



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILA SIQUEIRA TAVARES DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE ESCAVAÇÃO
DE ESTACA TIPO HÉLICE CONTÍNUA PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Recife – PE
2016



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILA SIQUEIRA TAVARES DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE ESCAVAÇÃO
DE ESTACA TIPO HÉLICE CONTÍNUA PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof^o Alexandre D. Gusmão,
M.Sc., D.Sc.

Co-orientador: Prof^o Eder C.G. Santos, M.Sc.,
D.Sc.

Recife – PE
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

L732a Lima, Camila Siqueira Tavares de
Caracterização tecnológica de resíduo de escavação de estaca
hélice contínua para uso em pavimentação. / Camila Siqueira Tavares
de Lima. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2016.
95 f.: il

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Co-orientador: Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, 2016.

1. Resíduo de construção civil 2. Estaca tipo hélice contínua 3.
Solo-cimento 4. Pavimentação. I. Construção civil - Dissertação II.
Gusmão, Alexandre Duarte (orient.) III. Santos, Eder Carlos Guedes
dos (co-orient.) IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica,
Mestrado em Construção Civil. V. Título.

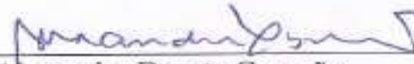
CDD: 690.0286

CAMILA SIQUEIRA TAVARES DE LIMA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE ESCAVAÇÃO
DE ESTACA TIPO HÉLICE CONTÍNUA PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador:



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

Co-orientador:

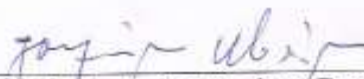


Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos
Universidade Federal de Goiás

Examinadores:



Profa. Dra. Kalirny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

Recife – PE
2016

DEDICATÓRIA

*À minha amada irmãzinha, Aline Siqueira,
que permanece viva em meus
pensamentos e em meu coração.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a vida e a sabedoria de vivê-la respeitando seus desígnios e planos.

Aos meus amados pais, José Claudio e Ailma Maria, que sempre serão minha fonte de inspiração.

Aos professores, Alexandre Gusmão e Eder Santos, pela orientação desta dissertação, pela serenidade constante, pela confiança em mim depositada e principalmente pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os professores e funcionários do PEC, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

Ao Alison Bussmeyer, pelo amor e companheirismo ao longo de toda a nossa história.

Agradeço a minha família, avós, tios, primos e afilhado, que sempre torceram e batalharam pelo meu sucesso.

Aos meus amigos e colegas de profissão que também contribuíram de forma decisiva compartilhando suas experiências no campo profissional e acadêmico. De maneira especial, a Demócrito e Suzany, pela cumplicidade durante o mestrado.

Aos meus colegas, Edivan e Fábio, que foram fundamentais para a execução de todos os ensaios desta pesquisa.

Agradeço a todos que fazem parte da família VME pelo apoio. Em especial, ao estimado Dr. João, que sempre acreditou e incentivou a busca da vida acadêmica.

A todos, muito obrigada.

RESUMO

Os resíduos de construção civil (RCC) fazem com que o setor da construção civil seja visto como um dos principais responsáveis pela poluição do meio ambiente urbano. Por outro lado, várias pesquisas têm demonstrado que diversos tipos de RCC podem ser reutilizados no próprio setor da construção civil. Diante disso, este estudo tem o objetivo de analisar a viabilidade do melhoramento (com aglomerante hidráulico) de resíduos oriundos de escavação de estaca tipo hélice contínua para o seu uso como material em base de pavimentação. Para isso, coletou-se RCC durante a execução desse tipo de estaca em uma obra localizada na localidade na Região Metropolitana do Recife (RMR). O material coletado foi encaminhado para o Laboratório de Solos, da Universidade de Pernambuco, para a realização da caracterização das suas propriedades físicas e mecânicas. Após a caracterização geotécnica dos resíduos, foram moldados corpos de prova com diferentes teores de cimento adicionados (3%, 6% e 9%), os quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, aos 7, 28 e 90 dias de idade. Os resultados dos ensaios revelaram que o resíduo pode ser classificado como areia média e fina. Os resultados dos ensaios de compressão simples das misturas, realizados nos três tempos de cura, mostraram que houve aumentos significativos de resistência, sendo entre 2,01 a 15,78 MPa, os quais tornam os percentuais de 3%, 6% e 9% adequados segundo a NBR 12253/2012, para a utilização desses resíduos em camada de base em pavimentação.

Palavras-chaves: resíduo de construção civil, estaca tipo hélice contínua, solo-cimento, pavimentação.

ABSTRACT

The construction and demolition wastes (CDW) make the civil construction sector be seen as one of the main responsible for the pollution of the urban environment. On the other hand, several studies have shown that different types of CDW can be reused in the construction industry. In this context, the large volume of waste generated in the process of continuous flight auger (CFA) piles excavation has been motivating the search for more appropriate ways for its final disposal following the concept of sustainable development. Thus, this study aims to analyze the feasibility of strength improving (with hydraulic binders) the residues from CFA piles excavation, in order to use them as base pavement material. Bearing this in mind, CDW sample was collected during the execution of this kind of pile in a construction site located in the Recife Metropolitan Area. The collected material was transported to the Soil Laboratory at the Polytechnic School of the University of Pernambuco for physical and mechanical characterization. After geotechnical characterization, CDW cylinders were molded with different added cement content (3%, 6% and 9%), and compressive strength and traction by diametrical compression tests were carried out at 7, 28 and 90 days old. The results have showed that CDW can be classified as fine sand. The results of unconfined compression test – carried out at the three curing times – have showed significant strength gains – between 2.01 to 15.78 MPa – , which allows the percentages of 3%, 6% and 9% adequate, according NBR 12253/2012, for the use of such mixtures as pavement base material.

Keywords: civil construction waste, continuous flight auger piles, soil cement, pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Porcentagem da geração de RCC por fase da obra.....	21
Figura 2: Exemplo de fundação superficial e fundação profunda.	23
Figura 3: Equipamento montado em guindaste com lança treliçada.....	24
Figura 4: Esquema de execução de estaca hélice contínua.....	25
Figura 5: Diagrama esquemático – Métodos de estabilização de solos.	27
Figura 6: Curva granulométrica da areia de Osório.....	33
Figura 7: Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/Civ) para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.....	35
Figura 8: Zoom da Figura 7 com exemplo da determinação da resistência à compressão simples (q_u) para um $\eta/Civ=20$ e para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.....	36
Figura 9: Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/Civ) para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.....	37
Figura 10: Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a relação vazios/cimento (η/Civ) para tempo de cura de 7 dias.	38
Figura 11: Curva de resistência à compressão simples de solo-cimento (q_u) versus relação vazios/cimento (η/Civ).....	39
Figura 12: Fluxograma da pesquisa.....	40
Figura 13: Canteiro de obra que forneceu os RCC para o presente trabalho.	41
Figura 14: Ensaio de sondagem a percussão.....	42
Figura 15: Perfil geotécnico do solo do primeiro e segundo furo de sondagem.	42
Figura 16: Execução de estaca em hélice contínua na obra.....	43
Figura 17: Coleta de RCC proveniente do estaqueamento.	44
Figura 18: Acondicionamento do material coletado.	44
Figura 19: Secagem do RCC realizada ao ar livre.	48
Figura 20: Limpeza do piso.	48
Figura 21: Homogeneização da amostra.	48
Figura 22: Quarteamento do RCC.....	49
Figura 23: Destorroamento do RCC.	49
Figura 24: Peneiramento (material grosso).	50
Figura 25: Peneiramento (material fino).....	50
Figura 26: Ensaio de sedimentação em três amostras de RCC100.....	50
Figura 27: Determinação da densidade real	51
Figura 28: Ensaio em execução.....	51
Figura 29: Execução do limite de plasticidade em uma amostra de RCC100.	51
Figura 30: Ensaio de limite de liquidez	52
Figura 31: Amostra no aparelho de casagrande.....	52
Figura 32: Compactação da mistura na energia intermediária.....	52
Figura 33: Preparação das amostras para o ensaio de compactação.	53
Figura 34: Amostra apenas com RCC	53
Figura 35: Preparação do cimento	53
Figura 36: Mistura de uma das amostras do RCC-C.....	54
Figura 37: Nivelamento com régua biselada do material excedente.....	54
Figura 38: Amostras do ensaio de ISC.....	55

Figura 39: Amostras submersas por 4 dias para ensaio de expansão e ISC.	55
Figura 40: Execução do ensaio de ISC.	56
Figura 41: Amostras após a penetração do pistão.	56
Figura 42: Moldagem de corpo de prova cilíndrico.	57
Figura 43: Extração de corpo de prova do molde cilíndrico.	58
Figura 44: Corpos de prova sem adição de cimento.	58
Figura 45: Corpos de prova com percentual de cimento, da esquerda para a direita, 3%, 6% 9% de adicional de cimento.	58
Figura 46: Corpos de prova sem adição de cimento armazenados na câmara úmida.	59
Figura 47: Corpos de prova com adição de 3%, 6% e 9% de cimento armazenados na câmara úmida.	59
Figura 48: Moldagem do Corpo de prova 50x100mm.	61
Figura 49: Pesagem da amostra.	61
Figura 50: Corpos de prova 50x100 mm após moldagem.	61
Figura 51: Corpos de prova 100x128 mm imersos em água.	62
Figura 52: Corpos de prova 50x100 mm imersos em água.	62
Figura 53: Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova (100x128 mm)	63
Figura 54: Corpo de prova RCC100 (100x128 mm).	63
Figura 55: Ruptura de RCC100 (100x128 mm).	64
Figura 56: Ruptura de RCC91C9 (100x128 mm).	64
Figura 57: Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova (50x100 mm).	64
Figura 58: Corpo de prova RCC91C9 (50x100 mm).	64
Figura 59: Ensaio de resistência a tração por compressão diametral RCC94C6.	65
Figura 60: Ruptura do RCC94C6.	65
Figura 61: Curva granulométrica das três amostras do RCC100.	66
Figura 62: Classificação dos solos - TRB.	68
Figura 63: Curva do ensaio de compactação das três amostra do RCC100.	69
Figura 64: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 3% de cimento.	71
Figura 65: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 6% de cimento.	71
Figura 66: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 9% de cimento.	72
Figura 67: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 1 (RCC100).	73
Figura 68: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 2 (RCC100).	73
Figura 69: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 3 (RCC100).	74
Figura 70: Gráfico da relação entre resistência à compressão e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 100x128mm.	77
Figura 71: Gráfico da relação entre resistência à compressão e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 50x100mm.	78

Figura 72: Variação da resistência à compressão simples com a relação de η/Civ aos 7 dias de cura do RCC-C e de Marques et al. (2014).....	80
Figura 73: Variação da resistência à compressão simples com a relação de η/Civ aos 28 dias de cura do RCC-C e de Marques et al. (2014).....	80
Figura 74: Curvas granulométricas do RCC e da areia de Osório.....	81
Figura 75: Gráfico da relação entre resistência à tração por compressão diametral e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 50x100mm.....	83
Figura 76: Variação da resistência à tração por compressão diametral com a relação de η/Civ aos 7 dias de idade do RCC-C e de Cruz & Consoli (2010).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peneiramento da area de osório.....	33
Tabela 2 – Resultado da análise química do cimento CP II Z – 32.....	45
Tabela 3- Densidade real das amostras de RCC100.	67
Tabela 4 - Resultados de compactação das amostras de RCC100.	70
Tabela 5 - Resultados do ensaio de compactação nas amostras de RCC-C.	72
Tabela 6 - Valores de ISC mínimos aceitáveis e expansões máximas para base e sub-base para pavimentos de grande tráfego.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Quantitativos e características das estacas.....	43
Quadro 2 - Resultado das propriedades físicas do cimento CII Z-32.....	45
Quadro 3 - Identificação das amostras.....	46
Quadro 4 - Quadro resumo dos ensaios realizados.	47
Quadro 5 - Quantitativo de corpos de prova moldados dinamicamente....	57
Quadro 6 - Quantitativo de corpos de prova 5x10 cm moldados.....	60
Quadro 7 - Relação da quantidade de corpos de prova das amostras com as idades de ruptura.	63
Quadro 8 - Relação da quantidade de corpos de prova das amostras com as idades de ruptura.	65
Quadro 9 - Fração do solo (%) das três amostras de RCC100.....	67
Quadro 10 - Resultados de CBR e expansão do RCC.	74
Quadro 11 - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos 100x128 mm.	75
Quadro 12 - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos 50x100 mm.	78
Quadro 13 – Quadro comparativo dos resultados obtidos e os critérios da NBR.....	81
Quadro 14 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos 50x100 mm.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo geral	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Estrutura do Trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Resíduo de Construção Civil	20
2.2 Fundação	22
2.3 Estaca Tipo Hélice Contínua	23
2.4 Solos estabilizados com cimento	26
2.5 Uso de RCC em pavimentação	29
2.6 Metodologia de dosagem de Solo-cimento proposto por Consoli (2007)	32
3 METODOLOGIA	40
3.1 Caracterização do local de coleta das amostras	41
3.1.1 Sondagens	41
3.1.2 Projeto de fundação com estacas tipo estaca hélice	42
3.1.3 Coleta dos RCC	43
3.3 Ensaio de laboratório	46
3.3.1 Preparação do RCC	48
3.3.2 Análise granulométrica	49
3.3.3 Densidade real dos grãos	50
3.3.4 Limites de consistência	51
3.3.5 Ensaio de Compactação do RCC	52
3.3.6 Ensaio de Compactação do RCC-C	53
3.3.7 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia do RCC	54
3.3.8 Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos 100x128 mm do RCC e RCC-C	56
3.3.9 Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos 50x100 mm do RCC-C	59
3.3.10 Ensaio de resistência à compressão simples	62
3.3.11 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	64
4 RESULTADOS	66
4.1 Ensaio de caracterização física do RCC	66
4.1.1 Análise granulométrica	66
4.1.2 Densidade real dos grãos	67
4.1.3 Limites de consistência	68
4.1.4 Classificação Transportation Research Board (TRB)	68
4.2 Ensaio mecânicos	69
4.2.1 Ensaio de Compactação do RCC	69
4.2.2 Ensaio de Compactação do RCC-C	70
4.2.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do RCC	73
4.2.4 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC e RCC-C	75
4.2.4.1 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC e RCC-C com 100x128 mm	75

<i>4.2.4.1 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC-C com 50x100 mm.....</i>	<i>77</i>
<i>4.2.5 Análise dos resultados x NBR 12253/2012.....</i>	<i>81</i>
<i>4.2.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos do RCC-C.....</i>	<i>82</i>
<i>5 CONCLUSÕES.....</i>	<i>85</i>
<i>REFERÊNCIAS.....</i>	<i>86</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O setor da construção civil é reconhecido por sua importância para a economia do país e pela elevada geração de empregos, seja de forma direta ou indireta, contribuindo também para o desenvolvimento industrial e o surgimento de novas tecnologias. Por outro lado, este elevado índice de atividades construtivas acarreta em um alto consumo de matérias-primas e geração de expressivo volume de resíduos, que originam impactos ambientais, sociais e econômicos.

Os resíduos da construção civil (RCC) gerados nos canteiros de obra transformam o setor da construção civil em um dos principais responsáveis pela poluição do meio ambiente. Dentre os resíduos oriundos da construção civil está o solo, que, apesar de ser um componente natural, ao ser descartado após processos de escavação, é abandonado em depósitos clandestinos de entulhos, espaço bastante comum em áreas urbanas (GONZALES & RAMIRES, 2005).

A disposição dos RCC em áreas ilegais traz uma série de impactos ambientais, como a poluição visual, o estreitamento de leitos de rios – ocasionando enchentes –, a poluição das águas e solos, a indução à deposição de outros tipos de rejeitos – com o atrativo para vetores de doenças (PAZ *et al.*, 2015). Isso se deve, entre outros fatores, à falta de gestão dos resíduos das empresas construtoras, que, segundo Gusmão (2008), apesar de 90% dos RCC serem reaproveitáveis, são destinados de forma inadequada.

A destinação dos RCC não é o único problema ambiental da construção civil; a exploração de jazidas de matérias-primas também causa grandes impactos ambientais. Sendo assim, a exploração mineral em ritmo crescente acarretou em alerta para as autoridades e para a sociedade em geral sobre as atividades das empresas exploradoras. Diante disso, observou-se a necessidade do manuseio e da estocagem dos resíduos serem efetuados de forma combinada com os ideais de

preservação ambiental, respeitando os princípios técnicos e éticos da Engenharia.

De acordo com Farias *et al.* (2015), neste cenário, é essencial que as práticas de construção tenham princípios sustentáveis, com tecnologias de construção com ênfase na prevenção, redução, recuperação, reutilização e reciclagem de materiais.

Neste contexto, a procura por materiais a serem usados em camadas de base e sub-base – que se adequem às especificações das normas rodoviárias vigentes no Brasil – representam um grande problema para órgãos rodoviários locais. Muitas vezes, a falta de materiais granulares próximos ao local de construção das vias acaba tornando oneroso a execução de pavimentos. Dessa forma, surge a necessidade de utilizar solos menos nobres, estabilizando-os com aglomerantes e resíduos que melhorem suas propriedades (PEREIRA, 2012).

1.2 Justificativa

Em todas as etapas construtivas de um empreendimento há geração de resíduo. Segundo Gusmão (2011), na Região Metropolitana do Recife-PE, a execução do projeto de fundação em estaca tipo hélice contínua representa 76% de todos os projetos de fundação de prédios com mais de 8 pavimentos construídos na região. Conhecendo o processo executivo desse tipo de estaca, sabe-se que ele é caracterizado por gerar um volume expressivo de resíduo de escavação.

Assim, a realização de estudos atestando que esse material proveniente de escavação poderia ser reutilizado evitaria custos financeiros desnecessários e danos ao meio ambiente, consequentes de uma má destinação.

