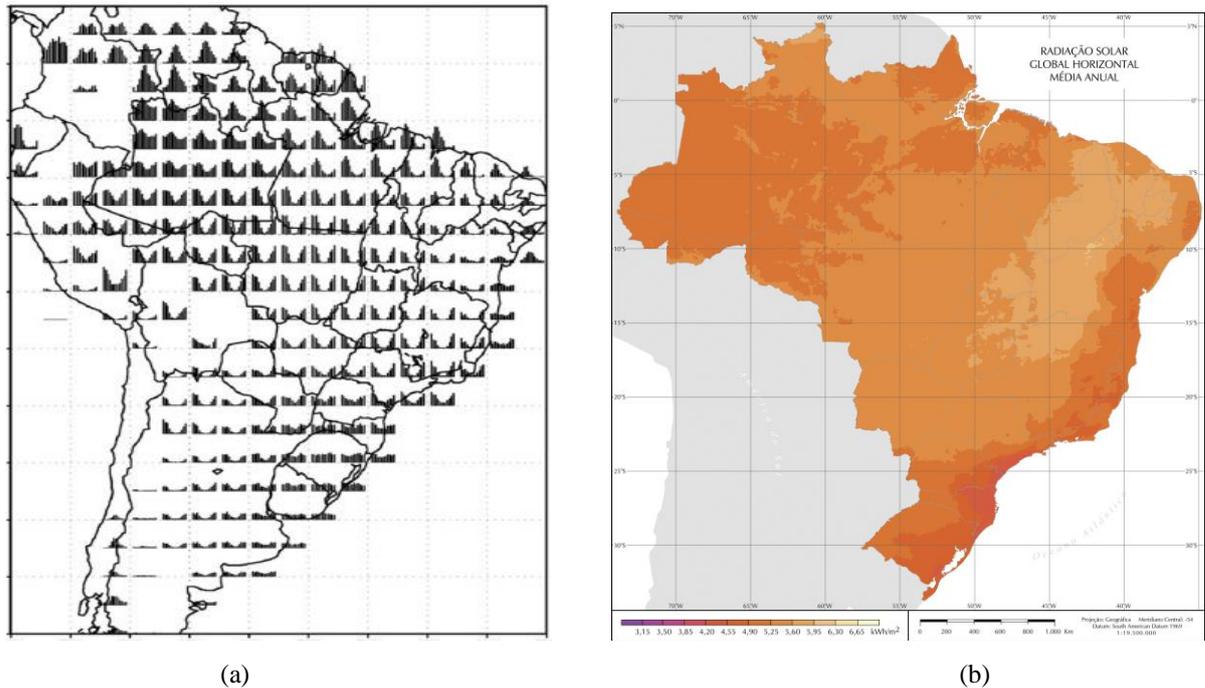


Figura 2 (a) Ciclos de precipitação anual (GRIMM, 2011) e (b) Radiação Solar média anual (PEREIRA *et al.*, 2006).

As elevadas temperaturas costumeiras desta região provocam incompatibilidade quando relacionadas às normas técnicas de desempenho de compósitos asfálticos que, no geral, indicam temperaturas em torno de 25 °C. Pavimentos asfálticos recorrentemente apresentam problemas de deformações permanentes quando executados em regiões em que a superfície dos pavimentos alcançam 60 °C por longas horas do dia. Silva *et al.* (2015) indicaram a queda de 93,3% do módulo dinâmico de misturas asfálticas utilizando argilas calcinadas como agregado graúdo quando expostas à temperatura de 55 °C, o que sugere a necessidade de identificar pavimentos mais adequados à regiões de alta temperatura.

Geologicamente, o Estado do Amazonas é caracterizado por uma extensa cobertura sedimentar fanerozóica, distribuída nas bacias Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós, que

se depositou sobre um substrato rochoso pré-cambriano onde predominam rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar (REIS *et al.*, 2006) (Figura 3).

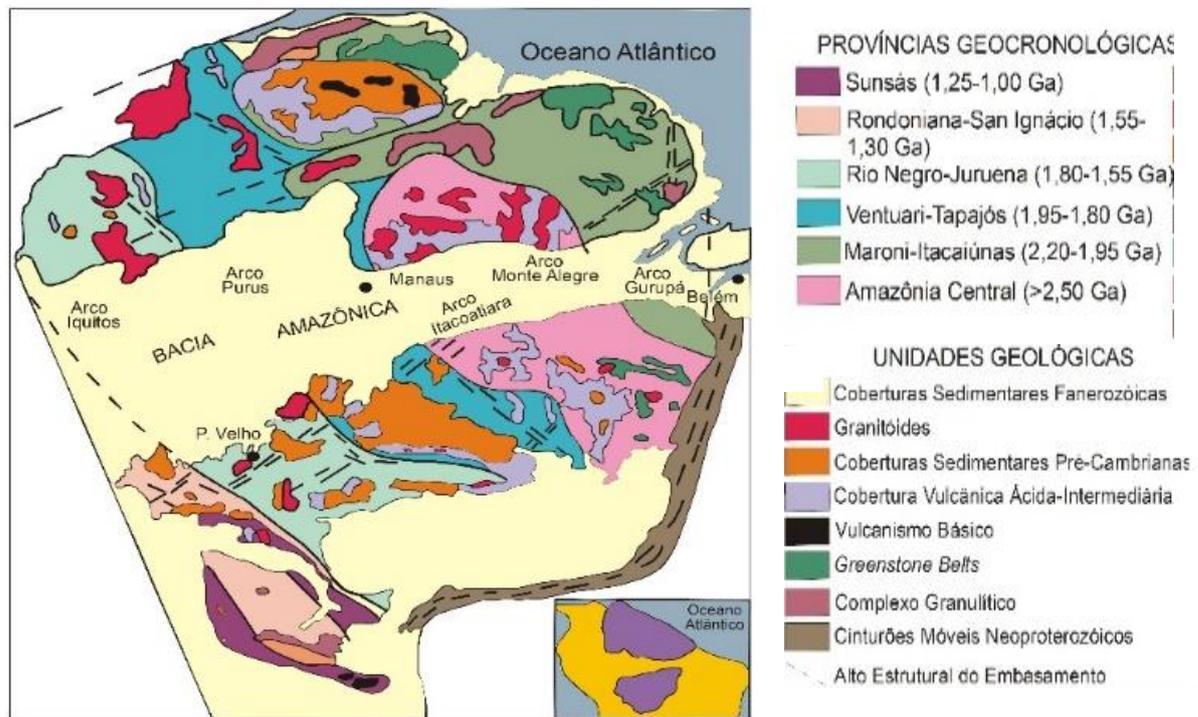


Figura 3 Cráton Amazônico segundo a concepção de Tassinari (1996).

Conforme Riker *et al.* (2008), as argilas da região do Médio Amazonas são encontradas sob forma de depósitos aluvionares holocênicos relacionados a um sistema fluvial meandrante e representados por canais ou barras de meandros e depósitos de planície de inundação. Essa formação geológica remete a uma predominância de subleito com características de baixa capacidade de suporte, grandes porções de material fino e laterização. Por meio do Sistema Rodoviário de Classificação denominado *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e Índice de Suporte Califórnia (ISC), 90% das jazidas analisadas no levantamento SEINFRA/AM (2014) apresentaram solos do tipo A-4 a A-7, com valor médio de ISC de 26,11%. Solos argilosos são compostos por complexos minerais largamente influenciadores das propriedades de engenharia. Existem 3 principais grupos de argilo minerais comumente encontrados em argilas: caulinita, ilita, esmectita ou montmorilonita (PINTO, 2006). O mineral montmorilonita é considerado o principal atuante para determinar a plasticidade da argila.

Convencionalmente, materiais naturais, como britas ou cascalhos selecionados, são amplamente utilizados como materiais rodoviários (CAMPELO, CAMPOS & ARAGÃO, 2017; MOLENAAR & VAN NIEKERK 2002; PARK 2003; LEITE *et al.*, 2011; CABRAL *et*

al., 2008). A construção de estradas geralmente precisa de grandes quantidades de agregados, contudo, encontrar jazidas de solo com boa qualidade, sem conflitos ambientais e legalmente habilitadas, torna-se um grande desafio na maioria dos municípios. A carência de material pétreo na região da Amazônia central é tratada por PIKANÇO *et al.* (2011), indicando a ocorrência de afloramento de rochas somente a grandes distâncias dos principais centros urbanos.

A fim de solucionar a falta de material disponível na região, opta-se pelo uso de materiais alternativos. Em geral, o seixo, extraído por meio de dragas em leitos ativos dos rios, é utilizado como material nas diversas camadas dos pavimentos. A intensa extração e utilização desse bem mineral é justificada também pela grande demanda no setor da construção civil (REIS *et al.*, 2006). A areia, assim como o seixo rolado, quando extraídos dos rios, promove sérios danos ambientais, alteração do ecossistema e riscos urbanos mediante colapsos em margens afetadas pela alteração do leito dos rios.

2.2 SOLOS TROPICAIS

Oliveira (2001) descreve que na formação dos solos tropicais, resultantes da evolução pedológica de laterização, prevalecem os processos intempéricos de hidrólise (quebra da ligação entre os íons dos minerais pela ação dos íons H⁺ e OH da água), seguido de hidratação, dissolução, carbonatação, e oxidação ou redução. Já os processos pedogenéticos atuantes nos solos tropicais, sobreleva-se a transformação, translocação e remoção.

Em função da ambiguidade de atribuição dos termos laterita, solos lateríticos e solos tropicais, erroneamente confundidos. Mitchell (1993) descreve que solos lateríticos são aqueles que possuem uma relação molecular entre SiO₂ e Al₂O₃ abaixo de 2,0, enquanto na laterita esta relação normalmente é inferior a 1,33. Já os solos tropicais são formados por processos pedológicos de laterização e podzolização, compreendendo os solos citados anteriormente dentre outros, cujas relações entre SiO₂ e Al₂O₃ podem ser superior a 2,0.

Deste modo, o IBGE (2005) atribui índices de intemperização, índice K_i, juntamente com o índice K_r. Os referidos índices são calculados conforme as equações 2.1 e 2.2. O índice K_i mede o grau de decomposição da fração argila presente no solo.

$$K_i = 1,7 \times \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (2.1)$$

$$K_r = 1,7 \times \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + 0,6375 \times Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

Onde SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 correspondem aos percentuais dos referidos compostos na composição do solo. Segundo o mesmo autor, devido ao fato do índice K_i da caulinita ser igual a 2,0, esse valor foi estabelecido como limite entre solos muito intemperizados ($K_i < 2,0$) e pouco intemperizados ($K_i > 2,0$). Desta forma, o índice K_i determina uma linha divisória entre os solos tropicais altamente intemperizados (plintossolos e latossolos) e os solos tropicais pouco intemperizados (nitossolos e argissolos), definidos posteriormente. Define ainda um limite entre os as concreções lateríticas ($K_i < 1,33$) e os latossolos ($K_i > 1,33$). Já o índice K_r , por envolver os teores de ferro, de alumínio e silício, pode ser empregado para separar os solos caulínicos ($K_r > 0,75$) de solos oxídicos ($K_r < 0,75$).

Nogami e Villibor (1980, 1985) foram precursores no estudo da composição mineralógica e classificação geotécnica dos solos tropicais. As classificações convencionais que buscam correlacionar propriedades geotécnicas (granulometria e limites de Atterberg) aos comportamentos geotécnicos (compacidade, compressibilidade e resistência, permeabilidade, etc), não geram resultados satisfatórios quando aplicados aos solos tropicais. Isto se deve, sobretudo, às particularidades mineralógicas deste solo.

A metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) é proposta por Nogami & Villibor (1980, 1985) afim de estabelecer um sistema de classificação que aborde as características inerentes aos solos tropicais, sobretudo as características mecânicas e hidráulicas de interesse geotécnico aplicado a mecânica de pavimentos. O sistema de classificação MCT separa os solos tropicais segundo duas classes distintas, solos lateríticos e não lateríticos (saprolíticos) (Figura 4), sendo que os solos lateríticos caracterizam-se por apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas que levam a classificá-los como de comportamento laterítico segundo a classificação MCT, enquanto os solos saprolíticos resultam da degradação direta da rocha matriz, preservando algumas de suas características.

Morandini (2014) indica que solos lateríticos possuem fração arenosa e pedregulhosa constituída principalmente por quartzo e laterita (óxido hidratado de ferro) e fração siltosa com predominância de quartzo, com ocorrências de magnetita e ilmenita. Já a fração argilosa é composta por argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e sesquióxidos como hidróxidos de ferro (goetita, lepidocrocita, limonita, ferrihidrita), hidróxidos de alumínio (diásporo, bohemita e gibbsita), ou ainda óxidos anidros de ferro (hematita e magnetita). Por outro lado, os solos saprolíticos ou não lateríticos possuem fração arenosa e pedregulhosa constituída por feldspatos, micas e fragmentos de rocha, não excluindo o quartzo, enquanto a fração siltosa é constituída predominantemente por caulinita e micas. Já na fração argilosa podem ocorrer argilominerais tais como a esmectita e a ilita (não descartando a caulinita), associados ou não aos sesquióxidos.

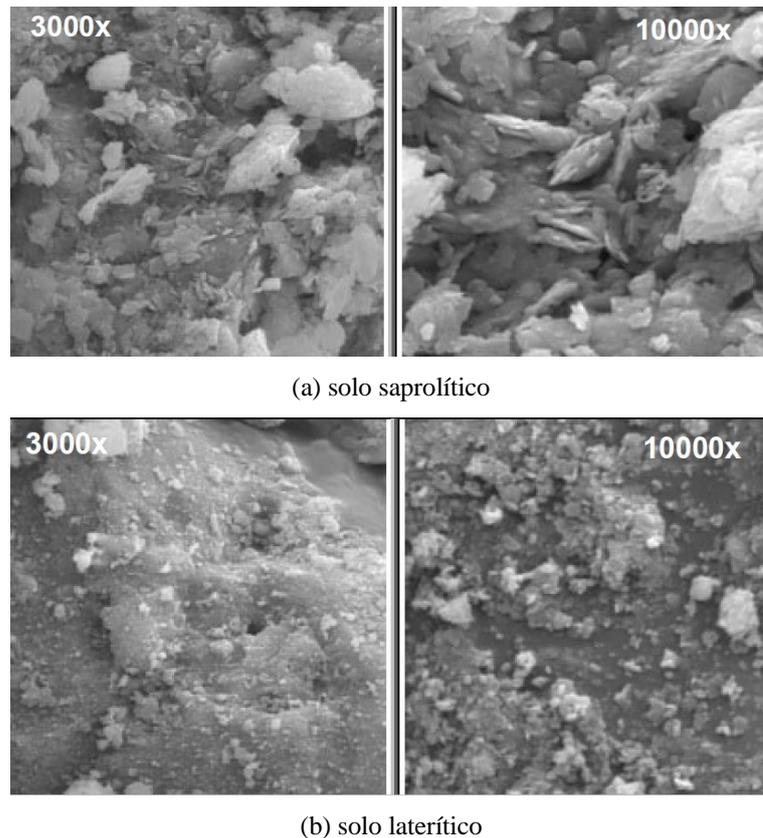


Figura 4 Fotografias microscópicas de um solo saprolítico (a) e de um solo laterítico (b) respectivamente - aumento de 3000x e 10.000x (TAKEDA, 2006).

O comportamento dos solos é fortemente determinado pelos argilominerais presentes. O azul de metileno é um corante orgânico cuja molécula quando em contato com um argilomineral em meio aquoso, forma uma camada monomolecular quase que completa sobre a sua superfície (FABBRI & SÓRIA, 1994).

Lan (1977) estudou o ensaio de mancha de azul de metileno, considerando-o promissor para a caracterização de solos. Correlacionou os resultados desse ensaio com o índice de plasticidade e com o equivalente areia, que são dois outros tipos de ensaios muito utilizados naquela instituição, na fase de caracterização de materiais para construção de pavimentos.

O ensaio de adsorção de azul de metileno permite avaliar a superfície específica total (SE) e a capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais presentes nos solos, uma vez que a SE é inversamente proporcional ao diâmetro equivalente. Pode-se dizer que a contribuição das frações granulométricas de dimensões superiores às da argila, em termos de SE, é muito pequena (FABBRI & SÓRIA, 1994). Desta forma, quanto maior a superfície de um argilomineral (interna e externa), maior a quantidade de azul de metileno adsorvida. O Quadro 1 apresenta algumas valores típicos de SE dependendo do argilomineral.

Morandini (2014) identifica valores de CTC para solos lateríticos entre 3,6 e 15,7 meq/100g, para solos transicionais 6,9 a 36,0 meq/100g, e solos não lateríticos entre 7,9 e 24,8

meq/100g. Para SE, o mesmo autor observou aumento nos resultados na mesma proporção. Pejon (1992), apresentando uma classificação expedita à classificação MCT, verificou que solos de comportamento laterítico apresentam uma CTC menor que 4,7 meq/100g em 85% dos casos, enquanto solos de comportamento não laterítico apresentam uma CTC maior que 4,7 em 88% dos casos.

Quadro 1 Superfície específica de alguns argilominerais (adaptado de FABBRI, 1994).

ARGILOMINERAL PRESENTE	SE (m ² /g)
Caulinita	5-20
Ilita	40-60
Vermiculita	200
Montmorilonita	800

Casanova (1986) concluiu que o ensaio de mancha de azul de metileno deve ser adotado como meio de caracterização dos solos lateríticos, uma vez que ele propicia uma maneira rápida, simples e eficaz de determinar as propriedades químicas e físico-químicas de superfície dos solos lateríticos. Para a avaliação da "atividade" dos argilominerais presentes nos solos, Fabbri (1994) definiu um coeficiente de atividade, CA, conforme a Equação 2.3.

$$CA = 100 \times \frac{VT}{P_F} \quad (2.3)$$

Onde:

CA: coeficiente de atividade;

PF: porcentagem, em peso, que o solo contém da fração que se quer avaliar a atividade;

VT: volume total de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral.

Para o cálculo do volume total (VA), torna-se necessário levar em consideração a porcentagem que o solo tem nesta peneira e o teor de umidade que ele possui no momento do ensaio. Este cálculo é feito segundo a Equação 2.4.

$$VA = V \times \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (2.4)$$

Onde:

VA é volume total de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral,

V é volume de azul de metileno adicionado à suspensão durante o ensaio, P₂₀₀ é

porcentagem que o solo possui na # 0,074 mm (peneira #200), e w é teor de umidade do solo.

A Figura 5 apresenta ábaco para a identificação dos argilominerais presentes na fração fina do solo analisado. Os argilominerais presentes na fração argila do solo são podem ser pouco ativos, ou ainda, laterizados. Ativos, podendo ser uma combinação de argilominerais dos grupos das caulinitas e ilitas, por exemplo; Ou muito ativos, devendo ter, em sua fração argila, argilominerais do grupo das montmorilonitas, por exemplo.

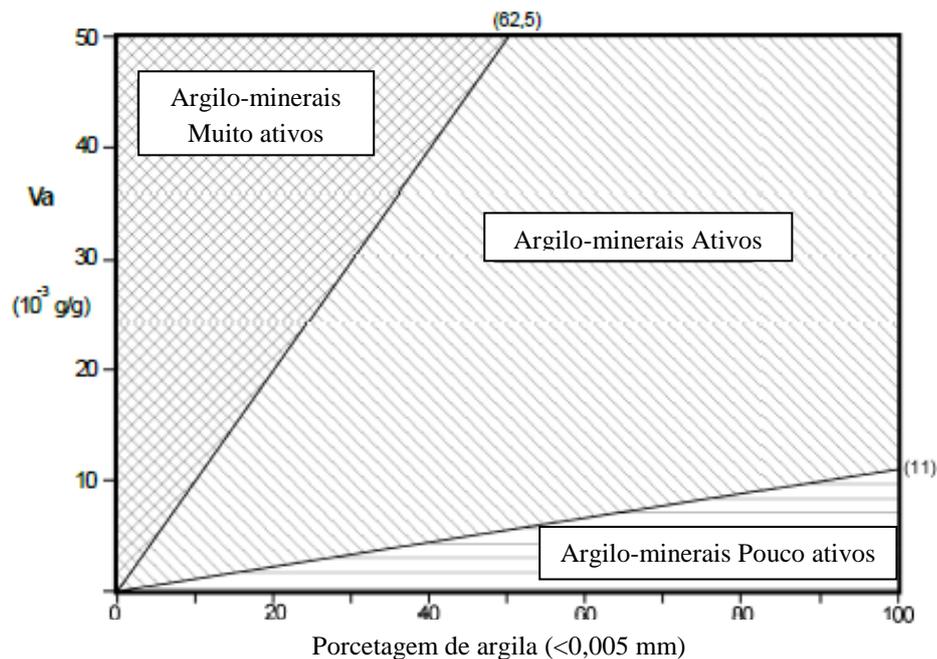


Figura 5 Ábaco para caracterização da atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).

Fabbri (1994) aponta que existe uma boa concordância (em torno de 82%) entre os graus de atividade, determinados pela adsorção de azul de metileno, e a previsão de comportamento dada pelas classes de solos da classificação MCT, apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 Atividade dos argilominerais em função do coeficiente de atividade (FABBRI, 1994).

Coeficiente de atividade (CA) (10^{-3}g/g)	Atividade dos argilominerais presentes no solo	Comportamento Laterítico segundo MCT
CA < 11	Pouco Ativos	Comportamento Laterítico
11 < CA < 80	Ativos	Não laterítico
CA > 80	Muito Ativos	Não Laterítico

Dutra (2014) ao realizar a pesquisa acerca de solos lateríticos da África, do Brasil, e da Índia, concluiu-se que as laterita não são todas iguais, apesar de apresentarem algumas características comuns.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO *IN SITU* EM REGIÕES CRÍTICAS

Conforme Gersonuis & Egyed (2012) antes, durante e depois da inundação, a qualidade da infraestrutura da estrada é fundamental. O problema é que os materiais tradicionais não consolidados possuem maior susceptibilidade à erosão, enquanto os materiais consolidados estão propensos à ruptura quando as camadas inferiores sofrem erosão. Estudos sobre estabilização *in situ* de subleito com cinzas volantes e cimento (KOLIAS *et al.*, 2005) mostraram considerável o efeito benéfico mesmo em subleito de baixa capacidade de suporte, com redução na espessura final do revestimento asfáltico.

A técnica de estabilização do solo *in situ* apresenta-se relevante ao ponderar as condicionantes regionais. Ao utilizar o próprio material do subleito na estabilização de base, há uma redução no custo da construção e na exploração de jazidas e bota-foras, conduzindo a benefícios ambientais e desenvolvimento sustentável (VOROBIEFF, 1998 e MICHENER, 2008).

As propriedades dos materiais estabilizados com cimento são fortemente determinadas pela natureza da matéria-prima utilizada que pode ser argila, silte, areia ou pedregulho. O tipo de solo influencia na escolha apropriada do estabilizante e controla as propriedades estruturais do produto final estabilizado. Em grande parte, a variabilidade das propriedades do solo é fortemente atribuída à distribuição granulométrica das partículas, formato dos grãos, arranjo das partículas e sua composição mineralógica (MOLENAAR, 2010).

Estruturas de solo-cimento estão propensos à retração hidráulica principalmente com a perda de umidade durante a hidratação do cimento ou variação de temperatura. O acúmulo de trincas, provocado pela retração, podem acelerar os danos ao pavimento, processos erosivos e consequente redução da resistência e durabilidade da camada de base.

Em termos construtivos, a estrutura do pavimento de solo *in situ* estabilizado é estabelecida por duas camadas, uma de base estabilizada com cimento e aditivo com espessura variável e outra de revestimento asfáltico (Figura 6). Em função das características do solo e do tráfego estimado, a estrutura deverá ser capaz de absorver e reduzir todas as solicitações de cargas a uma magnitude que possa ser suportada pelo subleito. Quando a camada superior tem um módulo de elasticidade muito superior, as tensões que ocorrem na camada inferior ficam muito reduzidas e são distribuídas lateralmente, caracterizando o efeito de laje (PINTO, 2006). Conforme ilustrado na Figura 6, para que não surjam trincas no revestimento, é necessário

manter deflexão, D , abaixo de um valor máximo, D_{adm} , e o raio de curvatura, R , do pavimento, acima de um certo valor mínimo.

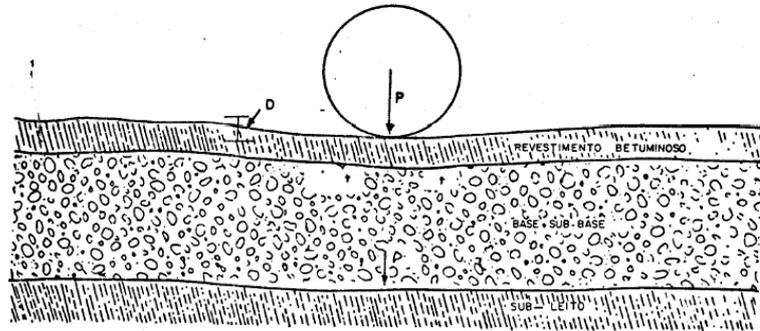


Figura 6 Efeito da carga sobre um pavimento flexível (DNER, 1979).

2.4 UTILIZAÇÃO DO ADITIVO DE ZEÓLITOS SINTÉTICOS

A adição de aditivo a base de zeólitos sintéticos conjuntamente com cimento para estabilização de solo *in situ* modifica a dinâmica do processo de hidratação cimentícia em uma escala nanométrica, melhorando os processos de formação da microestrutura cristalina, troca iônica, absorção e imobilização de compostos potencialmente nocivos em solos que, em uma abordagem tradicional, precisariam ser removidos ou descartados a um custo significativo, tornando-os, assim, materiais relevantes e adequados para serem usados na construção de estradas (WU, 2015).

Em estudos com zeólitos sintéticos Marjanovic *et al.* (2009) desenvolveram o produto denominado ROADCEM, indicando que, para aplicação em bases estabilizadas de solo de subleito e cimento para fins de pavimentação, este aditivo é usado em baixa dosagem, de 1,2 a 2,4 kg/m³. A dosagem do aditivo pode ser aumentada baseado nas condições locais, tais como as características do solo, tempo para abertura do tráfego e condições climáticas durante a construção.

Segundo Marjanovic *et al.* (2009), valores típicos do coeficiente de Poisson para materiais estabilizados com cimento e RC variam em torno de 0,2 e 0,3 sendo geralmente utilizado o valor de cálculo 0,25. Projetando conforme um pavimento flexível, o mecanismo normatizado de falha é dado pelo surgimento de deformações na região inferior da camada estabilizada que ocorrem em função do tráfego.

Em áreas com risco de inundações, pavimentos tradicionais têm elevado custo devido aos danos associados, forçando o governo a adotar políticas reativas ao invés de políticas proativas, que pode ser entendido pela realização da manutenção somente após danificação total da estrada. Já em estruturas com base de solo-cimento-RC, adequadas para estas regiões, a política proativa se torna uma possibilidade, conduzindo a uma rede de estradas mais

confiáveis, especialmente após a inundação (GERSONUIS & EGYED, 2012) e oferece uma enorme vantagem econômica ao longo do tempo (Figura 7).

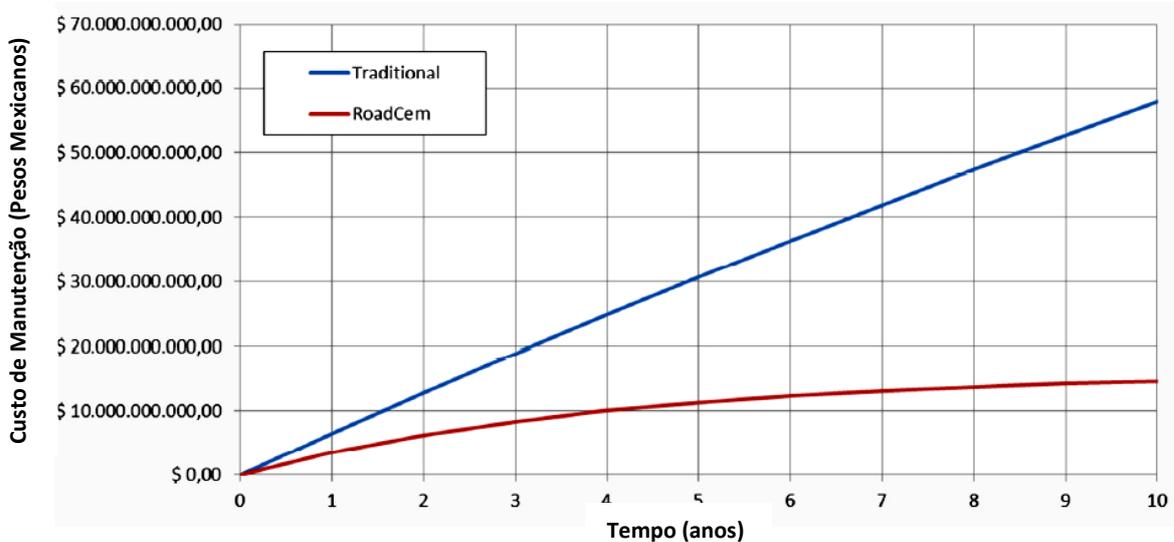


Figura 7 Custo de Manutenção Pavimento Tradicional vs Pavimento Solo-cimento-RC em função da idade do pavimento (GERSONUIS e EGYED, 2012).

2.5 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE SOLO-CIMENTO-RC

Os zeólitos sintéticos permitem que a água penetre profundamente nas partículas de cimento promovendo uma reação de hidratação adicional em seu núcleo que, geralmente, não reage completamente em função de uma barreira de gel hidratado formado inicialmente nas regiões periféricas. Esta característica aumenta a resistência, rigidez e flexibilidade de compósitos como solo-cimento (Figura 8) e melhoram o desempenho geral das camadas estabilizadas de pavimento (MARJANOVIC *et al.*, 2009; WU, 2015; e MUTEFPA, 2010). No estado do Amazonas testes foram realizados em solos argilosos comprovando-se o ganho de resistência mecânica quando utilizado RS em sua composição (NOGUEIRA *et al.*, 2015; FERNANDES, MENDES & FROTA, 2017). A quantidade de água livre aprisionada dentro do compósito é reduzida e os cristais crescem nestes espaços vazios. A porosidade reduzida e a matriz estrutural cristalina mais densa aumentam a resistência à compressão, flexão e ruptura do produto (RAKI & ALIZADEH, 2009).

Apesar do RC apresentar-se como um material promissor no melhoramento das propriedades mecânicas do solo, é importante verificar sua manutenção de resistência quando condições ideais de execução e cura não são garantidas. O ensaio RCNC é amplamente utilizado para avaliar a resistência mecânica destes materiais. Modelos de estimativa de RCNC de solos estabilizados com cimento são utilizados para prever o seu comportamento mecânico (CONSOLI *et al.*, 2007).