Diante da geração expressiva de resíduo oriundo da execução de estacas tipo hélice contínua, da preocupação ambiental com o destino final deste resíduo e da necessidade de materiais de construção para execução de camadas de base e sub-base, assurge uma interessante perspectiva de realizar o melhoramento desses resíduos com aglomerante hidráulico a fim de promover a sua reutilização base de pavimentação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal do estudo é avaliar o potencial da utilização do resíduo de escavação de estacas tipo hélice contínua (REHC) melhorado com cimento para aplicação em camada de base de pavimentação.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo proposto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- quantificar o volume de resíduo de estaca hélice contínua gerado em uma obra de edifício multirresidencial localizado na Região Metropolitana do Recife-PE (RMR);
- caracterizar o resíduo de escavação da estaca hélice contínua de uma obra;
- avaliar o comportamento mecânico do resíduo estabilizado com diferentes teores de cimento;
- analisar a adequabilidade do uso do resíduo estabilizado em obras de pavimentação.

1.4 Estrutura do Trabalho

A partir do conhecimento teórico adquirido através da revisão bibliográfica e na delimitação do problema de pesquisa, o presente trabalho foi organizado em 5 capítulos, apresentados a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução à contextualização do tema, abordando a sua importância e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica, que trata de assuntos de correlação com o estudo e pesquisas anteriores que fizeram utilização de métodos ou materiais semelhantes ao desenvolvido.

O Capítulo 3 aborda a metodologia aplicada no estudo, descrição da escolha dos parâmetros experimentais, caracterização do solo, preparação das amostras, bem como técnica experimental adotada e análise preliminar dos dados.

O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química e física dos materiais e na caracterização das propriedades mecânicas das misturas solo-cimento. Os resultados encontrados na pesquisa são discutidos e comparados com o de trabalhos anteriores disponíveis na literatura.

O Capítulo 5, a partir da sintetização dos resultados encontrados, apresenta as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduo de Construção Civil

Apesar dos avanços tecnológicos alcançados, o setor construtivo ainda apresenta traços artesanais, responsáveis por uma significativa geração de resíduo de construção, a qual ocorre desde o recebimento do produto até a sua aplicação na obra (FARIAS, 2013).

Segundo a NBR 15116/2004 os resíduos da construção civil (RCC) são:

“Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

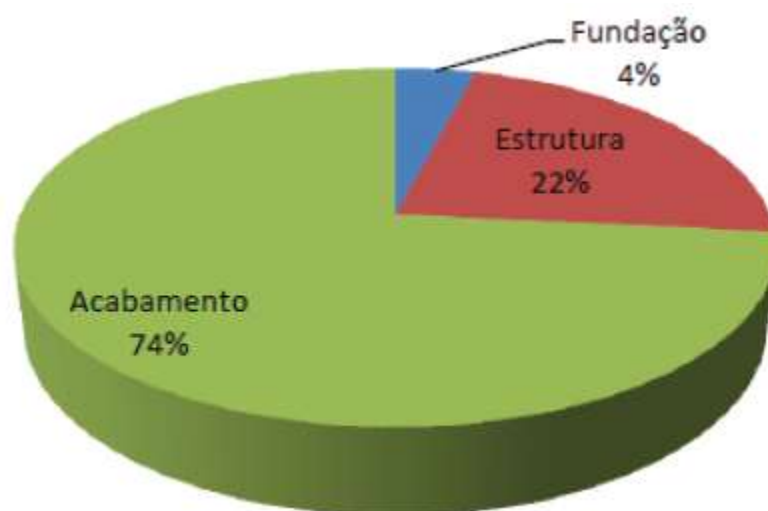
Para Achillas *et al.* (2011), o volume de RCC causa grande preocupação por ser, atualmente, o maior dentre todos os resíduos gerados em áreas urbanas, além de que seus constituintes também podem ser danosos à saúde e ao meio ambiente, como, por exemplo, materiais contaminantes, plásticos e derivados, entre outros. Isto traz muitas dificuldades para o seu descarte correto, pois tais resíduos quando despejados em locais impróprios, como florestas, córregos, barrancos ou em terrenos vazios, auxiliam na degradação do local, causando erosão, contaminando o solo, poços, lençóis freáticos e águas de superfície, contribuem para a ocorrência de enchentes, atraem pragas e geram riscos de incêndio, além de prejudicarem a beleza das áreas naturais.

No Brasil, a destinação incorreta de RCC tem causado danos ambientais, sociais e econômicos à sociedade. A deposição inadequada é feita em leitos de rios, beiras de estradas e terrenos baldios, sem qualquer cuidado, podendo ocasionar o aparecimento de vetores, gerando doenças, além de contaminar rios e lençóis freáticos. Apesar do RCC ser um

material inerte, a formação de pontos de disposição inadequada na malha urbana oportuniza o depósito de outros tipos de resíduos, criando mini lixões, agravando a situação (RODRIGUES, 2015).

Com relação à etapa da obra, Paz (2014) afirma que a fase mais crítica em termos de geração de resíduos é a de acabamento, seguida das fases de estrutura e fundação (Figura 1). O autor associa esta característica ao tempo de duração da fase, que é a mais longa do processo construtivo, além de envolver serviços tais como alvenaria, instalações elétricas e hidrossanitárias e ter um alto índice de desperdício.

Figura 1: Porcentagem da geração de RCC por fase da obra.



Fonte: Paz (2014).

O gerenciamento correto dos resíduos deve ser realizado em todas as etapas construtivas do empreendimento independentemente do volume gerado. Embora os RCC da fase de fundação possa representar um expressivo percentual do volume de RCC total de uma obra, o que pode causar danos ambientais a sociedade, observa-se que as políticas de reaproveitar desses resíduos de escavação são pouco trabalhadas nos canteiros.

De acordo com Pereira (2012), devido à alta demanda por agregados utilizados na indústria da construção, materiais provenientes de pedreiras e jazidas de solo estão cada vez mais escassos. Sendo assim, muitas vezes, faz-se necessário utilizar materiais locais, solos finos, tipicamente

argilosos, muito embora, estes estejam no limite das especificações de uso. Nesse cenário, surge a possibilidade do RCC reciclado, beneficiado ou somente reutilizado, oriundos de atividades de fundação apresentar as especificações técnicas exigidas pelos órgãos responsáveis.

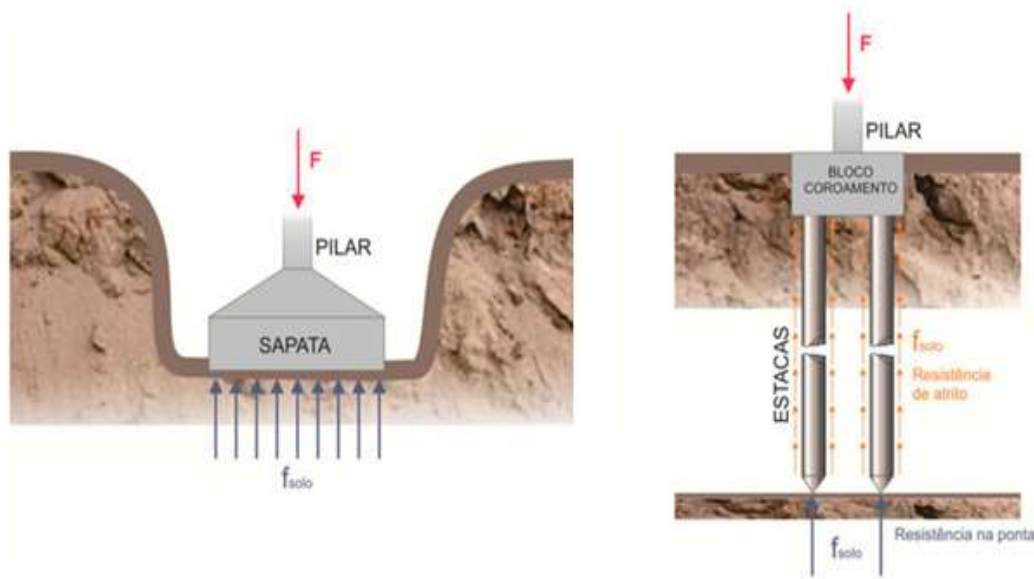
2.2 Fundação

Fundação de uma obra de engenharia é todo elemento que intermedeia entre a estrutura e o terreno responsável por receber os esforços de ações diversas aplicados pelas estruturas e transmiti-los ao terreno de forma segura e econômica (GUSMÃO FILHO, 1998).

Os elementos de fundações responsáveis por suportar a cargas da edificação devem ser executados em solo firme, que é previamente determinado por ensaios de sondagem. De acordo com Hachich *et al.* (1998), as fundações são elementos que não subsistem por si só, são sempre fundações de algum outro elemento. Daí o histórico condensado precisar, também, necessariamente, incluir algo sobre superestruturas, embora de maneira mais singela e ainda mais concisa.

Devido à existência de diversos tipos de fundação, a escolha de um determinado tipo para o desenvolvimento do projeto de fundação depende de vários elementos. Segundo Velloso & Lopes (2010), um dos primeiros cuidados de um projetista de fundação deve ser o emprego da terminologia correta. As fundações são convencionalmente separadas em dois grandes grupos, fundações superficiais (ou diretas ou rasas) e fundações profundas (Figura 2). A distinção entre estes dois grupos é feita segundo o critério (arbitrário) de que uma fundação profunda é aquela cujo mecanismo de ruptura de base não surgisse na superfície do terreno (VELLOSO & LOPES, 2010). Como os mecanismos de ruptura de base atingem, acima dela, tipicamente duas vezes sua menor dimensão, a norma NBR 6122 determinou que fundações profundas são aquelas cujas bases estão implantadas a uma profundidade superior a duas vezes sua menor dimensão e a pelo menos 3 m de profundidade.

Figura 2: Exemplo de fundação superficial e fundação profunda.



Fonte: Adaptado de Construfácil RJ (2015).

Os elementos necessários para o desenvolvimento de um projeto de fundação são a topografia da área, dados geológico-geotécnicos, dados sobre construções vizinhas, dados da estrutura a construir.

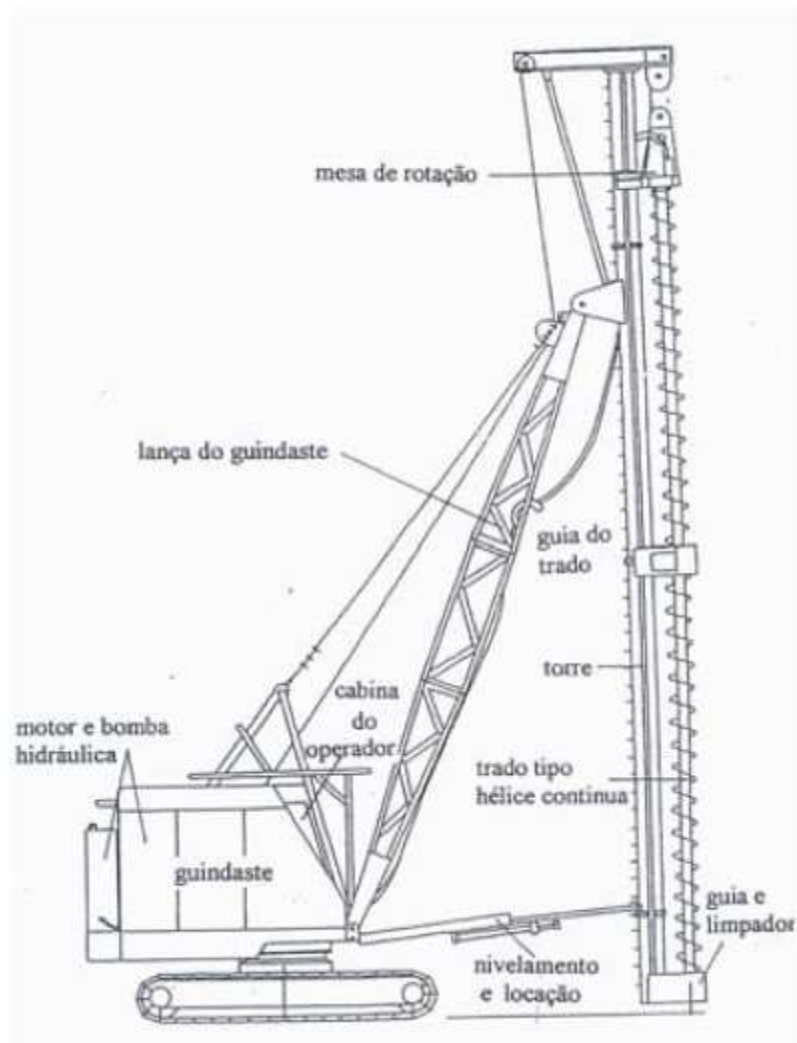
Dentre os tipos de estacas empregadas na execução de fundação profunda, pode-se destacar:

- . estacas pré-moldadas;
- . estacas metálicas;
- . estacas-raiz;
- . estacas tipo hélice contínua.

2.3 Estaca Tipo Hélice Contínua

O emprego de estacas executadas com trado de hélice contínua surgiu na década de 50, nos Estados Unidos. O equipamento era composto por guindaste com lança treliçada, munido de uma torre com mesa rotativa acoplada (Figura 3), que podia executar estacas com diâmetro de 275, 300 e 400 mm. No início da década de 70, o processo executivo foi implantado na Alemanha, de onde, em pouco tempo, disseminou-se para toda Europa e Japão (PENNA *et al.*, 1999).

Figura 3: Equipamento montado em guindaste com lança treliçada.



Fonte: Penna *et al.* (1999).

De acordo com a NBR 6122/2010, a estaca hélice é o tipo de fundação profunda constituída por concreto, moldada *in loco* e executada por meio de trado contínuo e injeção de concreto pela própria haste do trado.

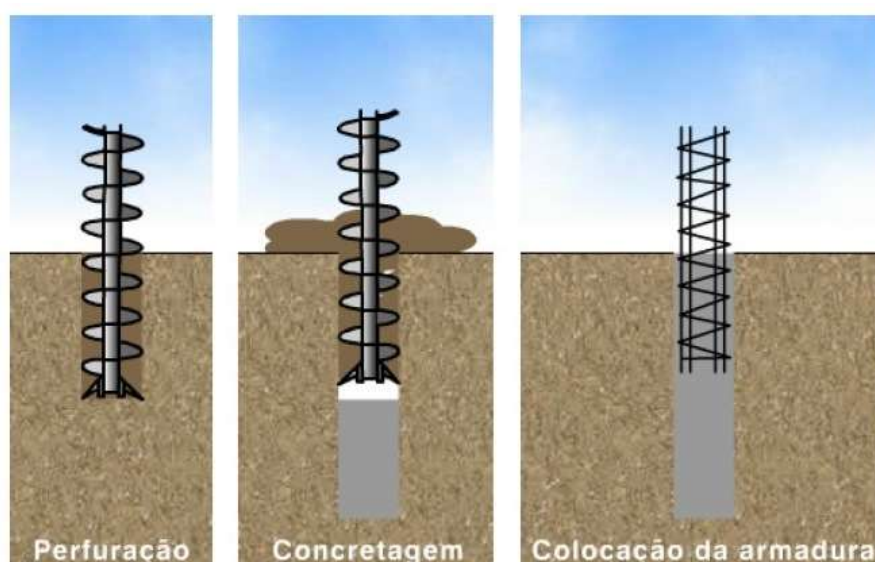
Segundo Hachich (1998), a partir da metade da década de 90, o mercado brasileiro foi invadido por máquinas importadas da Europa, principalmente da Itália, construídas especialmente para execução de estacas tipo hélice contínua, com torque de 90 kN.m a mais de 200 kN.m, diâmetros de hélice de até 1000 mm e com capacidade para executar estacas de até 24 m de profundidade.

Esse tipo de estaca é feito com um trado de grande comprimento, composto de chapas em espiral que se desenvolvem em torno do tubo

central. A extremidade inferior do trado é adotada de garras para facilitar o corte do terreno, e de uma tampa que impede a entrada de solo no tubo central da escavação. Velloso & Lopes (2010) apresenta o processo de execução desse tipo de estaca, que é dividido em três etapas (Figura 4):

- Perfuração: consiste na introdução da hélice no terreno, por meio de movimento rotacional transmitido por motores hidráulicos acoplados na extremidade superior da hélice, até a cota de projeto sem que a hélice seja retirada da perfuração;
- Concretagem: após alcançar a profundidade projetada, o concreto é bombeado continuamente através do tubo central, ao mesmo tempo em que a hélice é retirada, sem girar, ou girando lentamente no mesmo sentido da perfuração;
- Armadura: o processo executivo da estaca tipo hélice contínua impõe que a colocação da armadura seja feita após o término da concretagem. A armadura é introduzida na estaca manualmente por operários ou com auxílio de um peso ou com o auxílio de um vibrador. Um fator condicionante para decidir o tipo e a profundidade das armaduras é o conhecimento acerca do esforço que essa estaca vai estar submetida, podendo ser, esforços de compressão, esforços transversais ou de tração.

Figura 4: Esquema de execução de estaca hélice contínua.



Fonte: Adaptado de Solossantini (2015).

De acordo com Resende & Martins (2014), a fundação em estaca hélice é um sistema que proporciona uma boa produtividade e, por esse

motivo, é recomendável que haja uma central de concreto nas proximidades do local de trabalho. Além disso, as áreas de trabalho devem ser planas e de fácil movimentação. O sistema pode ser empregado na maioria dos tipos de solos, exceto em locais onde há a presença de matacões e rochas. Estacas muito curtas, ou que atravessam materiais extremamente moles também devem ter sua utilização analisada cuidadosamente.

Velloso & Lopes (2010) apresentam uma discussão técnica quanto à classificação das estacas tipo hélice contínua, a qual afirma que estas devem ser consideradas como estacas escavadas tradicionais, estacas de substituição, em cujo processo executivo há descompressão do solo, ou como estacas sem deslocamento. Segundo o processo executivo, se houver retirada de praticamente todo o solo no espaço onde será constituída a estaca, ela deve ser classificada como estaca de substituição, ou, segundo a terminologia da NBR 6122/2010, “estaca hélice contínua com escavação do solo”. Se no processo executivo, houver deslocamento lateral do solo para criar o espaço da estaca, ela pode ser considerada uma estaca “sem deslocamento” ou mesmo de “de pequeno deslocamento”. Essas diferenças são consequências do emprego de trados especiais, como também podem ser geradas pelo procedimento de introdução do trado convencional.