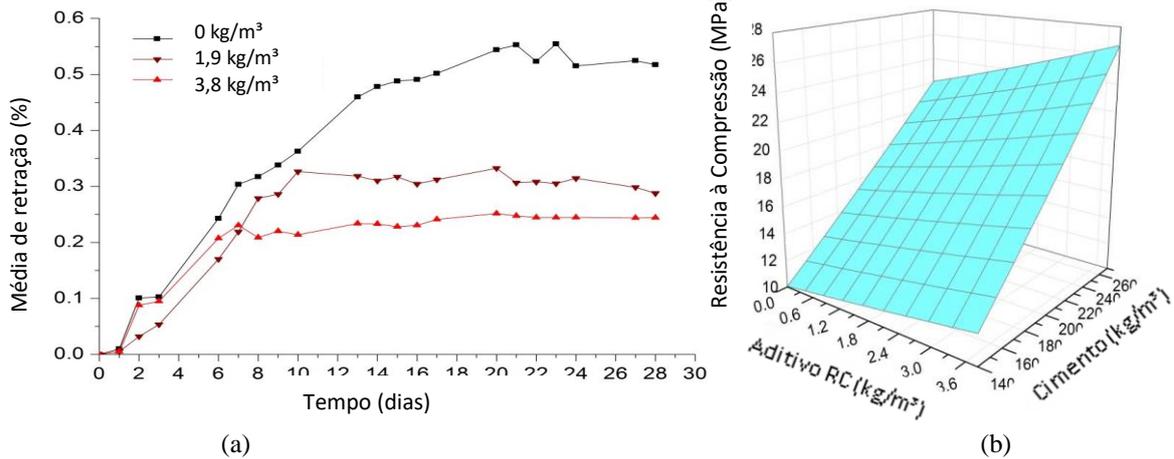


Figura 8 Efeito do RC na redução de retração (a) e no ganho de resistência à compressão (b) em função da dosagem (WU, 2015).

Estruturas de pavimento estão sujeitas a tensões de tração em função dos carregamentos gerados pelo tráfego. Assim, para verificação do efeito de resistência à tração do material, o ensaio RTCD apresenta-se como um método adequado para identificação na alteração da resistência à tração. Montardo (1999) realizou ensaio de RTCD e triaxiais drenados para avaliar o efeito da inclusão de três tipos de fibras (polipropileno, vidro e PET) e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra, concluindo que a influência da inclusão de fibra sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades mecânicas da fibra e da matriz.

Dado a possibilidade de realizar pavimentos rígidos sem revestimento asfáltico (tornando-se uma camada externa diferente da camada de base ou sub-base que se encontra protegida), o revestimento primário encontra-se submetido à ação das condições climáticas do ambiente em que é construído, nesse sentido é necessário analisar a sua resistência diante dos agentes externos que atuam sobre ele. Pereira (2005) aponta que resistência dos solos à erosão e ao desgaste é uma característica extremamente desejável quando se pensa em construção de pavimentos rodoviários. Lima *et al.* (1993), definem a durabilidade sendo a capacidade de um material manter a sua integridade quando submetido a ação de agentes externos.

Walker (1995) apresentou dados experimentais fornecendo uma visão importante das relações entre o teor de cimento, as propriedades do solo e as características físicas dos blocos de solo estabilizados, indicando que tanto a resistência saturada quanto a durabilidade dos blocos de solo estabilizados com cimento são melhoradas pelo aumento do teor de cimento e prejudicado pelo teor de argila (Figura 9). No Brasil, a norma utilizada para realizar o ensaio

de durabilidade (ABNT, 1996) estabelece seis (06) ciclos de da escovação por fios de aço, molhagem e secagem, avaliando a perda de peso do material estabilizado com cimento.

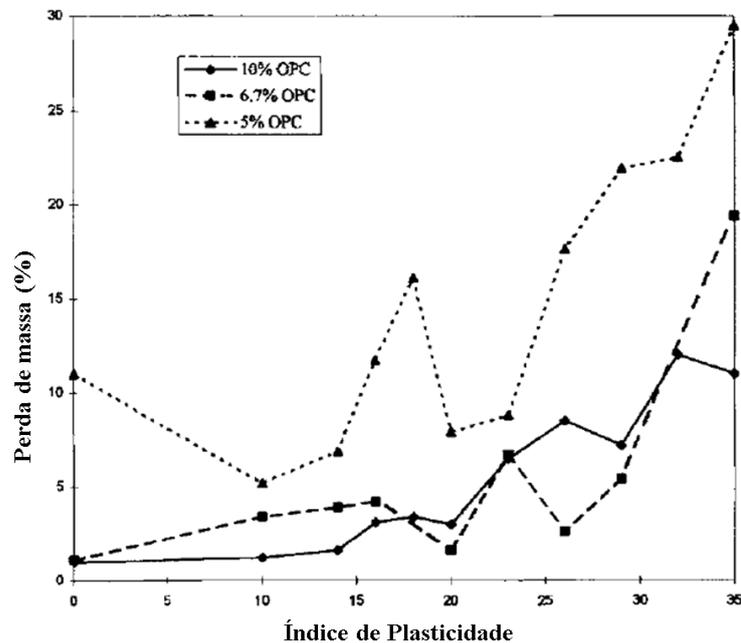


Figura 9 Relação entre a durabilidade e o índice de plasticidade (WALKER, 1995).

Quanto à retração hidráulica, o solo estabilizado com cimento é suscetível ao encolhimento causado pela perda de umidade durante a hidratação ou uma diminuição da temperatura. À medida que a camada de base estabilizada retrai, devido ao atrito com as camadas subjacentes, tensões de tração ocorrem. Ao passo que esforços devido à retração excede a resistência à tração do material base, fissuras podem surgir. As fissuras de encolhimento que se desenvolvem na base da estrada podem refletir através da camada superficial superior, resultando em fissuras transversais visíveis. Melorose *et al.* (2010) atribuiu o grau de agravamento da retração aos seguintes fatores:

- a) Variação da umidade durante o período de cura;
- b) A contração do material quando a temperatura cai;
- c) A restrição imposta na base pela sub-base ou subleito;
- d) Propriedades de tração durante cura do solo-cimento.

O padrão de fissura das camadas de base estabilizadas é estimado por um método mecânico, considerando o desenvolvimento do esforço de tração devido a fatores internos e ambientais e ao desenvolvimento da resistência à tração do próprio material. O tempo de ocorrência das fissuras transversais, o espaçamento entre as fissuras e o desenvolvimento da largura das fissuras são estimados e analisados em relação à taxa de RC, ao método de cura, às

cargas sofridas, ao tempo de construção, ao atrito e à amplitude da variação diária de temperatura.

A avaliação de novos materiais exige um número de informação bastante detalhado da características microestruturais que pode ser observado através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Guedes, (2013) salienta que onde existe o desenvolvimento de novos materiais, também existe a necessidade de uma MEV para as observações micro estruturais.

Na engenharia, o MEV pode ser aplicado para análises de morfologia e identificação de fases com números atômicos distintos, identificação/composição química de fases presentes em uma amostra, estudos de liberação de minérios (conjugado com sistemas de análise de imagens), análise micromorfológica, incluindo estudos de fratura, morfologia de pós, etc. No caso processo de hidratação dos grãos de cimento observados pelo MEV, Scrivener (1989) o apresenta em três estágios, onde as reações que ocorrem e suas velocidades variam muito (Figura 10).

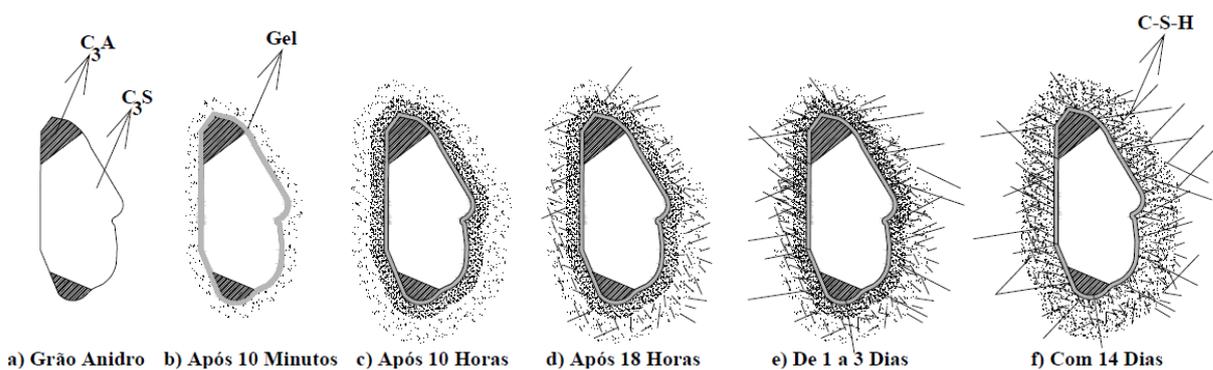


Figura 10 Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland (Fonte: SCRIVENER, 1989).

2.6 INTERFERÊNCIA DA UMIDADE E CONDIÇÃO DE CURA

A avaliação do desempenho mecânico de materiais estabilizados com cimento estão diretamente ligados à taxa e tipo de cimento, tipo de solo, método, umidade e grau de compactação, teor de umidade durante a compactação, qualidade da mistura, bem como o regime de cura (ACI, 1990). Um importante fator para atingir bons resultados de resistência de solo-cimento compactado é manter o teor ótimo de umidade durante a compactação, essencial para atingir a densidade máxima seca e permitir a hidratação cimentícia.

Yoon & Abu-Farsakh (2009) examinaram os efeitos do teor de umidade e da relação água/cimento na RCNC aos 7 dias apresentando uma correlação positiva com o teor de umidade no ramo seco. Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão não-confinada de um solo residual de calcário, compactado segundo uma larga

faixa de teor de umidade. Os resultados indicam que houve aumento da resistência à compressão não-confinada, principalmente para teores de umidade próximos a ótima e no ramo úmido da curva de compactação. Entende-se que a água necessária para correta compactação é também a quantidade adequada para reação de hidratação considerando que a mesma não é perdida durante a cura. A influência do teor de umidade está mais relacionado com a trabalhabilidade e compatibilidade dos materiais utilizados para obter uma mistura homogênea do que a necessidade de água para hidratação.

De modo geral, técnicas de estabilização tradicionais muitas vezes exigem longos tempos de cura e quantidades relativamente grandes de aditivos para melhorar significativamente a resistência. Tingle (2003) avaliou a estabilização de argila com aditivos tradicionais e não tradicionais para diferentes regimes de cura observando que os resultados dos ensaios de RCNC secos foram significativamente maiores do que os resultados de RCNC submersos para todos os CPs testados (Figura 11), sendo que o cimento e a cal foram efetivos na estabilização da argila de baixa plasticidade sob condições de teste molhadas, mas a cal foi relativamente ineficaz na estabilização da argila de alta plasticidade com base em critérios de melhoria da força.

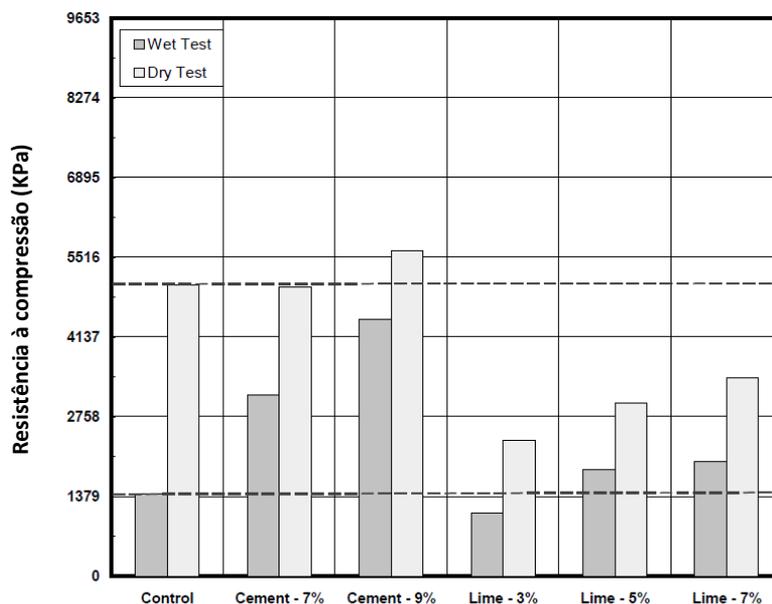


Figura 11 Resultados de ensaio para o solo argiloso estabilizado com cimento portland de Tipo I e cal hidratada por tipo de cura (TINGLE, 2003).

A alteração no estado da cura investigada por BAHAR (2004) na resistência de amostras de argilas moderadamente plásticas tipo A-6, conforme classificação AASHTO, com 5% de cimento indicou que amostras imersas em água por 48 horas tiveram sua resistência

reduzida quando comparadas a amostras secas, já que a imersão reduz a ligação entre as partículas.

A temperatura de cura também influencia na sua resistência, temperaturas elevadas aceleram o processo de hidratação cimentícia, contudo o produto formado tende a ser mais frágil (Figura 12). Para regiões frias, com temperaturas abaixo de zero, a resistência à compressão não se altera, segundo Sato, Nishimoto & Suzuki (2006).

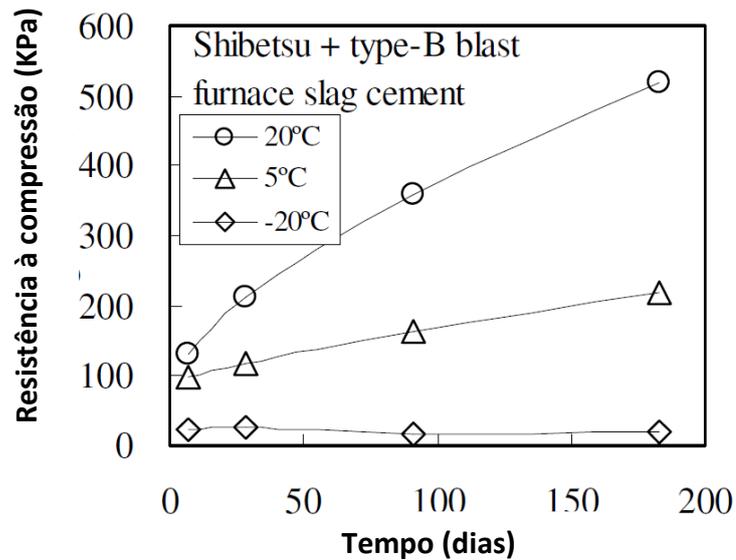


Figura 12 Alterações na resistência à compressão não-confinada para diferentes temperaturas de cura, durante 180 dias (SATO, NISHIMOTO & SUZUKI, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa busca investigar as alterações das propriedades mecânicas de um solo fino estabilizado com cimento a diferentes taxas de RC quando sujeito a condições críticas encontradas em regiões amazônicas. O programa de ensaios foi desenvolvido de tal maneira que foi correlacionado as propriedades do solo-cimento em diferentes taxas de aditivo com diferentes condições de cura e umidade durante a moldagem das amostras.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo Tropical

O solo estudado foi coletado nos bordos da estrada vicinal no KM-53 da rodovia AM-010, no município de Manaus, Amazonas (Figura 13). O aspecto pedológico é característico de solo do tipo latossolo, predominantemente constituídos por finos do tipo caulinita, que são, geralmente, revestidas por sesquióxidos de ferro ou alumínio.



Figura 13 Coleta do solo no trecho do estudo de caso.

Foram realizados ensaios para sua caracterização geotécnica para emprego em pavimento; a caracterização químico-mineralógica, avaliando suas propriedades microestruturais; as propriedades físico-químicas e a caracterização pelo sistemática MCT.

3.1.1.1 Caracterização Geotécnica

As características geotécnicas do solo, segundo as normas nacionais, estão discriminadas no Quadro 3. Os ensaios foram realizados no laboratório LAPAV/UFAM, seguindo as condições discriminadas em norma específica.

Quadro 3 Propriedades geotécnicas do solo.

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS	NORMAS	SOLO
Teor de argila (%)	NBR 7181 (ABNT, 2016a)	8,7
Teor de silt (%)	NBR 7181 (ABNT, 2016a)	54,95
Teor de Areia (%)	NBR 7181 (ABNT, 2016a)	36,35
Teor de Orgânico	NBR 13600 (ABNT, 1996)	0,62
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b)	30,50
Índice de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)	10,19
Índice de Grupo	AASHTO	4,46
Classificação do solo	USCS, AASHTO	CL, A-4
Pedologia	Sistema Brasileiro de Classificação De Solos (SiBCS)	Latossolo vermelho
Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	NBR 6458 (ABNT, 2016f)	2,63
Umidade ótima – Energia Modificada (%)	NBR 7182 (ABNT, 2016d)	12,4
Densidade máxima seca – Energia Modificada (g/cm ³)	NBR 7182 (ABNT, 2016d)	1,95
Umidade ótima – Energia Intermediária (%)	NBR 7182 (ABNT, 2016d)	12,6
Densidade máxima seca – Energia Intermediária (g/cm ³)	NBR 7182 (ABNT, 2016d)	1,94
ISC – Energia Intermediária (%)	NBR 9895 (ABNT, 2016e)	31,13
Expansão (%)	NBR 9895 (ABNT, 2016e)	0,03
Índice de Compressão	(PINTO, 2006)	0,18
Índice de atividade das argilas	(PINTO, 2006)	1,17

A análise granulométrica foi determinada método de espalhamento à laser pela realizado no Laboratório de Análises Minerais - LAMIN do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com adição de 20 ml de NaOH 0,1M, sem ultrassom, representado na Figura 14.

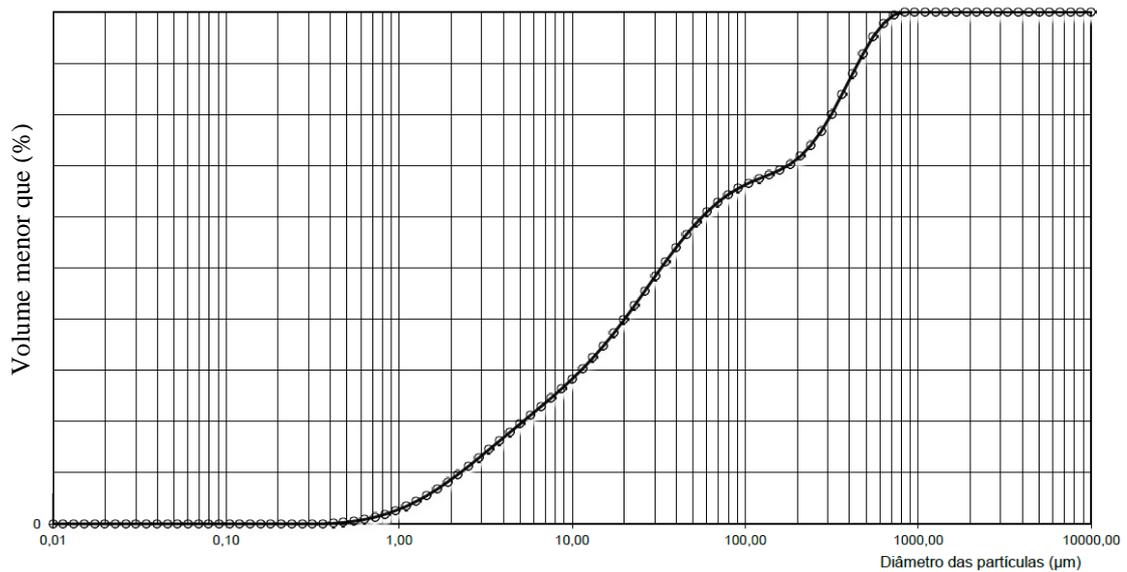


Figura 14 Distribuição granulométrica do solo pelo método de espalhamento à laser.

A classificação do solo segundo AASHTO e Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS), definiram o solo como A-4 e CL, ou argila pouco plástica. Com ISC menor que 60, não sendo recomendado para execução de base de pavimentação. O índice de atividade indicou uma argila normal (entre 0,75 e 1,25) e a Figura 15 apresenta as curvas de compactação nas duas energias ensaiadas com a indicação da curva de saturação.

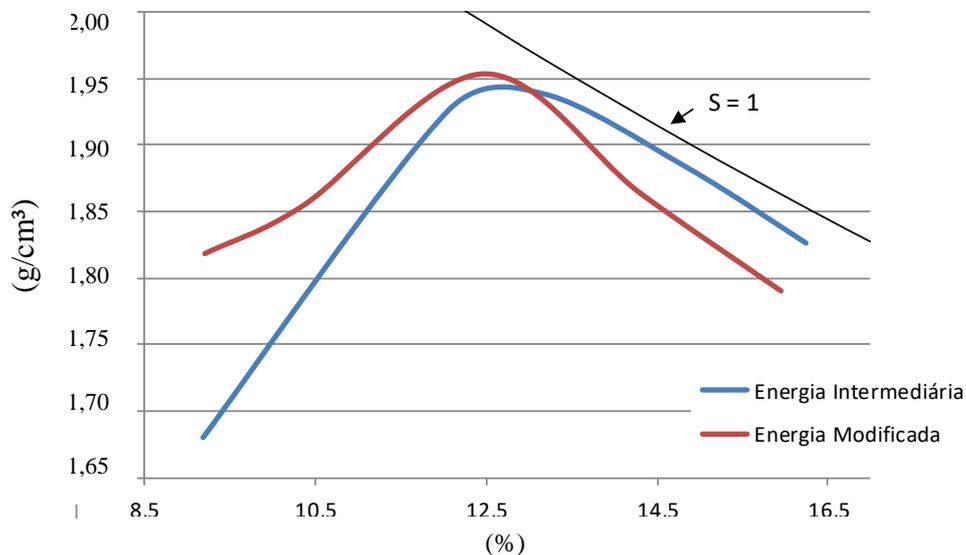


Figura 15 Curva de compactação do solo.

3.1.1.2 Caracterização Químico-Mineralógica

Os principais compostos químicos são descritos no Quadro 4 como resultado da análise de Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) por energia dispersiva realizadas no Laboratório de Ensaios Físico-Químicos/FT/UFAM. Para amostra de solo passante na peneira

#200, utilizou-se do Espectrômetro PANalytical, modelo EPSILON 3 XL, de tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e uso de Gás Hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²).

Dada a informação foi calculado os índices de intemperização, K_i e K_r , segundo equações 2.1 e 2.2, apresentadas no capítulo anterior. O valor de K_i e K_r encontrados foram 1,92 e 1,81, respectivamente, caracterizando-o como solo tropical do tipo latossolo ($K_i > 1,33$), altamente intemperizados ($K_i < 2,0$), contudo próximo do limite transicional. Já o índice $K_r > 0,75$ demonstra que a amostra é essencialmente caulinitica.

Quadro 4 Composição química do solo.

ÓXIDO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ti	Outros
TEOR (%)	49,721	44,095	4,164	1,145	0,317

A análise da difração por raios-X (DRX), para a mesma amostra, é apresentada na Figura 16. Os difratogramas de raios-X foram obtidos com o 2θ variando de 10 e 80 °, tubo de raios X de cobre, fenda de 3mm, Soler de 2,5 graus com varredura de 30 kv e 10 Am, utilizando-se do equipamento Shimadzu XRD-6000 pertencente ao Laboratório de Nanotecnologia do Instituto Federal do Amazonas (IFAM). Os resultados indicaram que o solo contém predominantemente cristais de quartzo com presença de argilominerais de caulinita. Devido ao elevado grau de intemperização ocorrente nos solos tropicais, Oliveira (2001) sugere que a presença de caulinita ocorre em função do processo de formação de solos tropicais onde prevalece o processo intempérico de hidrólise parcial (monossilização), ocorrendo alta remoção da sílica, formando argilominerais do tipo 1:1 (e.g caulinita) e óxidos/hidróxidos de Fe, Al e Mn.

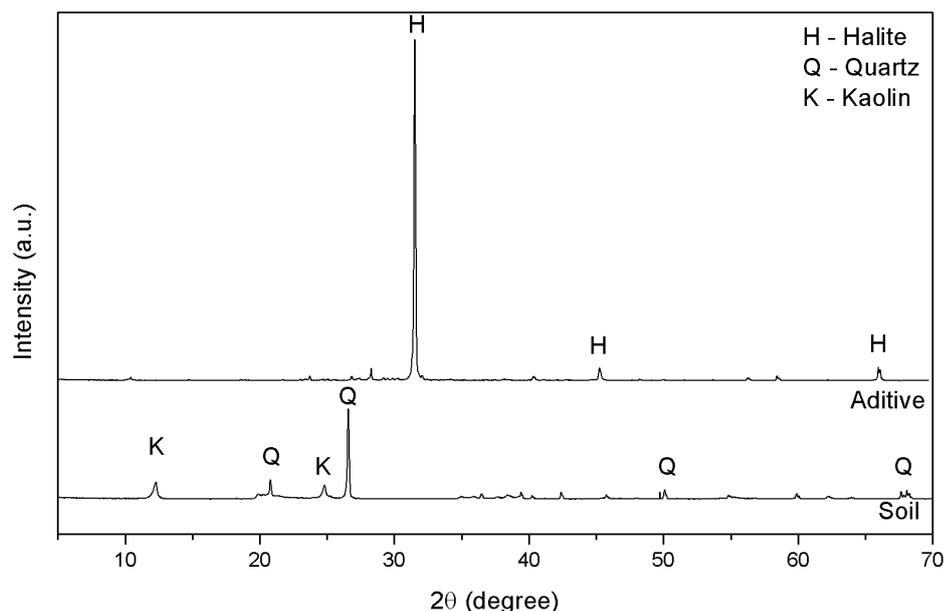


Figura 16 Espectro de difração de raios-X para amostras de solo natural e aditivo RC.

Ressalta-se que a composição química e a classificação pedológica anteriormente citadas tem caráter qualitativo no âmbito geotécnico. Ensaio adicionais, como a determinação de propriedades físico-químicas e, sobretudo, a classificação MCT, são determinantes para a distinção do comportamento laterítico, transicional e não laterítico dos solos.

3.1.1.3 Propriedades Físico-Químicas

As propriedades físico-químicas foram obtidas por meio da determinação do teor de orgânico, pH, Superfície Específica e Capacidade de Troca Catiônica. A porcentagem de matéria orgânica no solo foi quantificada por meio do Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C, de acordo com a ABNT (1996). O ensaio de determinação do pH do solo foi realizado no Laboratório de Físico-Química no Instituto de Ciências Exatas (ICE) da UFAM, em solução com H₂O milli-q, com auxílio de potenciômetro modelo QUIMIS aferido em soluções padrão de pH 4,00 e pH 7,00 (Vettori, 1969).

As determinações de SE e CTC foram realizadas com solo passante na #10, no Laboratório de Geoquímica/ICE/UFAM, segundo metodologia de adsorção de azul de metileno descrita em Gomes (2002). Para VA e CA, foi seguido Fabbri (1994). O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 5 Propriedades químicas do solo.

ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICAS	REFERÊNCIAS	SOLO
Fração menor que 0,005 mm (%)	NBR 7181 (ABNT, 2016a)	19,50
pH H ₂ O milli-q	(VETTORI, 1969)	5,39
Teor de Orgânico (%)	NBR 13600 (ABNT, 1996)	0,62
SE (m ² /g)	(GOMES, 2002)	28,8
CTC (meq/100g)	(GOMES, 2002)	20,03
VA (10 ⁻³ g/g)	(FRABBRI, 1994)	1,27
CA (10 ⁻³ g/g)	(FRABBRI, 1994)	10,25

O pH ácido de 5,39, típico dos solos do Amazonas, indica um solo com maior floculação. O ensaio de perda de massa por aquecimento a 440°C, obteve valor de 0,62%, apresenta baixo teor de matéria orgânica, característico de latossolos.

O ponto de viragem do ensaio de SE é atingido quando o líquido sobrenadante passa de incolor a corado com tonalidade azul claro, é utilizado 0,5 mL de solução de azul metileno 0,01 M para cada tubo de ensaio. Já o ponto de viragem do CTC é dado quando o halo azul pálido permanece após 25 minutos do gotejamento da solução do material com 2 mL de azul metileno. Para ambos os casos, a viragem ocorreu na primeira tentativa.

Os resultados indicaram novamente um solo com caráter transicional, sendo que quanto maior o CTC, maior a capacidade de armazenamento de cátions. A Figura 17 apresenta o ábaco para caracterização da fração argilosa. Sua posição na parcela de Argilominerais pouco ativos denotam um comportamento laterítico. Contudo sua proximidade com a linha de transição para argilominerais ativos indica o estado transicional deste solo. O valor CA menor que 11 representa uma argila pouco ativa e comportamento laterítico (FABBRI, 1994).

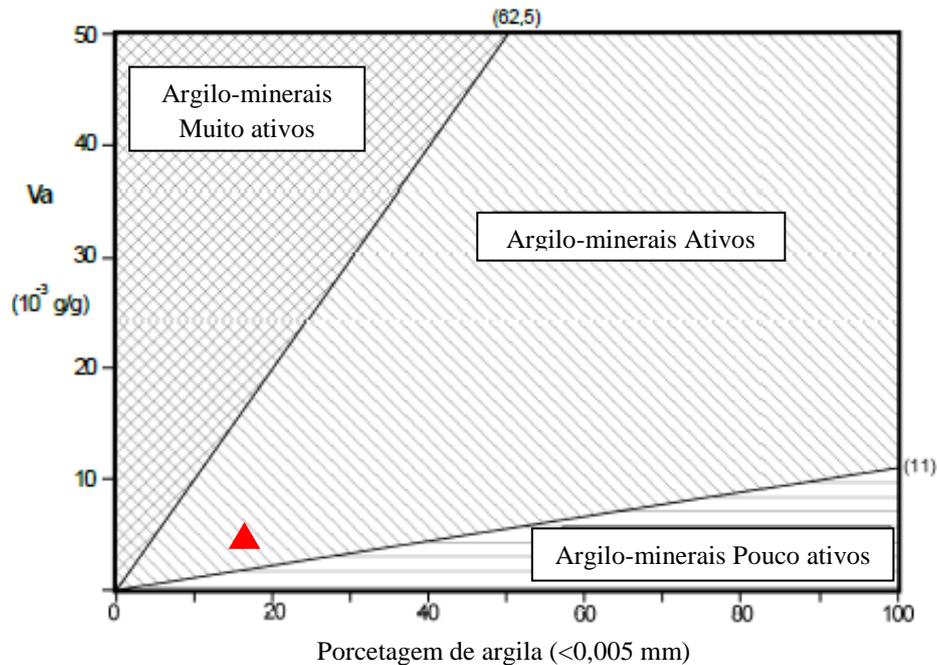


Figura 17 Localização do solo no ábaco para caracterização da fração argila.