2.4 Solos estabilizados com cimento

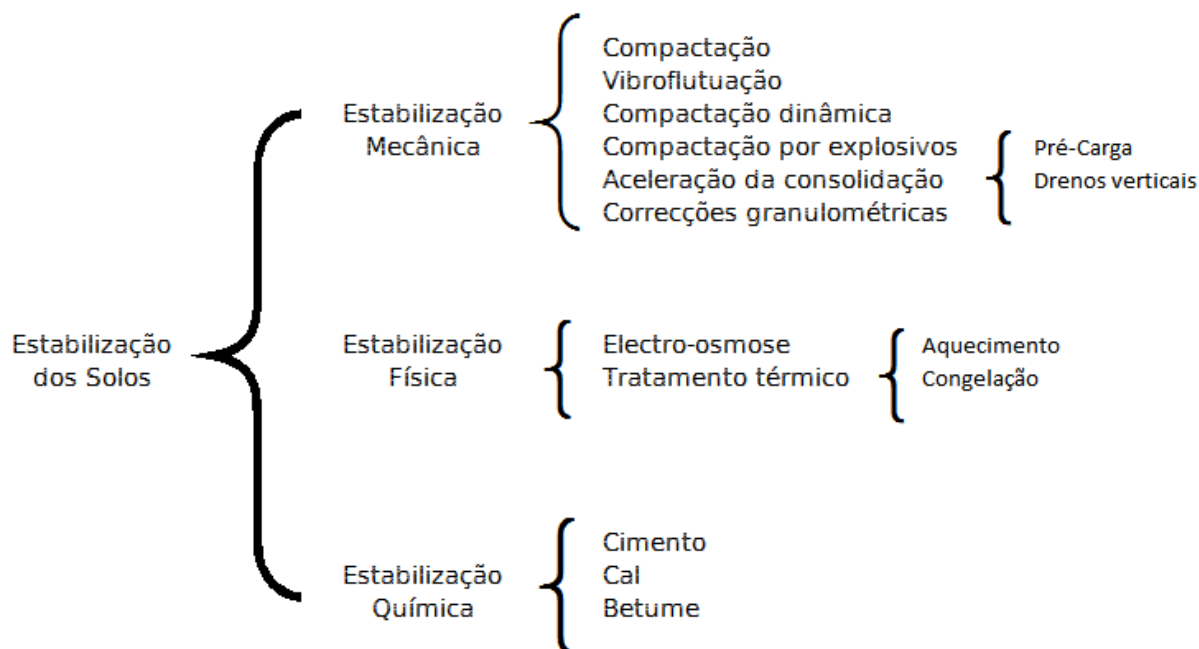
A tentativa de modificar algumas propriedades dos solos é bastante antiga. Alguns autores fazem considerações a tentativas ocorridas há cerca de três mil anos, mas foi com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novos sistemas de produção – ocorridos após a Revolução Industrial no século XVIII – que se tornou mais comum a modificação das propriedades do solo. Isso se deu em virtude da necessidade de novas obras de infraestruturas, por muitas vezes, em locais onde o solo não atendia as necessidades básicas exigidas (FONINI, 2012).

Quando os solos naturais não possuem os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados, quer

quando utilizados no seu estado natural, em fundações ou escavações, quer quando utilizados como material de construção, uma das soluções possíveis é a alteração das suas características de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas. Esta alteração é o que se designa por estabilização de solos (CRUZ & JALALI, 2010).

Os métodos existentes para a estabilização de solos podem ser divididos em três grupos (Figura 5), de acordo com os meios que são utilizados, sendo que cada grupo possui diversos procedimentos. Os tipos três estabilizações são: i) mecânica, ii) física e iii) química. A primeira busca melhorar as características do solo através de uma melhor organização das suas partículas sólidas e/ou recorrendo à correção da composição granulométrica. Na estabilização física, as propriedades do solo são alteradas por meio do uso do calor ou da aplicação de um potencial elétrico. Por fim, na estabilização química, as características do solo são modificadas através da mistura com outros materiais.

Figura 5: Diagrama esquemático – Métodos de estabilização de solos.



Verificou-se, no período pós 2ª Guerra Mundial, a necessidade de estabilização de solos na tentativa de dar resposta à necessidade de construção de pavimentos rodoviários. Isso acabou sendo impulsionado pelo crescimento da indústria automobilística e sua consequente evolução

tecnológica, o que causou um aumento progressivo dos volumes de tráfego e das cargas por eixo dos veículos.

A NBR 12253/2012 define ‘solo-cimento’ como sendo “[...] o produto resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem”. O procedimento de melhora das propriedades dessa mistura ocorre pelo processo de cimentação com o aumento do tempo de cura, o que lhe confere ganho de coesão, tendo como resultado final materiais com características superiores quando comparados aos materiais originais. Dentre essas qualidades superiores, pode-se destacar: i) a capacidade de suporte a esforços de compressão e de tração, ii) a redução de compressibilidade e iii) a permeabilidade (BECHARA *et al.*, 2010). De acordo com Zhang & Tao (2008), os solos tratados com cimento são misturados com baixas dosagens com ou sem o objetivo de melhora de resistência dependendo das suas funções.

De acordo com Clough & Bachus (1980), os solos cimentados podem ser divididos em 2 (dois) tipos de estruturas: i) ligações decorrentes de cimentações apenas nos pontos de contato entre as partículas e ii) vazios completos ou parcialmente completos por agentes cimentantes, além das ligações nos pontos de contato. O primeiro tipo geralmente ocorre quando o solo tem predominância das areias e cascalhos; enquanto que o segundo tipo ocorre com siltes e argilas.

Clought *et al.* (1981) ao estudar amostras de areia artificialmente cimentadas com o objetivo de verificar os efeitos da quantidade de agente cimentante e da densidade da areia na matriz de solo. Concluíram que o comportamento da areia cimentada é fortemente influenciado pela quantidade de agente cimentante, densidade da areia, pressão confinante e distribuição granulométrica.

Segundo Consoli *et al.* (2007), o uso de técnicas tradicionais de engenharia geotécnica enfrenta obstáculos de natureza econômica e ambiental. A adição de cimento se torna uma técnica atraente quando o projeto requer melhora do solo local. O tratamento de solos com cimento encontra aplicação, por exemplo, na construção de camadas de base do

pavimento, na proteção de inclinação barragens de terra, e como camada de suporte para fundações superficiais. Para Floss *et al.* (2014), a aplicação desta técnica de tratamento de solos com cimento vem sendo empregada com sucesso para proteção de taludes em barragens de terra e canais, na contenção de plumas de contaminação, na construção de bases para pavimentos rodoviários e ferroviários, ou ainda no encapsulamento de solos contaminados.

Estudos anteriores de solo-cimento demonstraram que o seu comportamento é complexo e dependem de vários fatores, tais como: i) a propriedades físico-químicas do solo, ii) a quantidade de cimento, e iii) o teor de umidade e a porosidade no momento da compactação (CLOUGH *et al.*, 1981; LOPES 2007; CRUZ & CONSOLI, 2010; MORAES *et al.*, 2010; CONSOLI *et al.*, 2012; FONINI, 2012; PEREIRA, 2012).

2.5 Uso de RCC em pavimentação

A norma NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o pavimento como:

“uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento”.

Os pavimentos são classificados em: i) flexível, ii) semirrígido e iii) rígido. O primeiro é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. O segundo caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. O último é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto,

absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

De acordo com Bonafé & Specht (2005), o solo, por se tratar do material de construção mais abundante e barato na natureza, precisa ser bem conhecido para aplicação em camadas de pavimentos, pois em condições naturais nem sempre apresenta condições técnicas suficientes para atender aos requisitos necessários para uso como material de construção ou para suporte de estruturas de engenharia.

O pavimento é um acabamento indispensável para todas as categorias de estradas, sejam elas de tráfego intenso, vias urbanas, pistas de aviação e muitas outras que, por razões econômicas, nem sempre são pavimentadas. Estradas com pavimento exercem uma grande atração sobre o tráfego, e quanto maior for a parcela de estradas pavimentadas numa malha rodoviária, menor será o volume de tráfego no restante da rede, o que em algumas situações não justificaria sua pavimentação (FRAENKEL, 1980).

A Norma 304/97 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define 'solo melhorado com cimento' como " [...] um material de mistura de solo, cimento e água, em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade". Os teores usuais de cimento situam-se na faixa de 2 a 4% em peso, em relação ao total da mistura. Entretanto, a NBR 12253/2012 recomenda 4% a 7% de adição de cimento. As normas vigentes recomendam que os solos empregados na execução de base de solo melhorado com cimento deverão ser submetidos a ensaios com a finalidade de caracterização física e mecânica e os resultados dessas caracterizações devem ser comparadas com os parâmetros apresentados nas normas.

Segunda a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2009), os pavimentos com base ou sub-base de solo-cimento são empregados no Brasil desde 1939, quando foi construída a estrada Caxambu-Areias, em empreendimento no qual a ABCP juntou-se ao Departamento Nacional de

Estradas e Rodagem (DNER). Desde então, foram executados no país mais de 25.000 km com essa solução, um marco mundial.

Mistura homogêneamente compactada, curada e endurecida de solo, cimento e água, pode empregar solos do próprio leito da futura base, misturados no local com equipamento pulvimisturador, ou usar solos selecionados, de jazida, misturados em usina central ou no próprio campo. O baixo custo inicial e a alta durabilidade são dois pontos fortes dessa alternativa. É indicado como base e sub-base de pavimentos flexíveis e de peças pré-moldadas de concreto e também sub-base de pavimentos de concreto. No campo rodoviário, serve também como contenção de encostas.

Neste contexto, os RCC reciclados possuem grande possibilidade de utilização como material para alimentar o próprio setor construtivo, podendo ser usado em concreto sem função estrutural, camadas drenantes, pavimentação, estacas de compactação, entre outros.

A pavimentação consome uma grande quantidade de recursos, e o emprego de resíduos pode ser vantajoso, pois pode poupar recursos e matéria prima, unindo a economia com o descarte adequado e o benefício da obra. Porém para utilização do resíduo é preciso fazer investigações. O seu uso deve ser concebido após ensaios que comprovem sua viabilidade quanto às propriedades de engenharia como: i) resistência, ii) durabilidade, iii) impacto ambiental gerado com o seu uso e iv) estudos de lixiviação, dentre outros.

Como exemplos de pesquisas que estudaram o melhoramento de solos e RCC com a finalidade de utilização em pavimentação, pode-se citar Pereira (2012) e Farias (2013). Pereira (2012) estudou um silte-arenoso argiloso oriundo do município de Parnamirim, estado do Rio Grande do Norte, estabilizado com cimento Portland comum. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica do solo e mecânicos das misturas de solo-cimento, com os teores de aglomerantes adicionados ao silte-arenoso argiloso de 3%, 6% e 9%. Pereira 2012 observou o aumento nos resultados de resistência à compressão simples em todos os traços com adição de cimento. A pesquisa elaborada por Farias (2013) utilizou

dois resíduos de construção civil, resíduo de escavação de estaca tipo hélice contínua e de demolição retirados de uma obra localizada na RMR, estado de Pernambuco. O estudo realizou ensaios de caracterização geotécnica do resíduo escavado e de caracterização mecânica do resíduo de demolição; realizou-se a mistura dos dois tipos de resíduos em diversas proporções e os resultados confirmaram a viabilidade técnica e econômica da mistura dos resíduos provenientes de escavação e demolição para utilização em pavimentação.

2.6 Metodologia de dosagem de Solo-cimento proposto por Consoli (2007)

Embora existam diversas aplicações, ainda não são utilizadas metodologias de dosagem e projeto das misturas de solo-cimento baseadas em critérios mais racionais como existe, por exemplo, para o concreto, onde o fator água/cimento tem papel fundamental na obtenção da resistência desejada (FLOSS *et al.*, 2014; MORAES *et al.*, 2010).

Atualmente, o procedimento de dosagem do solo-cimento restringe-se à escolha do teor de cimento necessário, geralmente a partir de uma estimativa inicial fornecida pela literatura ou norma, seguida pela execução de uma série de ensaios laboratoriais, até a obtenção das propriedades necessárias para que se possa atingir de forma objetiva e com grande confiabilidade, as propriedades requeridas (FLOSS *et al.*, 2014).

Consoli *et al.* (2007), foram pioneiros ao estabelecer uma metodologia de dosagem para solo-cimento, com base em critérios racionais, considerando a relação vazios/cimento (η/Civ), definida pela porosidade da mistura compactada (η) dividida pelo teor volumétrico de cimento (Civ) como um parâmetro adequado para avaliar a resistência à compressão simples da mistura de solo e cimento.

O solo utilizado para o desenvolvimento da metodologia de dosagem apresentada por Consoli *et al.* (2007) foi a areia de Osório, obtida na região de Porto Alegre-RS, classificada como uma areia fina uniforme e com massa específica real dos grãos de 2,65 g/cm³. A granulometria (Tabela 1) mostrou um diâmetro efetivo médio (D50) de 0,17mm, sendo os

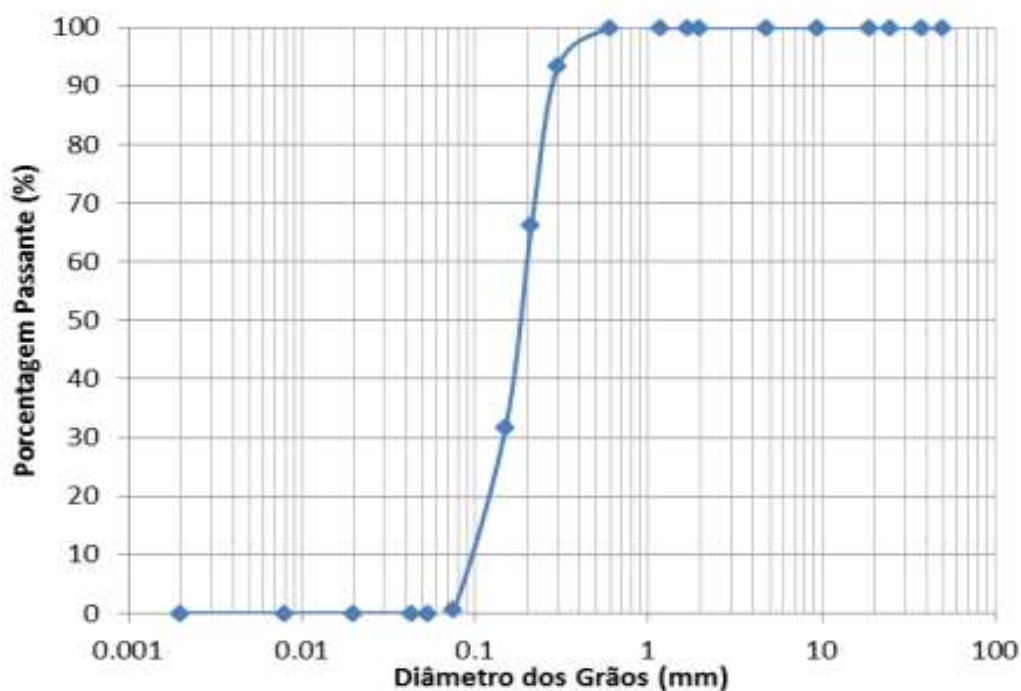
coeficientes de uniformidade e de curvatura (Figura 6) de 2,11 e 1,15, respectivamente. Os índices de vazios mínimo e máximo foram de 0,60 e 0,85, respectivamente (CONSOLI *et al.*, 2014).

Tabela 1 – Peneiramento da areia de osório.

Abertura da peneira (mm)	% Passante
1.18	100,00
0.6	99,84
0.3	93,33
0.212	66,35
0.15	31,76
0.075	0,59
0.0534	0,00

Fonte: Venson (2015).

Figura 6: Curva granulométrica da areia de Osório.



Fonte: Venson (2015).

Com tantos fatores que podem interferir diretamente nos resultados de resistência das amostras de solo-cimento, como, por exemplo, teor de cimento, percentual de porosidade, relação de porosidade por teor volumétrico de cimento. Esses dados devem ser avaliados durante a dosagem das amostras e também na análise dos resultados de resistência à compressão simples e compressão diametral.

De acordo com Marques *et al.* (2014), o ensaio de resistência à compressão simples (q_u), sendo um ensaio confiável, mundialmente usado e de baixo custo, tem sido utilizado na investigação de diferentes variáveis e de metodologias de dosagem em misturas solo-cimento. Como já referido anteriormente, uma metodologia de dosagem foi desenvolvida considerando a relação vazios/cimento (η/Civ), que é definida pela porosidade (η) dividida pelo teor volumétrico de cimento (Civ).

A Figura 7 apresenta, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, as curvas únicas de resistência à compressão simples (q_u) em função da relação vazios/cimento (η/Civ) mostrando uma muito boa correlação ($r^2 > 0.92$). Os resultados mostram que quanto menor o valor da razão vazios/cimento (η/Civ) maior a resistência à compressão simples (q_u); e também que existe um aumento geral (cerca de 50%) das resistências à compressão simples (q_u) para o tempo de cura de 28 dias em relação ao tempo de cura de 7 dias.

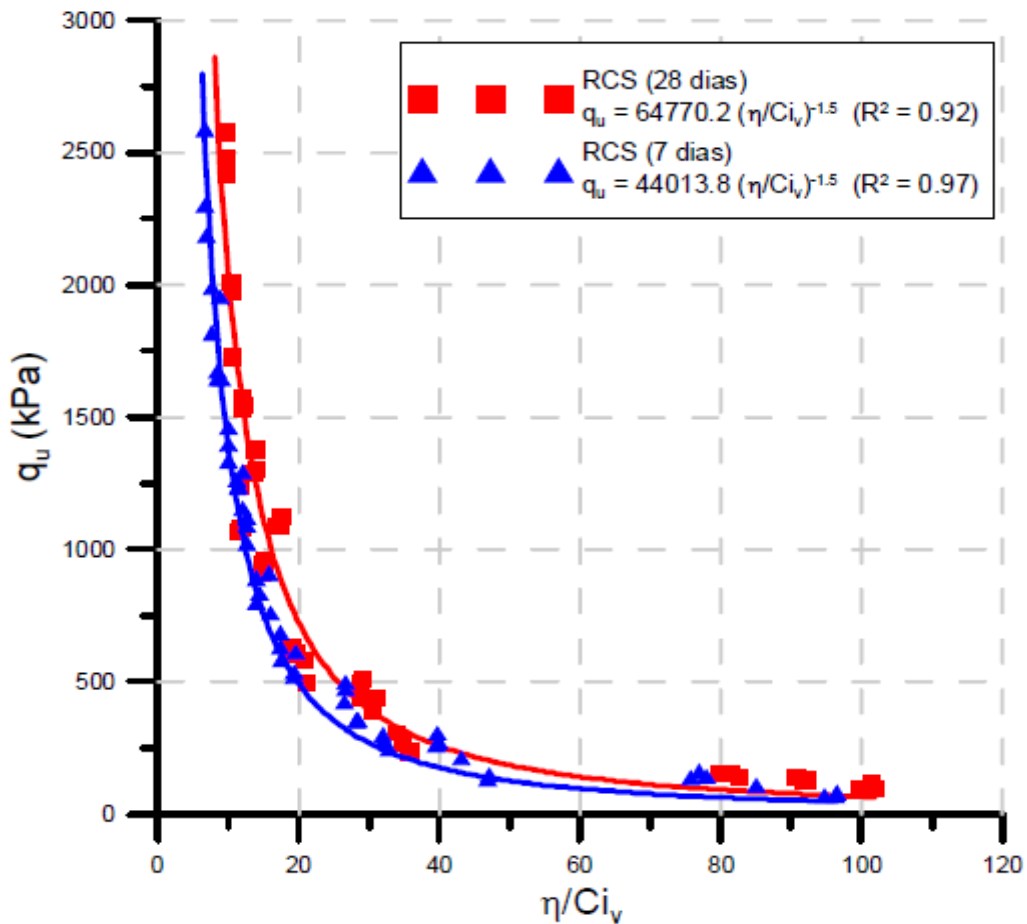
Com o objetivo de normalização, Moraes *et al.* (2014) encontraram uma solução única que englobasse todos os resultados, ou seja, que substituísse a Equação 1 e a Equação 2 para os tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, por uma equação da curva única (Equação 3).

$$q_u = 44013,8 \times (\eta | Civ)^{-1,5} \quad (\text{Equação 1})$$

$$q_u = 64770,2 \times (\eta | Civ)^{-1,5} \quad (\text{Equação 2})$$

$$q_u = 89,44 \times q_u(\eta | Civ = 20) \times (\eta | Civ)^{-1,5} \quad (\text{Equação 3})$$

Figura 7: Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/Ci_v) para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.



Fonte: Marques *et al* (2014).

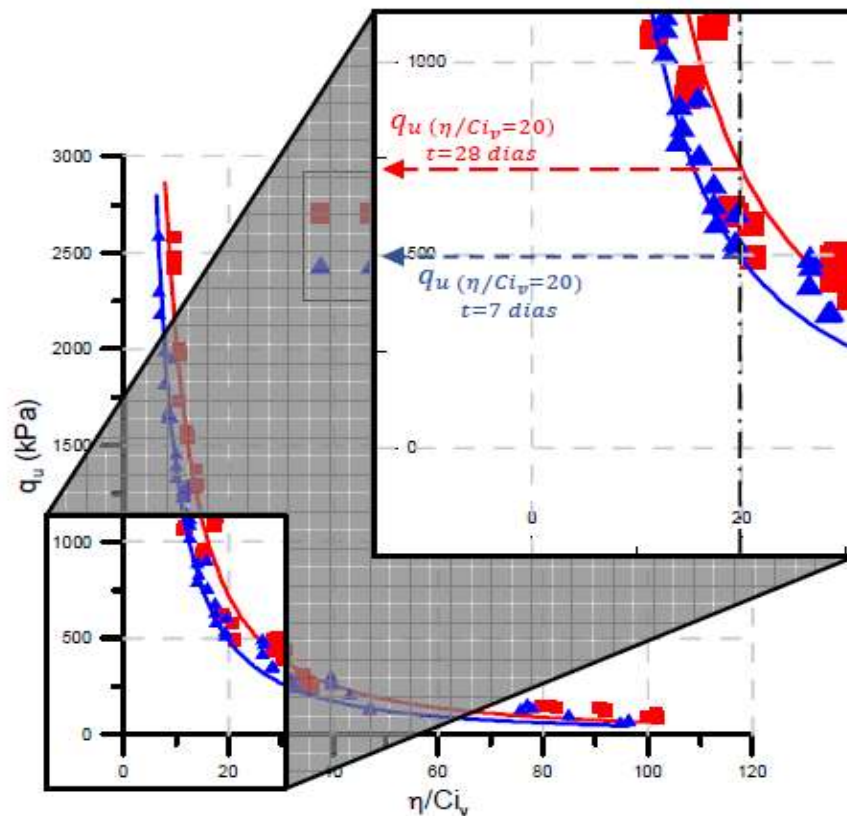
A solução para a normalização passou então por encontrar um multiplicador comum para as Equações 1 e 2, já que elas são do mesmo formato (potencial) e a componente referente ao eixo das abcissas e o seu expoente são iguais [$(\eta/Ci_v)^{-1.5}$]. Para isso, dividiu-se a resistência à compressão simples (q_u) de todos os pontos que compõe as curvas da Figura 7 por uma resistência de referência, para cada tempo de cura, que foi obtida a partir de um determinado η/Ci_v . Essa resistência de referência pode ser determinada através do gráfico (Figura 8) ou então através das Equações 1 e 2, sendo este último método, tanto mais prático como mais preciso. MARQUES *et al*. (2014) utilizaram o $\eta/Ci_v=20$ mas, a normalização é independente deste valor, podendo-se utilizar qualquer valor de η/Ci_v , desde que ele se encontre entre o intervalo mínimo e máximo do conjunto de valores apresentado nas duas curvas.

Analisando o gráfico, para $\eta/Civ=20$ tem-se $qu=500\text{KPa}$ (Figura 8). No entanto utilizando as Equações 1 e 2 os resultados são:

$$qu\left(\frac{\eta}{Civ} = 20\right) = 44013,8 \times (20)^{-1,5} = 492,1 \text{ kPa} \quad (\text{Equação 1})$$

$$qu\left(\frac{\eta}{Civ} = 20\right) = 64770,2 \times (20)^{-1,5} = 724,2 \text{ kPa} \quad (\text{Equação 2})$$

Figura 8: Zoom da Figura 7 com exemplo da determinação da resistência à compressão simples (qu) para um $\eta/Civ=20$ e para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

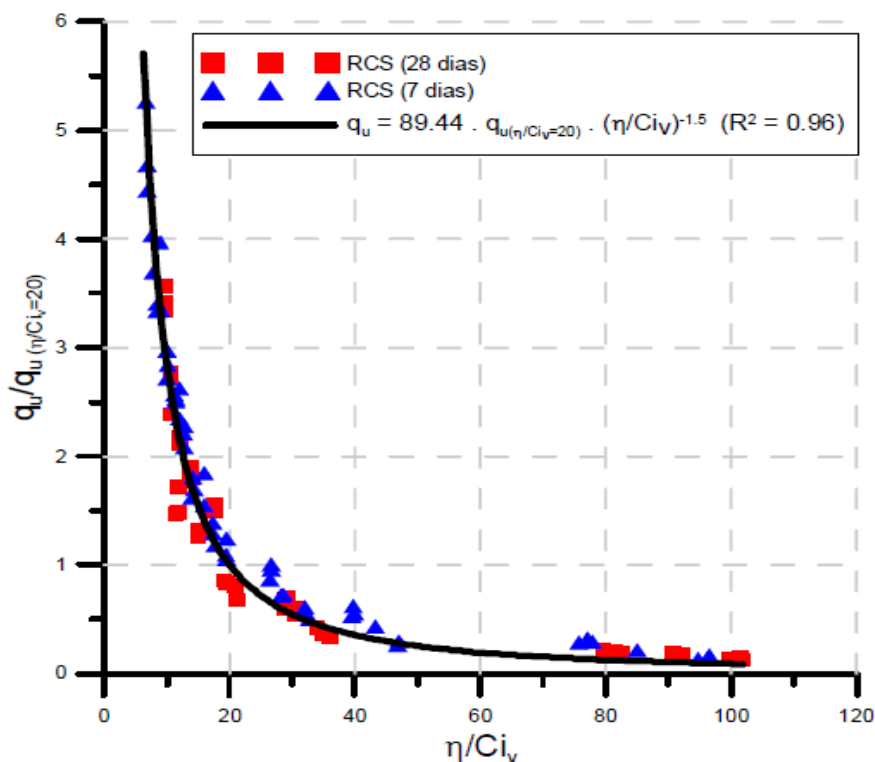


Fonte: Marques *et al* (2014).

Assim, a divisão de todos os resultados da resistência à compressão simples (qu) pela resistência de referência de 492,1 kPa e 724,2 kPa, respectivamente, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, transforma todos esses valores da resistência à compressão simples (qu) da Figura 7 em valores de resistência à compressão simples normalizados como mostra a Figura 9. Com essa normalização conseguiu-se obter uma curva única com um ajuste muito bom, que representa os resultados de resistência à

compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/Civ) para dois tempos de cura diferentes (MARQUES *et al.*, 2014).

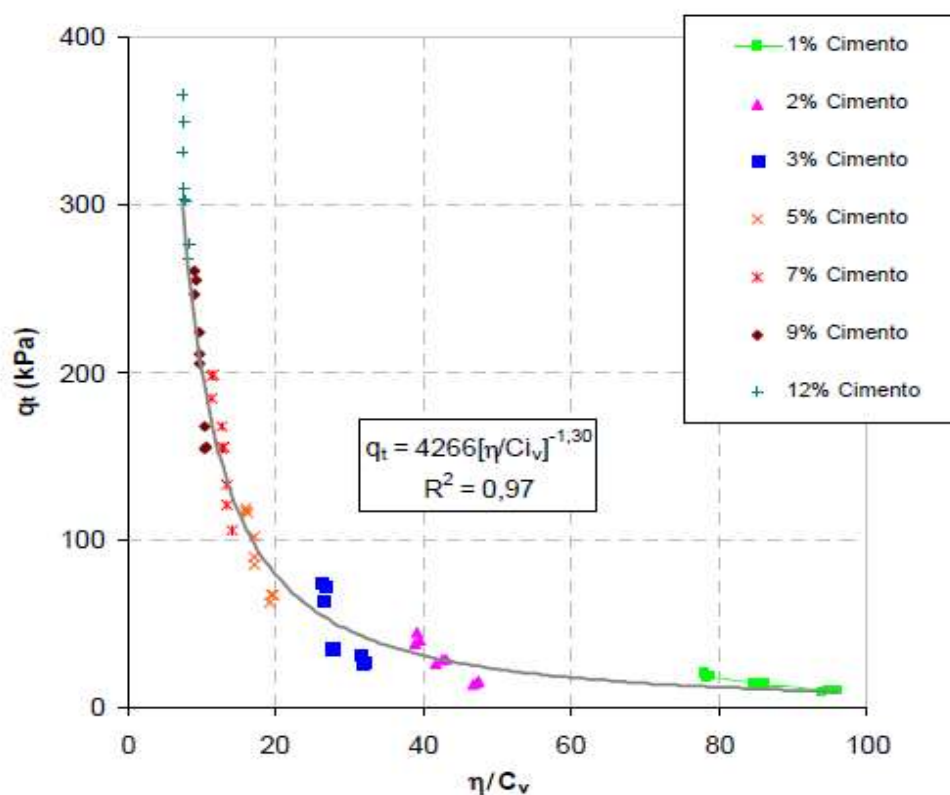
Figura 9: Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/Civ) para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.



Fonte: Marques et al (2014).

Cruz & Consoli (2010) estudaram amostras de solo-cimento utilizando a metodologia de dosagem proposta por Consoli *et al.* (2007), uma dosagem baseada em dois fatores, a resistência à tração por compressão diametral (q_t) e o fator “vazios/cimento” (η/Civ). Este, por sua vez, através de uma curva (Figura 10), relacionando parâmetros da mistura, o primeiro parâmetro é a porosidade, que indica o grau de compactação do material, o segundo é o volume de cimento em relação a massa seca do solo. Para tanto, com esta curva, o engenheiro pode definir a dosagem baseada na resistência desejada, ou vice-versa, pode definir a resistência em função de uma dosagem pré-definida. O material em questão é a areia fina, com granulometria uniforme, de Osório, cimentada, material utilizado em diversas pesquisas realizadas na Região de Porto Alegre-RS.

Figura 10: Variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com a relação vazios/cimento (η/C_v) para tempo de cura de 7 dias.



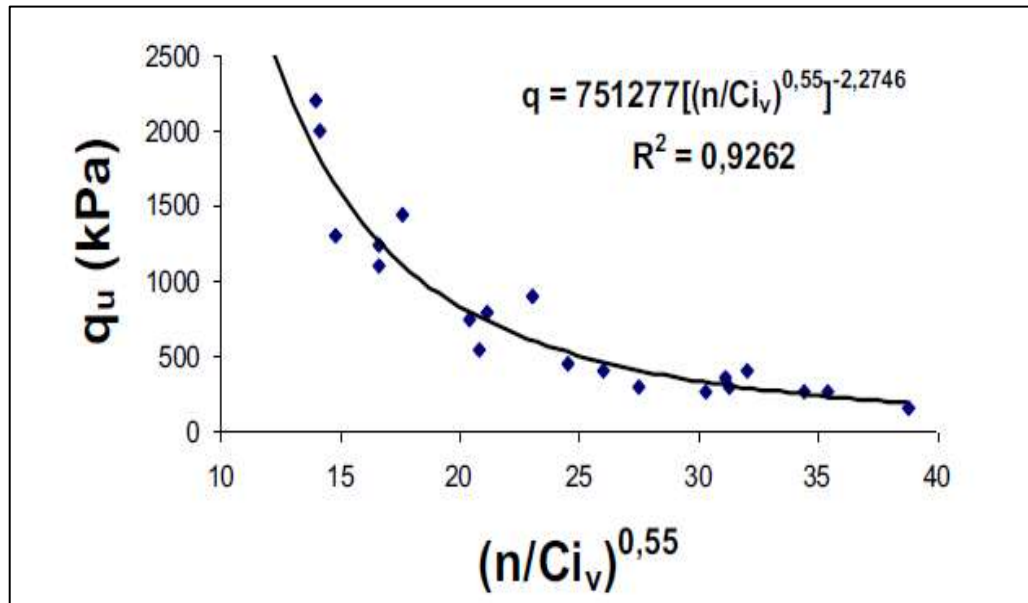
Fonte: Cruz & Consoli (2010).

Segundo Cruz & Consoli (2010), obteve-se a curva do fator vazios/cimento versus resistência à tração por compressão diametral. Tal curva, pode sem dúvidas, ser utilizada na dosagem dos mesmo materiais utilizados na pesquisa, com excelente acuidade em obras de engenharia a que essa metodologia seja adequada.

Severo 2011 também aplicou a metodologia de dosagem de Consoli *et al.* 2007, ao realizar um estudo experimental sobre o comportamento mecânico de solos sedimentares da Formação Barreiras, na Falésia da Ponta do Pirambu, no município de Tibau do Sul – RN. Para tanto, foi realizada a caracterização geotécnica da falésia e estudado a influência da cimentação do solo em seu comportamento. Foram utilizados teores de cimento Portland de alta resistência inicial de 2%, 3,5% e 5% em amostras moldadas com diferentes pesos específicos aparente seco. Com isso, a Figura 11 apresenta a curva da resistência à compressão simples versus resistência o fator vazios/cimento que comprova o efeito da cimentação é

mais intenso, em termos de ganho de resistência devido ao aumento do teor de cimento, para valores mais baixos de índice de vazios.

Figura 11: Curva de resistência à compressão simples de solo-cimento (q_u) versus relação vazios/cimento (η/Ci_v).



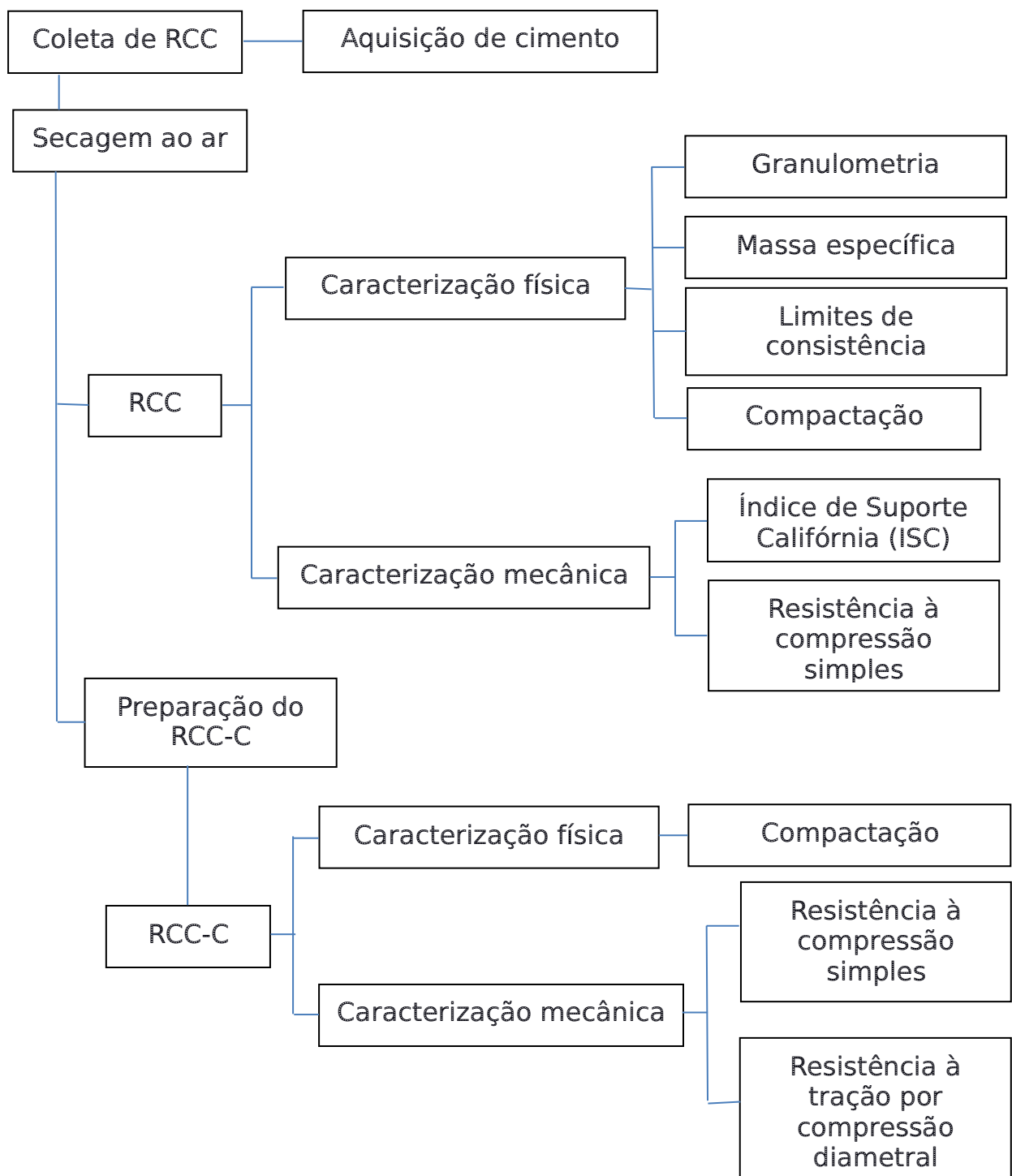
Fonte: Severo (2011).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, bem como a metodologia para sua realização.