3.1.1.4 Classificação MCT

Os ensaios para classificação segundo a metodologia MCT foram realizados no Laboratório de Pavimentação/FT/UFAM, para o solo alvo do estudo com corpos de prova de 50 mm de diâmetro. Estes podem ser divididos em duas etapas: a compactação Mini-MCV e a perda por imersão. Os procedimentos adotados seguiram as normas apresentadas no Quadro 6, que também apresenta seus principais resultados.

Resumidamente, o ensaio de compactação denominado Mini-MCV (*Moisture Condition Value*) consiste na aplicação de energias crescentes de compactação em corpos de prova de 50 mm de diâmetro e 130 mm altura. Isto permite calcular as massas específicas e desenhar uma família de curvas de compactação para várias energias, com os mesmos corpos de prova, obtendo-se assim o parâmetro d' . Também obtém-se as curvas de deformabilidade,

que permitem calcular o parâmetro c' da classificação MCT (Figura 18). O parâmetro c' elevado ($>1,5$) caracteriza solos argilosos plásticos.

Quadro 6 Parâmetros para classificação MCT.

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS	MÉTODOS UTILIZADO	SOLO
c'	Mini-MCV- DNER-ME 258/94 (DNIT, 1994b)	1,72
d'		70,6
e'	Perda de Massa por Imersão- DNER-ME 256/94 (DNIT, 1994a)	1,14
P_i		120
Classificação MCT	Classificação de Solos Tropicais em Equipamento em Miniatura- DNER-CLA 259/96 (DNIT, 1996)	LG'
Classificação MCT-M	Vertamatti (1988)	TA'G'

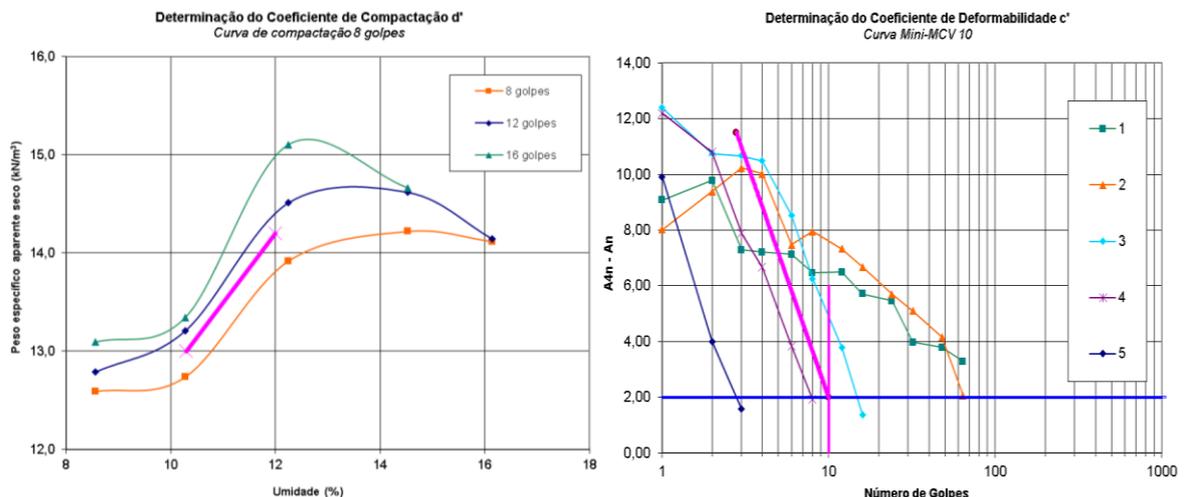


Figura 18 Gráficos de determinação dos coeficientes c' e d' .

O ensaio de perda de massa por imersão foi desenvolvido para distinção entre os solos lateríticos e não lateríticos, cujo limite é definido pelo índice e' . Neste procedimento, o corpo de prova proveniente do ensaio de compactação é submerso em água na posição horizontal (com 10 mm extrudido do molde) por um período de 24 horas. Com a perda de massa por imersão em função da compactação mini-MCV, para cada corpo de prova, foi possível obter o valor de P_i de 120, indicando um comportamento fracamente laterítico.

Após a obtenção dos parâmetros classificatórios e' e c' obtidos dos ensaios mini-MCV e de perda de massa por imersão, obteve-se a classificação MCT para o solo caracterizado como LG' (Figura 19). Para Villibor & Nogami (2009), esta classificação veio permitir a verificação do comportamento laterítico dos solos e dar subsídios à avaliação das propriedades

mecânicas e hídricas dos solos típicos dos climas tropicais úmidos, uma vez que os lateríticos exibem propriedades peculiares como elevada resistência, baixa expansibilidade e plasticidade.

A proximidade do ponto obtido com a linha de transição de solo laterítico para não-laterítico exige uma análise mais profunda sobre seu real comportamento. Vertamatti (1988) observou um novo padrão preponderante de comportamento tecnológico e à inferência da natureza quartzífera das frações siltes presente, o que o conduziu à estruturação de novos grupos classificatórios, notadamente o dos solos transicionais. O ábaco assim restruturado mostrou-se potencialmente favorável para representar e distinguir a natureza genética de solos amazônicos, dentro do universo considerado. Na Figura 20 é possível identificar a nova classificação TA'G' do solo em análise.

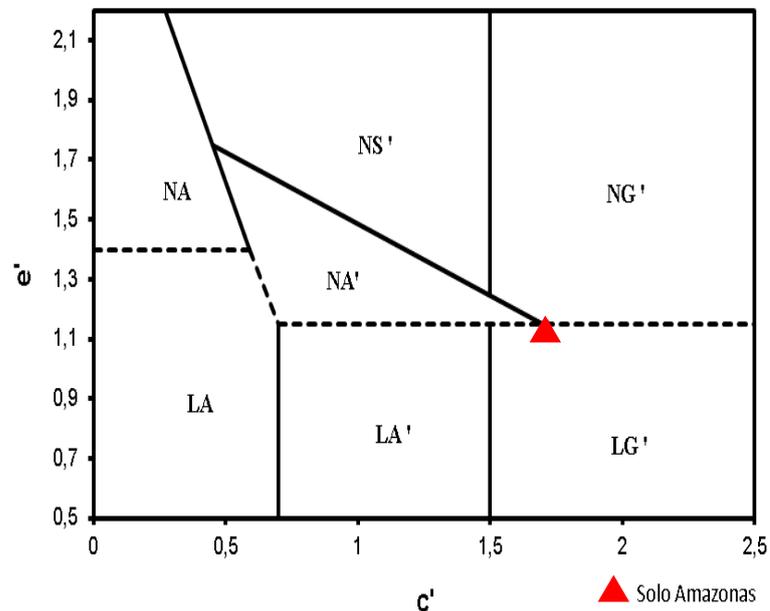


Figura 19 Posição do solo na tabela de Classificação MCT (VILLIBOR & NOGAMI, 2009).

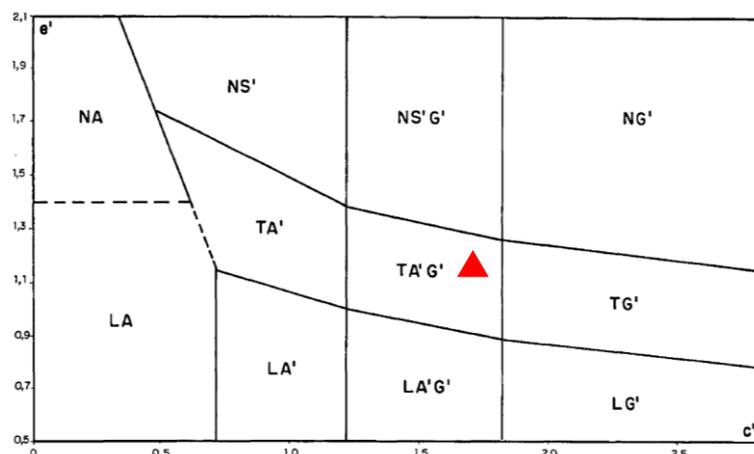


Figura 20 Posição do solo no ábaco de classificação MCT proposto por Vertamatti (1988).

Conclui-se que o solo estudado é um solo tropical residual jovem, com características de solo laterítico em transição, com argilominerais pouco ativos, sendo estas características altamente representativas para o estado do Amazonas.

3.1.2 Aditivo Roadcem® (RC)

O aditivo utilizado, denominado Roadcem®, é um material de elevada finura de cor acinzentada inodoro. Segundo o fabricante, possui com massa específica de aproximadamente 1,100 kg/m³, pH entre 10-12 (em água, a 20 °C) e solubilidade em água é 260 g/l em 20 °C. Segundo Wu (2015), sua composição química é composta principalmente por:

- a) Metais alcalinos e metais alcalino-terrosos (60-80%, em massa), incluindo cloreto de sódio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio;
- b) Zeólitos sintéticos e óxidos (5-10%, em massa);
- c) Ativadores (5-10%, em massa).

Com ensaios realizados nos mesmos locais e equipamentos descritos anteriormente, identificou-se a presença de cristais de halita, ou NaCl, por meio de análise DRX, apresentando na Figura 16. Contudo, o ensaio FRX não indicou presença de Sódio. Os principais componentes químicos encontrados estão listados no Quadro 4.

Quadro 7 Composição química do aditivo RC determinada por análise FRX.

ELEMENTO	Cl	Ca	K	Mg	Si	Al	Fe	Br	Outros
TEOR (%)	55,51	25,88	10,03	3,31	1,86	1,43	0,64	0,38	0,96

A análise granulométrica pelo método de espalhamento a laser é representada na Figura 21, com teor de finos de 72,5 % (menor que 0,075 mm). Os valores de D50 e D90 foram 16,8 mm e 250,1 mm, respectivamente.

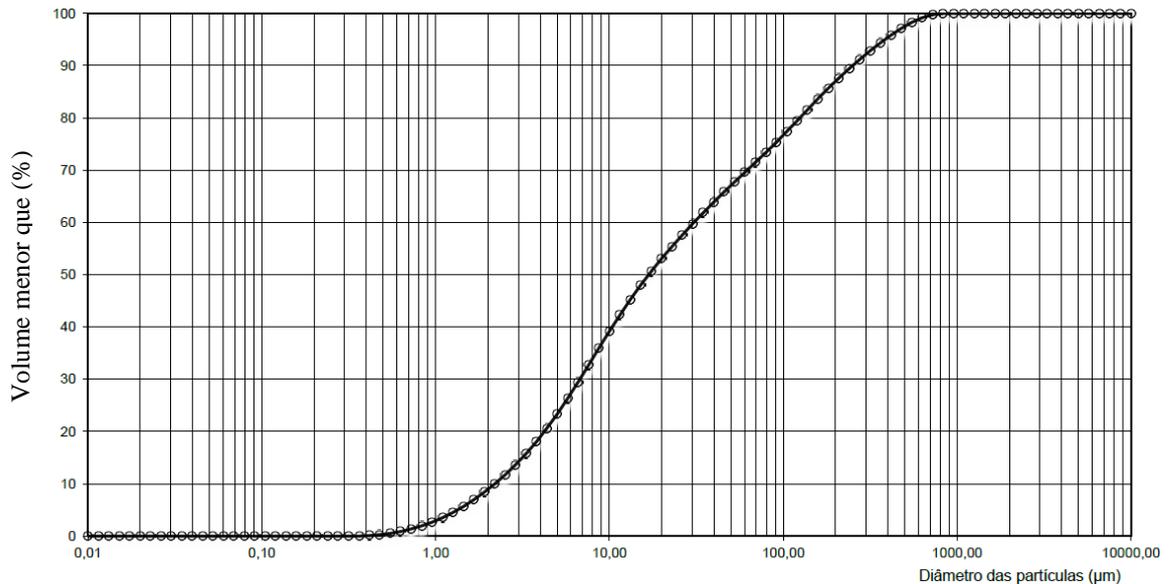


Figura 21 Curva granulométrica do aditivo RC.

3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado foi do tipo Portland Pozolônico resistente a sulfatos, CP II-Z 40 RS. Este tipo de cimento possui em sua constituição 60,69 % de óxido de cálcio e 26,91 % de dióxido de silício, caracterizado pelo maior tempo de cura inicial e uma taxa de desenvolvimento de resistência mais lenta que cimentos Portland tradicionais (TOBERGTE & CURTIS, 1986). O tempo de cura inicial mais longo contribui para garantir tempo suficiente para realização da mistura e compactação das amostras em laboratório.

Utilizando-se dos equipamentos do Laboratório de Qualidade MIZU, realizou-se ensaios que definem as principais propriedades físicas e químicas do cimento dentro dos limites estabelecidos pela ABNT (1992). Os resultados são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 Caracterização do cimento.

Propriedades de Engenharia		Principais componentes químicos (%)	
Área específica (cm ² /g)	4530	SiO ₂	26,91
Massa específica (g/cm ³)	3,02	CaO	60,69
Finura método de Blaine (m ² /kg)	4951	Al ₂ O ₃	2,82
Passante na peneira #200 (%)	0,19	CaOLivre	1,73
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	23,9	MgO	1,15
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	32,5	Fe ₂ O ₃	1,30
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	42,7	SO ₃	2,37
Início de pega (min)	133	Resíduos insolúveis	1,20
Fim de pega (min)	226		
Índice de consistência normal (%)	30,64		
Perda ao fogo (%)	1,90		

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o planejamento do experimento, o qual contempla a definição dos fatores controláveis e das variáveis de resposta bem como um programa de ensaios.

3.2.1 Fatores controláveis

Diversos fatores influenciam o desempenho dos compósitos de solo-cimento (tipo de solo, umidade de compactação, material cimentante, qualidade da mistura, método de compactação, condição de cura, idade) e a inclusão do aditivo RC contribui para manutenção da qualidade da matriz. Embora todos os fatores mencionados sejam importantes, o presente trabalho restringiu-se ao estudo da influência do percentual de aditivo RC, umidade durante a compactação da amostra e condição de cura. A escolha destas variáveis, bem como do seu nível de variação, decorreu da necessidade de delimitação do trabalho, e foi baseada em estudos mencionados no capítulo anterior.

Dentre os fatores: tipo de solo, qualidade da mistura, tempo de cura, percentual de cimento da matriz e tipo de cimento foram mantidos fixos durante a pesquisa. A taxa de cimento utilizada na pesquisa foi fixada em 160 kg/m^3 (8,2%), conforme dosagem sugerida por Gersonuis & Christophe (2012) para solos do tipo argila pouco plástica (CL) não-orgânicos e validados por meio de ensaios de resistência à compressão não-confinada (RCNC) com idades de 3, 7 e 28 dias, definido por mínimo de 5 MPa para 28 dias de cura.

Para os ensaios mecânicos de RCNC e resistência à tração por compressão diametral (RTCD) foram investigados três diferentes taxas de aditivo RC em relação ao solo seco, 0 kg/m^3 (0 %) (-1), $1,7 \text{ kg/m}^3$ (0,087 %) (0) e $3,4 \text{ kg/m}^3$ (0,174 %) (+1), definidos segundo faixa de trabalho identificado em trabalhos com RC (Mutepfa (2010), Ouf (2012), Holmes (2015) e Nogueira *et al.* (2015))

Para cada taxa definida do aditivo foi investigado seu efeito para três condições de acréscimo de umidade na compactação em relação teor de umidade ótima (h_{ot}) do solo de 0 % (0), 30 % (+1) e 60 % (+ α), como forma de representação da dificuldade de campo em compactar dentro da umidade ótima em regiões com chuvas frequentes.

São determinadas três variações das condições de cura imediatamente após a moldagem do CP até o momento da realização do ensaio: úmida (0), submersa (+1) e sob ciclos do ensaio de durabilidade (+ α). A condição de cura úmida é estabelecido por meio de câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%. A condição submersa indica CPs em tanque com água com temperatura regulada. A condição de cura sob ciclos do ensaio de durabilidade é a condição que busca representar as condições de campo em situação

extrema. Esta condição estabelece sete dias de cura em câmara úmida, após esse período, submetidos a seis ciclos de molhagem, secagem e escovação com duração 48 horas para cada ciclo e retornam para câmara úmida até completarem idade de 28 dias.

Os CPs na condição de cura sob ciclos do ensaio de durabilidade ($+\alpha$) foram medidos conforme preconiza o ensaio de durabilidade. Assim, resultados dessa medição são obtidos para as três condições de umidade na compactação e três taxas de aditivo RC indicado.

Na investigação microscópica, por meio do ensaio de microscopia eletrônica por varredura (MEV), apresentou-se imagens de amostras moldados apenas na h_{ot} (0 %) para duas condições de cura: submersa e sob ciclos do ensaio de durabilidade, e nos teores de RC de 0 kg/m^3 (-1) e 3,4 kg/m^3 (+1). As comparações são feitas em 4 aproximações: aumentos de 100, 500, 1500 e 5.000 vezes.

3.2.2 Variáveis de resposta

Variáveis de resposta são grandezas mensuráveis utilizadas para representar as características de qualidade do objeto de estudo. Nos ensaios de RCNC e RTCD, as variáveis de respostas medidas são a resistência à compressão não-confinada, (q_{renc}), a resistência à compressão diametral, (q_{rtcd}). Nos ensaios de durabilidade, as variáveis de respostas são: absorção (A_d) e perda de massa (PM_d).

No Quadro 9, são apresentadas as características de qualidade do solo-cimento-RC e suas respectivas variáveis de resposta. São apresentadas, também, as unidades de medida e os ensaios realizados para avaliar cada característica de qualidade.

Quadro 9 Variáveis de respostas do programa experimental.

Variável Medida	Unidade	Tipo de Ensaio
q_{renc}	MPa	RCNC
q_{rtcd}	MPa	RTCD
A_d	%	Durabilidade
PM_d	%	Durabilidade

Com as microscopias, pretende-se obter respostas sobre a morfologia do compósito solo-cimento-RC e identificar as estruturas cristalinas formadas.

3.2.3 Programa de ensaios

No Quadro 10 é apresentado um resumo do programa de ensaios realizado nesta pesquisa. Para garantir a segurança nos resultados dos ensaios, pelo menos três amostras foram preparadas para cada teste, sendo que seu resultado deve pertencer ao intervalo de aceitação proposto pela ABNT (1992b) de no máximo 10 % do valor da média. Para os CPs submetidos

ao ciclo de durabilidade, adicionou-se um CP, não submetido à escovação, e verificação da variação de volume do CP.

A moldagem e os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação LAPAV da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Foram necessários 422 quilos de solo para moldagem 192 CPs, incluindo aqueles fora do intervalo de aceitação.

Quadro 10 Codificações das amostras.

RCNC	RTCD	Código	Dosagem RC (kg/m ³)	Acréscimo na h _{ot} (%)	Condição de cura	Teor RC (kg/m ³), Acréscimo na h _{ot} (%), Condição de cura
3	3	RC ₋₁ TUO ₀ CC ₀	-1	0	0	(0, 0, úmida)
3	3	RC ₋₁ TUO ₀ CC ₊₁	-1	0	+1	(0, 0, submersa)
4	4	RC ₋₁ TUO ₀ CC _{+α}	-1	0	+α	(0, 0, ciclo durabilidade)
3	3	RC ₋₁ TUO ₊₁ CC ₀	-1	+1	0	(0, 30, úmida)
3	3	RC ₋₁ TUO ₊₁ CC ₊₁	-1	+1	+1	(0, 30, submersa)
4	4	RC ₋₁ TUO ₊₁ CC _{+α}	-1	+1	+α	(0, 30, ciclo durabilidade)
3	3	RC ₋₁ TUO _{+α} CC ₀	-1	+α	0	(0, 60, úmida)
3	3	RC ₋₁ TUO _{+α} CC ₊₁	-1	+α	+1	(0, 60, submersa)
4	4	RC ₋₁ TUO _{+α} CC _{+α}	-1	+α	+α	(0, 60, ciclo durabilidade)
3	3	RC ₀ TUO ₀ CC ₀	0	0	0	(1,7, 0, úmida)
3	3	RC ₀ TUO ₀ CC ₊₁	0	0	+1	(1,7, 0, submersa)
4	4	RC ₀ TUO ₀ CC _{+α}	0	0	+α	(1,7, 0, ciclo durabilidade)
3	3	RC ₀ TUO ₊₁ CC ₀	0	+1	0	(1,7, 30, úmida)
3	3	RC ₀ TUO ₊₁ CC ₊₁	0	+1	+1	(1,7, 30, submersa)
4	4	RC ₀ TUO ₊₁ CC _{+α}	0	+1	+α	(1,7, 30, durabilidade)
3	3	RC ₀ TUO _{+α} CC ₀	0	+α	0	(1,7, 60, úmida)
3	3	RC ₀ TUO _{+α} CC ₊₁	0	+α	+1	(1,7, 60, submersa)
4	4	RC ₀ TUO _{+α} CC _{+α}	0	+α	+α	(1,7, 60, durabilidade)
3	3	RC ₊₁ TUO ₀ CC ₀	+1	0	0	(3,4, 0, úmida)
3	3	RC ₊₁ TUO ₀ CC ₊₁	+1	0	+1	(3,4, 0, submersa)
4	4	RC ₊₁ TUO ₀ CC _{+α}	+1	0	+α	(3,4, 0, ciclo durabilidade)
3	3	RC ₊₁ TUO ₊₁ CC ₀	+1	+1	0	(3,4, 30, úmida)
3	3	RC ₊₁ TUO ₊₁ CC ₊₁	+1	+1	+1	(3,4, 30, submersa)
4	4	RC ₊₁ TUO ₊₁ CC _{+α}	+1	+1	+α	(3,4, 30, durabilidade)
3	3	RC ₊₁ TUO _{+α} CC ₀	+1	+α	0	(3,4, 60, úmida)
3	3	RC ₊₁ TUO _{+α} CC ₊₁	+1	+α	+1	(3,4, 60, submersa)
4	4	RC ₊₁ TUO _{+α} CC _{+α}	+1	+α	+α	(3,4, 60, durabilidade)

3.3 PREPARAÇÃO DOS CPs

Para os ensaios de ensaios de RCNC, RTCD e durabilidade, foram moldados CPs cilíndricos. Para garantir a homogeneização do montante total de solo, realizou-se ensaio de granulometria em três amostras coletadas aleatoriamente, buscando identificar resultados idênticos e conferindo a homogeneidade.

A preparação das amostras é definida pela mistura de todos os componentes (solo, água, RC e cimento) (Figura 22), seguido pela compactação e desmoldagem. Realizar uma boa mistura dos materiais é um fator preponderante para atingir resultados com qualidade, dado que a interação entre o solo e os estabilizantes é influenciada pela adequada pulverização e área de contato disponível.

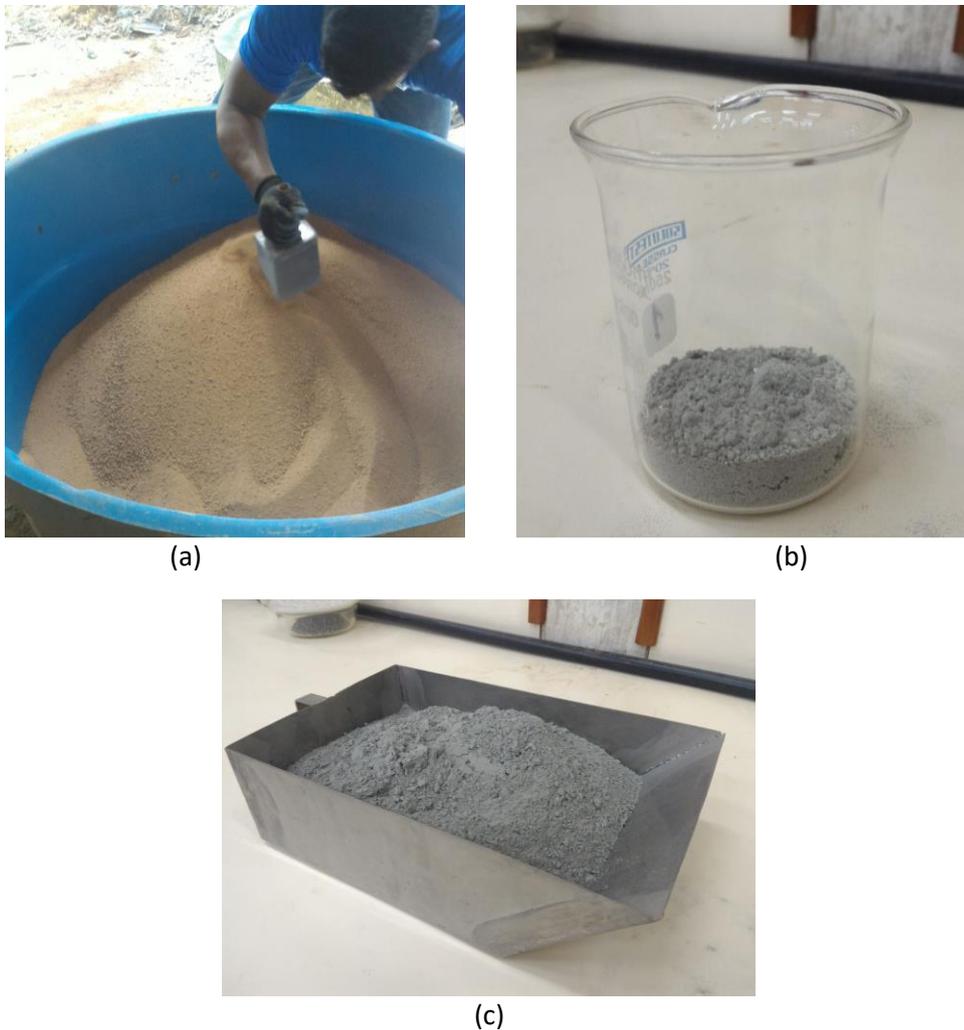


Figura 22 Separação do solo (a), aditivo RC (b) e cimento (c) para moldagem.

Inicia-se o processo de preparação das amostras através da determinação da umidade do solo natural. No solo seco e destorroado, a quantidade requerida de RC (0 %, 0,087 % e 0,174 %) é adicionada em forma de pó até homogeneizar completamente. Utilizou-se

Amassadeira Espiral modelo G.Paniz, Trifásica, com capacidade de 60 kg com gancho em espiral e raspador de tigela para garantir a qualidade da mistura (Figura 23). Após homogeneizar o RC, adiciona-se o cimento e mantém o processo de mistura por cerca de 10 minutos até observar uniformidade de cores. Por fim, adiciona-se água até atingir a h_{ot} (12,4 %) e, para amostras moldadas com acréscimo na h_{ot} de 30% e 60%, até a umidade estabelecida (16,1 % e 19,8 %, respectivamente). A sequência estabelecida é a que apresenta melhor homogeneização.



Figura 23 Homogeneização do solo-cimento-RC.

O molde metálico bi-partido de dimensões 101,6 x 116,4 mm é envolto internamente com óleo para evitar que o solo se prenda às paredes do molde e a mistura homogeneizada e lançadas em camadas e compactadas com soquete pequeno em 5 camadas na energia modificada, conforme ABNT (1992a). A compactação é realizada em um intervalo de no máximo 2 horas para evitar efeito prejudicial de atraso na compactação. Após a compactação, a superfície foi nivelada com auxílio de espátula e lixa fina (Figura 24).



Figura 24 Procedimento de moldagem com detalhe no molde bi-partido preenchido com material compactado.

A desmoldagem das amostras foi realizada imediatamente após a compactação através da cuidadosa retirada da trava das duas abas que constitui o molde bi-partido e encaminhada à câmara de cura específica para cada teste imediatamente, conservando seu estado dado à susceptibilidade do solo à variação de umidade.

A cura úmida foi realizada cobrindo o CP com um tecido úmido e umedecimento contínuo à temperatura constante (23 ± 2) °C para simular o método de cura em campo. A cura submersa foi realizada em tanque com água com lâmina d'água de 10 cm a temperatura constante (Figura 25).



Figura 25 Condição de cura submersa.

3.4 PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

A seguir, serão descritos os procedimentos básicos de cada ensaio e as características gerais dos equipamentos utilizados.

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão não-confinada

Ensaio de resistência à compressão não confinado foi utilizado nesta pesquisa para avaliar o desempenho e durabilidade de solo estabilizado com cimento e RC. Resistência à compressão é considerado um dos mais populares métodos para avaliar a performance de solos estabilizados e um dos principais parâmetros aplicados no desenvolvimento de projetos de pavimentação. Além do que pode-se avaliar a durabilidade de solos estabilizados sujeitos às condições climáticas (GHAZAVI & ROUSTAIE, 2010).

Na condução do ensaio foram utilizadas amostras após o período de 28 dias no qual permaneceram em diferentes regimes de cura até o momento do ensaio. Para regularização da face superior das amostras no qual sofreram nivelamento manual, realizou-se capeamento do topo da amostra com base de enxofre. O dispositivo para medição da deformação axial é o próprio do equipamento que apresenta as medições associadas as cargas aplicadas equivalente. Os CPs foram levados à prensa automática onde realizou-se uma pré-carga de 5 N (Figura 26). A prensa foi ajustada a uma velocidade de deformação de 1,00 mm/minuto, conforme estabelecido pela ABNT (1992b), realizando a leitura dos dados de carga aplicada e deformação axial automaticamente. Para esta etapa, utilizou-se máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão, modelo EMIC 23-200, eletromecânica, marca INSTRON/EMIC.



Figura 26 CP capeado levado à ruptura por compressão não confinada.

3.4.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Utilizando-se do mesmo equipamento e velocidade de ensaio de RCNC, a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral ocorreu segundo as prescrições da norma ABNT (1993) (Figura 27). A Equação 3.1 utilizada para o cálculo de q_{ult} .

$$q_{ult} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (3.1)$$

Onde F é a força aplicada, h e d são a altura e o diâmetro do CP, respectivamente.

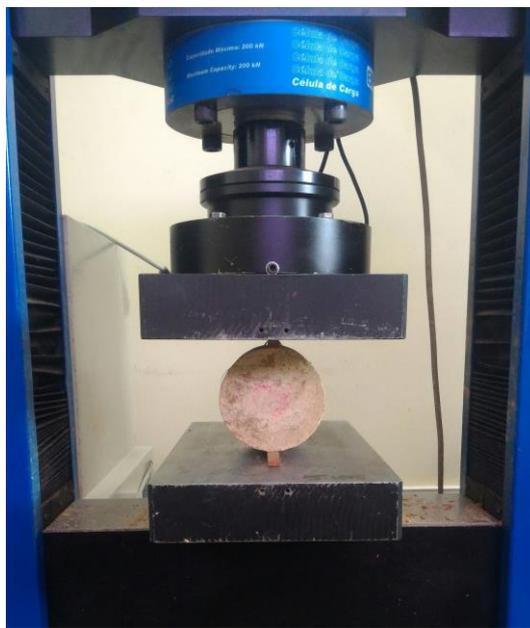


Figura 27 CP durante ensaio de RTCD.