As etapas da pesquisa são detalhadas neste capítulo, desde a coleta dos materiais, preparação, até os ensaios que avaliam o comportamento das misturas estudadas para a estabilização do solo em estudo. A Figura 12 apresenta o fluxograma adotado na pesquisa.

Figura 12: Fluxograma da pesquisa.



3.1 Caracterização do local de coleta das amostras

O local de coleta das amostras de RCC tratava-se de um canteiro de obra localizado no bairro do Espinheiro, em Recife-PE.

A obra prevista seria executada em um terreno com 1.466,43m² de área, consistindo em uma edificação de 8 pavimentos, sendo 7 tipos, totalizando 4.283,41m² de área construída.

Após algumas visitas ao canteiro da obra (Figura 13) foi agendada a data e o volume de RCC a ser coletado.

Figura 13: Canteiro de obra que forneceu os RCC para o presente trabalho.



3.1.1 Sondagens

O ensaio de sondagem à percussão (Figura 14), realizado na etapa de investigação do terreno de fundação, foi executado conforme a norma da ABNT NBR 6484/2001, por uma empresa especializada reconhecida no mercado local. Foram solicitados e executados 5 (cinco) furos (Anexo A) de sondagem. O ensaio foi executado com auxílio da circulação d'água para aprofundamento de perfuração.

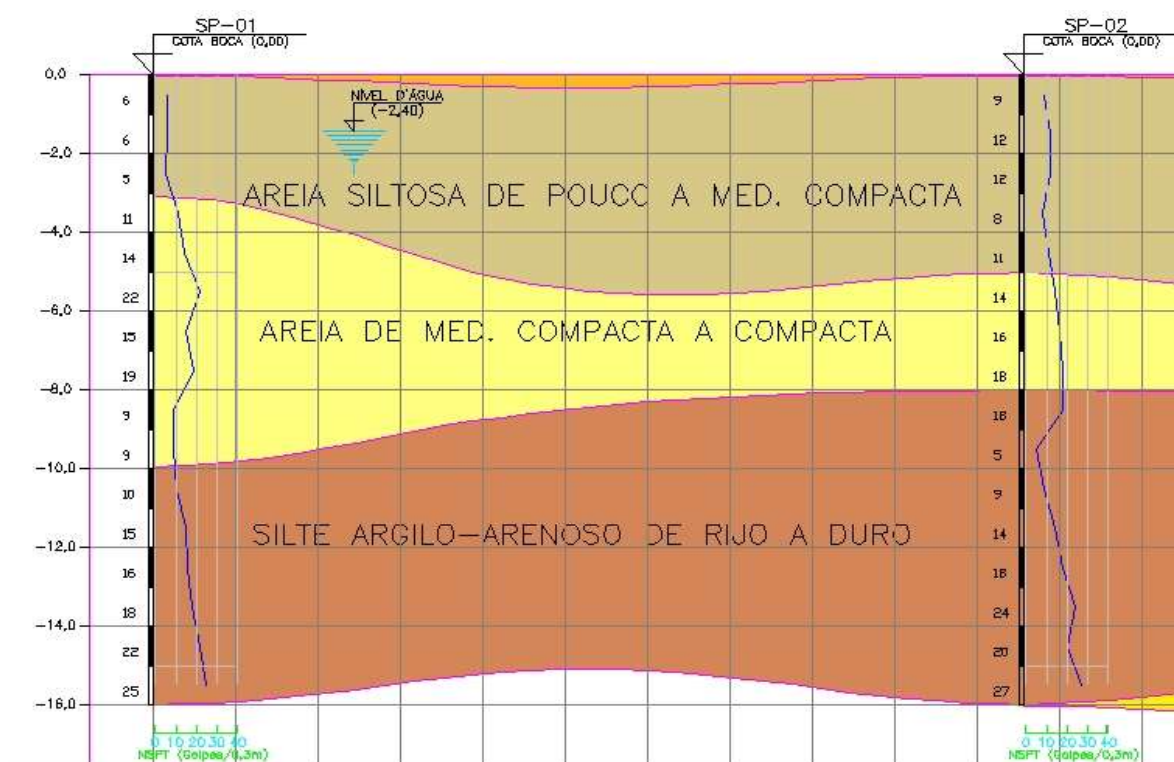
A investigação do terreno de fundação revelou que o solo era constituído principalmente por materiais arenosos, mas também apresentava, em menor proporção, silte e argila. A Figura 15 apresenta o perfil geotécnico do terreno elaborado a partir dos dados do primeiro e do

segundo furo de sondagem – o perfil completo, com os 5 (cinco) furos está apresentado no Anexo B.

Figura 14: Ensaio de sondagem à percussão.



Figura 15: Perfil geotécnico do solo do primeiro e segundo furo de sondagem.



Fonte: Relatório entregue pela empresa contratada.

3.1.2 Projeto de fundação com estacas tipo estaca hélice

A partir das sondagens à percussão, foi desenvolvido o projeto executivo de fundação, adotando-se estacas tipo hélice contínua (ANEXO

C). A empresa responsável encaminhou o projeto com os quantitativos dos materiais necessários, as características das estacas, recomendações executivas e os documentos de referências.

Na obra, foram executados 3 (três) tipos de estacas tipo hélice contínua (Figura 16), cujas características e quantitativos são apresentados no Quadro 1. De acordo com o comprimento e diâmetro de cada estaca, estimou-se que 253m³ de resíduos seriam retirados da obra. No entanto, os dados da obra revelaram um volume total de 393,70m³ de resíduo – esse acréscimo é justificável levando em consideração o volume de sobre consumo de concreto, que foi 26%, e o fator de empolamento do solo, que foi de 30%.

Quadro 1: Quantitativos e características das estacas.

Tipo de estaca	Diâmetro (mm)	Comprimento médio (m)	Quantidade	Estimativa do volume de solo escavado (m ³)
H400	400	11,52	31	44,88
H500A	500	13,52	50	132,73
H500B	500	9,52	40	74,76
Volume Total (m ³):				252,37

Figura 16: Execução de estaca tipo hélice contínua na obra.



3.1.3 Coleta dos RCC

Foram coletados aproximadamente 400 kg de RCC (Figura 17) provenientes do estaqueamento. O RCC foi obtido durante a execução de

3 (três) estacas tipo hélice continua com 500 mm de diâmetro cada e próximas aos pilares P26, P38 e PT1 (Anexo C);

Os resíduos foram armazenados em 20 (vinte) sacos (Figura 18), os quais foram transportados para a Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco e, posteriormente, homogeneizados, formando uma única amostra.

Não foi possível determinar a profundidade de cada amostra coletada nas três estacas, tendo em vista que o processo de execução do estaqueamento ocorre de maneira muito rápida impossibilitando o rastreamento da profundidade.

Figura 17: Coleta de RCC proveniente do estaqueamento.



Figura 18: Acondicionamento do material coletado.



3.2 Cimento

O aglomerante hidráulico utilizado para o estudo de estabilização química do RCC foi o cimento Portland composto com pozolona – CP II Z 32 –, usado em proporções definidas. Os resultados da análise química e física do aglomerante são apresentados na Tabela 2 e Quadro 2, respectivamente.

Tabela 2 – Resultado da análise química do cimento CP II Z – 32.

Análise química do aglomerante	
Perda ao fogo	≤ 6,5 %
Resíduo insolúvel	≤ 1,6 %
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0 %
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5 %

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante do produto

Quadro 2 - Resultado das propriedades físicas do cimento CII Z-32.

Ensaio físico		Norma	Resultados
Finura (%)	P#200	NBR 11579	≤ 12
	P#325		-
	Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76	≤ 2600
Tempo de pega (h:min)	Inicial	NBR NM 65	≥ 1
	Final		≤ 10
Resistência à compressão (Mpa)	1 dia	NBR 7215	-
	3 dias		≥ 10
	7 dias		≥ 20
	28 dias		≥ 32

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante do produto

3.3 Ensaios de laboratório

A investigação laboratorial foi dividida em duas fases:

- . Fase 1 - seguiu recomendações da NBR 12253/2012 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo determinada a granulometria (peneiramento e sedimentação), o limite de liquidez e plasticidade, a densidade real, a compactação, o ISC com medição de expansão;
- . Fase 2 - foi investigado o RCC estabilizado quimicamente com cimento – denominado RCC-C – em diferentes proporções de aglomerante, sendo adotado 3%, 6% e 9% em relação a massa do solo. Foram realizados, para cada teor de cimento, os ensaios de compactação do RCC-C, moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos e, por fim, os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral.

O Quadro 3 apresenta a identificação das amostras. O Quadro 4 apresenta os ensaios executados no estudo, assim como as quantidades realizadas dos respectivos ensaios.

Quadro 3 - Identificação das amostras.

Amostra	Percentual (%)		
	Resíduo	Cimento	η/Civ (médio)
RCC100	100	0	0
RCC97C3	97	3	17,97
RCC94C6	94	6	9,00
RCC91C9	91	9	6,19

Quadro 4 - Quadro resumo dos ensaios realizados.

Amostra	Ensaio									
	Granulometria	Densidade Real	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Compactação	ISC	Moldagem dinâmica de corpos de prova	Moldagem estática de corpos de prova	Compressão simples	Tração por compressão diametral
RCC100	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-
RCC97C3	-	-	-	-	X	-	X	X	X	X
RCC94C6	-	-	-	-	X	-	X	X	X	X
RCC91C9	-	-	-	-	X	-	X	X	X	X
Amostra	Quantidade dos ensaios									
	Granulometria	Densidade Real	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Compactação	ISC	Moldagem dinâmica de corpos de prova	Moldagem estática de corpos de prova	Compressão simples	Tração por compressão diametral
RCC100	3	3	3	3	3	3	5	-	5	-
RCC97C3	-	-	-	-	1	-	15	30	30	15
RCC94C6	-	-	-	-	1	-	15	30	30	15
RCC91C9	-	-	-	-	1	-	15	30	30	15

3.3.1 Preparação do RCC

A amostra foi seca ao ar livre (Figura 19), sendo, posteriormente, realizado o quarteamento (Figura 22) segundo a NBR 10007/2004. As Figuras 20 a 22 apresentam as etapas empregadas no quarteamento da amostra de RCC. Para finalizar a preparação do RCC, foi necessário realizar o destorroamento do solo (Figura 23) e o seu armazenamento em sacos plásticos.

Figura 19: Secagem do RCC realizada ao ar livre.



Figura 20: Limpeza do piso.



Figura 21: Homogeneização da amostra.



Figura 22: Quarteamento do RCC.



Figura 23: Destorroamento do RCC.



3.3.2 Análise granulométrica

Para o estudo da granulometria, a partir do peneiramento (Figura 24 e 25) e da sedimentação (Figura 26), utilizou-se a NBR 7181/1984. Esses ensaios foram realizados apenas nas amostras tipo RCC100. Optou-se por executar 3 (três) ensaios granulométricos, assim a análise dos resultados e a utilização da média poderia justificar uma melhor representatividade do resíduo.

Figura 24: Peneiramento (material grosso). Figura 25: Peneiramento (material fino).



Figura 26: Ensaio de sedimentação em três amostras de RCC100.



3.3.3 Densidade real dos grãos

Na determinação da densidade real, empregou-se a norma NBR 6508/1984. Essa determinação foi realizada em 3 (três) amostras compostas por 100% de RCC. O método aplicado por essa norma utiliza picnômetro e bomba a vácuo, (Figuras 27 e 28).

Figura 27 - Determinação da densidade real.



Figura 28 - Ensaio em execução.



3.3.4 Limites de consistência

Como a granulometria e a densidade real não são suficientes para classificar fisicamente um material, além da necessidade de analisar a interação do solo com a água, complementou-se a investigação do RCC com a execução dos ensaios de limite de liquidez (NBR 6459/1984) e de limite de plasticidades (NBR 7180/1984). Nas Figuras 29 a 31 são apresentados os procedimentos adotados para a realização desses ensaios em três amostras de RCC100.

Figura 29: Execução do limite de plasticidade em uma amostra de RCC100.



Figura 30: Ensaio de limite de liquidez. Figura 31: Amostra no aparelho de Casagrande.



3.3.5 Ensaio de Compactação do RCC

O ensaio de compactação do RCC (Figuras 32 e 33) foi realizado baseado na NBR 7182/1986 apenas nas amostras constituídas por 100% de resíduos. Com a finalização dos ensaios, foi possível determinar os valores de umidade ótima e densidade seca máxima das amostras, esses resultados foram utilizados posteriormente no ensaio de ISC e nas moldagens de corpos de prova cilíndricos.

A energia intermediária aplicada no ensaio de compactação foi definida a partir da norma do DNER 129/94, uma vez que se busca o emprego do material estudado em pavimentação.

Figura 32: Compactação da mistura na energia intermediária.



Figura 33: Preparação das amostras para o ensaio de compactação.



3.3.6 Ensaio de Compactação do RCC-C

Para a realização do estudo da compactação do RCC-C, foi necessária a execução da mistura de RCC e cimento (Figuras 34 a 36) em proporções já estabelecidas de cimento (3%, 6% e 9%) em cada amostra. O ensaio de compactação do RCC-C (Figura 37) seguiu as recomendações da NBR 12024/2012, cujos resultados de umidade ótima e densidade seca máxima foram utilizados posteriormente nas moldagens de corpos de prova cilíndricos do RCC-C. A energia intermediária também foi aplicada no ensaio de compactação do RCC-C – de acordo com DNER 129/94.

Figura 34: Amostra apenas com RCC.



Figura 35: Preparação do cimento.



Figura 36: Mistura dos materiais secos (RCC e cimento).



Figura 37: Nivelamento com régua biselada do material excedente.



3.3.7 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia do RCC

Os ensaios de ISC com medição de expansão seguiram as determinações da NBR 9895/87 e foram realizados apenas nas amostras de RCC100, a fim de definir a capacidade de suporte e a expansibilidade do resíduo, através da resistência à penetração de um pistão nos corpos de prova das amostras saturadas e compactadas a energia intermediária.

As amostras compactadas receberam uma sobrecarga de discos anulares de aproximadamente 4,5 kg e foram levadas a imersão em água por 4 (quatro) dias (Figura 38 a 41).

Figura 38: Amostras do ensaio de ISC.



Figura 39: Amostras submersas por 4 dias para ensaio de expansão e ISC.



Figura 40: Execução do ensaio de ISC.



Figura 41: Amostras após a penetração do pistão.



3.3.8 Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos 100x128 mm do RCC e RCC-C

A NBR 12253/2012 recomenda, para cada teor de cimento selecionado, moldar e curar por 7 (sete) dias, no mínimo 3 (três) corpos de prova cilíndricos. No entanto, para o presente optou-se por uma amostragem maior.

Os procedimentos de moldagem dinâmica e cura de corpos de prova cilíndricos – com 100 mm de diâmetro e 128 mm altura – foram baseados na NBR 12024/2012. Foram moldados 50 (cinquenta) corpos de prova (Figuras 42 a 45). Os quantitativos para cada teor de cimento são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Quantitativo de corpos de prova moldados dinamicamente.

Amostra	Quantidade de moldagens de corpos de prova cilíndricos (100x128 mm)
RCC100	5
RCC97C3	15
RCC94C6	15
RCC91C9	15

A mistura do RCC com o cimento foi realizada até que a coloração do material se tornasse uniforme em toda a massa, constituindo a mistura seca. A adição da água foi determinada pelas umidades obtidas a partir das curvas de compactação de cada amostra. A cura dos corpos de prova (Figura 46 e 47) consistiu no seu armazenamento em câmara úmida, à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar não inferior a 95% até a data do ensaio de resistência à compressão.

Figura 42: Moldagem de corpo de prova cilíndrico.



Figura 43: Extração de corpo de prova do molde cilíndrico.



Figura 44: Corpos de prova sem adição de cimento.



Figura 45: Corpos de prova com percentual de cimento, da esquerda para a direita, 3%, 6% 9% de adicional de cimento.



Figura 46: Corpos de prova sem adição de cimento armazenados na câmara úmida.



Figura 47: Corpos de prova com adição de 3%, 6% e 9% de cimento armazenados na câmara úmida.



3.3.9 Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos 50x100 mm do RCC-C

Foram moldados, para os ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral, 90 (noventa) corpos de prova cilíndricos (Quadro 6) de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, utilizando a mesma metodologia de moldagem adotada por Consoli *et al.* (2009). Após a pesagem dos materiais (solo, cimento e água), o RCC e o cimento foram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. Em seguida, foi adicionada a água,

continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida. A quantidade de cimento necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água em relação à soma das massas de RCC e de cimento (RCC-C).

Quadro 6 - Quantitativo de corpos de prova 50x100 mm moldados.

Amostra	Quantidade de moldagens de corpos de prova cilíndricos (50x100 mm)
RCC97C3	30
RCC94C6	30
RCC91C9	30

Após a mistura dos materiais, a quantidade RCC-C necessária para confecção de um corpo de prova foi dividida em 3 (três) partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda de umidade, para posterior compactação. Ao final deste processo, 2 (duas) pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos 2 (dois) teores de umidade medidos era adotada como sendo o teor de umidade do corpo de prova. A amostra foi, então, compactada estaticamente em 3 (três) camadas no interior de um molde metálico tripartido de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, tomando-se o cuidado de se escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas. Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova foi imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) foram devidamente anotados (Figuras 48 a 50); em seguida o corpo de prova foi acondicionado em um saco plástico. A cura dos 90 (noventa) corpos de prova consistiu em armazená-los em câmara úmida, à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar não inferior a 95% até a data do ensaio de resistência à compressão.

Figura 48: Moldagem do CP 50x100mm. Figura 49: Pesagem da amostra.



Figura 50: Corpos de prova 50x100 mm após moldagem.



Esses corpos de prova não serão analisados de acordo com a NBR 12253/2012, referente a solo-cimento, tendo em vista que o diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm das formas não se enquadram nas recomendações da norma citada. Os resultados das amostras moldadas serão analisados de acordo com a metodologia aplicada por Consoli *et al.* (2007) – já definida no referencial bibliográfica da pesquisa.

3.3.10 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram as recomendações da NBR 12025/2012. Após a cura, os corpos de prova de 100x128 mm e 50x100 mm foram imersos em água (Figura 51 e 52) por 4 (quatro) horas sendo retirados e superficialmente secos imediatamente antes da ruptura. O Quadro 7 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para cada amostra e as idades em que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão (Figuras 53 a 58) em uma prensa hidráulica, modelo EMIC 23-600, com capacidade de carga de 600 kN (60000 kgf).

Figura 51: Corpos de prova 100x128 mm imersos em água.



Figura 52: Corpos de prova 50x100 mm imersos em água.



Quadro 7 - Relação da quantidade de corpos de prova das amostras com as idades de ruptura.

Amostra (100x128 mm)	Quantidade de corpos de prova moldados para cada idade		
	7 dias	28 dias	90 dias
RCC100	-	-	5
RCC97C3	5	5	5
RCC94C6	5	5	5
RCC91C9	5	5	5
Amostra (50x100 mm)	Quantidade de corpos de prova moldados para cada idade		
	7 dias	28 dias	90 dias
RCC100	-	-	-
RCC97C3	5	5	5
RCC94C6	5	5	5
RCC91C9	5	5	5

Figura 53: Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova (100x128 mm).

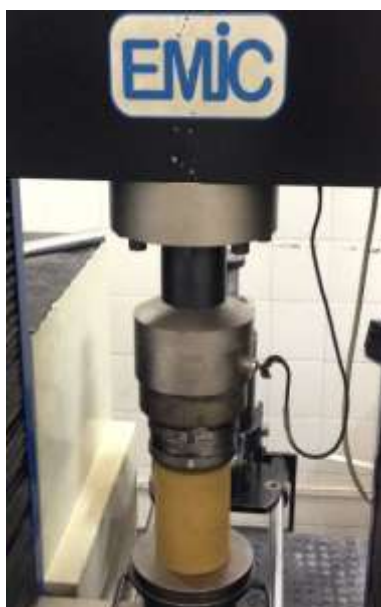


Figura 54: Corpo de prova RCC100 (100x128 mm).



Figura 55: Ruptura de RCC100 (100x128 mm).



Figura 56: Ruptura de RCC91C9 (100x128 mm).



Figura 57: Ensaio de resistência à Compressão em corpo de prova (50x100 mm).



Figura 58: Corpo de prova RCC91C9 (50x100 mm).



3.3.11 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral nos corpos de prova de 50x100 mm foram realizados segundo a norma NBR 7222/2011. O Quadro 8 apresenta a quantidade de corpos de prova moldados para cada amostra e as idades em que foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figuras 59 e 60), em uma prensa hidráulica, modelo EMIC 23-600, com capacidade de carga de 600 kN (60000 kgf).

Quadro 8 - Relação da quantidade de corpos de prova das amostras com as idades de ruptura.

Amostra (50x100 mm)	Quantidade de corpos de prova moldados para cada idade		
	7 dias	28 dias	90 dias
RCC100	-	-	-
RCC97C3	5	5	5
RCC94C6	5	5	5
RCC91C9	5	5	5

Figura 59: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral RCC94C6.



Figura 60: Ruptura do RCC94C6.



4 RESULTADOS

Neste capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente apresenta-se a caracterização física do RCC coletado e, em seguida, os resultados do estudo do comportamento mecânico do RCC e RCC-C.

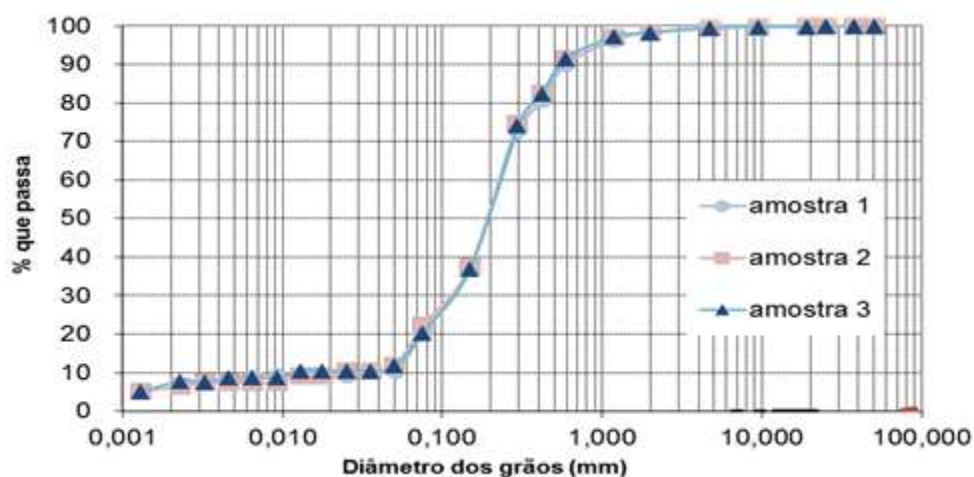
4.1 Ensaios de caracterização física do RCC

O resíduo coletado sem adição de cimento foi nomeado RCC100, e esse material foi caracterizado por meio dos ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência.

4.1.1 Análise granulométrica

Este ensaio permitiu a construção das curvas granulométricas das amostras de RCC100 investigadas. Verificou-se, a partir da Figura 61, que não houve variação entre as curvas granulométricas compostas pelo RCC proveniente das estacas.

Figura 61: Curva granulométrica das três amostras do RCC100.



A partir da Figura 61 e do Quadro 9, observa-se que o RCC mostrou-se constituído predominantemente por areia fina e areia média, com essas frações representando juntas entre 86 e 88% da massa total da amostra. O resultado obtido apresentou-se de acordo com o resultado das sondagens realizadas na obra, tendo em vista que o relatório apresentado pela empresa contratada descreve que o perfil (Anexo B) do subsolo dividido em três camadas, sendo essas, a primeira formada por areia siltosa de

pouco a média compacta, a intermediária composta por areia de média compacta a compacta e a mais profunda apresentou um silte arenoso argilo-arenoso de rijo a duro.

Quadro 9 - Fração do solo (%) das três amostras de RCC100.

Material	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
	Percentual (%)	Percentual (%)	Percentual (%)
Argila	8	7	9
Silte	2	4	3
Areia Fina	71	71	70
Areia Média	18	16	16
Areia Grossa	1	1	1
Pedregulho	1	1	1

4.1.2 Densidade real dos grãos

Na Tabela 3, verifica-se que os resultados das amostras apresentaram pouca variação, possuindo resultados coerentes com a literatura – Peck (1974) observou a densidade real das areias com valores entre 26,5 a 26,8 kN/m³.

Tabela 3 - Densidade real das amostras de RCC100.

RCC100	Densidade real dos grãos (kN/m ³)
Amostra 1	27,0
Amostra 2	26,8
Amostra 3	26,5
Média	26,8
Coeficiente de variação	0,01 %

4.1.3 Limites de consistência

As amostras de RCC100 por serem caracterizadas como materiais essencialmente granulares, não apresentaram limites de liquidez e limite de plasticidade. Trata-se, portanto, de material não líquido e não plástico.

4.1.4 Classificação Transportation Research Board (TRB)

A classificação do *Transportation Research Board* (TRB) fundamenta-se na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade dos solos, sendo proposta para classificar solos destinados à área de pavimentação. A Figura 62 apresenta esta classificação, onde os solos estão reunidos por grupos e subgrupos. Com os resultados obtidos, concluiu-se que o RCC enquadrou-se como um solo A3.

Figura 626: Classificação dos solos - TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: Manual DNIT (2006).

4.2 Ensaios mecânicos

Foram realizados ensaios mecânicos nas amostras com 100% de resíduo e nos RCC-C nas dosagens de cimento pré-estabelecidas (percentuais de cimento de 3%, 6% e 9%).

4.2.1 Ensaio de Compactação do RCC

O estudo da compactação do solo natural e solo-cimento serviram para determinar os valores de umidade ótima e massa específica máxima seca, que foram utilizados no ensaio de CBR – moldado na energia normal. Os resultados também serviram para moldagem dos corpos de prova moldados para o ensaio de compressão simples e tração à compressão diametral. As curvas do ensaio de compactação das amostras de RCC são mostradas na Figura 63. Na Tabela 4, é possível observar os resultados dos ensaios do teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima das amostras. Notou-se baixa variabilidade nos resultados dos ensaios.

Figura 63: Curvas do ensaio de compactação das três amostras de RCC.

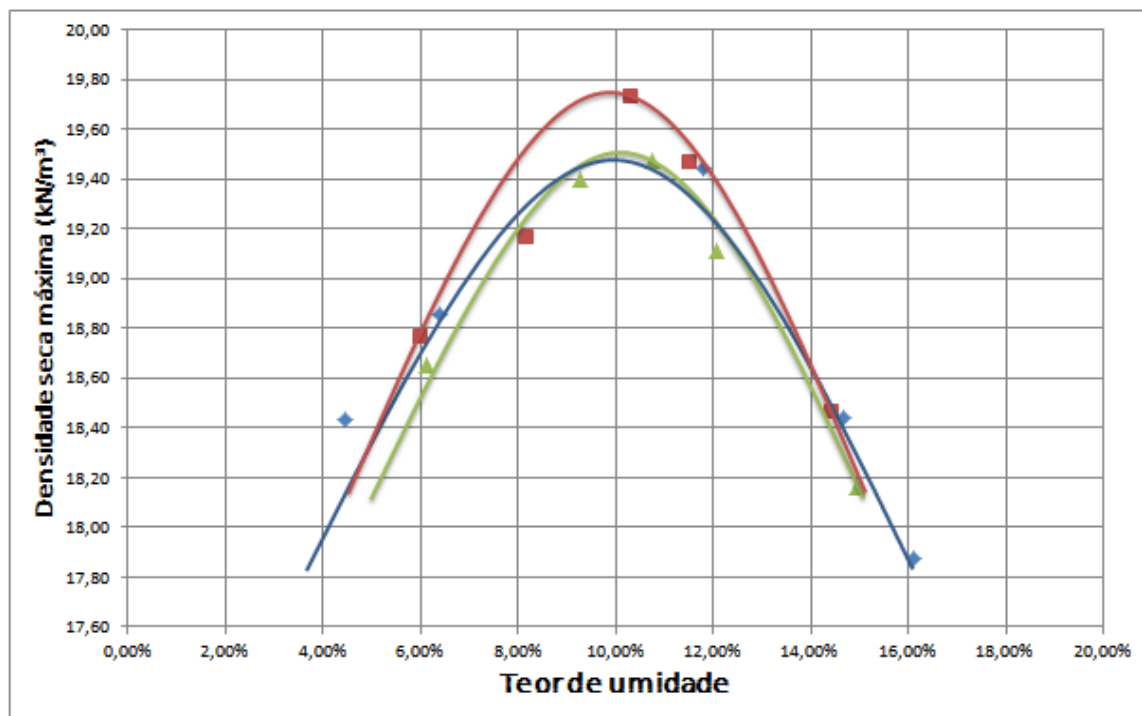


Tabela 4 - Resultados de compactação das amostras de RCC100.

RCC100	Umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (kN/m ³)
Amostra 1	10,4	19,43
Amostra 2	10,9	19,60
Amostra 3	9,7	19,45
Média	10,3	19,49
Coeficiente de variação	0,05%	0

Os resultados apresentados na Tabela 4 foram semelhantes aos resultados de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do resíduo de escavação de estaca tipo hélice contínua estudado por Farias (2013), material que também foi classificado como um solo A03 da tabela TRB.

4.2.2 Ensaio de Compactação do RCC-C

A Figura 64 apresenta o resultado do ensaio de compactação do RCC-C com 3% de cimento; enquanto que as Figuras 65 e 66 se referem às misturas de RCC-C com teores de cimento de 6 e 9%, respectivamente. A Tabela 5 mostra o resumo dos resultados dos ensaios de compactação das amostras.

Figura 647: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 3% de cimento.

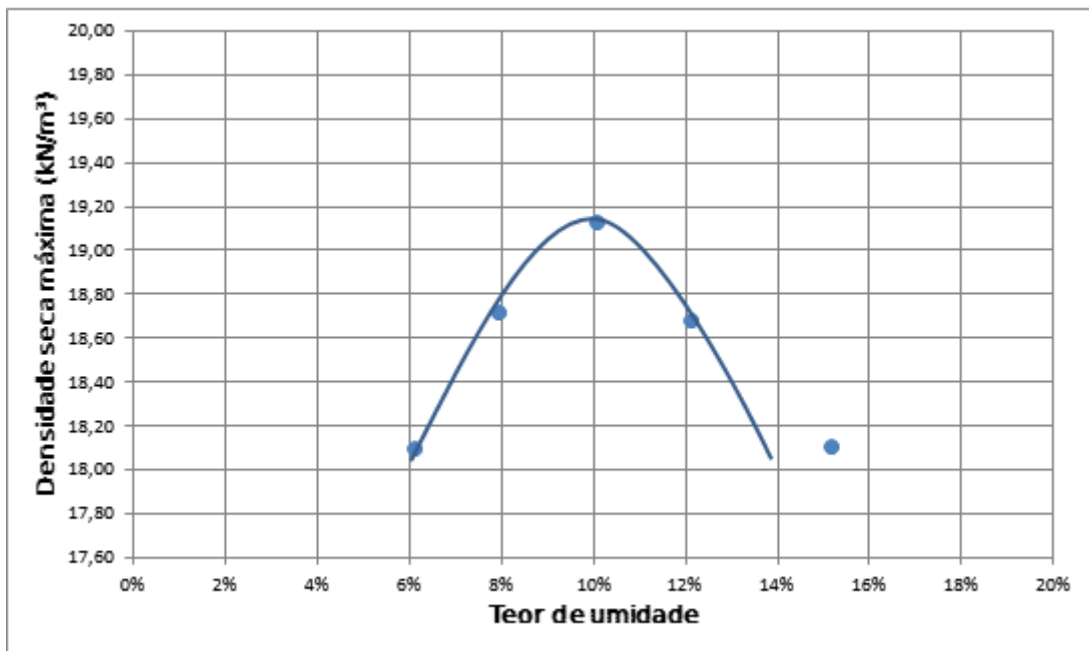


Figura 65: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 6% de cimento.

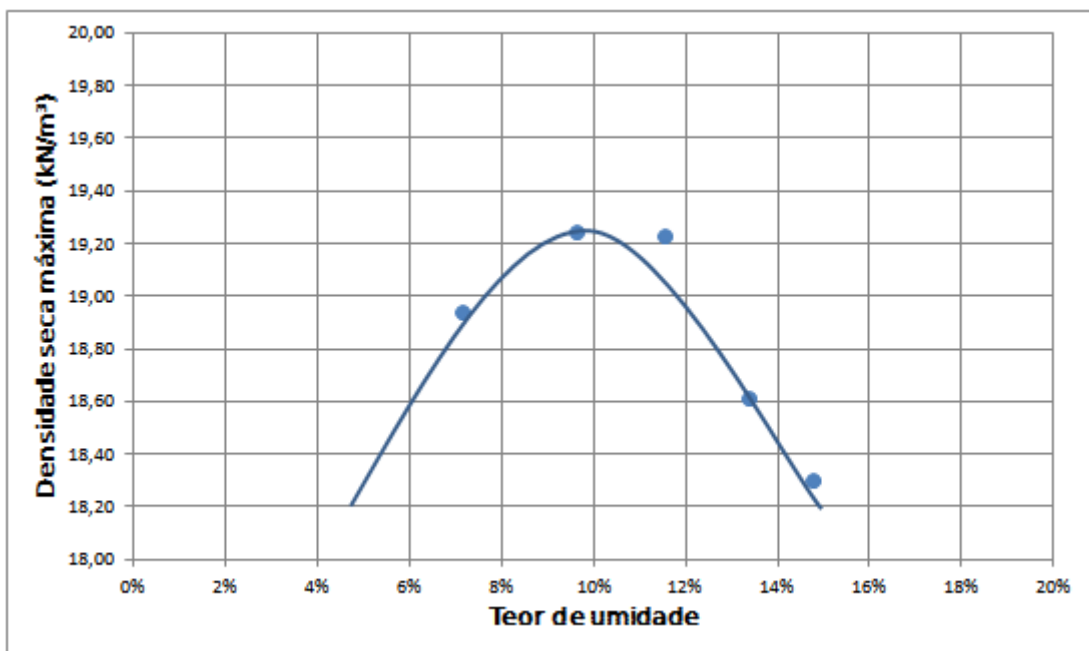


Figura 66: Curva do ensaio de compactação do RCC-C com adição de 9% de cimento.