3.4.3 Ensaio durabilidade

O ensaio de durabilidade, desenvolvido por meio de ciclos de molhagem, secagem e escovação, foi realizado com base nos procedimentos contidos na norma ABNT (1996), sendo que um CP não é submetido à escovação (nº 1) e os demais (nº 2, nº 3 e nº 4) segue todos os procedimentos descritos abaixo:

a) Depois dos corpo de prova completarem sete dias de cura em câmara úmida, os mesmos foram pesados e medidas suas dimensões com o auxílio de um paquímetro de precisão igual a 0,02 mm;

b) Em seguida foram imersos em um recipiente contendo água durante o período de cinco horas (processo de molhagem). Após o período de imersão os CPs foram enxutos superficialmente com um pano úmido e novamente pesados e retiradas suas dimensões;

c) Concluídos os procedimentos acima, os CPs foram colocados numa estufa, de temperatura igual a 71 ± 20 °C, onde permaneceram por quarenta e duas horas (processo de secagem);

d) Finalizado o tempo na estufa, os CPs foram retirados e deixados esfriar, e em seguida foram pesados e medidas suas dimensões. O intervalo de tempo estabelecido pela norma para que o corpo de prova esfrie e logo em seguida seja realizado o processo de escovação é de sessenta minutos;

e) Após medir três leituras do diâmetro e três da altura, foi dado início ao processo de escovação com a escova de aço padrão desenvolvida para o respectivo tipo de ensaio;

f) A escova utilizada possui tiras de chapa de aço SAE 1020 n° 26, de 50,80 mm de comprimento por 1,60 mm de largura, reunidas em 50 grupos de 10 tiras cada e montadas em cinco filas longitudinais e dez transversais, em um bloco de madeira dura de 190 mm por 65 mm;

g) O processo de escovação utilizando a referida escova se deu da seguinte maneira: a superfície lateral dos CPs foi escovada de maneira que o eixo longitudinal da escova ficasse paralelo ao eixo longitudinal do CP, são requeridas entre 18 e 20 escovações laterais. Em se tratando da escovação das superfícies superior e inferior (topo e base) do CP, a mesma foi realizada esfregando a escova quatro vezes em cada superfície, sendo duas escovações numa direção e as outras duas na direção perpendicular, aplicando uma força correspondente a 15 N (1,50 kgf) (Figura 28). Portanto, para obter uma melhor precisão na força aplicada, durante o ensaio colocou-se o CP em cima de uma balança eletrônica. Dessa maneira, quando aplicava-se força durante a escovação podia aproximar a magnitude da mesma para o valor normatizado de 15 N (1,50 kgf). O esfriamento e a escovação deram-se no intervalo de tempo de uma (01) hora após a retirada da estufa, conforme estabelecido pela norma;

h) Os procedimentos descritos da etapa b) à etapa g), que constitui um ciclo de 48 horas (05 horas de Imersão + 42 horas de estufa + 01 hora entre esfriamento e escovação) foi repetido mais cinco vezes, conforme estabelecido pela norma;

i) Finalizado os seis ciclos, os corpo de prova foram colocados numa estufa de temperatura entre 105 °C e 110 °C e retirados após 24 horas;



Figura 28 Processo de escovação aplicando força correspondente a 15 N.

j) Por último, após o término dos ciclos de molhagem, secagem e escovação os CPs foram retornados para câmara úmida, onde permaneceram até completar 28 dias e, logo em seguida, levados a ruptura seguindo os procedimentos descritos anteriormente.

Os dados obtidos permitem calcular a variação de volume do CP nº 1 e a perda de massa dos corpo de prova nº 2, nº 3 e nº 4 após os seis ciclos descritos pela norma. A perda de massa considera a massa após estufa para cada ciclo e a massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do CP nº 1 e determinação da sua umidade. Após sete dias de cura são iniciados os ciclos de durabilidade que consistem nos processos de molhagem, secagem e escovação promovendo uma redução de massa ao final do ensaio.

3.4.4 Microscopia eletrônica por varredura

Na última etapa do programa experimental realizou-se ensaio da análise microscópica das amostras de solo-cimento-RC. A análise microscópica teve como objetivo observar a estrutura microscópica de ambos os materiais após o processo de ruptura pelo ensaio de compressão simples.

O programa de análises concentrou em avaliar a influência do aditivo nas condições de cura submersa e cura com ciclos de durabilidade. Assim, são avaliadas duas composições de mistura com a mesma quantidade de cimento de 160 kg/m^3 com uso de 0 kg/m^3 e $3,4 \text{ kg/m}^3$ de RC. As quantidades escolhidas de aditivo RC são relativamente altas, o que pode maximizar as mudanças químicas e a morfologia da estrutura cimentada para a observação. As amostras foram retiradas com o auxílio de um estilete da zona de ruptura dos CPs, ou seja, do local onde houve o desenvolvimento da cunha de ruptura dos mesmos.

Utilizando-se do microscópio LEO 435 Variable Pressure SEM, marca Carl Zeiss, localizado no Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), as amostras foram fixadas em um suporte metálico por meio de uma substância líquida escura denominada Grafite Coloidal (Base de Isopropanol) fabricado pela TED PELLA, INC - PELCO®, (Figura 29). Utilizando um pequeno pincel fixado na tampa do recipiente deste produto, espalhou-se uma pequena quantidade de grafite coloidal na base do suporte metálico e logo em seguida colocou-se as amostras sobre este, objetivando obter total aderência com o suporte descartados após o ensaio. Passado o intervalo de tempo de quarenta e cinco minutos, com o auxílio de um alicate específico fixou-se os suportes metálicos no porta amostra. Após fixação do suporte metálico no porta amostra, as amostras foram submetidas a jatos de nitrogênio, por meio de um spray, objetivando remover partículas que não se encontravam totalmente aderidas à amostra, evitando, danificar a coluna do MEV durante o processo de sucção desenvolvido pelo equipamento para desenvolvimento do vácuo no interior de sua câmara, local onde se deposita as amostras para realização do ensaio.



Figura 29 Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura.

O vácuo desenvolvido pelo equipamento fornece uma pressão no interior da câmara abaixo da pressão atmosférica ($1 \text{ Bar} = 1,0325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), entre $0,1 \cdot 10^{-3}$ e $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Bar}$, que corresponde à 10 e 50 Pa respectivamente. De acordo Dedavid, Gomes & Machado (2007) amostras particuladas (pó), mesmo muito finas, podem também passar por processo de limpeza e secagem, quando for adequado à investigação. Para evitar que partículas contaminem a coluna do MEV, recomenda-se após fixação no suporte metálico e a metalização (técnica relacionada com preparação de amostras para a observação por microscopia óptica ou eletrônica de varredura), submetê-las a jatos de gás (nitrogênio) para assegurar que as mesmas estejam em boas condições de adesão.

Na sequência, ajusta-se o porta amostra de modo que sua parte metálica proporcionasse altura igual à da amostra reduzida de 2 mm. O ajuste do porta amostra era obtido manualmente rotacionando a parte metálica do mesmo no sentido horário ou anti-horário conforme fosse necessário. Após o ajuste dado ao porta-amostra, o mesmo foi levado para o interior da câmara do MEV onde realizou-se o ensaio.

O MEV consiste em um scanner eletrônico que visualiza a amostra por meio de um ângulo de rotação de 360° e um ângulo de inclinação entre 450° até -50°, controlado por *software*. A microscopia eletrônica permitiu a observação em detalhes mediante aumentos de 100, 500, 1.500 e 5.000 vezes.

3.5 METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE CASO

Foi selecionado um trecho de 70 m de comprimento com 7,5 m de largura de uma estrada militar vicinal não pavimentada da AM-010, KM 53, ao norte de Manaus/AM (Figura 30) para aplicação dos procedimentos executivos de estabilização de solo de subleito propostos no Capítulo 5. O solo, aditivo e cimento utilizados na execução da seção teste estão descritos no subitem 3.1. Elaborou-se projeto estrutural, avaliação do desempenho mecânico *in loco* e levantamento de produção e custo.

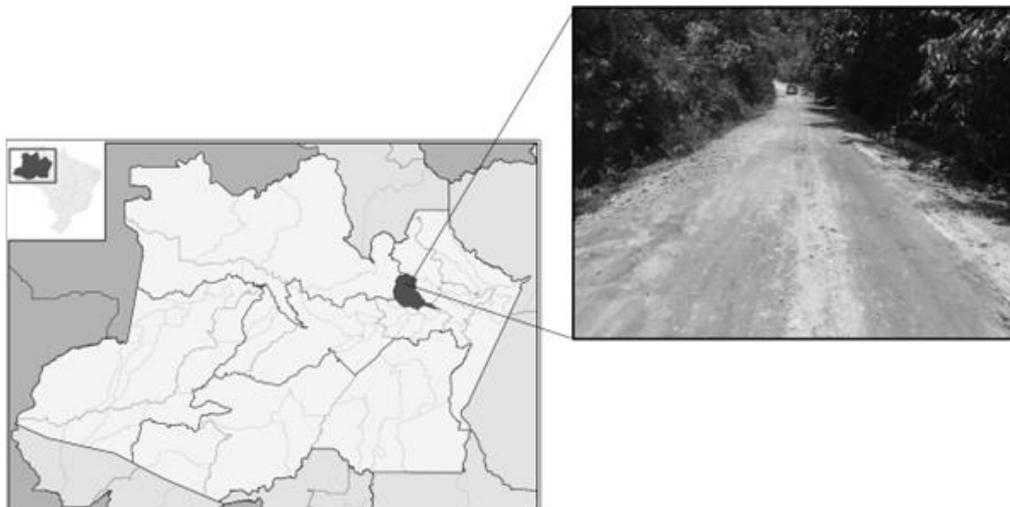


Figura 30 Localização do trecho experimental. (Fonte: Própria, 2016)

Para verificação da resistência mecânica da obra, realizou-se a moldagem de CP em três etapas. Em laboratório, antes de iniciar obra, são preparados CPs com a dosagem estabelecida de 1,7 kg/m³ de RC (0,09 % em relação ao solo seco) e 160 kg/m³ de cimento (8,2 %). A preparação de CP seguiu a metodologia descrita neste capítulo, sendo avaliado a RCNC e RTCD nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias em cura úmida.

Durante a execução da obra, realizou-se nova moldagem de CPs, coletando mistura homogeneizada de solo-cimento-RC, imediatamente antes de iniciar o procedimento de compactação em campo. Esses CPs podem indicar a qualidade da mistura realizada na obra. Para estas amostras, ensaio de RCNC foi realizado, nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias.

Para uma terceira comparação, com 28 dias de conclusão de obra, realizou-se extração de seis amostras diretamente da pista (Figura 31). A extratora utilizada possui diâmetro de 200 mm e as amostras coletadas possuíam altura de $20\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$. A utilização de água durante a extração se faz necessário para minimizar os efeitos da vibração que podem danificar o CP. Para regularização da face das amostras, utilizou-se de lixadeira orbital, removendo sobras grosseiras e capeamento com enxofre. Após a extração, as amostras foram levadas imediatamente para laboratório e verificado sua RCNC.



(a)



(b)

Figura 31 Extração de CPs da pista (a) e aspecto final (b).

E, por fim, realizou-se inspeção visual para diferentes épocas de obra, com um dia de conclusão até os 490 dias de idade, buscando identificar a qualidade geral da estrutura, dos elementos de drenagem, afundamentos, trincas, fissuras, etc.

4 RESULTADOS LABORATORIAIS

Neste capítulo pretende-se identificar a relação das propriedades nas condições de cura úmida, submersa e sob ciclos do ensaio de durabilidade com as taxas de RC e umidades durante a moldagem das amostras. Para os resultados de RCNC e RTCD, foram realizadas análise de variância (ANOVA) para cada variável de resposta e análises de regressão múltipla com gráficos de efeito e interações. O nível de significância adotado para estas análises foi de 0,05, ou seja, ao se aceitar a hipótese de que o modelo representa significativamente os pontos experimentais, ou que um fator controlável influencia a variável de resposta, há, no máximo, uma probabilidade de 5% desta hipótese não ser verdadeira.

4.1 ENSAIO DE DURABILIDADE

Foi analisado a durabilidade do solo-cimento-RC afim de relacionar efeito do aditivo RC para condições atípicas de umidade de compactação. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os a relação da perda de massa (%) por taxas de aditivo RC, para cada condição de umidade de compactação em cada ciclo realizado. Os resultados obtidos para cada CP durante todo o processo do ensaio de durabilidade é apresentado no Apêndice B.

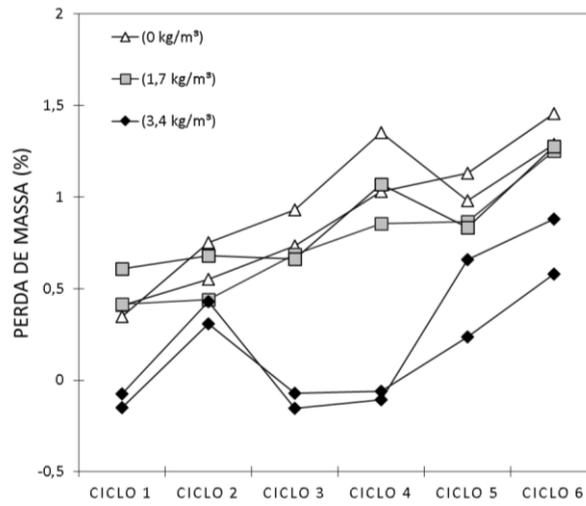


Figura 32 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas na umidade ótima de compactação.

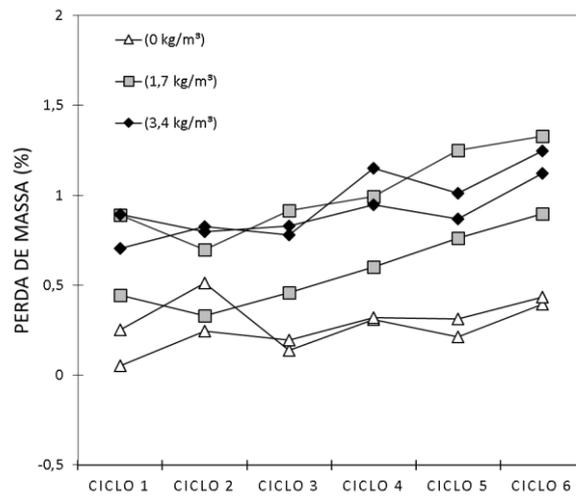


Figura 33 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30%.

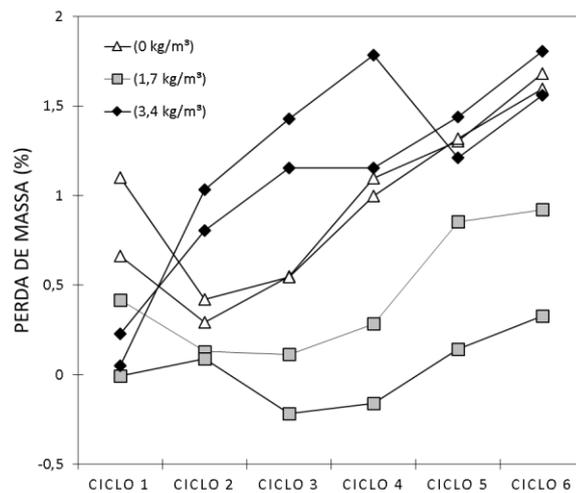


Figura 34 Perda de massa de amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo na umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60%.

Para análise dos resultados das amostras moldadas com 0 % de acréscimo de umidade, Figura 32, é possível observar redução da perda de massa quando a taxa de aditivo RC é de 3,4 kg/m³, na ordem de 0,5 % de perda de massa. Amostras com 0 kg/m³ apresentaram a menor perda de massa para condições com acréscimo de 30 % de umidade, com valores médios de 0,4 % (Figura 33).

Para amostras moldadas com acréscimo de 60 % de umidade, Figura 34, uma relação entre o aditivo RC e a redução na perda de massa não é identificada, sendo que, neste caso, a perda de massa é menor para taxa de 1,7 kg/m³ de aditivo RC, com média de 0,6%. Uma boa relação foi observada entre a perda de massa (%) e aditivo RC para condições de compactação na umidade ótima para este solo tropical estabilizado com cimento.

Biswal, Sahoo & Dash (2018) realizaram estudo de perda de massa para solos lateríticos para diferentes taxas de cimento após 12 ciclos de molhagem e secagem. Com 8% de cimento, a perda de massa encontrada foi de 0,5 %. Os autores observaram que um limite mínimo de 4% de cimento foi necessário para atender recomendações internacionais (PCA, 1992) de perda de massa mínima de 10 %, requeridas para camada estrutural de qualquer pavimento. Scullion (2005) sugere que a perda máxima admissível de peso após 12 ciclos de molhagem e secagem das argilas seja de 6 %. Para o caso desta pesquisa, o elevado teor de cimento contribuiu para valores de perda de massa bem abaixo dos limites recomendados. Em função disto, a alteração da umidade de compactação representou pouca alteração na perda de massa dos materiais. Para menores dosagens de cimento supõe-se que a interferência da umidade seja mais expressiva.

A redução na perda de massa representa uma melhora no desempenho do material, indicando maior resistência aos processos de erosivos e aumento na durabilidade. As alterações provocadas pelo aditivo RC ocorrem pela intensificação das reações de hidratação cimentícia, assim, para condições com a umidade em excesso a interação entre os produtos das reações não ocorrem devidamente e, conseqüentemente, o benefício proporcionado pelo aditivo é perdido. Assim, somente na condição de compactação na umidade ótima é possível observar melhora no desempenho pela utilização do aditivo, em termos de perda de massa.

As variações da massa absoluta dos CPs por ciclo são apresentadas nas Figuras 35, 36 e 37. Para amostras moldadas com 0 % de acréscimo de umidade, a diferença na massa absoluta é de 5 % quando utilizada teor de RC de 3,4 kg/m³, dado ao fato que nesta condição ideal, a absorção da água durante a reação de hidratação ocorre intensamente aumentando sua massa absoluta. Nas outras umidade de compactação, essa diferenciação não é mais identificada.

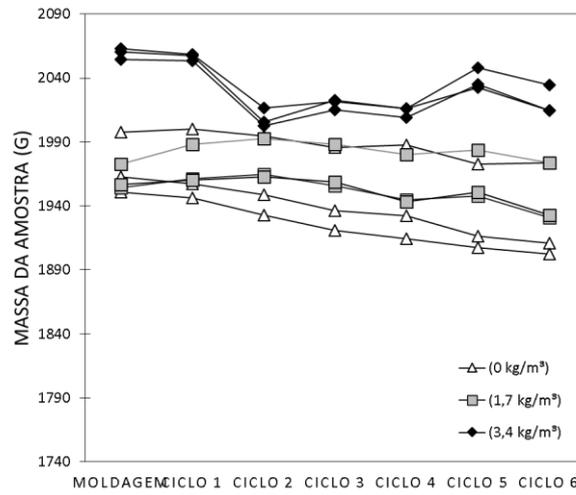


Figura 35 Massa absoluta de amostras solo-cimento-RC moldadas na umidade ótima de compactação.

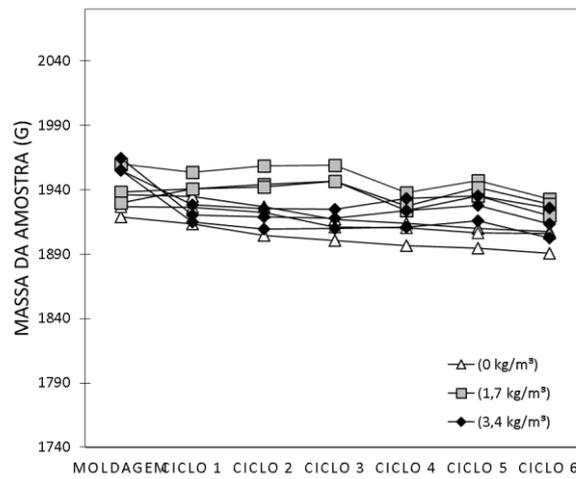


Figura 36 Massa absoluta das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30 %.

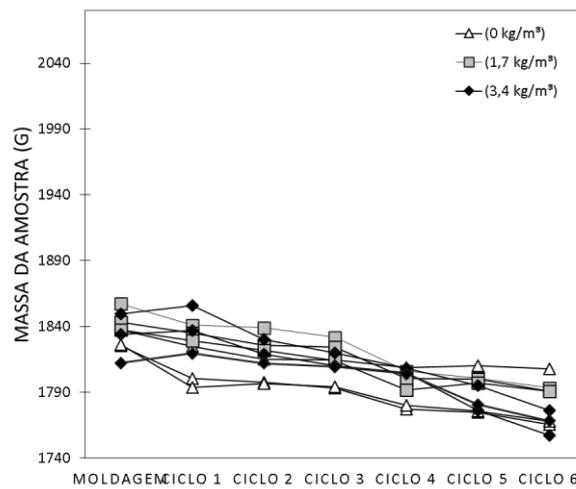


Figura 37 Massa absoluta das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60 %.

Na comparação das três figuras, é possível observar a redução na massa de todos os CPs como resultado dos processos de deterioração. Contudo, quanto maior é a umidade de compactação mais intensos são os desgastes sofridos nas amostras e o redução na massa absoluta em cada ciclo. Ressalta-se a importância de controlar o tempo e exposição ao vento após a retirada das amostras da estufa e a realização da medição de massa. A umidade do ar é rapidamente absorvida pelos CPs, alterando de maneira expressiva os resultados.

Os gráficos apresentados nas Figuras 38, 39 e 40 indicam o grau de absorção após imersão das amostras que foram submetidas apenas ao ciclo de molhagem e secagem.

Para as três condições de umidade de compactação pôde-se observar um melhor desempenho das amostras com $3,4 \text{ kg/m}^3$ de aditivo RC. Para a condição de compactação na umidade ótima, as amostras com $3,4 \text{ kg/m}^3$ de aditivo RC apresentaram absorção 15 % inferiores às demais. Já amostras compactadas com acréscimo de 60% da umidade ótima, amostras com mesma quantidade de aditivo apresentaram absorção 40 % inferior às outras condições. Estes resultados indicam uma redução nos poros na superfície da amostra, limitando a capacidade de absorção de água após imersão em tanque por 5 horas. Os efeitos microscópicos do aditivo podem ser evidenciados neste experimento, que produzem uma malha mais densa e menos susceptível à água.

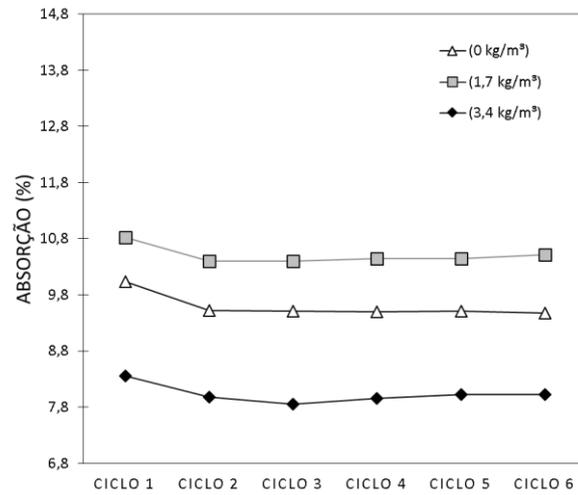


Figura 38 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 0 %.

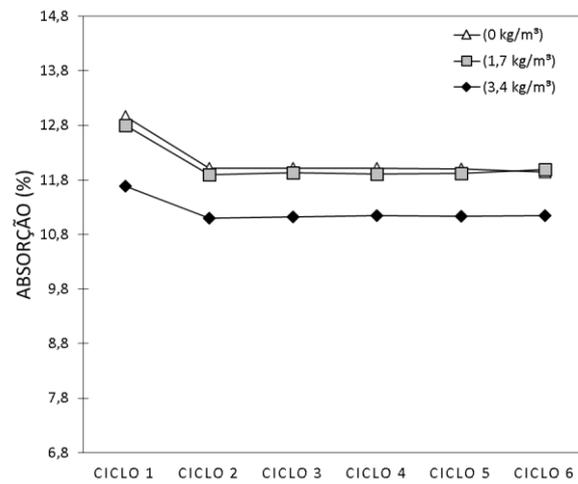


Figura 39 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 30 %.

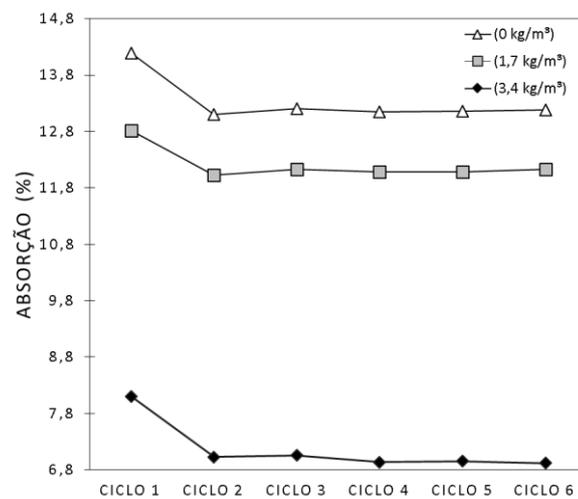


Figura 40 Absorção após imersão das amostras solo-cimento-RC moldadas com acréscimo da umidade na compactação em relação teor de umidade ótimo do solo de 60 %.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Os dados apresentados no Quadro 11 correspondem aos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) dos CPs moldados em diferentes condições de cura, teor de aditivo RC e acréscimo de umidade em relação à umidade ótima durante a compactação. Também é apresentado a densidade aparente de cada CP instantes antes da ruptura. Um total de 27 experimentos foram realizados com três CPs para cada condição atendendo o critério do desvio máximo de 10 % da média. A taxa de cimento manteve-se fixa (8,2 %) e a idade dos CPs foram 28 dias.

Quadro 11 Resultado da resistência sob diferentes condições para RCNC.

<i>Teor aditivo RC (kg/m³)</i>	<i>Acréscimo na h_{ot} (%)</i>	<i>Condição de cura</i>	<i>Densidade aparente média dos CPs (g/cm³)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>
0	0	Sob ciclos de durabilidade	2,04	5,31
0	30	Sob ciclos de durabilidade	2,05	3,69
0	60	Sob ciclos de durabilidade	1,85	2,19
1,7	0	Sob ciclos de durabilidade	2,10	5,77
1,7	30	Sob ciclos de durabilidade	2,12	2,79
1,7	60	Sob ciclos de durabilidade	1,90	2,69
3,4	0	Sob ciclos de durabilidade	2,11	5,89
3,4	30	Sob ciclos de durabilidade	1,98	4,66
3,4	60	Sob ciclos de durabilidade	1,86	2,17
0	0	Submersa	2,17	3,14
0	30	Submersa	2,16	2,06
0	60	Submersa	2,07	1,20
1,7	0	Submersa	2,21	3,70
1,7	30	Submersa	2,14	1,95
1,7	60	Submersa	2,07	1,37
3,4	0	Submersa	2,22	3,25
3,4	30	Submersa	2,14	2,18
3,4	60	Submersa	2,05	1,53
0	0	Úmida	2,19	3,40
0	30	Úmida	2,14	2,80
0	60	Úmida	2,07	1,38
1,7	0	Úmida	2,21	4,95
1,7	30	Úmida	2,13	2,87
1,7	60	Úmida	2,08	1,66
3,4	0	Úmida	2,21	5,04
3,4	30	Úmida	2,13	2,98
3,4	60	Úmida	2,08	1,80

Então, foi determinado uma condição ótima de melhores resultados de resistência, por meio de um modelo de regressão ajustado às respostas, para cada condição de cura, correlacionando o acréscimo de umidade ótima na compactação com taxa de aditivo RC

utilizado, buscando avaliar os efeitos individuais e a interação de todas as variáveis estudadas de forma independente. Foram realizadas uma série de análises para verificar a adequação do modelo. Todos os cálculos estatísticos foram realizados usando *software* ActionStat versão 3.4.124.1308 build 3.

4.2.1 Ajuste do modelo e análise ANOVA

Os resultados de ANOVA do modelo quadrático apresentado no Quadro 12 indicam o nível de significância do teor de umidade com p-valor $<0,001$, o teor de RC é considerado pouco significativo (p-valor de 0,14), e as interações entre os fatores não são significativas para nível de confiança 95 %. Segundo Manzato (2018), um p-valor inferior a 0,05 indica que o modelo é estatisticamente significativo, enquanto que um valor superior a 0,10 indica que o modelo não é significativo.

Quadro 12 Resultados ANOVA para RCNC.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor	Característica
Teor RC	2	1,05	0,53	2,33	0,14	Não significativo
Umidade	2	33,65	16,83	74,58	$<0,001$	Significativo
Cura	2	12,19	6,09	27,02	$<0,001$	Significativo
Teor RC x Umidade	4	1,28	0,32	1,42	0,29	Não significativo
Teor RC x Cura	4	0,49	0,12	0,55	0,70	Não significativo
Resíduos	12	2,71	0,23			

Na Figura 41 são apresentadas as análises dos resíduos necessárias para avaliar a adequação do modelo de regressão previsto. O histograma dos resíduos, na Figura 41 (a), apresenta a densidade dos resíduos com a curva da densidade da normal. O gráfico QQ-plot (Figura 41 (b)) indicam se os resíduos seguem uma distribuição normal, tendo todos os pontos enquadrados nos limites estabelecidos, portanto, o ajuste do modelo de regressão linear é confiável. O efeito dos resíduos *versus* valores ajustados (Figura 41 (c)) é apresentado como uma dispersão aleatória, ao contrário de um padrão afunilado, indicando uma resposta de variância original com uma boa previsão da tensão de ruptura. Com o gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Coleta, apresentado na Figura 41 (d), é possível verificar se os resíduos são independentes, apesar de um valor discrepante ser detectado, ultrapassando o limite de resíduos padronizados de ± 2 . O critério para a análise é que se os pontos do gráfico estiverem distribuídos de forma aleatória, há um indicativo de independência, por outro lado, se apresentar um padrão é indicativo de dependência nos resíduos. Neste caso, verifica-se independência nos resíduos.