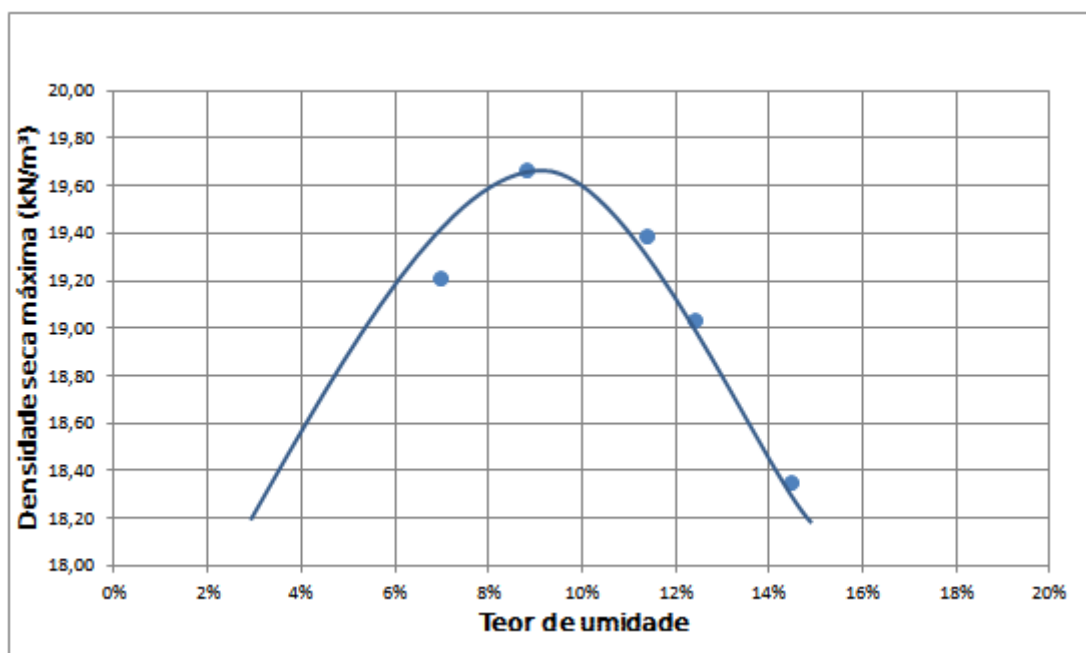


Tabela 5 - Resultados do ensaio de compactação nas amostras de RCC-C.

RCC-C	Umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (kN/m³)
RCC97C3	10,6	18,97
RCC94C6	9,9	19,25
RCC91C9	9,3	19,69
Média	9,9	19,30
Coeficiente de variação	0,07%	0

A partir das curvas de compactação do RCC estabilizado quimicamente com cimento, pode-se observar que para uma dada energia de compactação, a massa específica seca máxima aumenta com o aumento do teor de cimento. Esse fato se deve ao cimento ter um maior valor de massa específica em relação ao solo. Resultados semelhantes

foram relatados por Silva (2011), no estudo de compactação de uma areia silto-argilosa e de uma areia argilosa, e por Pereira (2012), no estudo da estabilização de um solo com cimento para utilização em pavimentação.

4.2.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do RCC

A realização dos ensaios de ISC com medição de expansão permitiu a construção das curvas Penetração x Pressão (Figuras 67 a 69) das amostras de RCC100. O Quadro 10 apresenta os valores de umidade ótima, CBR e expansão das amostras. A Tabela 6 mostra, em resumo, os valores de CBR mínimos exigidos e expansão máxima permitida para solos a serem aplicados em camada de base e sub-base de pavimentos, conforme especificado pelo manual do DNIT (2006).

Figura 67: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 1 (RCC100).

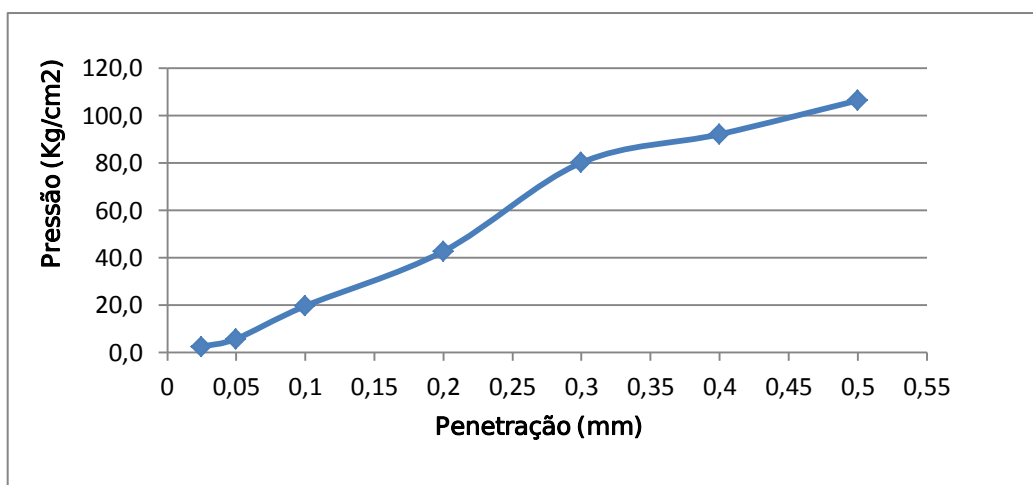


Figura 68: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 2 (RCC100).

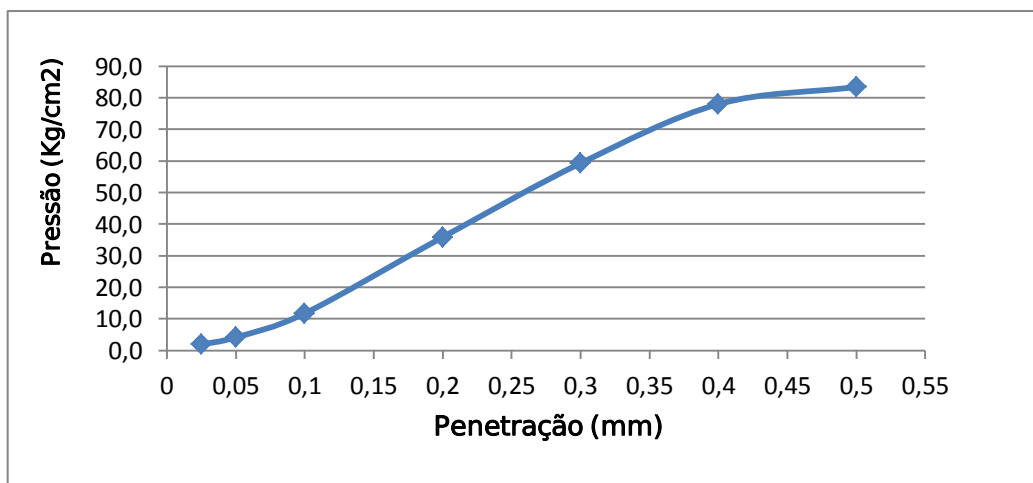
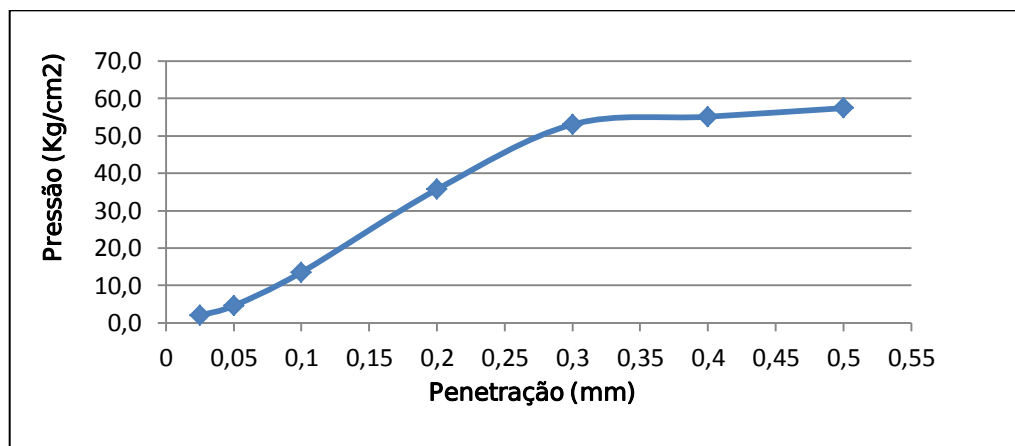


Figura 69: Curva Penetração x Pressão no ensaio ISC da amostra 3 (RCC100).



Quadro 10 - Resultados de CBR e expansão do RCC.

RCC100	Umidade ótima (%)	CBR (%)	Expansão (%)
Amostra 1	10,4	36	0,02
Amostra 2	10,9	34	0,01
Amostra 3	9,7	34	0,01

Tabela 6 - Valores de ISC mínimos aceitáveis e expansões máximas para base e sub-base para pavimentos de grande tráfego.

Camadas	CBR mínimo por camada	Expansão máxima
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1,0\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$

Fonte: Manual DNIT (2006).

Analizando o Quadro 10 e a Tabela 6, verificou-se que o RCC sem melhoramento químico atende às exigências para uso em base e sub-base de pavimentos quanto à expansão, no entanto em relação ao CBR mínimo exigido o resíduo só atende as exigências para uso em sub-base. Assim, o uso desse RCC como material de construção de camadas de pavimentos só pode ser utilizado em sub-base de pavimentação.

4.2.4 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC e RCC-C

4.2.4.1 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC e RCC-C com 100x128 mm

O Quadro 11 apresenta os resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos moldados com 100 mm de diâmetro e 128 mm de altura.

Quadro 11 - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos 100x128 mm.

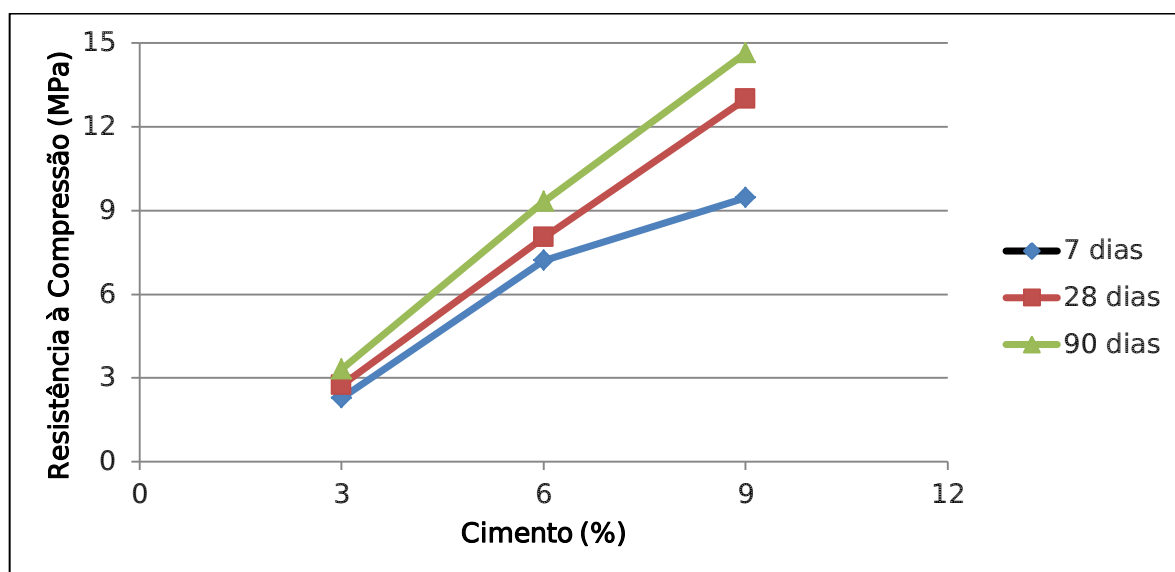
Amostra (100X128 mm)	7 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	2,21	2,28	2,19	2,24	2,48	2,28	5%
RCC94C6	7,06	6,94	7,55	6,90	7,59	7,21	5%
RCC91C9	9,65	9,32	8,87	9,87	9,53	9,45	4%
Amostra (100X128 mm)	28 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	2,58	2,83	2,72	2,79	2,69	2,72	4%
RCC94C6	7,98	8,19	8,11	8,21	7,67	8,03	3%
RCC91C9	13,20	13,92	13,06	12,41	12,29	12,98	5%
Amostra (100X128 mm)	90 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	0,20	0,20	0,20	0,17	0,18	0,19	0%
RCC97C3	3,35	3,43	3,63	2,95	3,22	3,32	8%
RCC94C6	10,03	9,06	9,70	8,57	9,25	9,32	6%
RCC91C9	14,88	15,40	15,98	13,43	13,52	14,64	8%

Observa-se que quanto maior o percentual de cimento adicionado ao RCC, maior é resultado da resistência à compressão, por exemplo, as amostras com 3% de adição de aglomerante apresentaram uma resistência média de 2,28 MPa aos 7 dias de idade, já a média dos corpos de prova com adição de 9% de cimento apresentaram 9,45 MPa para a mesma idade de ruptura, ou seja, com o acréscimo de 6% de cimento houve um aumento de 314,47% na resistência à compressão do RCC estudado.

O Apêndice A apresenta diversas informações detalhadas acerca de todos os corpos de prova de RCC-C.

A Figura 70 apresenta o crescimento do resultado de resistência à compressão em relação ao aumento das idades de ruptura (7, 28 e 90 dias) das amostras, esse fato é explicado através do processo de hidratação do aglomerante, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão-se aglutinando paulatinamente uns aos outros, por efeito de floculação, conduzindo à construção de um esqueleto sólido, finalmente responsável pela estabilidade da estrutura geral. O prosseguimento da hidratação em subseqüentes idades conduz ao endurecimento responsável pela aquisição permanente de qualidades mecânicas. Assim, garantindo o aumento dos resultados de resistência à compressão nas idades mais elevadas, por exemplo, as amostras com 6% de adição de cimento aos 7 dias de idade apresentaram média de 7,21 MPa, já aos 28 dias de idade a média dos resultados foi 8,03 MPa, com isso, esse acréscimo de idade (21 dias) resultou em um aumento de 11,37% de resistência.

Figura 708: Gráfico da relação entre resistência à compressão e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 100x128 mm.



Segundo a NBR 12253/2012, devem ser investigados, no mínimo, 3 (três) teores de cimento, visando determinar aquele que atenda ao critério da resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de idade. Os resultados obtidos revelaram que todas as amostras de RCC-C apresentaram resultado superior ao mínimo exigido pela norma vigente.

4.2.4.1 Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos do RCC-C com 50x100 mm

O Quadro 12 apresenta os resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Quanto maior o percentual de cimento adicionado a amostra, maior foi o resultado da resistência à compressão. Observou-se que para a mesma idade de ruptura as amostras com 6% de teor de cimento apresentaram uma resistência média menor que as amostras com 9% de teor de cimento, por exemplo, aos 90 dias de idade as amostras com 6% de cimento denotaram um resultado de 5,33 MPa, já as amostras com 9% de adição de cimento mostraram um resultado de 8,79 MPa.

O Apêndice A apresenta diversas informações detalhadas acerca de todos os corpos de prova de RCC-C.

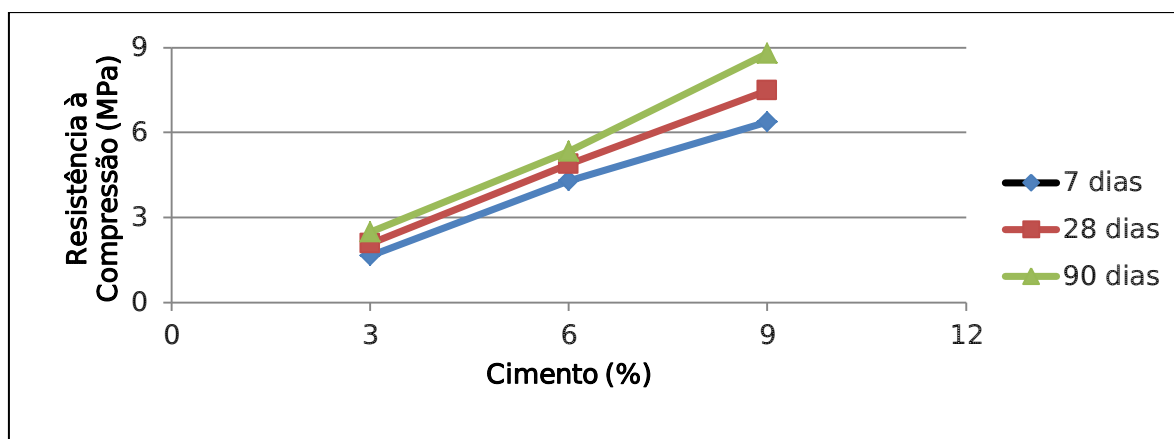
Quadro 12 - Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos 50x100 mm.

Amostra (50X100 mm)	7 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	1,66	1,54	1,75	1,74	1,59	1,66	6%
RCC94C6	4,53	3,97	4,36	4,58	4,05	4,30	6%
RCC91C9	6,73	6,78	6,64	5,69	5,95	6,36	8%
Amostra (50X100 mm)	28 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	1,91	2,14	2,13	2,16	2,06	2,08	5%
RCC94C6	5,11	4,61	4,86	4,79	5,03	4,88	4%
RCC91C9	7,66	7,76	6,92	7,19	7,89	7,48	5%
Amostra (50X100 mm)	90 dias de idade						
	Resistência à compressão simples (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	2,57	2,74	2,33	2,43	2,31	2,48	8%
RCC94C6	5,21	5,08	5,13	5,59	5,62	5,33	5%
RCC91C9	8,52	9,00	8,22	8,77	9,44	8,79	5%

Além do aumento de resistência provocado pelo acréscimo no teor de aglomerante adicionado durante a estabilização do RCC, pode-se observar, através da Figura 71, o aumento de resistência à compressão simples dos corpos de prova provocado pela hidratação do cimento ao decorrer das idades de ruptura (7, 28 e 90 dias) das amostras. Ou seja, com o aumento da idade de ruptura da amostra aumenta-se o resultado de resistência à compressão, por exemplo, a média dos resultados das amostras com 3% de cimento aos 28 dias foi 2,08 MPa, com o mesmo teor

de aglomerante. No entanto, realizando o ensaio de ruptura aos 90 dias a resistência média à compressão das amostras foi de 2,48 MPa, ou seja, após 62 dias o RCC estabilizado com 3% de cimento apresentou um acréscimo de 19,23% de resistência.