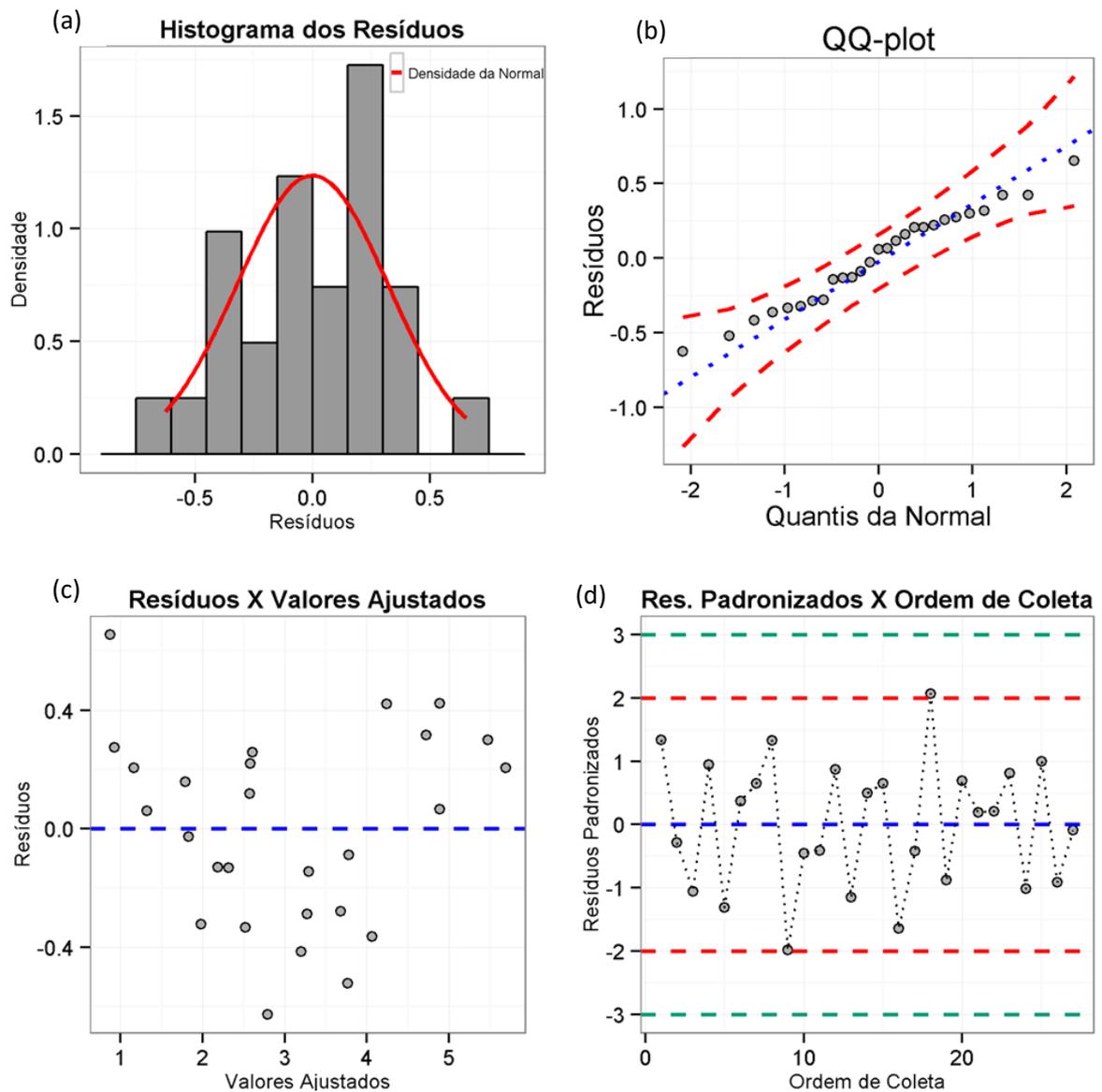


Figura 41 Análise dos resíduos para amostras de RCNC.

Para o gráfico de efeitos apresentado na Figura 42, há indicativo de aumento da resistência em função do aumento do teor de aditivo RC, aumento também quando há redução na variação da umidade em relação à h_{ot} e que a cura sob ciclos de durabilidade apresenta as melhores resistências, seguida da cura úmida e cura submersa.

No Quadro 13 é apresentado o teste de Normalidade. Para o cálculo do p-valor é utilizado uma interpolação que aproxima uma função exponencial. O método de Anderson-Darling tem objetivo de verificar se os resíduos tem distribuição normal, como os p-valores são todos maiores que 0,05, a hipótese de normalidade dos dados não é rejeitada.

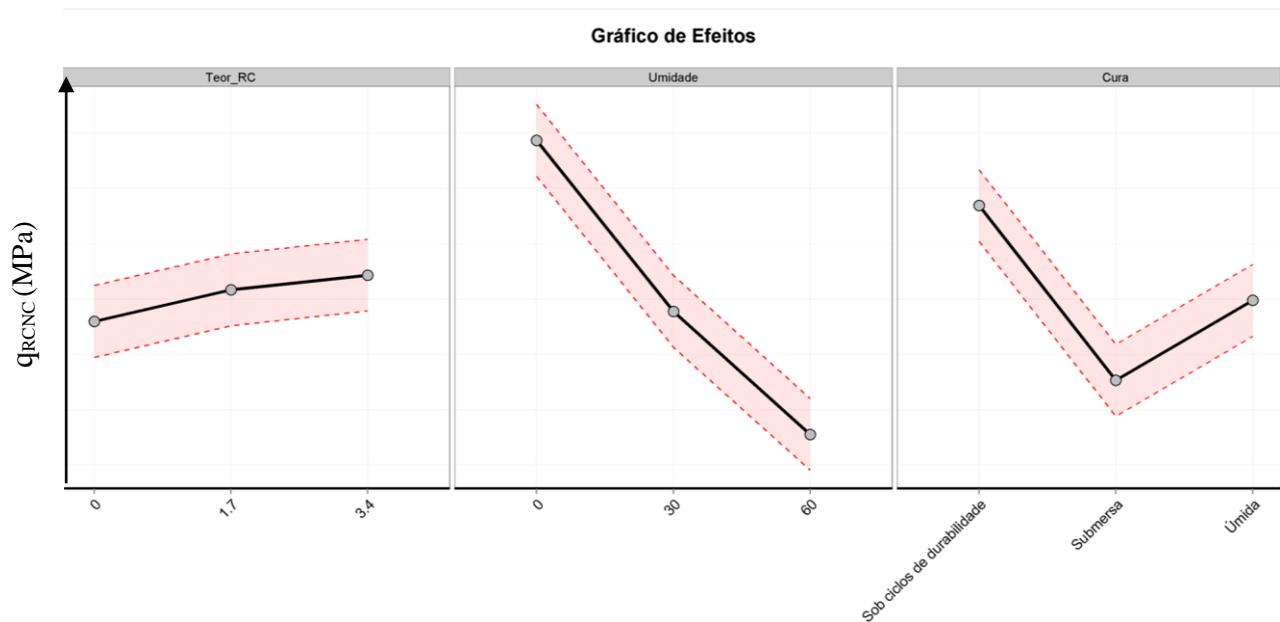


Figura 42 Gráfico de efeitos para amostras de RCNC.

Quadro 13 Testes de normalidade para amostras de RCNC.

Média	<0,001
Desvio Padrão	0,322
N	27
Anderson-Darling	0,297
P-Valor	0,564

4.2.2 Efeito dos fatores através de análise gráfica

Após a análise da interação entre os fatores, foi desenvolvido equações que indiquem a relação entre a resistência do compósito com o teor de RC e acréscimo de umidade para cada condição de cura. Para verificação da qualidade dos modelos, é apresentado o coeficiente de determinação (R^2) para cada equação. O R^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados (HABER & RUNYON, 1977).

Para determinar a otimização da variável resposta, foi realizado um ajuste de dados experimentais. A relação entre a RCNC e os fatores selecionados para as condição de cura úmida, submersa e sob ciclos de durabilidade é descrito segundo as equações 4.1 a 4.3.

$$Y_{úmida} = 8,076 + 0,440x_1 - 0,081x_2 - 0,005x_1x_2 \quad R^2 = 0,63 \quad (4.1)$$

$$Y_{ciclos\ de\ durabilidade} = 10,305 + 0,480x_1 - 0,100x_2 - 0,006x_1x_2 \quad R^2 = 0,85 \quad (4.2)$$

$$Y_{submerso} = 8,379 + 0,261x_1 - 0,085x_2 - 0,002x_1x_2 \quad R^2 = 0,49 \quad (4.3)$$

Onde, $Y_{úmida}$, Y_{ciclos} de durabilidade e $Y_{submerso}$ são as tensões de ruptura nas condições de cura úmida, sob ciclos de durabilidade e submersa, respectivamente. x_1 é o teor de aditivo RC e x_2 é o acréscimo percentual na h_{ot} .

Joglekar and May (1987) sugerem que um bom ajuste do modelo deve produzir um R^2 de pelo menos 0,8. Isso significa que o modelo de resposta avaliado neste estudo pode explicar muito bem na condição de cura sob ciclos de durabilidade, com R^2 de 0,85 a um nível de confiança de 95%. Os modelos na condição de cura úmida e submersa apresentaram R^2 de 0,63 e 0,49, respectivamente.

O efeito de cada fator indicado na resistência à compressão do compósito foi analisado por meio de uma representação gráfica 3-D e os contornos 2-D gerados pela superfície do modelo usando o polinômio de segunda ordem (equações (4.1), (4.2) e (4.3)), apresentados nas Figuras 43 a 45. Cada gráfico mostra os efeitos de duas variáveis fixada ao nível zero, com a outra variável resposta dentro dos seus intervalos estudados. A superfície do gráfico 3-D auxilia na identificação do ganho de resistência em função do teor de aditivo RC para cada interação entre os fatores.

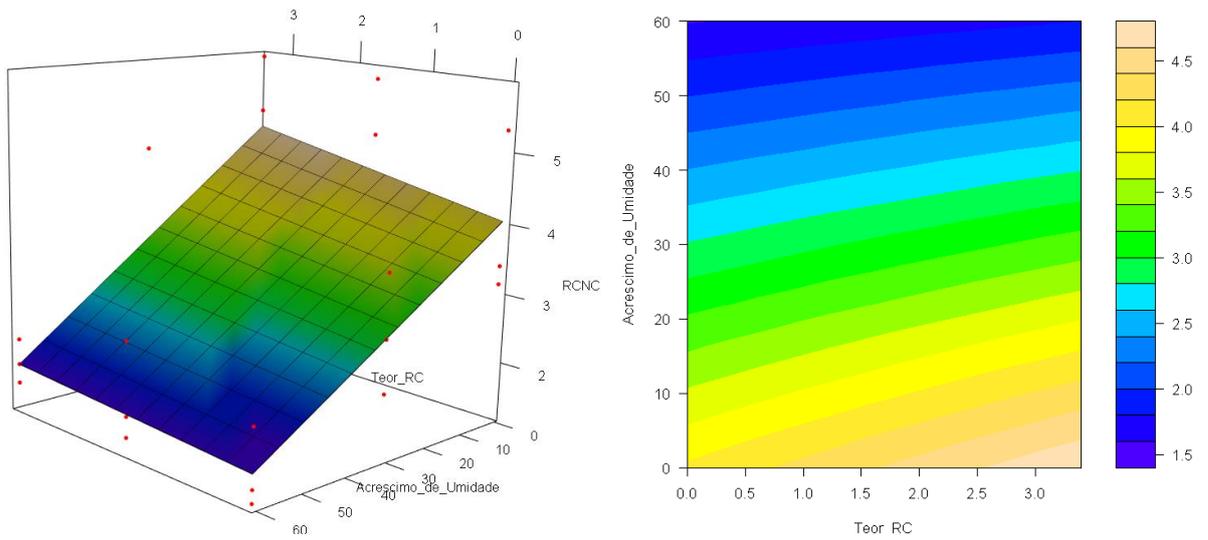


Figura 43 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura úmida para RCNC.

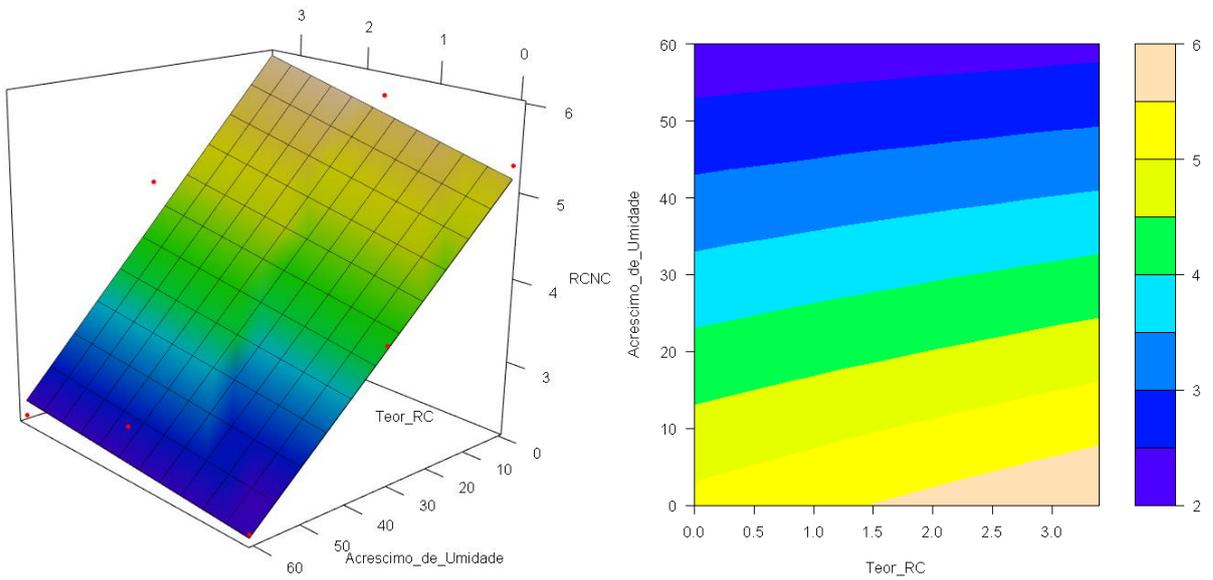


Figura 44 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura sob ciclos de durabilidade para RCNC.

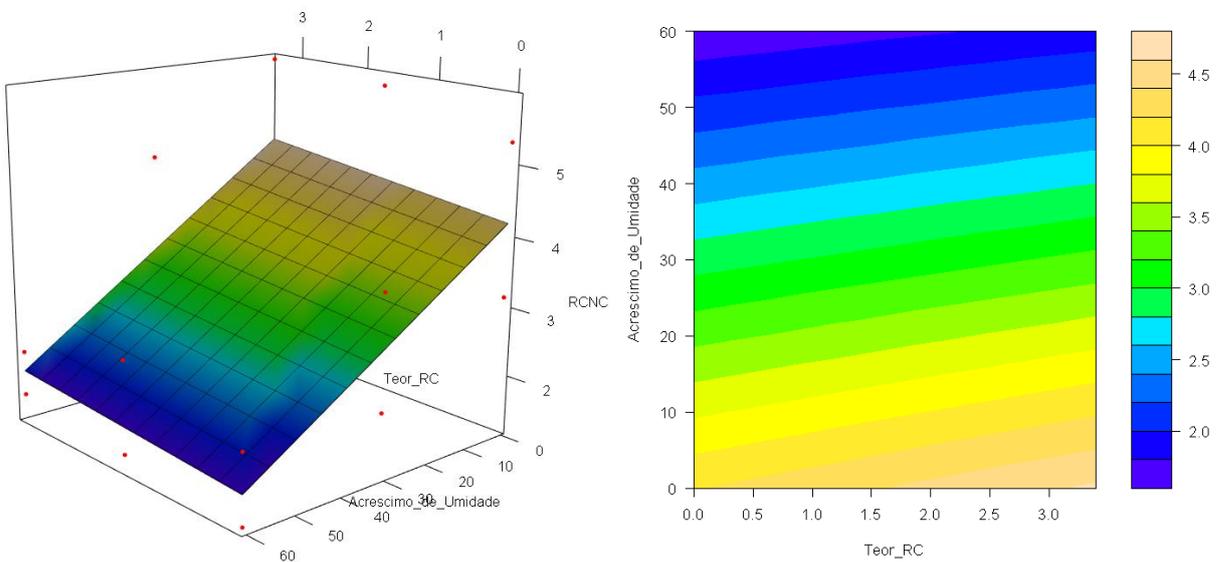


Figura 45 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura submersa para RCNC.

A Figura 43 mostra os efeitos do teor de RC e acréscimo de umidade com a resistência à compressão para condição de cura úmida. De modo geral, o aumento da resistência pode ser observado com acréscimo de aditivo RC e redução de umidade. Um aumento da inclinação na condição de acréscimo de umidade 0 % em relação ao acréscimo de 60 % indica que o aditivo RC produz melhores resultados quando a moldagem da amostra segue as condições ideais especificadas.

Assim, a alteração da umidade na compactação interfere negativamente nos efeitos que o aditivo RC pode proporcionar. Esses dados foram consistentes com a análise ANOVA (Quadro 12), onde é evidente a influência dos fatores quando analisados em conjunto. Portanto, tanto a umidade quanto o teor de aditivo RC possuem parâmetros ideais independentes.

A Figura 44 e 45 apresentam os resultados para condição de cura sob ciclos de durabilidade e cura submersa, respectivamente. O efeito da umidade apresentado é mais significativo que o efeito do teor de RC e a combinação do teor de RC pela umidade em todas condições de cura.

O incremento de resistência em função da adição de RC é mais expressivo na condição de cura sob ciclos de durabilidade, atingindo valores de 6 MPa. No caso das condições de cura úmida e submersa, os valores atingiram valores em torno de 4,5 MPa. Essa melhor condição do modelo sob ciclo de durabilidade ocorre devido ao fato que amostras submetidas ao processo de secagem em estufa à 72 °C durante os ciclos de durabilidade aceleram as reações de hidratação cimentícia nas amostras, somada à pouca perda de massa para amostras moldadas com este teor de cimento. Espera-se que estudos com menores taxas de cimento a resistência para amostras com cura sob ciclos de durabilidade não sigam a tendência apresentada.

A menor influência do aditivo RC é na condição submersa. Este indício pode ser justificado pelo fato de que as alterações microestruturais proporcionadas pelo aditivo RC é mais representativa quando há maior interação entre as partículas de solo e o cimento, ou seja, em condições ideais de umidade durante a compactação e de cura. Quando essas condições não são aplicadas, e há um excesso de água na matriz do compósito, as reações topoquímicas que promovem a maior interação entre os grãos não ocorrem na mesma intensidade.

4.2.3 Gráfico de otimização dos efeitos

A validação é um passo importante para avaliar a estabilidade de predição dos fatores selecionados neste estudo. A opção máxima de intervalo para todas condições foi selecionada por meio de otimização numérica do *software* ActionStat e obtenção do valor máximo da

resistência à compressão não confinada. A Figura 46 apresenta o melhor resultado teórico da RCNC em cada condição de cura.

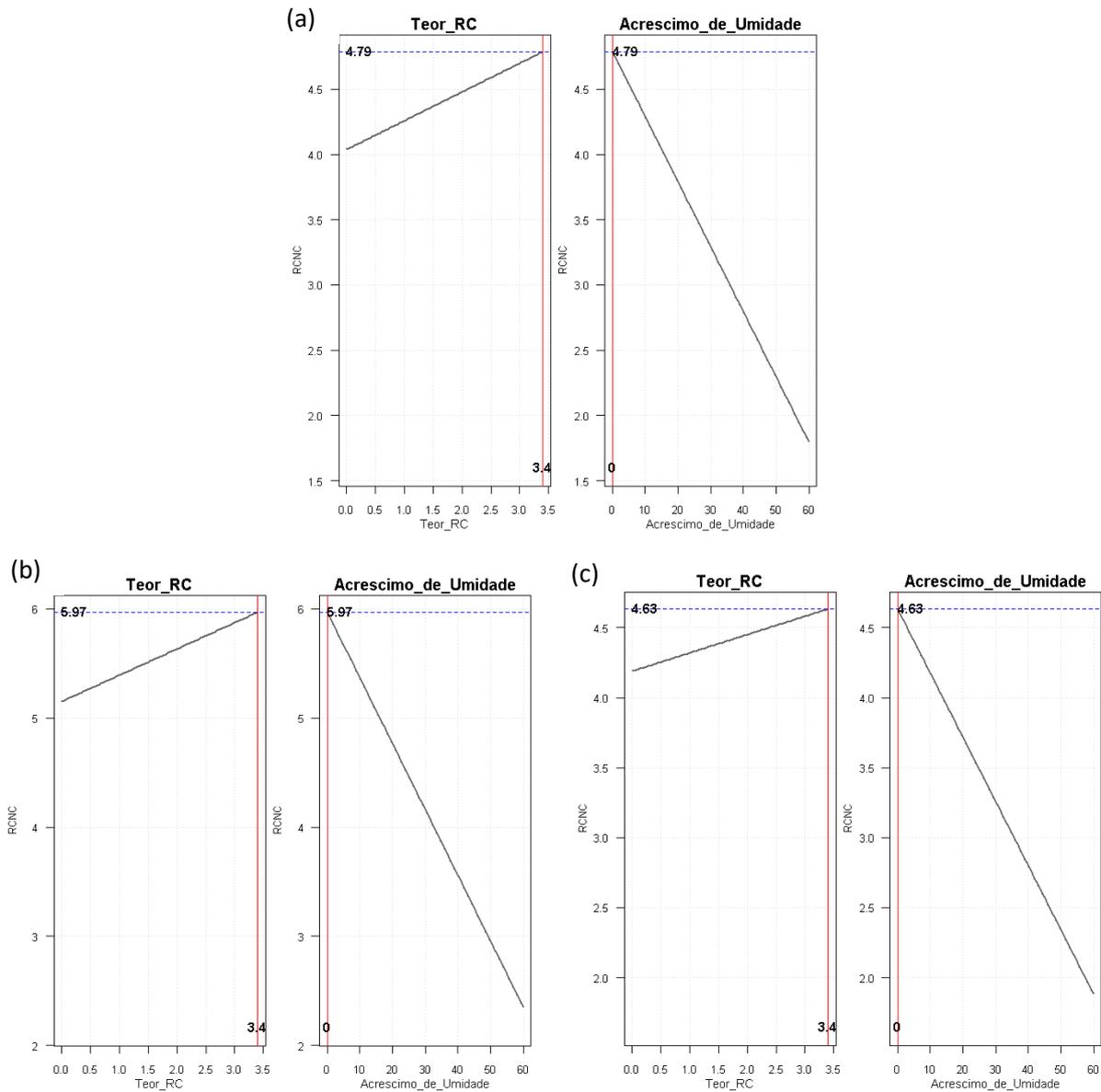


Figura 46 Previsão de resistência máxima para amostras nas condições de cura úmida (a), cura sob ciclos de durabilidade (b) e cura submersa (c) para RCNC.

A resistência máxima foi obtida na condição de cura sob ciclos de durabilidade para teor de aditivo RC de 3,4 kg/m³ e 0 % de acréscimo na hot, no qual é atingiu o valor de 5,97 MPa (Figura 46 (b)). Para os mesmos fatores, na cura úmida e submersa, os valores encontrados foram 4,79 MPa e 4,63 MPa, respectivamente.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Análogo ao ensaio de resistência à compressão não confinada, este subitem apresentará os resultados correspondentes ao ensaio de tração por compressão diametral. Os fatores e condições em que foram moldados as amostras são idênticas ao ensaio de RCNC. Para este experimento avaliou-se o desempenho do aditivo RC sob condições severas e a tensão na ruptura obtida no ensaio será a variável resposta nos modelos de regressão para cada condição de cura, correlacionando seus fatores. O Quadro 14 apresenta a resistência à tração para cada condição estabelecida. Realizaram as mesmas análises para verificar a adequação do modelo.

Quadro 14 Resultado da resistência sob diferentes condições para RTCD.

<i>Teor aditivo RC (kg/m³)</i>	<i>Acréscimo na h_{ot} (%)</i>	<i>Condição de cura</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>
0	0	Sob ciclos de durabilidade	0,731
0	30	Sob ciclos de durabilidade	0,300
0	60	Sob ciclos de durabilidade	0,231
1,7	0	Sob ciclos de durabilidade	0,731
1,7	30	Sob ciclos de durabilidade	0,308
1,7	60	Sob ciclos de durabilidade	0,312
3,4	0	Sob ciclos de durabilidade	0,745
3,4	30	Sob ciclos de durabilidade	0,296
3,4	60	Sob ciclos de durabilidade	0,230
0	0	Submersa	0,382
0	30	Submersa	0,168
0	60	Submersa	0,128
1,7	0	Submersa	0,409
1,7	30	Submersa	0,231
1,7	60	Submersa	0,198
3,4	0	Submersa	0,405
3,4	30	Submersa	0,240
3,4	60	Submersa	0,216
0	0	Úmida	0,570
0	30	Úmida	0,276
0	60	Úmida	0,251
1,7	0	Úmida	0,869
1,7	30	Úmida	0,288
1,7	60	Úmida	0,293
3,4	0	Úmida	0,892
3,4	30	Úmida	0,282
3,4	60	Úmida	0,270

4.3.1 Ajuste do modelo e análise ANOVA

Buscando avaliar a interação do efeito do aditivo RC com a cura e umidade realizou-se análise ANOVA, análise dos resíduos com nível de confiança 95% e gráficos de efeito.

Os resultados de ANOVA do modelo quadrático apresentado no Quadro 15 indicam significativo o fator da umidade e cura com p-valor $<0,001$, já o teor de RC e as interações entre os fatores não são significativas para nível de confiança 95%. Comparado ao RCNC, resultados apresentaram-se semelhantes, contudo o teor de RC e Teor RC *versus* Umidade apresentaram um p-valor não significativo.

Quadro 15 Resultados ANOVA para RTCD.

Fonte de variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor	Característica
Teor RC	2	0,024	0,012	1,059	0,377	Não significativo
Umidade	2	0,899	0,449	39,043	$<0,001$	Significativo
Cura	2	0,181	0,091	7,874	0,007	Significativo
Teor RC x Umidade	4	0,010	0,002	0,207	0,930	Não significativo
Teor RC x Cura	4	0,011	0,003	0,244	0,908	Não significativo
Resíduos	12	0,138	0,012			

Os gráficos de efeitos apresentados na Figura 47 indicou aumento da resistência em função do aumento do teor de aditivo RC apenas entre os teores 0 e 1,7 kg/m³. Os tipos de cura úmida e sob ciclos de durabilidade apresentaram a mesma resistência. A compactação fora da umidade ótima (na condição com acréscimo na h_{ot} de 30 % e 60 %) representou perda de 39 % de resistência.

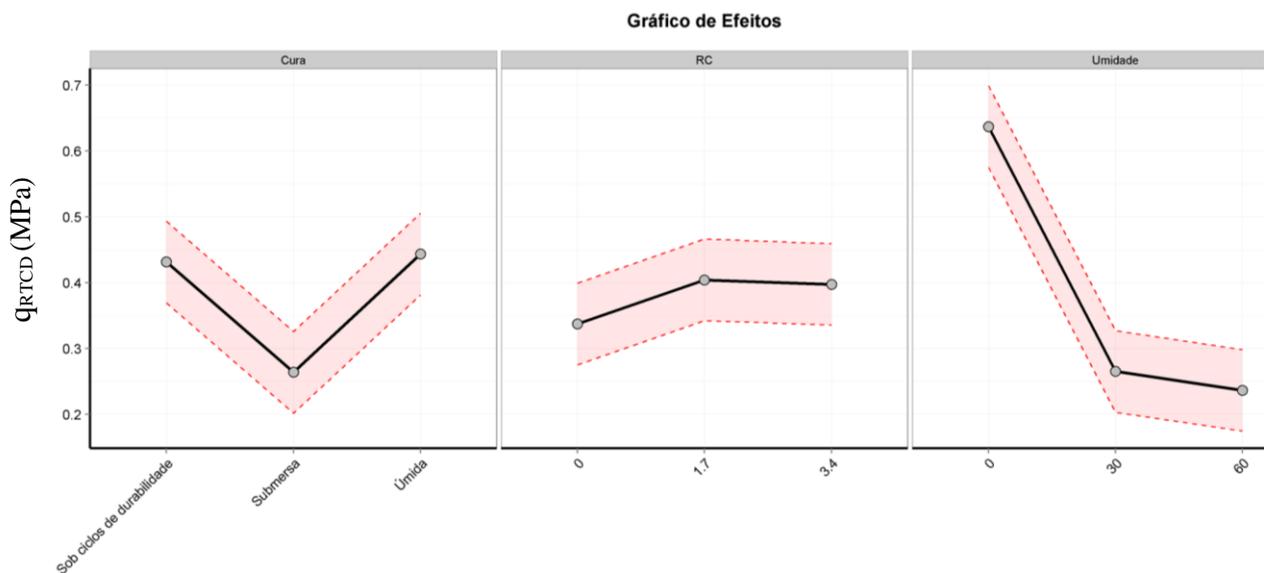


Figura 47 Gráfico de efeitos para amostras de RTCD.

Na Figura 48 é apresentada a análise dos resíduos para os dados do ensaio de RTCD. De modo geral, o gráfico QQ plot (Figura 48 (b)) indicou que o ajuste do modelo de regressão linear foi confiável. O efeito dos resíduos *versus* valores ajustados (Figura 48 (c)) apresenta uma resposta de variância original com uma boa previsão de resposta. Com o gráfico de Resíduos *versus* Ordem de Coleta (Figura 48 (d)) verificou-se independência nos resíduos.

Para o teste de Normalidade, apresentado no Quadro 16, a hipótese de normalidade dos dados não é rejeitada.

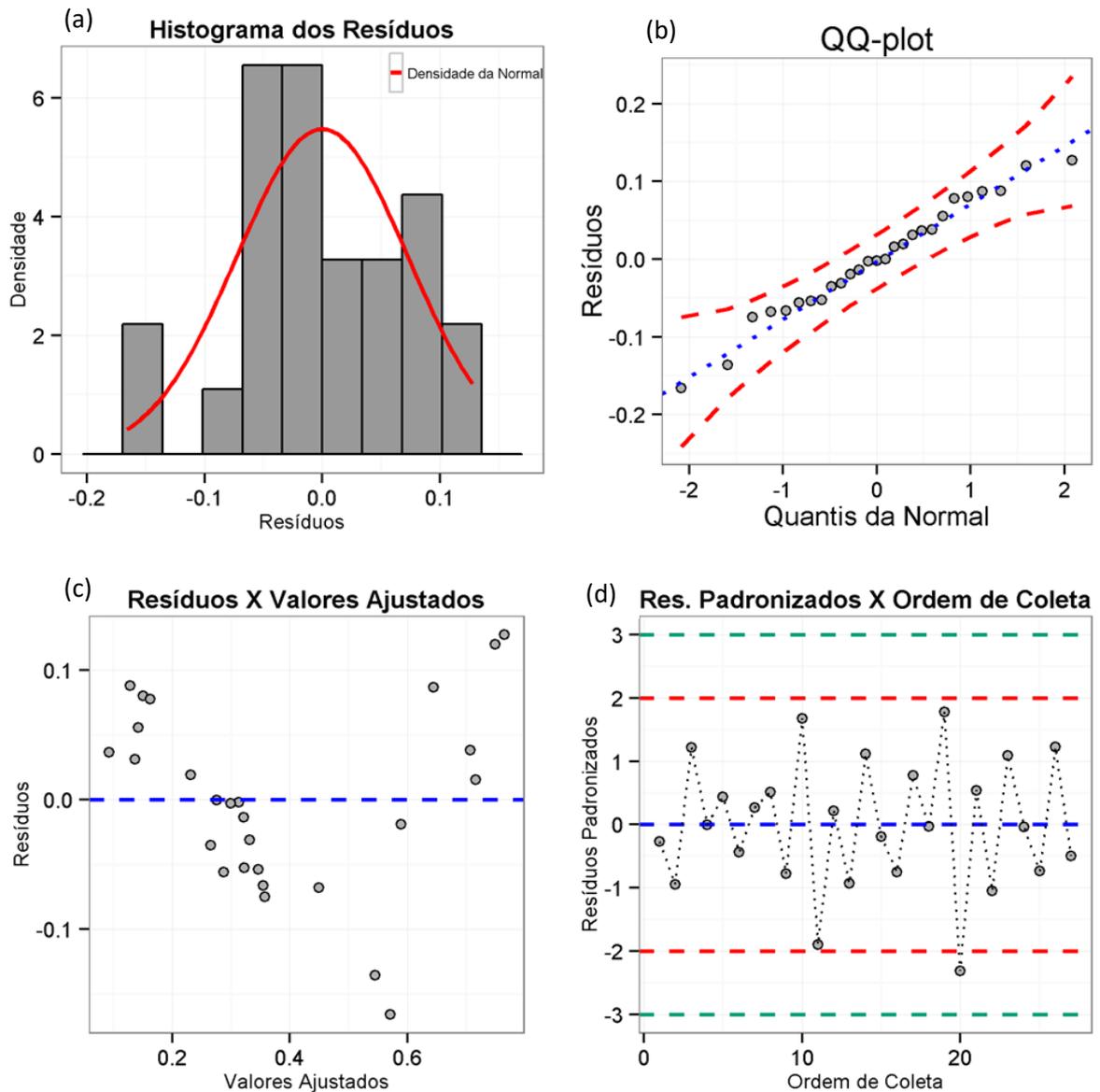


Figura 48 Análise dos resíduos para amostras de RTCD.

Quadro 16 Testes de normalidade para amostras de RTCD.

Média	<0,001
Desvio Padrão	0,073
N	27
Anderson-Darling	0,188
P-Valor	0,893

4.3.2 Efeito dos fatores através de análise gráfica

Para cada condição de cura, a determinação da tensão de ruptura para o ensaio de RTCD é descrito segundo as equações 4.1 a 4.3 com os respectivos coeficientes de determinação.

$$Y_{úmida} = 1,106 + 0,033x_1 - 0,013x_2 \quad R^2 = 0,53 \quad (4.4)$$

$$Y_{ciclos\ de\ durabilidade} = 1,100 + 0,035x_1 - 0,013x_2 \quad R^2 = 0,55 \quad (4.5)$$

$$Y_{submerso} = 1,103 + 0,034x_1 - 0,013x_2 \quad R^2 = 0,54 \quad (4.6)$$

Onde, $Y_{úmida}$, $Y_{ciclos\ de\ durabilidade}$ e $Y_{submerso}$ são as tensões de ruptura nas condições de cura úmida, sob ciclos de durabilidade e submersa, respectivamente. x_1 é o teor de aditivo RC e x_2 é o acréscimo percentual na h_{ot} .

Os modelos para todas condições de cura apresentaram R^2 pouco significativos, na ordem de 0,55. Isto ocorre devido a uma grande variação nos dados do ensaio. No entanto, indica que o conteúdo RC exerce influência positiva na resistência de ruptura.

Nas Figuras 49 a 51 são apresentados os gráficos 3-D e os contornos 2-D gerados pelas equações (4.4), (4.5) e (4.6) com os efeitos de duas variáveis fixadas ao nível zero, com a outra variável respondendo dentro dos seus intervalos estudados. Nas três condições de cura, os gráficos apresentaram curvas idênticas conforme a equação dos modelos de regressão.

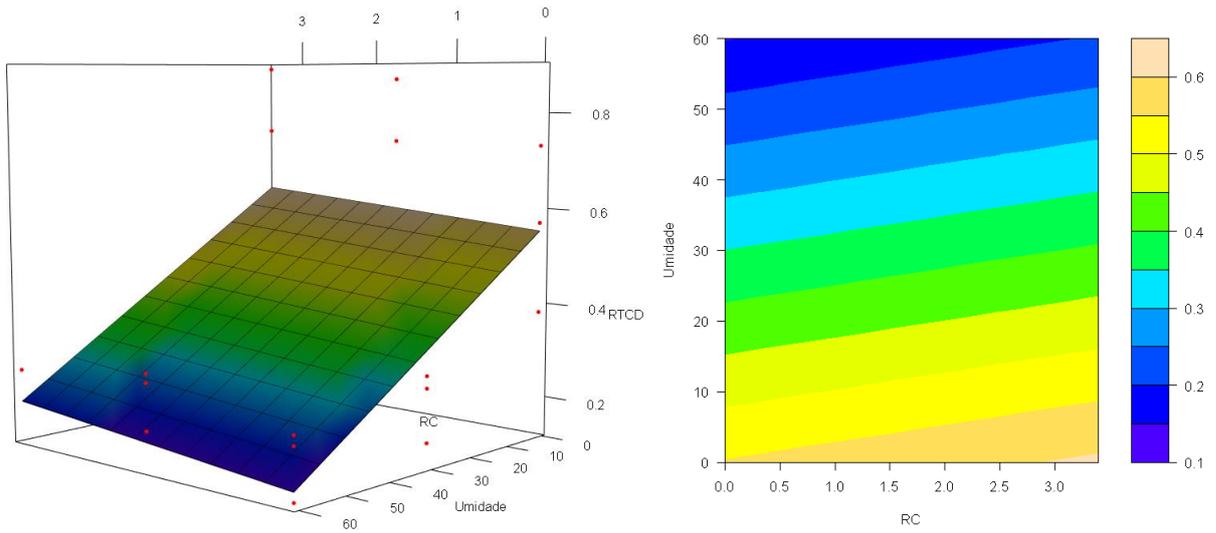


Figura 49 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura úmida RTCD para RTCD.

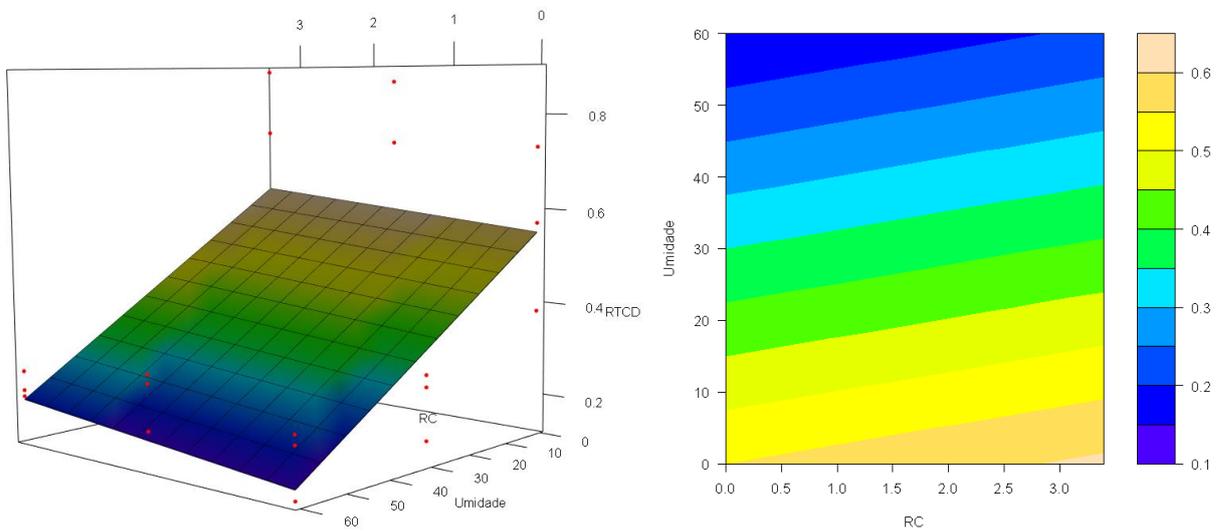


Figura 50 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura sob ciclos de durabilidade para RTCD.

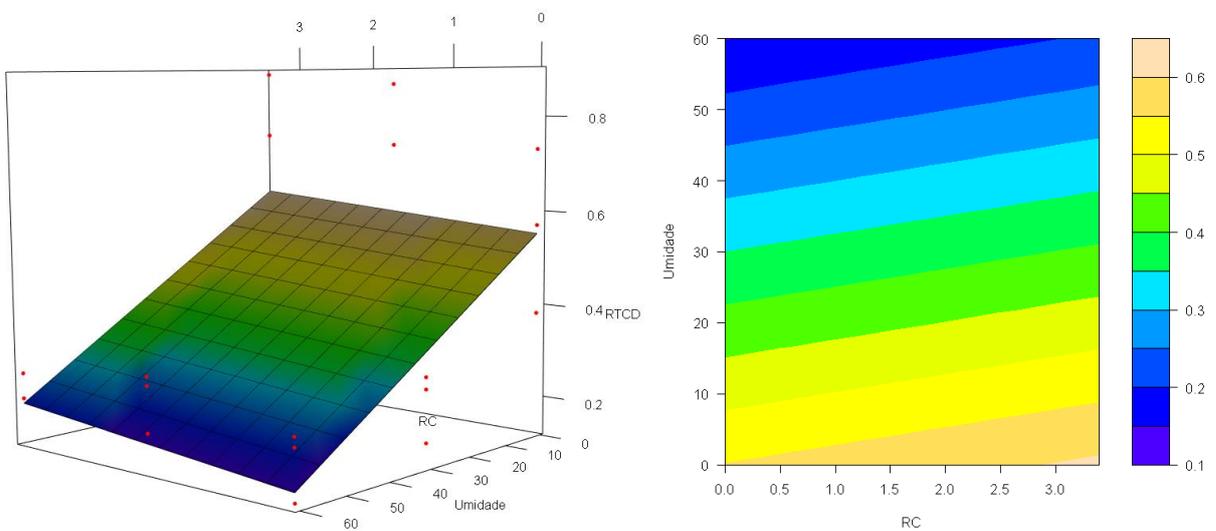


Figura 51 Gráfico 3-D e Gráfico Superfície para condição de cura submersa para RTCD.

4.3.3 Gráfico de otimização dos efeitos

A opção máxima de intervalo para todas condições foi selecionada por meio de otimização numérica do *software* ActionStat e obtenção do valor máximo da resistência à tração por compressão diametral. A Figura 52 apresenta a otimização para cada cura. A resistência máxima foi obtida para teor de aditivo RC de 3,4 kg/m³ e 0 % de acréscimo na hot, com valor de 0,61 MPa para todas as três condições de cura.

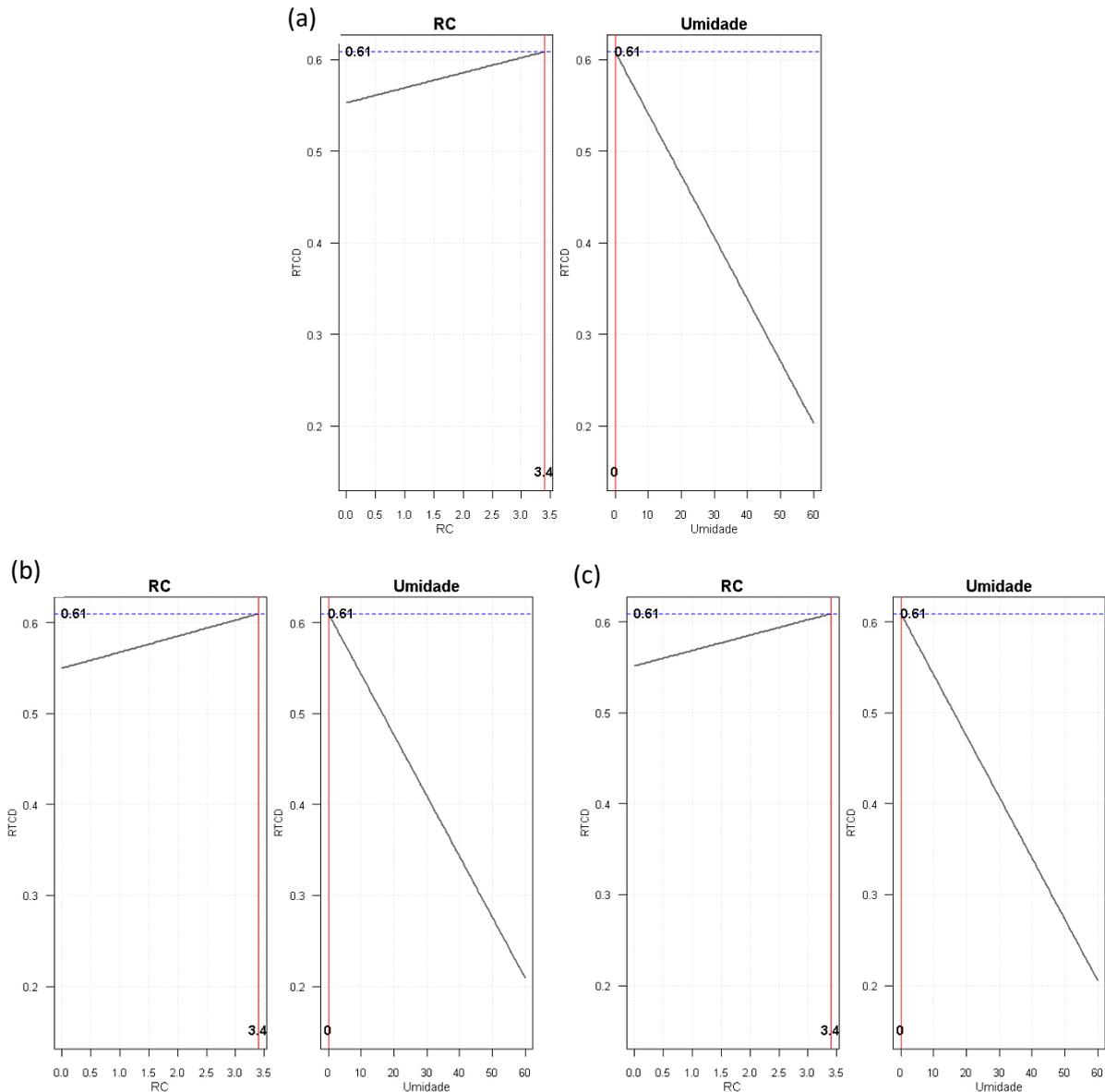


Figura 52 Previsão de resistência máxima para amostras nas condições de cura úmida (a), cura sob ciclos de durabilidade (b) e cura submersa (c) para RTCD.

Kennedy *et al.* (1971) propuseram modelos matemáticos lineares que podem ser utilizados para definir a correlação entre a RCNC e RTCD para solos estabilizados com cimento, conforme mostrado na Equação 4.7.

$$RTCD = -11,38 + 0,1662 \cdot RCNC \quad (4.7)$$

Onde, RTCD e RCNC são as tensões de ruptura para os respectivos ensaios, em libra-força por polegada quadrada (psi), sendo $1 \text{ psi} \approx 0.0069 \text{ MPa}$.

Utilizando a Equação 4.7, com os resultados de tensão de ruptura obtidos na análise de otimização da RCNC no capítulo anterior é possível obter os valores de 0,91 MPa, 0,72 MPa e 0,69 MPa para a RTCD nas condições de cura sob ciclos de durabilidade, úmida e submersa, respectivamente. A proximidade com o resultado de otimização obtido neste estudo, de 0,61 MPa, indica adequabilidade do modelo proposto.

4.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO SOLO-CIMENTO-RC

Resultados das alterações das propriedades mecânicas do uso de aditivo RC em solos estabilizados com cimento já foram discutidos anteriormente. Para entender essa mudança no comportamento dos materiais, as imagens de MEV possibilitam uma análise em microescala.

Foi determinado análise em misturas com duas taxas de aditivos RC e duas condições de cura. Para cada amostra foram examinados 3 regiões e em cada região foram realizadas imagens com diferentes aumentos. Contudo, para cada condição, é apresentado apenas uma região que busca representar a micrografia típica.

A micrografia do solo estabilizado com cimento e aditivo são apresentadas nas Figuras 53 e 54. A Figura 53 apresenta as imagens de solo estabilizado com cimento com e sem aditivo RC para condição de cura submersa, já a Figura 54 apresenta mesmo material diferenciando a condição de cura sob ciclos de durabilidade. Para cada condição, foram obtidas imagens em 4 magnitudes: aproximação de 100, 500, 1500 e 5000 vezes. Os círculos vermelhos indicam a região da aproximação contemplada na foto subsequente.

Todas as amostras já possuem 28 dias de cura e o produto da hidratação cimentícia e reações pozolânicas (trocas catiônicas e floculação) já tomaram conta de suas superfícies, unindo as partículas de argila floculada, não sendo possível observar placas individualizadas de caulinita e propor uma análise pedológica.

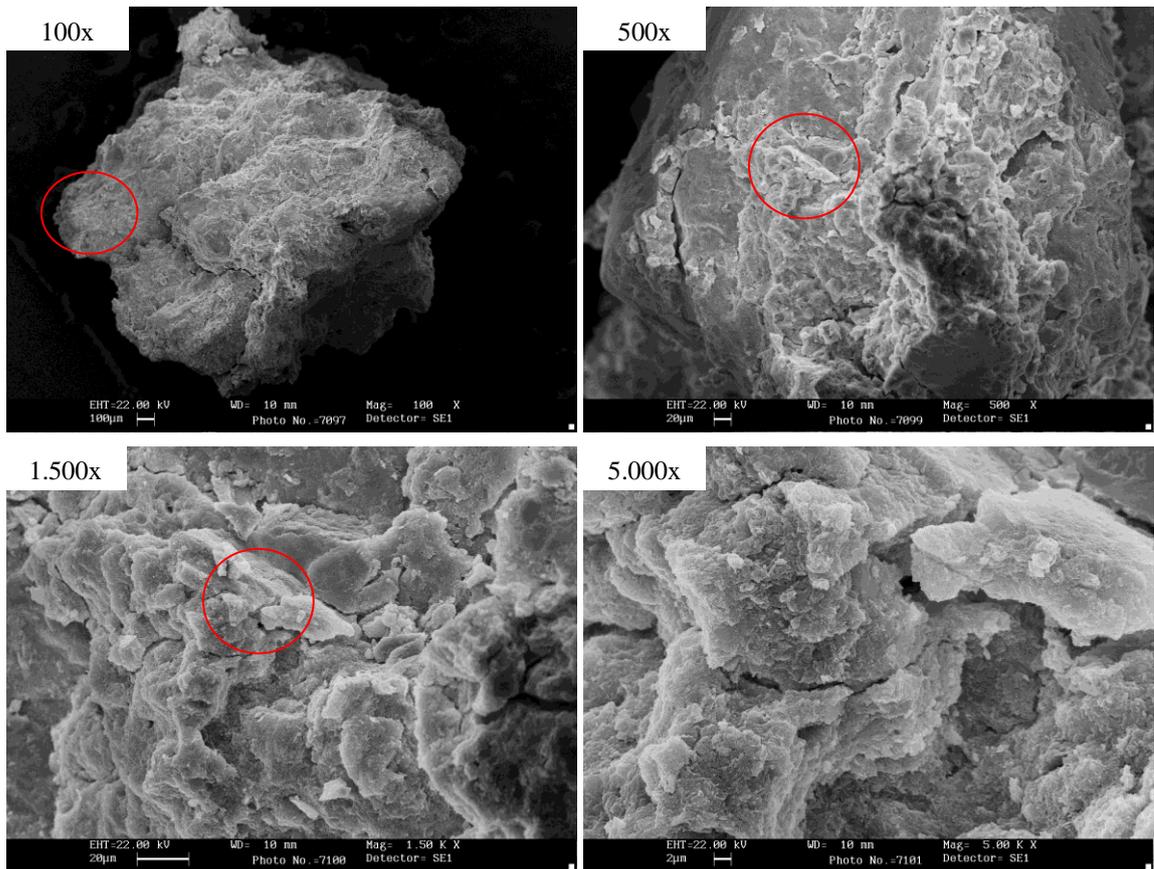
Uma estrutura formada mais densa e complexa, com menor ocorrência de fraturas é observada nas amostras com aditivo RC indicando maior quantidade de produtos da hidratação cimentícia. Não foi observado estruturas cristalinas com formato de cristais hexagonais conhecida como hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 . Não é possível identificar a gênese laterítica ou não do solo em função da superfície está tomada pelos produtos de hidratação cimentícia.

Pôde-se observar cristais de etringita ($1 \mu\text{m}$) em formato de agulha nas amostras com aditivo RC para as ambas condições de cura. Cristais semelhantes ao observado são

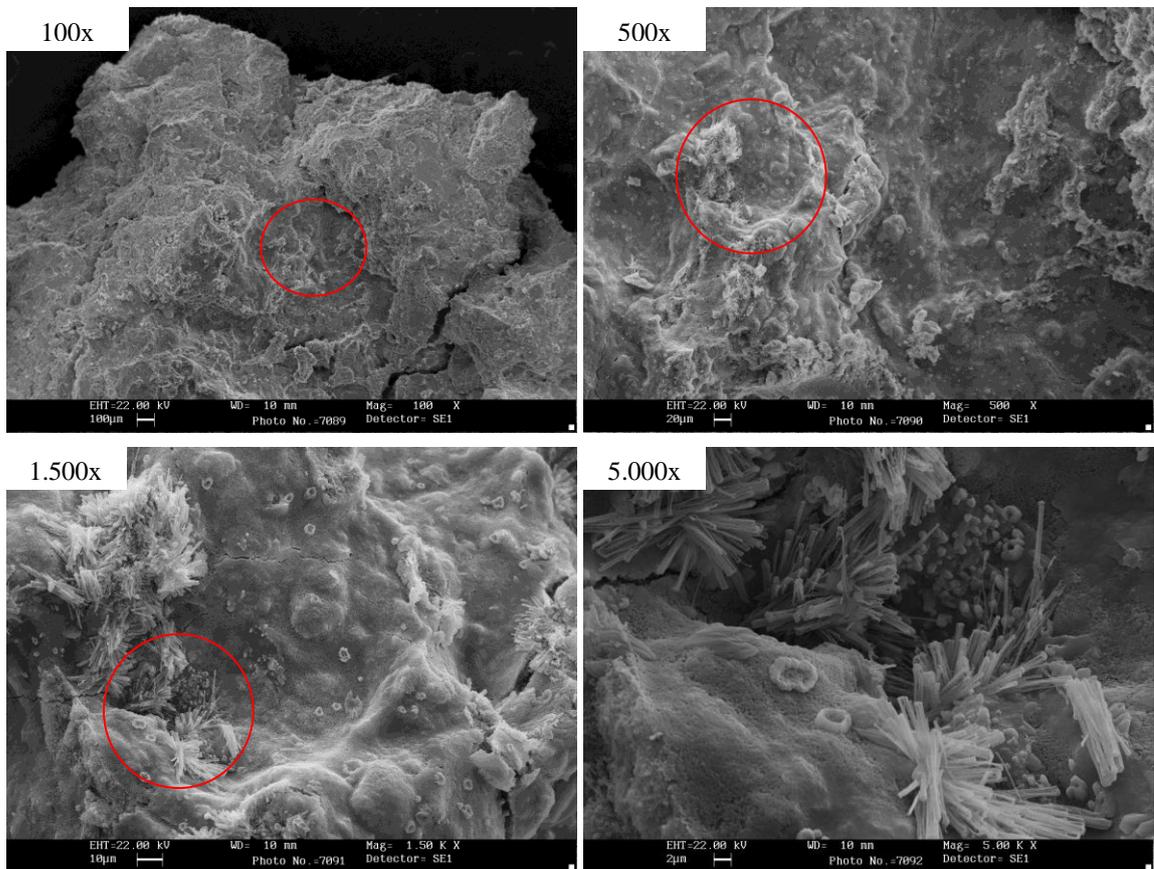
encontrados por toda área de varredura em ambas amostras com aditivo RC. Enquanto nas amostras sem aditivo, nenhum foi observado.

Em termos de condição de cura, não foi observado diferenças representativas, sendo possível observar uma malha de cristais de etringita mais densa nas amostras que foram submetidas ao ciclo de durabilidade. O processo de aquecimento em estufa durante a etapa de secagem pode ter ampliado a formação desses cristais.

Cristais de etringita são tipicamente formados de sulfatos com partículas de argila na amostra. Minnick (1967) sugere que os principais compostos cimentantes formados em misturas contendo cal e cinza são, provavelmente, membros da família da tobermorita (silicato de cálcio hidratado) e, possivelmente, da etringita (sulfato de cálcio e aluminato hidratado), que, em grandes quantidades podem gerar tensões no pavimento devido à expansão volumétrica (HUNTER, 1988). Wu (2014), em sua pesquisa, não identificou problemas com expansão das amostras com aditivo RC. Isso pode ser explicado pela compensação na minimização da retração hidráulica que ocorre devido à perda de umidade durante a hidratação cimentícia. O conjunto de reações químicas que envolve solos tropicais com cimento e aditivo RC e provoca a formação desses cristais identificados nas amostras devem ser alvo de investigações mais aprofundadas.

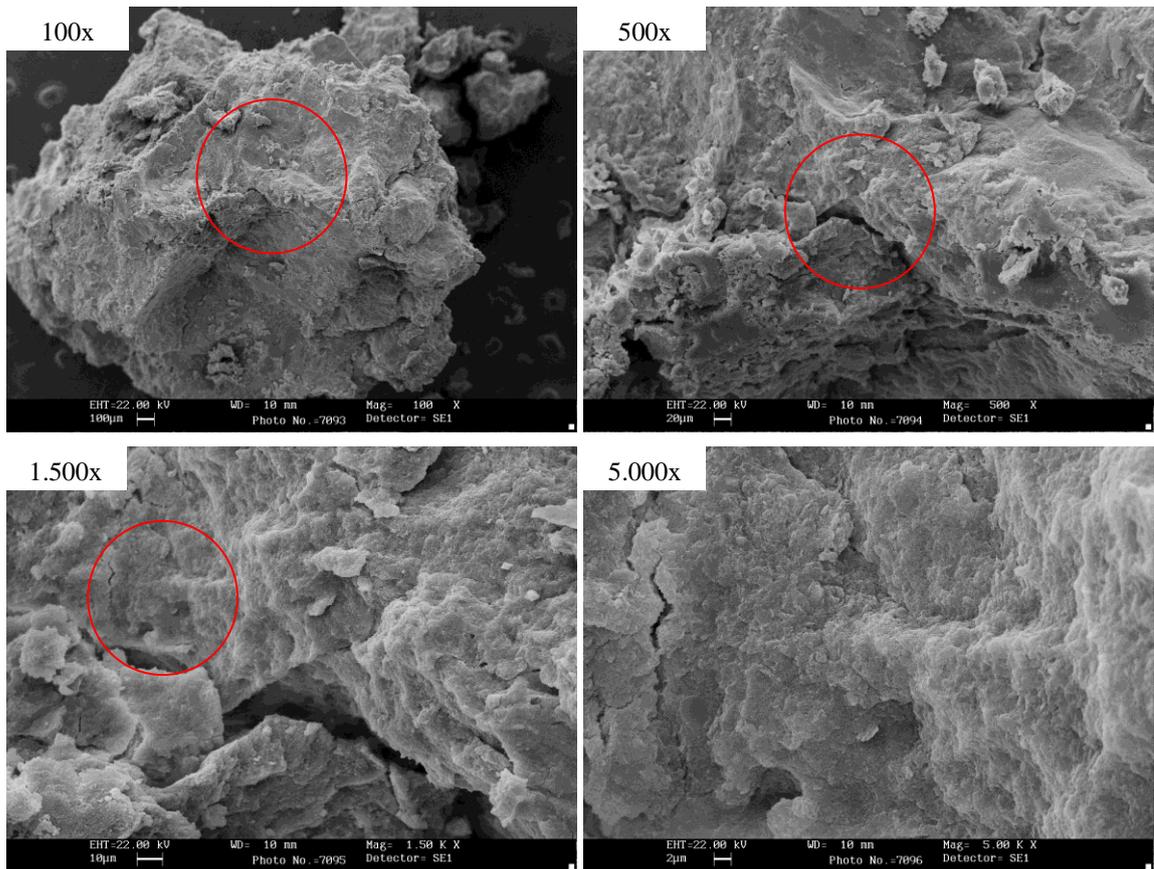


(a) Solo estabilizado com 8,2 % de cimento e 0 % de aditivo RC para condição de cura submersa.

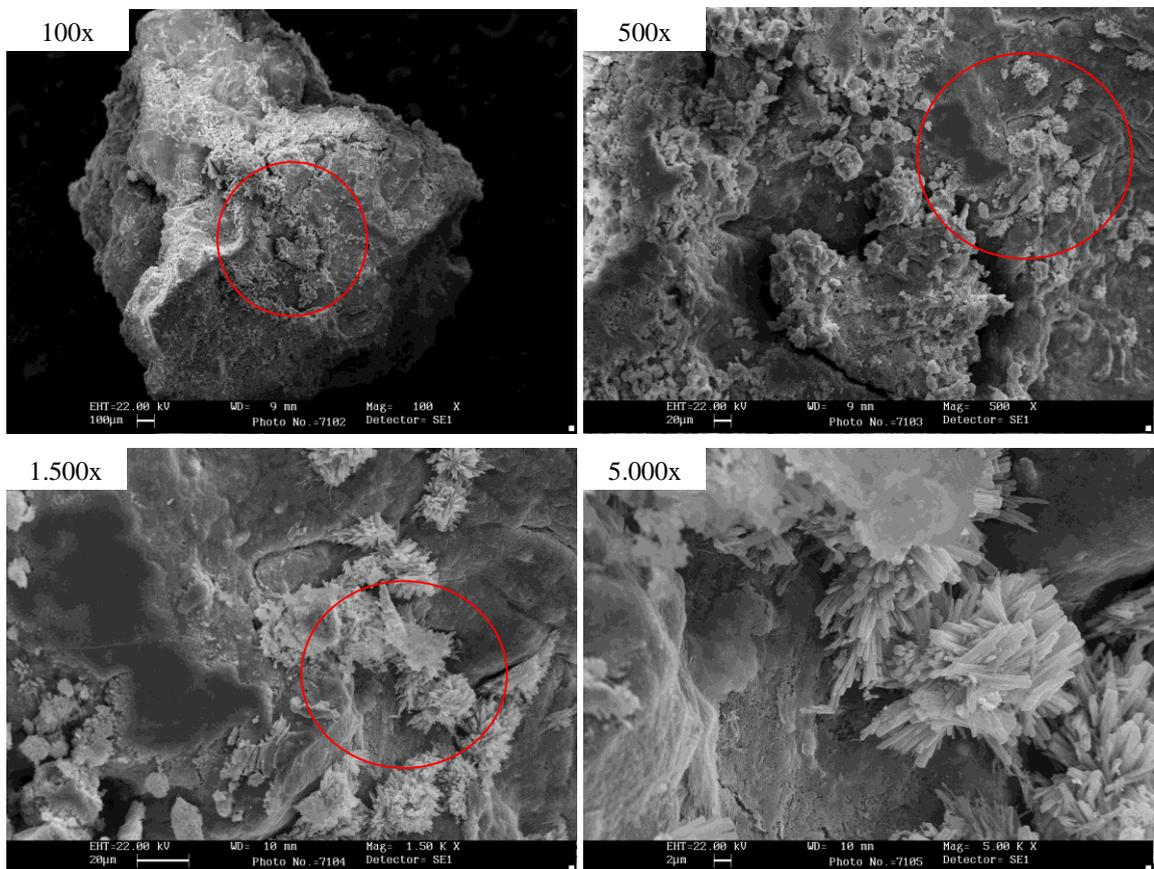


(b) Solo estabilizado com 8,2 % de cimento e 0,174 % de aditivo RC para condição de cura submersa.

Figura 53 Imagens MEV de solo estabilizado com cimento sem (a) e com (b) aditivo RC para condição de cura submersa com 28 dias.



(a) Solo com 8,2 % de cimento e 0 % de aditivo RC para condição de cura com ciclos de durabilidade.



(b) Solo estabilizado com 8,2 % de cimento e 0,174 % de aditivo RC com ciclos de durabilidade.

Figura 54 Imagens MEV de solo estabilizado com cimento sem (a) e com (b) aditivo RC para condição de cura com ciclos de durabilidade com 28 dias.

5 APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO-RC NO AMAZONAS

Utilizando-se deste compósito com solo de matriz cimentícia e aditivo RC, é proposto uma sistemática de execução de obra desde a sua concepção até o pós obra, apresentando uma estrutura de ações que tem como referência as principais normas e literaturas nacionais e a sistemática de trabalho da companhia fornecedora do aditivo adaptada assim às condições regionais.

Na sequência são apresentados os resultados do estudo de caso por meio da construção de trecho experimental de base estabilizada com solo cimento e aditivo RC em uma estrada rural não pavimentada coadjuvando na identificação das principais características e considerações para futuras aplicações em condições similares.

5.1 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO

A proposta de desenvolvimento dos procedimentos sistemáticos de execução de pavimento de base estabilizada do solo de subleito com cimento e aditivo RC é dividido em 3 fases. A primeira fase, (i) Concepção Inicial, consiste na apresentação sistemática das atividades antes do início da obra, coletando informações para desenvolvimento do projeto estrutural do pavimento. A segunda fase delinea os procedimentos de (ii) Execução de Obra, apresentando as etapas construtivas que devem ser estabelecidos para garantia da qualidade da execução. Por fim, a terceira fase, (iii) Avaliação e Monitoramento Pós Obra, apresenta os testes e inspeções que devem ser executadas para verificar a qualidade da construção após a conclusão. Essas etapas serão detalhadas nos subitens a seguir.

5.1.1 Concepção Inicial

Nesta fase realiza-se a coleta de informações do subleito, cimento e tráfego determina-se o traço que será utilizado na obra e o desenvolvimento do projeto estrutural.

5.1.1.1 Caracterização do subleito

É necessário identificar as características da camada superior de solo natural, no qual será tratada com cimento e RC e será considerada a camada de base do pavimento, e determinar a capacidade de suporte na camada inferior (subleito). Os parâmetros que imprimem influência nas características dos solos e os respectivos ensaios são definidos no Quadro 17.

Quadro 17 Procedimentos para caracterização do subleito (Adaptado de POWERCEM, 2015)

PARÂMETROS	ENSAIOS
Propriedades químicas	Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - NBR 13600 (ABNT, 1996). Determinação da Composição Química
Distribuição granulométrica	Análise Granulométrica NBR 7181 (ABNT, 2016a)
Consistência	Determinação de limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 2016b). Determinação do limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Classificação SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos solos
Capacidade de suporte	Ensaio de Compactação na Energia Modificada – NBR 7182 (ABNT, 2016d). Ensaio Índice Suporte Califórnia – NBR 9895 (ABNT, 2016e). Teste de Placa (Plate test). Deflectômetro de Impacto <i>tipo Falling Weight Deflectometer</i> (FWD) (DNER, 1996)

As propriedades químicas influenciam na composição química da mistura e a quantidade de matéria orgânica determinam o traço (GERSONUIS e EGYED, 2012). A distribuição granulométrica e sua consistência é um método para verificar o tipo de solo. Para este estudo a classificação SUCS será adotada, seguindo a metodologia da fabricante. Por fim, o Quadro 18 apresenta uma relação do Módulo Dinâmico (E_{dyn}) com o tipo de solo.

Quadro 18 Capacidade de suporte por tipo de solo (GERSONUIS & CHRISTOPHE, 2012).

Tipo de solo	Módulo Dinâmico (E_{dyn})
Solo Orgânico	25 N/mm ²
Argiloso	50 N/mm ²
Argilo Arenoso	75 N/mm ²
Arenoso	100 N/mm ²

5.1.1.2 Seleção do tipo de cimento utilizado

O processo de cristalização prolongada muda significativamente ao se usar o RC. O aditivo pode ser utilizado com qualquer tipo de cimento disponível no mercado. Contudo, a utilização de cimento com altas taxas de cal hidratado em seu conteúdo, na estabilização de solos argilosos, não é recomendada, visto que, a cal hidratada pode consumir a água ligada quimicamente às partículas de argila, criando retrações e possíveis fissuras.

5.1.1.3 Determinação da dosagem

Após classificação do tipo de solo do subleito, é realizado a definição do traço, utilizando o Quadro 19 como referência, levando em conta sua classificação SUCS.

Quadro 19 Dosagem de cimento e RC em função do tipo de solo (adaptado de Gersonuis & Egyed (2012)).

TIPO	Indicativo de quantidade de RC (kg/m ³) na densidade máxima seca	Indicativo de quantidade de cimento (kg/m ³) na densidade máxima seca	Estimativa de Compressão Simples a 28 dias (MPa)	Módulo Dinâmico (MPa)
GW	1.0 – 1.4	100 – 140	10-15	10000
GP	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6000
GW-GM	1.2 – 1.6	120 – 160	10-15	10000
GW-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	10-15	10000
GP-GM	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6000
GP-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6000
GM	1.5 – 1.8	150 – 180	6-11	6000
GC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5000
GC-GM	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5000
SW	1.2 – 1.6	120 – 160	5-13	8000
SW-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6000
SW-SC	1.4 – 2.0	140 – 200	7-12	7000
SP	1.2 – 1.8	140 – 200	5-10	5000
SP-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	5-10	5000
SP-SC	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5000
SM	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5000
SC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	4000
ML	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	5000
CL	1.7 – 2.0	170 – 200	5-6	3500
OL	1.5 – 1.9	150 – 190	5-7	3500
MH	1.6 – 2.0	160 – 200	5-7	3000
CH	1.8 – 2.2	180 – 220	4-7	3000
OH	2.0 – 2.4	200 – 240	4-6	3000
PT	2.2 – 2.8	220 – 280	1-3	1000

5.1.1.4 Moldagem e ruptura dos CPs

Com quantidades de aditivo RC e cimento definidos para mistura, segundo Quadro 19, realiza-se a avaliação da resistência mecânica afim de atender a estimativa de compressão, através de ensaios de RCNC. Para moldagem e ruptura dos CPs devem ser seguidos os preceitos de moldagem de CP do método de ensaio do DNER (1994a) e rompimento de CP segundo DNER (1994b) adaptado em função da utilização do aditivo RC (POWERCEM, 2015):

- a) Para homogeneização, a quantidade mínima de RC é de 50 g. Em caso de doses inferiores, nem todas substâncias ativas podem estar contidas na mistura gerando resultados não desejados;
- b) A homogeneização do material deve ocorrer em equipamento homogeneizador ou argamassadeira com capacidade para 50 kg;
- c) O RC deve ser homogeneizado ao solo antes de adicionar o cimento. Em caso de solos argilosos ou orgânicos, recomenda-se deixar a mistura solo/RC por 3 horas antes de aplicar o cimento, homogeneizando a mesma ocasionalmente;

- d) Após determinação da h_{ot} pelo ensaio de compactação, realizar a homogeneização da mistura com solo na umidade hot +1 %;
- e) A homogeneização se dá como concluída após confirmar ausência de diferentes colorações da mistura. E as amostras devem ser compactadas em no máximo 2 horas após adição de cimento na mistura. Deve-se agitar a mistura a cada 15 minutos. Durante a compactação das amostras, deve-se manter o resíduo da mistura vedado para conservação da umidade;
- f) O molde cilíndrico (100 mm x 120 mm) deve ser bipartido para auxiliar na desmoldagem sem danificar a amostra. A utilização de parafina ou óleo lubrificante nas paredes internas do molde deve ocorrer antes de iniciar a compactação;
- g) Após a compactação, o desmolde é aconselhado após 24 horas para solos arenosos ou imediatamente para solos argilosos e as amostras serão armazenadas em câmara úmida (maior que 90 %) à temperatura 23 °C até o momento da ruptura.

Para avaliar o ganho de resistência inicial e sua resistência característica, realiza-se a ruptura dos CPs nas idades 3, 7 e 28 dias. Sendo que os valores de resistência com 28 dias devem se enquadrar na faixa definida no Quadro 19. Em caso de divergência com os valores limites estabelecidos, aumenta-se taxa de cimento e aditivo RC para valores inferiores, e diminui-se a taxa para valores superiores.

5.1.1.5 Estudo de tráfego

O estudo de tráfego tem como objetivo fornecer elementos necessários para avaliação e desenvolvimento do projeto estrutural do pavimento. A expectativa de carregamento e a função do pavimento determina o tipo de construção, tipo de material utilizado, espessura da camada e critérios específicos. O parâmetro de projeto (BALBO, 2007) que indica o número total de repetições equivalentes do eixo simples de rodas duplas com 80 kN, que ocorrerá em todo o horizonte de projeto, é denominado Número N.

5.1.1.6 Desenvolvimento de projeto estrutural

O desenvolvimento do projeto estrutural compreende a determinação da espessura da camada única de base formada de solo-cimento-aditivo RC considerando as características dos materiais e tráfego. A espessura é definida através de cálculo utilizando-se *software* de análise elástico linear dos materiais que utiliza parâmetros de rigidez para análise das tensões e deformações nos pontos críticos da construção de pavimento.

O cálculo das deflexões e deformações é elaborado de acordo com os máximos valores das propriedades dos materiais como: máxima capacidade de tensão, máxima capacidade de

deformação definido como 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ para materiais estabilizados com cimento e RC e influência a carregamentos repetitivos.

A fadiga devido à aplicação de cargas repetidas é governada pela resistência à tração na flexão, é dependente do tipo de carga aplicada, sua duração e dimensões, bem como do número de ciclos de aplicações de cargas (CERVO, 2004). O mecanismo de falha padrão para construções com camada de cimento e RC é a influência das cargas repetidas na base da camada estabilizada. Quando ocorrem trincas nesta zona inferior da camada estabilizada, pode-se considerar estruturalmente danificada. Marjanovic *et al.* (2009) define que o teste de fadiga para a camada estabilizada deve obter um valor mínimo de 10^7 repetições de carregamento com a tensão de 80 $\mu\text{m}/\text{m}$ alcançada com um carregamento de eixo de 100 kN.

5.1.2 Execução De Obra

A seguinte programação de atividades é proposta seguindo as principais condicionantes e prevendo eventualidades típicas encontradas na região. A expectativa de clima no Amazonas é geralmente de alternância entre períodos de calor intenso e chuva, com canteiro de obras muito úmido. Os solos argilosos se tornam muito escorregadios e fácil de atolar quando chove. Assim equipamentos com boa tração são fundamentais. Em relação aos elementos de drenagem, condução de águas superficiais e controle de processos erosivos, os mesmos devem ser mantidos sem alteração.

De modo geral, a obra se dá pela adição e mistura do aditivo RC e cimento, seguido pelo nivelamento, compactação e acabamento da superfície. Neste processo, a adição do aditivo RC pode ocorrer um dia antes da aplicação do cimento.

Etapa 1 - Abertura de camada de solo *in situ*: após fechamento da pista, realiza-se uma remoção de matéria orgânica remanescente e impurezas da pista. O trecho para receber a mistura de solo-cimento deve estar preparado no que se refere à drenagem, nivelamento e seção transversal fixados no projeto. Realiza-se a abertura de camada de solo *in situ* com auxílio da recicladora. Em seguida prepara-se a camada para aplicação do aditivo através do nivelamento com motoniveladora e a correção superficial com uma passada de rolo compactador liso.

Etapa 2 - Distribuição do RC: para realizar o espalhamento aditivo RC na pista segundo as taxas definidas em projeto, utiliza-se distribuidor de agregados ou delimita-se marcas na pista para alocação manualmente de cada saco. Na sequência, a recicladora mistura o solo e o RC a 2/3 da espessura da camada final de projeto (Figura 55). Após a completa incorporação do aditivo, a pista é levemente compactada para prevenir infiltração de água em caso de chuva.



Figura 55 Espalhamento manual do RC (a) e homogeneização com solo *in situ* utilizando-se de recicladora (b).

(Fonte: Própria 2016).

Etapa 3 - Adição de cimento e água à mistura: realiza-se a distribuição uniforme do cimento na superfície manualmente ou com auxílio de máquina distribuidora de agregados na dosagem de projeto. Inicia-se a homogeneização, utilizando recicladora, do solo/cimento/aditivo na espessura final de projeto (3/3) até que seja observado tonalidade uniforme em toda a camada e a correção da umidade progressivamente com auxílio do caminhão pipa.

Etapa 4 - Nivelamento, compactação e acabamento superficial: tendo concluído homogeneização da mistura, realiza-se a regularização da pista para dar início à compactação utilizando rolo compactador adequado para espessura de projeto. O tempo entre o contato do cimento com solo e a compactação final deve ocorrer em até no máximo 3 horas. Após este intervalo, a compactação pode quebrar ligações iniciais realizadas entre o solo cimento reduzindo a resistência da camada. Após, realiza-se conformação do trecho ao greide e o abaulamento desejados, depois, um polimento com rolo compactador liso e acabamento final com rolo pneumático leve (Figura 56).

Etapa 5 – Cura: Finaliza-se a atividade com lançamento de água na superfície acabada abundantemente com auxílio do caminhão pipa, com pneus levemente vazios e à 50% da sua capacidade de total. A base estabilizada deve permanecer fechada para tráfego durante 7 dias, sendo protegida contra a perda rápida de umidade através da aplicação de camada de areia, de capim, ou de outro material, realizando a molhagem duas a três vezes por dia (Figura 56 (d)). Em caso de necessidade de abertura da via antes da data prevista, verificar resistência à compressão para amostras com idade de 3 dias atingiu mínimo de 2,1 MPa.



Figura 56 Etapas de compactação (a), abaulamento (b), acabamento final (c) e cura (d). (Fonte: Própria, 2016)

Para maior preservação da estrutura final, recomenda-se aplicação de revestimento asfáltico delgado. Muitos métodos de revestimento asfálticos estão disponíveis e podem ser utilizados. A decisão sobre a opção mais adequada será afetada pela disponibilidade de materiais adequados e considerações econômicas. Cada um dos vários tipos de revestimentos asfálticos tem requisitos específicos no que se refere aos materiais e equipamentos necessários para aplicação. Tratamento Superficial Simples (TSS) ou Tratamento Superficial Duplo (TSD) é uma opção de revestimento asfáltico que exige habilidade mínima, a produção e execução são à temperatura ambiente, duráveis, rápidos de executar e, dependendo da intensidade de tráfego, é uma opção efetiva e econômica (BERNUCCI *et al.*, 2006). Recomenda-se aplicação após 48 horas da conclusão da estabilização com cimento e RC, seguindo todos procedimentos necessários para o tipo de revestimento escolhido.

5.1.2.1 Controle tecnológico

Para garantia da qualidade da execução deve-se seguir todas recomendações e testes necessários durante a obra descritos em DNIT (2010). Em acréscimo, durante a execução da obra, utiliza-se da mistura da pista realizada pela recicladora antes da compactação para

moldagem de CP e verificação da sua resistência mecânica futura. Os ensaios de resistência dos CP moldados na obra servem para verificar a qualidade da mistura e preceder resultados rápidos com 3 e 7 dias. Seus resultados devem atingir valores semelhantes aos ensaios realizados com mistura em laboratório.

5.1.3 Avaliação e Monitoramento

Para avaliação e monitoramento da qualidade da estrutura executada realiza-se inspeção de campo, ensaio de RCNC para amostras extraídas da pista e determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto após 28 dias de conclusão da obra, conforme sugerido no Quadro 20.

A inspeção visual tem por objetivo identificar a intensidade do processo de retração hidráulica e propagação de trincas, e propor medidas mitigatórias. Os ensaios de resistência dos CP extraídos com 28 dias servem para verificar a qualidade da cura e o seu comportamento estrutural. Durante a extração da amostra avalia-se a espessura da camada novamente. O CP deve possuir diâmetro mínimo de 150 mm e serem nivelados e capeados para realização de ensaio de compressão simples. Os valores de resistência do CP extraído pode atingir patamar entre 30% e 70% da resistência requerida de projeto (GASPARD, TRANSPORTATION & ROUGE (2002); WU, HOUBEN & EGYED (2013); VOROBIEFF (1998)).

Quadro 20 Ensaio pós obra. (Adaptado de MARJANOVIC *et al.*, 2009).

ENSAIO	MÉTODO	FREQUÊNCIA
Inspeção Visual	Verificação de danos e deformações na pista e espessura da camada nos locais onde é extraído amostra de campo.	Todo trecho
RCNC	Extrai-se CP da pista e analisa sua resistência mecânica através de ensaio de compressão simples	A cada 800m ²
Determinação das deflexões	Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)"	A cada 10m

5.2 TRECHO EXPERIMENTAL

Realizou-se um estudo de caso para avaliação da performance dos procedimentos sistemáticos por meio da construção de uma seção teste de base estabilizada com solo cimento e aditivo RC em uma estrada rural não pavimentada onde foi realizado projeto estrutural, inspeção visual, ensaios de RCNC antes, durante a após a construção, ensaios de RTCD para amostras moldadas em laboratório e levantamento de produção e custo.

5.2.1 Projeto Estrutural

O solo caracterizado no capítulo 3 define o subleito do trecho experimental, no qual possui E_{dyn} de 75 N/mm² como parâmetro de resistência a favor da segurança durante a

concepção do projeto. A definição do traço da camada de base foi estabelecida em $1,7 \text{ kg/m}^3$ de RC (0,09% em relação ao solo seco) e 160 kg/m^3 de cimento (8,20%), estes valores são estabelecidos conforme estabelece o Quadro 19 para solo de classificação CL. Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos CP moldados em laboratório antes da obra nesta dosagem encontraram valores em torno a 8 MPa para 28 dias, atendendo a condição mínima estabelecida, e foi definido a resistência característica para o solo-cimento-aditivo com E_{dyn} de 4500 MPa.

A expectativa de crescimento do tráfego é baixa devido a função da estrada ser uma vicinal para utilização do Exército Brasileiro, sendo previsto caminhões e veículos blindados (450 kN). Quanto ao tráfego definiu-se:

- a) Tráfego tipo normativo: veículos blindados (carga por roda de 75 kN);
- b) Carregamento de eixo padrão de 150 kN;
- c) Pressão nos pneus normativos de veículos de 557 kPa;
- d) Máximo carregamento na construção: 75 kN carga por roda;
- e) Vida útil estimada da construção: 5 anos;
- f) Tráfego assumido durante a vida útil de 5 anos: 5 blindados por ano.

O Quadro 21 apresenta os critérios então definidos e o cálculo de espessura das camadas através de *software* BISAR 3.0 e no Apêndice C é apresentado a ficha de análise emitida pelo programa. Por conseguinte, fica estabelecido que, para a dosagem e tráfego estabelecidos, a espessura da camada estabilizada deve possuir 35 cm (4500 MPa de E_{dyn}) e capa asfáltica de 3cm (3500 MPa de E_{dyn}).

Quadro 21 Critérios de projeto para desenvolvimento de projeto.

TRÁFEGO	Número de Repetições do Eixo-padrão (N)	$2,5 \times 10^4$
CAMADA 3 REVESTIMENTO	Material	AAUQ
	Rigidez (E_{dyn})	3500 MPa
	Espessura	3 cm
CAMADA 2 BASE	Material	Solo-Cimento-RC
	Rigidez (E_{dyn})	4500 MPa
	Espessura	35 cm
CAMADA 1 SUBLEITO	Material	Solo (CL)
	Rigidez (E_{dyn})	75 MPa
PROPRIEDADES DO SOLO- CIMENTO-RC	Número mínimo de repetições de carga para causar falha (N_i)	$4,6.10^6$
	Deformação Horizontal limite	150 $\mu\text{m/m}$
CÁLCULOS SOFTWARE BISAR	Cálculo de deformação Horizontal devido ao carregamento axial Padrão	111 $\mu\text{m/m}$
	Checagem de Fadiga ($N/N_i < 1$)	0,01

5.2.2 Resultados de obra

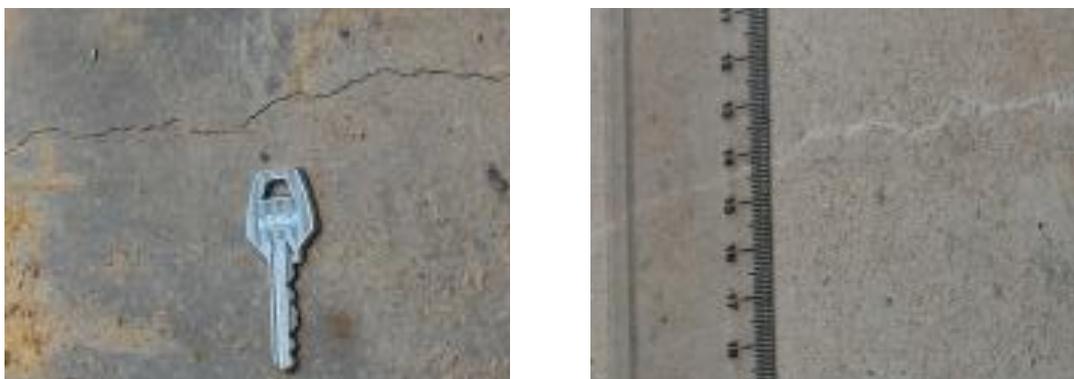
A execução da obra seguiu os procedimentos executivos descritos, sendo que no primeiro dia foi preparado o local e incorporado apenas o aditivo ao solo. No segundo dia incluiu-se o cimento e água na umidade ótima e realizou-se os restantes das etapas (Figura 57).



Figura 57 Aspecto final da seção teste com 1 dia de conclusão em 10/16 (a) e após 490 dias em 02/18 (b).

Na seção teste fora realizado todas as avaliações e testes estabelecidos. O controle de umidade foi realizado através de teste *Speedy*, o grau de compactação avaliado pelo método de determinação da densidade *in situ* com frasco de areia e a espessura da camada solta foi garantida pela própria régua embutida da recicladora no ato da abertura das camadas.

Mediante inspeção visual da obra durante as primeiras 48 horas de cura, observou-se surgimento de algumas trincas transversais, superficiais e isoladas com profundidades média de 1 mm, mostradas na Figura 58.



(a) 24 horas após a conclusão.

(b) 48 horas após a conclusão.

Figura 58 Regeneração de trincas 1mm.

Neste período ocorre expansão volumétrica que geram tensões internas de tração no material ainda em estado fresco. A microestrutura em formação, sofre com crescimento secundário da fase impura da etringita. E, como consequência da continuidade da hidratação do C_3S , o silicato de cálcio hidratado começa a se formar no interior da carapaça hidratada (SCRIVENER, 1989).

Este efeito fica mais intenso em argilas plásticas com teores elevados de cimento expostas a alta umidade que a floresta exerce durante a noite e ao calor intenso durante o dia. No entanto, o ganho de resistência contínuo do material interrompeu a propagação das trincas nos dias subsequentes, sendo incorporadas naturalmente por solos finos dando um aspecto de regeneração natural da base. Os resultados de resistência à compressão das amostras moldadas em laboratório, das moldadas com mistura de campo e das extraídas da pista podem ser observadas na Figura 59. Todos os testes foram realizados com mesmo solo e taxa de aditivo RC e cimento, contudo valores de resistência alteraram significativamente.

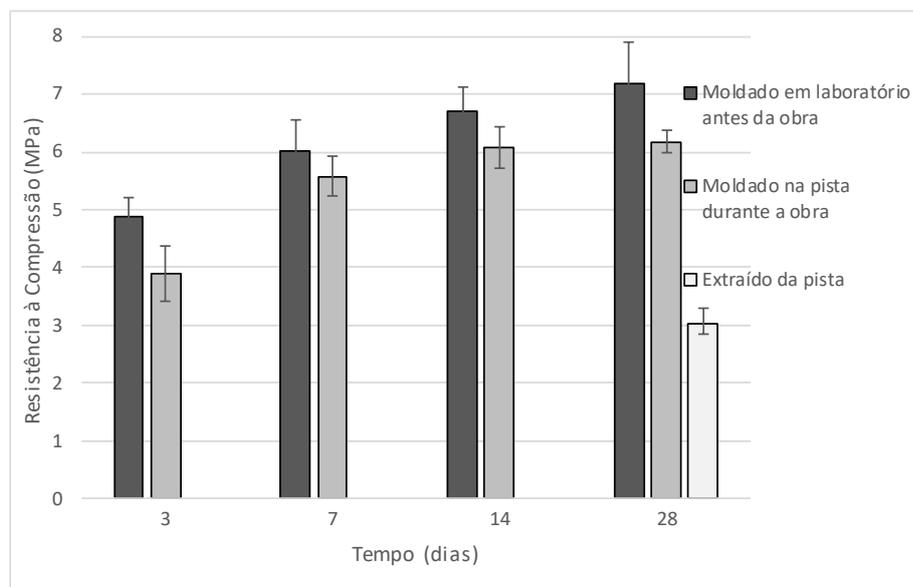


Figura 59 Comparativo de resistência à compressão para amostras moldadas em laboratório, durante a obra e extraídas diretamente da pista.

Dos CPs moldados com a mistura da pista durante a obra, observou-se resultados de resistência à compressão próximos aos resultados dos moldados em laboratório. A qualidade da mistura feita pela recicladora e o tempo entre a homogeneização e a compactação são os principais fatores que ilustram a diferença entre a resistência das amostras moldadas em laboratório e moldadas com mistura em campo que foram em torno de 15%.

Já amostras extraídas diretamente da pista resultaram em resistência 41% inferior quando comparada às amostras moldadas em laboratório. A alteração é causada principalmente

pelas técnicas de construção, a qualidade da mistura e da compactação pelos equipamentos em campo que possuem dificuldades inerentes inevitáveis, enquanto em laboratório busca-se sempre condições ideais. Durante o processo de extração de amostra, a água utilizada na lâmina durante a operação e a vibração excessiva podem danificar a matriz estrutural do CP reduzindo a resistência real.

Em relação às tensões de tração que as regiões inferiores do pavimento recebem devido às cargas verticais impostas pelo tráfego, avaliou-se a RTCD do material segundo a ABNT (1993) em CP de 7, 14 e 28 dias. Os resultados indicados na Figura 60 apresentaram valores superior a 1 MPa com 7 dias.

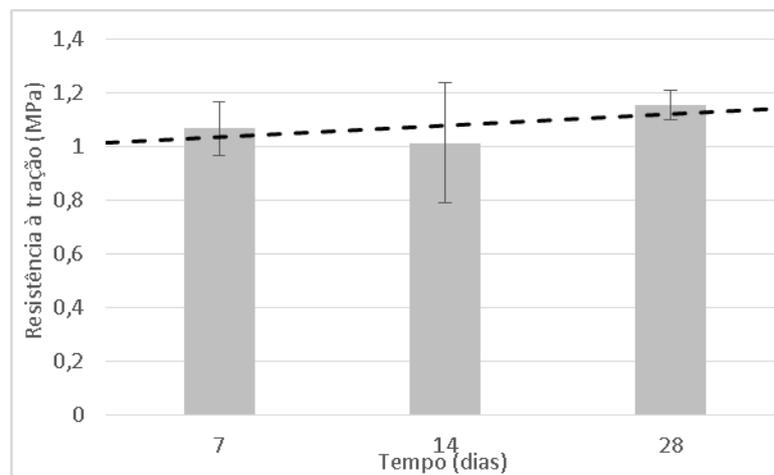


Figura 60 Tensão de ruptura do ensaio de RTCD para amostras moldadas em laboratório.

5.2.3 Levantamento de produção e custo

Para determinar o cálculo dos custos dos insumos e serviços e do tempo necessários à execução de “Base Estabilizada de solo de subleito, cimento e aditivo de zeólito sintético”, desenvolveu-se proposta de custo unitário de referência e produção horária específica para o tipo de obra de baixo volume de tráfego e utilização de solo argiloso, por meio da adaptação da atividade descrita como Reestabilização de camada de base com adição de cimento, oriundo da planilha do Sistema de Custos Rodoviários (SICRO), considerando mês de novembro de 2017 no estado do Amazonas, elaborado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

A atividade/serviço criada possui dosagem de 8% de cimento e 0,08% de aditivo. Sua produção equipe ficou estabelecida em 122 (m³/h) e custo unitário direto total de 265,58 (R\$/m³). Os cálculos de composição de custo unitário de referência e o custo unitário de referência estão detalhadas em Apêndice A.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões desta dissertação são resumidas neste capítulo e algumas recomendações também são fornecidas com respeito a pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos ensaios de laboratório, apresentados, analisados e interpretados nos capítulos anteriores, bem como a avaliação crítica dos resultados relatados na literatura e uma análise do aspecto construtivo de pavimentos na região, permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- a) Quanto à utilização de solos tropicais: O solo tropical laterítico com cimento, quando bem compactado, mantém boa capacidade de suporte mesmo em condição imersa. Os óxidos presentes contribui para a reação pozolânica que ao longo do tempo reagem com os produtos da cimentação ligando ainda mais as partículas de argilas, indicando vantagens ao se utilizar esse tipo de solo;
- b) Quanto ao comportamento geral do aditivo RC na pesquisa: O aditivo RC apresentou melhor desempenho na condição de h_{ot} um vez que, com excesso de água, as reações químicas que promovem a maior interação entre os grãos não ocorrem na mesma intensidade. Então, a moldagem e cura em condições ideais são fundamentais para garantir os efeitos do aditivo RC;
- c) Quanto à perda de massa e absorção durante o ensaio de durabilidade: No ensaio de durabilidade verificou-se que o aditivo RC reduziu a perda de massa (%) das amostras moldadas na h_{ot} . Para amostras moldadas com acréscimo de 60 % na h_{ot} , uma relação entre o aditivo RC e a redução na perda de massa não foi observada. A massa absoluta das amostras sob ciclos de durabilidade recebe destaque apenas na condição de moldagem na h_{ot} e 3,4 kg/m³ de RC, onde estão 5 % superiores às demais. O grau de absorção das amostras com 3,4 kg/m³ de aditivo RC foi inferior em todas condições de umidade de compactação. Com redução no grau de absorção de 40 % para amostras moldadas com acréscimo de 60 % na h_{ot} ;

- d) Quanto à resistência à compressão não-confinada: A importância de variáveis independentes sobre a resistência à compressão não-confinada pode ser classificada na seguinte ordem: acréscimo de umidade > condição de cura > teor de RC > relação teor de RC com umidade. A resistência à compressão do material estudado apresentou concordância significativa entre valores experimentais e preditos, com adequado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,85$) para condição de cura sob ciclos de durabilidade. Assim, pode-se concluir que o modelo matemático desenvolvido sob a forma de polinômio de segunda ordem é adequado para descrever a dependência da resistência à compressão não-confinada sob os parâmetros estudados. A máxima resistência predita foi obtida na condição de cura sob ciclos de durabilidade para teor de aditivo RC de $3,4 \text{ kg/m}^3$ e 0 % de acréscimo na h_{ot} , no qual atingiu o valor de 5,97 MPa;
- e) Quanto a resistência à tração por compressão diametral: Os modelos para todas condições de cura apresentaram R^2 pouco significativos, na ordem de 0,55. Isto ocorre devido a uma grande variação nos dados do ensaio. No entanto, há indicação que o aditivo RC exerce influência positiva na resistência à tração por compressão diametral. A resistência máxima foi obtida para teor de aditivo RC de $3,4 \text{ kg/m}^3$ e 0 % de acréscimo na hot, com valores de 0,61 MPa para todas as três condições de cura;
- f) Quanto à análise microestrutural: Cristais de etringita e menor ocorrência de fraturas é observada apenas nas amostras com aditivo RC indicando maior quantidade de produtos da hidratação cimentícia. Em termos de condição de cura, não foram observadas diferenças representativas, sendo possível observar uma malha de cristais de etringita mais densa nas amostras que foram submetidas ao ciclo de durabilidade devido ao processo de aquecimento em estufa durante o a etapa de secagem ter ampliado a formação dos produtos de hidratação;
- g) Quanto a análise de procedimentos executivos: A técnica de estabilização utilizando do próprio solo de subleito com cimento e aditivo produz um pavimento mais resistente às condições encontradas no Amazonas, passíveis de chuvas intensas e inundações, com mitigação da utilização de insumos

predatórios e minimiza as dificuldades logísticas. Os procedimentos de obra propostos descreveram de maneira ampla as etapas afim de obter sucesso na execução de estabilização de solos com cimento e aditivo RC;

- h) Quanto ao desempenho do trecho experimental: O procedimento executivo indicou uma obra rápida, não houve evolução das trincas superficiais, a resistência das amostras extraídas da pista enquadra-se em resultados de pesquisas similares e após 490 dias de construção a pista apresenta bom aspecto.

6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de obter um conhecimento mais abrangente sobre o efeito do aditivo RC em solos tropicais, recomenda-se pesquisa adicional nos seguintes aspectos:

- a) Avaliar o desempenho laboratorial através de ensaios que representem melhor seu comportamento em campo como: ensaio de retração, ensaio drenados de resistência à compressão triaxial, ensaio tração na flexão, ensaios de módulo de resiliência e fadiga, etc;
- b) Utilizar os parâmetros de resistência do compósito para investigações paramétricas e modelagem numérica de pavimento em condições diversas encontradas no estado do Amazonas;
- c) Realizar seções testes com diferentes taxas de aditivo e tipos de solo analisando os resultados com extração de CPs e análise de deflexões;
- d) Comparar desempenho de solos argilosos utilizando diferentes aditivos e compatibilizar com estabilizações granulométricas utilizando materiais regionais.

REFERÊNCIAS

- ACI. (1990). American Concrete Institute Committee 230. **State-of-the-Art Report on Soil Cement**. ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 4, pp. 395–417.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. NBR 9895. Rio de Janeiro, 2016f.
- _____. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**: NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1993, 3p.
- _____. **Cimentos Portland resistentes a sulfatos**. NBR 5737. 1992.
- _____. **NBR 12253 - Solo cimento - dosagem p pavimento**, 1992b.
- _____. **Solo - Análise granulométrica**: NBR 7181. Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. **Solo - Determinação do limite de liquidez**: NBR 6459. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**: NBR 13600. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **Solo — Determinação do limite de plasticidade**: NBR 7180. Rio de Janeiro, 2016c.
- _____. **Solo - Ensaio de compactação**. NBR 7182. Rio de Janeiro, 2016d.
- _____. **Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. NBR 9895. Rio de Janeiro, 2016e.
- _____. **Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem**. Nbr 13554, p. 8–10, 1996.
- _____. **Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Nbr 12024, p. 5, 1992a.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B. MOTTA, L.M.A, CERATTI, J. A., SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.
- CABRAL, G.L.L., E. ELLIS, H.S. YU, G. MCDOWELL, A. DAWSON AND N. THOM. **Calcined clay aggregate: a feasible alternative for Brazilian road construction**. Advances in transportation geotechnics. London: Taylor & Francis Group, 90–96. 2008.

- CAMPELO, N.; CAMPOS, A. M. L.; ARAGÃO, A. F. **Comparative analysis of asphalt concrete mixtures employing pebbles and synthetic coarse aggregate of calcined clay in the Amazon region.** International Journal of Pavement Engineering, v. --, p. 1-12, 2017.
- CARVALHO, D.; SANTOS, J. T. DE A. N. **Pesquisa SINDARMA : Transporte Hidroviário Interior de Passageiros e Cargas.** Manaus: 2015.
- CASANOVA, F. J. - **O Ensaio de Azul de Metileno na Caracterização de Solos Lateríticos.** Anais da XXI Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Salvador, BA. 1986.
- CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- CNT; SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial.** Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial. v. 1, p. 406, 2017.
- CONSOLI, N.C., FOPPA, D., FESTUGATO, L., & HEINECK, K.S. (2007). **Key Parameters for Strength control of Artificially Cemented Soils.** *Journals of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197-205.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores.** Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP), p. 60, 2007.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER-ME 202-94 **Solo - cimento - moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos**, 1994a.
- _____. DNER-CLA 259/96: **Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento em miniatura.** Brasil, 1996.
- _____. DNER-ME 256/94. **Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão**, solos, método de ensaio. Brasil, 1994a.
- _____. DNER-ME 258/94. **Solos compactados em equipamento miniatura - minimcv, solos**, métodos de ensaio. Brasil, 1994b.
- _____. DNER-PRO 011/79: **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis.**
- _____. **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.** Norma rodoviária. Procedimento. DNER-PRO 273, 1996.
- _____. DNER-ME 201/94 **Solo - cimento - compressão axial de corpos de prova cilíndricos**, 1994b.
- _____. DNIT 143/2010: **Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de Serviço.** 2010.
- DIPTI R. B, SAHOO U. C., DASH S. R. **Durability and shrinkage studies of cement stabilised granular lateritic soils**, International Journal of Pavement Engineering; 2018.

- DUTRA, S. V. M. **Estado da arte sobre a utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Porto. 2014.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PASQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília, 1997. 212p.
- FABBRI, G.T.P. (1994). **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos - SP, 157p.
- FERNANDES R. M., MENDES A. S., FROTA C.A. **Comportamento Mecânico da Mistura Solo-Cimento Portland-Roadcem® Sob Flexão A Quatro Pontos**. 20ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Florianópolis, 2017.
- FERREIRA-FERREIRA, J. SILVA, T. STREHER, A. AFFONSO, A. FURTADO, L. FORSBERG, B. VALSECCHI, J. QUEIROZ, H. NOVO, E. **Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil**. *Wetlands Ecology and Management*, v. 23, n. 1, p. 41–59, 2014.
- FREITAG, D. R. **Soil randomly reinforced with fibers**. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, v.112, n.8, p823-826, 1986.
- GASPARD, K. J. **In-place Cement Stabilized Base Reconstruction Techniques Interim Report:“ Construction and Two Year Evaluation”**. n. August, 2002.
- GERSONUIS, B.; EGYED, C. **Macro-economic Effects of Using the PowerCem Technology on Road Infrastructure in flood risk Areas**. 2012.
- GHAZAVI, M.; ROUSTAIE, M. **The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay**. *Cold Regions Science and Technology*, v. 61, n. 2–3, p. 125–131, 2010.
- GOMES, C. DE S.F. **Argilas – Aplicações na Indústria**. C. Gomes, O Liberal, Empresa de artes gráficas Ltda, Aveiro, 2002, 337p.
- GRIMM, A. M. **Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change**. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. v. 25, n. 4, p. 537-554, DOI: 10.1007/s00477010-0420-1, 2011.
- GUEDES.S. B, **Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas**. Tese de Doutorado. UFPE, 2013.
- HABER,R. R. **General Statistics**, 3rd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1977.

- HESS, L. L. **Amazonian Floodplain Forests**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. v. 210
- HOLMES, N. **Structural Properties of Concrete Materials Containing RoadCem**. v. 2015, 2015.
- HUNTER, D. (1988). **Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils**. Journal of geotechnical engineering, 114(2), 150-167.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2005). **Manual Técnico de Pedologia**. Manuais Técnicos em Geociências, Rio de Janeiro, 2ª ed., n. 4, 316 p.
- JOGLEKAR, A.T. MAY, **Product excellence through design of experiments**, Cereal Foods World 32. 857–868, 1987.
- JUNK, W. J **Brazilian wetlands: Their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection**. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, v. 24, n. 1, p. 5–22, 2014.
- JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. **The flood pulse concept in river-floodplain systems**. Canadian Journal of Fishers and Aquatic, 106: 110-127, 1989.
- KENNEDY, T.W., MOORE, R.K. ANAGNOS, J.N. **Estimation of Indirect-Tensile Strengths for Cement-Treated materials**, Record 351, Highway Research Board, 1971.
- KOLIAS, S.; KASSELOURI-RIGOPOULOU, V.; KARAHALIOS, A. **Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement**. Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 2, p. 301–313, 2005.
- LAN, T. N. - **Un Nouvel Essai d'Identification des Sols - L'Essai au Bleu de Méthylène**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N 88. França, 1977.
- LEITE,C, MOTTA, VASCONCELOS, K.L, 2011. **Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements**. Construction and Building Materials, 25 (6):2972-2979.
- LIMA, D. C.; ROHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. **A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32
- MANZATO, L., TAKENO, M.L., PESSOA-JUNIOR, W.A.G. **Optimization of Cellulose Extraction from Jute Fiber by Box-behnken Design**. Fibers Polym (2018) 19: 289.
- MARJANOVIC, P. EGYED, C. DE LA ROIJ, P. DE LA ROIJ, R. **The Road to the Future - Manual for working with RoadCem**. v. 5. 2009
- MELOROSE, J.; PERROY, R.; CAREAS, S. **Minimizing Reflective Cracking in Cement-Stabilized Pavement Bases**. Pavement Maintenance and Preservation Session, v. 1, p. 1–10, 2010.

- MICHENER, J. E. **Effects of Environmental Factors on Construction of Soil-Cement Pavement Layers**. Brigham Young University, 2008.
- MINNICK, L.J. **Reactions of Hydrated Lime with Pulverized Coal Fly Ash**. In: **Fly Ash Utilization, 1967, Pittsburgh, Pennsylvania, March 14-16. Proceeding** Edison Electric Institute – National Coal Association – Bureau of Mines Symposium. Pg. 330.
- MITCHELL, J. K. (1993). **Fundamentals of Soil Behaviour**. John Wiley e Sons, 2^a ed., New York, 437 p.
- MOLENAAR, A. **Cohesive and non-cohesive soils and unbound granular materials for bases and sub-bases in roads**. n. September, 2010.
- MOLENAAR, AAA, VANNIEKERK, A. A, 2002. **Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials**. The 81st TRB Annual Meeting, Washington DC.
- MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS.
- MORANDINI, T. L. C. **Solos tropicais e bentonita: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal**. [s.l.] UFOP, 2014.
- MUTEPFA, W. A. T. **Laboratory Evaluation of the Effect of Cement Concentration, Water Salinity and the Roadcem Additive on Kalahari Soil Strength**. University of Botswana, South Africa, 2010.
- NOGAMI, J. S. E VILLIBOR, D. F. (1980). **Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática**. In: Reunião Anual de Pavimentação: ABPV, 15, Belo Horizonte. Anais... Separata.
- NOGAMI, J. S. E VILLIBOR, D. F. (1985). **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. In: Simpósio
- NOGUEIRA, L. D. CRISÓSTOMO, P. SILVA, M E FROTA, C. **Avaliação do Comportamento Geotécnico de solos provenientes de Áreas de floresta no Amazonas Misturados Com Cimento Portland E Roadcem®**. Foz Do Iguaçu, Pr44a Rapv – Reunião Anual De Pavimentação, 2015.
- OLIVEIRA, J. B. (2001). **Pedologia Aplicada**. Jaboticabal: FUNEP, São Paulo.
- OUF, M. S. **Effect of using pozzolanic materials on the properties of Egyptian soils**. Life Science Journal, v. 9, n. 1, p. 554–560, 2012.

- PARK, T. **Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement.** Journal of Transportation Engineering, 129(5) : 558-563, 2003.
- PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Tese de Doutorado, 250 p, 1992.
- PEREIRA, E.; MARTINS, F.; ABREU, S.; RÜTHER R., **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** INPE, São José dos Campos. 2006.
- PEREIRA, R. S. **Viabilidade Técnica Do Emprego De Resíduos Da Indústria De Celulose Para Construção De Estradas Florestais.** 2008.
- PICANÇO, H. CARTAXO, E. FROTA, C. A. PEREIRA, P. H. **Refletividade, Radiação Solar e temperatura em diferentes tipos de revestimentos das vias urbanas no município de Manaus (Am).** CONINFRA 2011 – 5o Congresso De Infraestrutura De Transportes. São Paulo: 2011.
- PINTO, C. DE S. **Curso Básico Mecânica dos Solos.** 3 edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, **PCA Soil-cement laboratory handbook.** Skokie, IL: Portland Cement Association. 1992.
- POWERCEM. **Manual for laboratory research RoadCem™.** p. 1–39, 2015.
- PRANCE, G. T. Notes On The **Vegetation Of Amazonia Iii. The Terminology Of Amazonian Forest Types Subject To Inundation.** v. 31, n. 1, p. 26–38, 1979.
- RAKI, J. J. B.; ALIZADEH, R. **Nanotechnology Applications for Sustainable Cement-Based Products.** Nanotechnology in Construction 3, 2009.
- REIS, N. J. ALMEIDA, ME. RIKER, SL. FERREIRA, AL. **Geologia e Recursos Minerais so Estado so Amazonas. Manaus/CPRM - Serviço Geológico do Brasil,** 2006.
- RIKER, N. J.; BRITO, I.; D`ANTONA, R. **Projeto Materiais de Construção no Domínio médio Amazonas.** 2008.
- SATO, A.; NISHIMOTO, S.; SUZUKI, T. **Relationship between Curing Temperature and Strength of Stabilized Soil. Current Practices in Cold Regions Engineering,** p. 1–10, 2006.
- SCRIVENER, K. L. **The Microstructure of Concrete.** em SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.
- SCULLION, T. **Evaluating the performance of soil-cement and cement modified soil for pavements: a laboratory investigation.** Skokie, IL: Portland Cement Association, 2005.

- SEINFRA, Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas. **Catálogo de Jazidas no Estado do Amazonas**. 2014.
- SILVA, A. C. L. DA; FROTA, C. A. DA; FROTA, H. O. DA. **Módulo complexo de compósitos asfálticos com argila calcinada sob flexão a quatro pontos**. *Revista Materia*, v. 20, n. 2, p. 436–451, 2015.
- TAKEDA, M. C. **A Influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Tese de Doutorado, 276 p, 2006.
- TINGLE, J.; SANTONI, R. **Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1819, p. 72–84, 2003.
- TOBERGTE, D. R.; CURTIS, S. TRH13: **Cementitious stabilizers in road construction**. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 1986.
- VERTAMATTI, E. **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica: São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 1988.
- VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura. 24p. (Boletim Técnico, 9), 1969.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos - Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos**. 2009.
- VOROBIEFF, G. **Performance and Design of Insitu Stabilised Local Government Roads**. Technology Transfer Seminar, 1998.
- WALKER, P. J. **Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks**. *Cement and Concrete Composites*, v. 17, n. 4, p. 301–310, 1995.
- WU, P. **Cement Stabilized Materials with Use of RoadCem Additive**, 2015.
- WU, P.; HOUBEN, L. J. M.; EGYED, C. **Study of the variables in laboratory testing of cement stabilized**. *International Journal of Pavements Conference*. Anais...São Paulo, Brazil: 2013.
- YOON, S.; ABU-FARSAKH, M. **Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-sand as base material**. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 13, n. 1, p. 15–22, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO E O CUSTO UNITÁRIO DE REFERÊNCIA

CÓDIGO: 2.S.XX.XXX.XX		SERVIÇO: Base Estabilizada de solo in-situ e cimento c/ adit a base de Zeólito Sintético					UNIDADE m3		
	VARIÁVEIS INTERVENIENTES	UNIDADE	EQUIPAMENTOS						
			Dist. Agreg. A.P. 40 kW	Rolo Tandem Vib. A.P. 112 kW	Caminhão Tanque 10.000L 135kW	Estabiliz. Tipo Pulvimix 250 kW	Rolo Pé-de Carneiro Auto Propelido Vib. 11,25 t 85 kW	Motoniveladora 93 kW de Pneus 79 kW	
a	AFASTAMENTO								
b	CAPACIDADE	m3			10000				
c	CONSUMO (QUANTIDADE)	l / m3			50				
d	DISTÂNCIA	m	8,33		5000		150	150	
e	ESPAÇAMENTO								
f	ESPESSURA	m	0,2	0,2		0,2	0,2	0,20	
g	FATOR DE CARGA								
h	FATOR DE CONVERSÃO								
i	FATOR DE EFICIÊNCIA		0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	
j	LARGURA DE OPERAÇÃO						2,13	3,55	
l	LARGURA DE SUPERPOSIÇÃO						0,2	0,2	
m	LARGURA ÚTIL	m	3,6	1,67		2,44	1,93	3,35	
n	NÚMERO DE PASSADAS			8			8	6	
o	PROFUNDIDADE								
p	TEMPO FIXO (CARGA, DESCARGA E MANOBRA)	min			38				
q	TEMPO PERCURSO (IDA)	min			10				
r	TEMPO DE RETORNO	min			10				
s	TEMPO TOTAL DE CICLO	min	2,2		58				
t	VELOCIDADE (IDA) MÉDIA	m/min		80	500	5	70	100	
u	VELOCIDADE RETORNO	m/min			500				
OBSERVAÇÕES ESPECIF. DE SERVIÇO: DNERES-309 *CAPACIDADE DO CAMINHÃO DISTR. EM l **CONSUMO DO CAMINHÃO DISTR. EM l/m2			FÓRMULAS						
			$P = 60.d.f.m / s$	$P = 60.f.m.t / n$	$P = 60.b / c.s$	$P = 60.f.m.t$	$P = 60.f.m.t / n$	$P = 60.f.m.t / n$	
PRODUÇÃO HORÁRIA			136	166	860	122	168	670	
NÚMERO DE UNIDADES			1	1	1	1	1	1	
UTILIZAÇÃO OPERATIVA			0,90	0,73	0,14	1,00	0,72	0,18	
UTILIZAÇÃO IMPRODUTIVA			0,10	0,27	0,86	0,00	0,28	0,82	
PRODUÇÃO DA EQUIPE			122	122	122	122	122	122	
MT/DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes SISTEMA DE CUSTOS RODOVIÁRIOS - SICRO					PRODUÇÃO DAS EQUIPES MECÂNICAS				

Custo Unitário de Referência		Mês: nov/2017 - Amazonas				FIC 0,05700
Base Estabilizada de solo de subleito, cimento e aditivo de zeólito sintético		Produção da Equipe: 122,0m³				(R\$)
A - Equipamento	Quant	Utilização		Custo horário		Custo Horário
		Oper	Impr	Prod	Improd	
E9762 Rolo compactador de pneus de 27 t - 85 kW	1,00	0,52	0,48	143,92	65,88	106,46
E9685 Rolo compactador pé de carneiro vibratório 11,6t 82 kW	1,00	0,72	0,28	120,81	53,89	102,23
E9514 Distribuidor de agregados 130 kW	1,00	0,85	0,15	201,61	88,52	184,65
E9012 Recicladora a frio - 403 kW	1,00	1,00	0,00	727,09	258,42	727,09
E9524 Motoniveladora - 93 kW	1,00	0,38	0,62	178,65	78,01	116,25
E9571 Caminhão tanque com capacidade de 10.000L 188 kW	1,00	0,61	0,39	174,12	48,06	124,96
Custo Horário de Equipamentos						1361,64
B - Mão-de-Obra	Quant	Custo horário			Custo Horário	
P9824 Servente	3,00	16,1076			48,3228	
Custo horário total de mão de obra					48,3228	
Custo horário total de execução					1409,96	
Custo unitário de execução					11,6036675	
Custo do FIC					0,6614	
C - Material	Quant	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
M2147 Bits para recicladora	0,1000	un	31,2883	3,1288		
M2149 Blocos para recicladora	0,0045	un	1.895,26	8,5287		
M0424 Cimento Portland CP II - 32	165,0	kg	0,467	77,0550		
M2148 Porta bits para recicladora	0,0160	un	265,8498	4,2536		
Aditivo para estabilização de solo in-situ	1,7000	kg	93,0000	158,1000		
Custo unitário total de material				251,07		
D - TEMPO FIXO	Quant	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - Caminhão carroceria 15 t	0,1032	t	21,8400	2,2528		
Custo unitário total de tempo fixo				2,25		
Total Direto Unitário Custo				265,58		

Observações :

Especificação de serviço: DNER-ES-305 e DNIT 143/2010 – ES

APÊNDICE B – QUADRO DE RESULTADOS DO ENSAIO DE DURABILIDADE

Dosagem por amostra	Umidade moldagem (%)	Massa do CP (g)														
		Moldagem	Início do ciclo 1	Estufa 1	Submerso 1	Submerso 2	Estufa 2	Submerso 3	Estufa 3	Submerso 4	Estufa 4	Submerso 5	Estufa 5	Submerso 6	Estufa 6	Após última escovação
(0 kg/m ³ , 0%)	11,02	2172,11	2197,33	1997,88	2198,23	2188,05	2000,29	2187,88	1994,49	2187,70	1985,62	2187,93	1987,62	2187,19	1972,81	1973,70
(0 kg/m ³ , 0%)	11,23	2138,30	2177,19	1962,74	2177,34	2154,46	1957,08	2152,15	1948,64	2146,03	1936,41	2140,59	1932,52	2133,89	1916,21	1910,74
(0 kg/m ³ , 0%)	10,95	2126,20	2170,27	1950,71	2172,24	2153,13	1946,26	2149,05	1932,81	2142,68	1920,72	2136,42	1914,48	2130,45	1907,38	1902,31
(0 kg/m ³ , 30%)	13,98	2150,10	2175,63	1926,75	2176,60	2158,35	1926,24	2158,28	1922,12	2158,31	1910,88	2157,96	1910,34	2156,88	1906,36	1906,09
(0 kg/m ³ , 30%)	14,07	2169,00	2183,53	1936,39	2184,40	2165,97	1934,90	2165,74	1926,98	2164,02	1916,70	2161,46	1913,77	2158,04	1909,88	1907,34
(0 kg/m ³ , 30%)	14,12	2154,40	2166,26	1918,79	2167,09	2150,28	1913,47	2147,81	1904,39	2147,28	1900,35	2144,73	1896,54	2141,05	1894,46	1890,70
(0 kg/m ³ , 60%)	16,28	2083,73	2095,07	1837,28	2097,95	2078,04	1824,63	2079,88	1815,01	2078,88	1814,86	2079,12	1808,63	2079,46	1810,28	1807,64
(0 kg/m ³ , 60%)	16,83	2071,26	2083,35	1826,42	2086,68	2062,91	1793,88	2063,35	1796,68	2059,43	1794,31	2054,66	1779,97	2050,49	1775,82	1768,26
(0 kg/m ³ , 60%)	16,68	2069,20	2080,54	1825,21	2083,74	2060,24	1800,61	2060,67	1797,81	2055,93	1793,04	2051,48	1777,02	2047,34	1774,91	1765,57
(1,7 kg/m ³ , 0%)	10,82	2156,62	2183,39	1972,80	2186,27	2177,96	1988,38	2178,06	1992,46	2178,92	1988,20	2178,85	1980,33	2180,24	1983,49	1973,95
(1,7 kg/m ³ , 0%)	10,98	2132,22	2163,67	1954,11	2166,26	2154,47	1961,35	2150,26	1964,90	2146,04	1955,85	2141,83	1944,83	2137,60	1947,67	1930,80
(1,7 kg/m ³ , 0%)	10,98	2132,20	2168,99	1956,69	2172,01	2158,15	1960,15	2153,77	1962,74	2150,03	1958,93	2146,32	1943,17	2142,52	1950,90	1932,86
(1,7 kg/m ³ , 30%)	13,86	2158,22	2174,53	1929,68	2176,75	2159,27	1940,56	2159,87	1941,88	2159,41	1946,75	2159,77	1927,11	2161,04	1941,45	1928,63
(1,7 kg/m ³ , 30%)	13,80	2164,77	2182,50	1938,20	2184,44	2164,30	1940,46	2161,92	1944,04	2160,41	1946,41	2158,25	1923,98	2157,21	1935,20	1919,78
(1,7 kg/m ³ , 30%)	13,62	2183,62	2204,08	1959,82	2205,76	2184,99	1953,34	2182,71	1958,44	2180,00	1959,05	2177,21	1937,76	2175,97	1947,15	1932,76
(1,7 kg/m ³ , 60%)	16,33	2063,90	2071,31	1837,41	2072,98	2058,37	1829,00	2060,19	1821,71	2059,35	1814,39	2059,49	1791,81	2060,29	1797,04	1790,89
(1,7 kg/m ³ , 60%)	16,10	2083,67	2092,90	1857,22	2094,51	2075,61	1841,00	2076,17	1838,95	2073,13	1831,85	2069,99	1805,98	2066,24	1800,89	1793,49
(1,7 kg/m ³ , 60%)	15,89	2074,93	2087,72	1843,31	2089,63	2070,36	1835,00	2070,71	1825,95	2067,89	1824,16	2064,73	1800,46	2061,75	1800,21	1790,72
(3,4 kg/m ³ , 0%)	11,48	2223,02	2232,57	2062,72	2235,13	2227,24	2058,55	2224,77	2016,81	2226,76	2021,73	2228,12	2016,09	2228,28	2048,22	2034,63
(3,4 kg/m ³ , 0%)	11,38	2214,06	2224,00	2054,44	2226,28	2216,51	2053,40	2212,09	2002,50	2212,77	2015,06	2212,18	2009,24	2210,32	2035,20	2014,70
(3,4 kg/m ³ , 0%)	11,53	2717,53	2228,64	2060,31	2230,67	2221,90	2057,66	2218,04	2005,82	2218,96	2022,49	2219,00	2015,91	2216,88	2032,34	2014,38
(3,4 kg/m ³ , 30%)	13,42	2171,28	2181,04	1954,87	2183,39	2171,81	1928,11	2172,24	1925,08	2172,77	1924,53	2172,48	1933,00	2172,76	1935,18	1925,89
(3,4 kg/m ³ , 30%)	14,01	2172,49	2182,93	1964,35	2185,96	2170,81	1920,17	2170,75	1918,99	2169,89	1917,82	2168,16	1924,00	2167,49	1927,64	1913,53
(3,4 kg/m ³ , 30%)	14,49	2162,22	2172,09	1955,22	2175,03	2159,59	1914,86	2159,71	1909,53	2157,26	1909,85	2154,33	1911,10	2151,98	1915,95	1902,25
(3,4 kg/m ³ , 60%)	16,80	2048,90	2063,87	1912,46	2067,37	2046,88	1819,55	2047,40	1812,00	2045,08	1809,47	2045,46	1804,16	2044,80	1780,88	1768,31
(3,4 kg/m ³ , 60%)	16,60	2061,35	2080,10	1834,24	2083,56	2058,41	1837,21	2056,48	1819,00	2049,99	1810,07	2043,20	1804,73	2038,61	1776,34	1757,21
(3,4 kg/m ³ , 60%)	16,48	2077,70	2097,10	1849,58	2100,58	2077,00	1855,88	2074,70	1830,00	2070,34	1820,13	2064,41	1808,27	2059,63	1795,33	1776,34

APÊNDICE C – RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO PELO SOFTWARE

BISAR 3.0



BISAR 3.0 - Block Report

Manaus Army project

System 1: (untitled)

Structure

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,030	3,500E+03	0,35	1	7,500E+01	2,165E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,050E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,350	4,500E+03	0,25									
3		7,500E+01	0,35									

Loads

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (µstrain)			Displacements (µm)		
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
1	1	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-02	-1,563E+00	-1,563E+00	-2,101E+00	-8,010E+01	-8,011E+01	-2,878E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,661E+02
2	2	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-02	-1,181E+00	-1,181E+00	-2,101E+00	-8,017E+01	-8,013E+01	-3,357E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,661E+02
3	2	0,000E+00	0,000E+00	3,800E-01	6,563E-01	6,563E-01	-2,713E-02	1,109E+02	1,109E+02	-7,365E+01	0,000E+00	0,000E+00	4,664E+02
4	3	0,000E+00	0,000E+00	3,800E-01	-1,614E-03	-1,614E-03	-2,713E-02	1,109E+02	1,109E+02	-3,448E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,664E+02