Figura 71: Gráfico da relação entre resistência à compressão e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 50x100 mm.



Nas Figuras 72 e 73 pôde-se comparar a variação da resistência à compressão simples (MPa) versus relação vazios/cimento (η/Civ) da pesquisa com os resultados apresentados por Marques *et al.* (2014), tendo em vista que as duas pesquisas realizaram a mesma metodologia de moldagem (Consoli *et al.*, 2007) e as amostras foram ensaiadas com as mesmas idades, 7 e 28 dias.

Os resultados do RCC estabilizado com cimento formaram curvas com o comportamento semelhante a curva apresentada por Marques *et al.* (2014), demonstrando que quanto menor o relação de vazios/teor volumétrico de cimento maiores são os resultados de resistência à compressão das amostras esse comportamento pode ser visto nos dois gráficos, portanto nas duas idades estudadas. Pode-se analisar também que mesmo as duas curvas se comportando de maneira equivalente o RCC estudado, melhorado com os três teores de cimento apresentou valores de resistência à compressão mais elevados em relação a areia de Osório (Figura 6 e Tabela 1) estabilizada com os mesmo teores de aglomerante, o que pode ser justificado pelo fato da areia de Osório ser uniforme e fina. Na Figura 74 nota-se a divergência granulométrica do RCC e da areia de Osório, por se tratar de areia mais fina – com o módulo de finura menor em relação ao RCC – faz-se necessário uma hidratação maior para cada

adição de cimento, assim apresentando resultados de resistência à compressão menores.

Figura 72: Variação da resistência à compressão simples com a relação de η/Civ aos 7 dias de cura do RCC-C e de Marques *et al.* (2014).

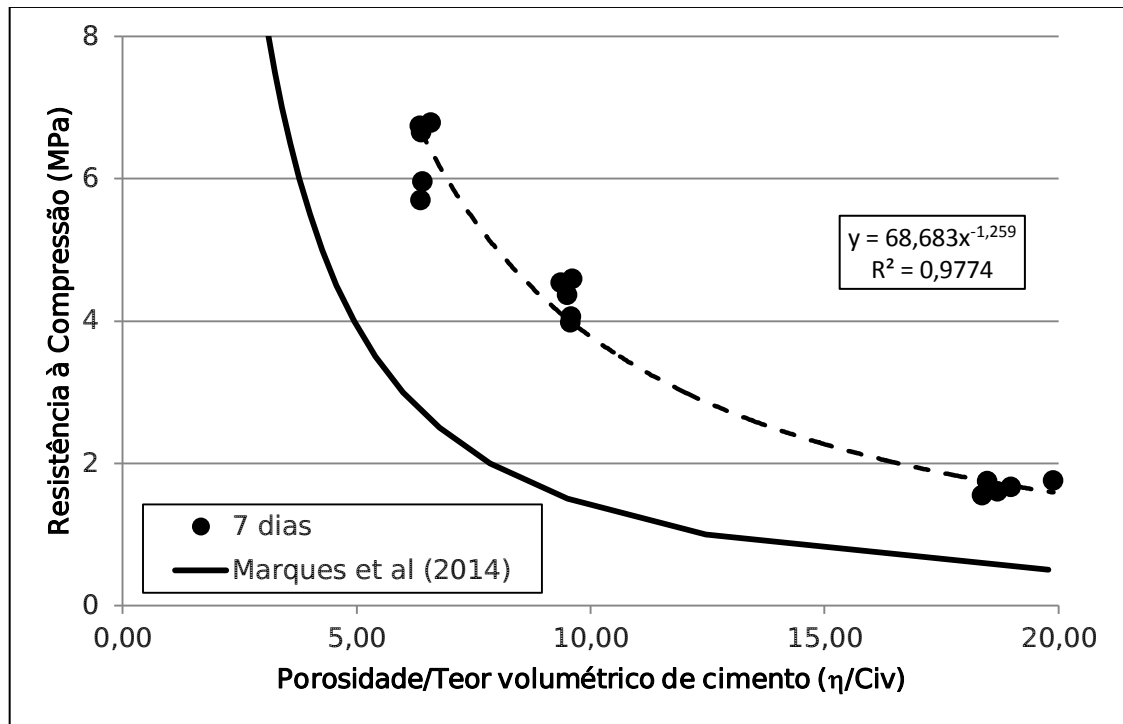


Figura 739: Variação da resistência à compressão simples com a relação de η/Civ aos 28 dias de cura do RCC-C e de Marques *et al.* (2014).

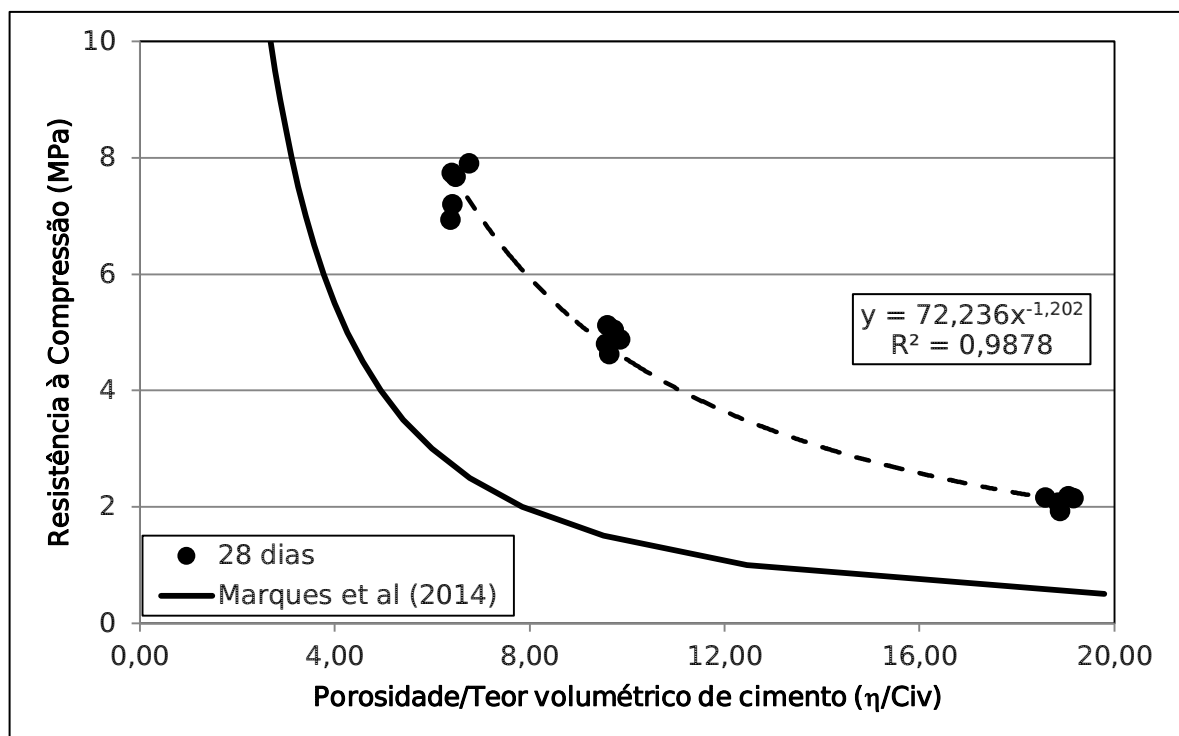
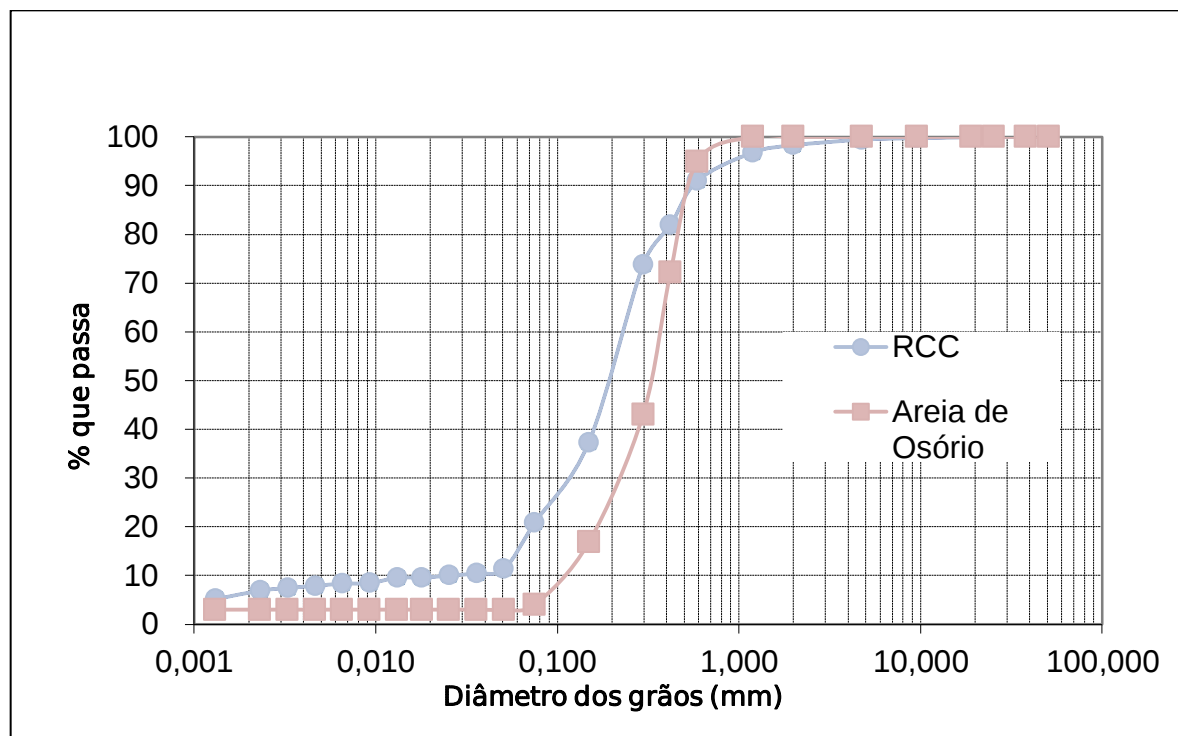


Figura 7410: Curvas granulométricas do RCC e da areia de Osório.



4.2.5 Análise dos resultados x NBR 12253/2012

Todos os critérios da NBR 12253/2012 – solo-cimento, dosagem para emprego como camada de pavimento – foram atendidos com o RCC-C moldados com 100x128 mm, como pode-se observar no Quadro 13.

Quadro 13 – Quadro comparativo dos resultados obtidos e os critérios da NBR

Item	Critério NBR 12253/2012	Resíduo coletado	Situação
Classificação do Solo (HBR)	A1a, A1b, A2, A3, A4	A3	Atendida
% Material passante na #16mm	100	100	Atendida
% Material retido na #4,8mm	≤ 45	< 12	Atendida
Resistência à compressão (MPa)	≥ 2,1	2,28 (3% de cimento)	Atendida
		2,72 (6% de cimento)	Atendida
		3,32 (9% de cimento)	Atendida

4.2.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos do RCC-C

O Quadro 14 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Quadro 14 - Resultados de resistência à compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos 50x100 mm.

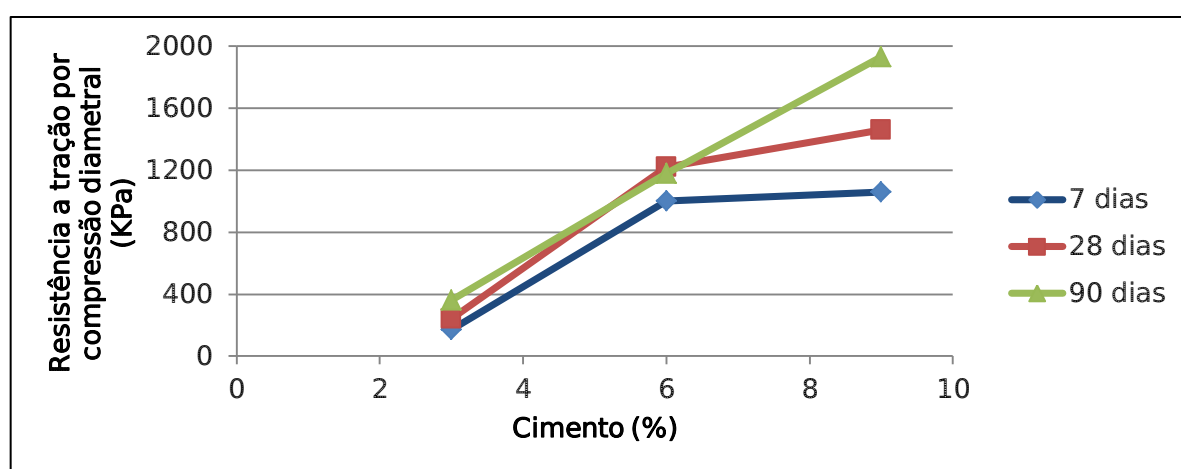
Amostra (50X100 mm)	7 dias de idade						
	Resistência à compressão diametral (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação (%)
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	0,18	0,19	0,15	0,17	0,17	0,17	9
RCC94C6	1,03	1,01	0,93	1,04	0,99	1,00	4
RCC91C9	1,05	1,02	1,07	1,06	1,10	1,06	3
Amostra (50X100 mm)	28 dias de idade						
	Resistência à compressão diametral (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação (%)
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	0,22	0,25	0,21	0,24	0,26	0,24	9
RCC94C6	1,21	1,05	1,08	1,15	1,24	1,15	7
RCC91C9	1,50	1,46	1,49	1,55	1,29	1,46	7
Amostra (50X100 mm)	90 dias de idade						
	Resistência à compressão diametral (MPa)						
	01	02	03	04	05	Média	Coeficiente de variação (%)
RCC100	-	-	-	-	-	-	-
RCC97C3	0,32	0,35	0,38	0,39	0,35	0,36	8
RCC94C6	1,17	1,23	1,15	1,22	1,12	1,18	4
RCC91C9	1,84	1,88	2,00	2,06	1,85	1,93	5

Observando-se o Quadro 14 e a Figura 75, verifica-se claramente que quanto maior o teor de cimento adicionado, maior será a resistência

das amostras. Pode-se citar, as amostras com 3% de teor de cimento aos 28 dias de idade apresentaram resistência à tração de 0,24 MPa. No entanto, as amostras com 6% de cimento ensaiadas na mesma idade mostraram 1,15 MPa, com isso, os resultados demonstraram um acréscimo de 379,17% de resistência.

O Apêndice A apresenta diversas informações detalhadas acerca de todos os corpos de prova de RCC-C.

Figura 75: Gráfico da relação entre resistência à tração por compressão diametral e teor de cimento para cada idade dos corpos de prova 50x100mm.

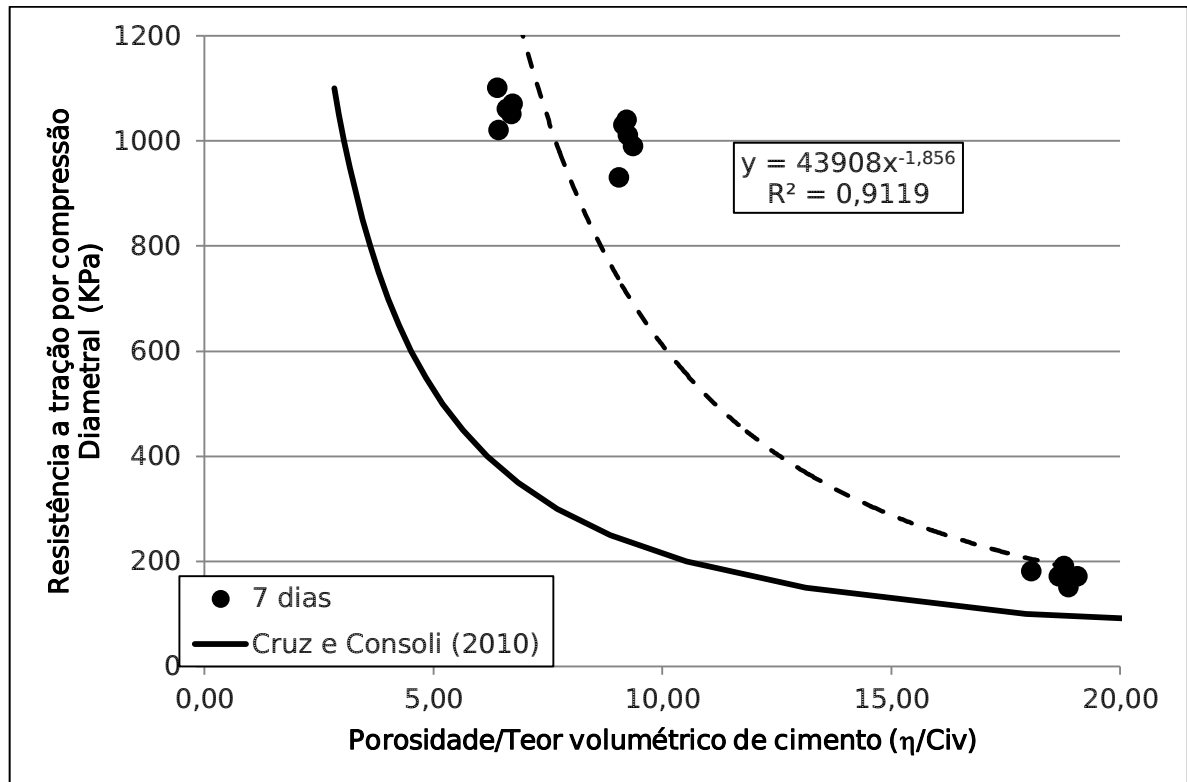


Na Figura 76 pôde-se comparar a variação da resistência à tração por compressão diametral (KPa) versus relação vazios/cimento (η/Civ) da pesquisa (Apêndice A) com os resultados apresentados por Cruz & Consoli *et al.* (2010). Sabendo que as duas pesquisas realizaram a mesma metodologia de moldagem, a metodologia de Consoli *et al.* (2007), as amostras foram ensaiadas com a mesma idade 7 dias e atentando para o material utilizado por Cruz & Consoli *et al.* (2010) que foi a areia de Osório (Figura 6 e Tabela 1).

As curvas apresentadas por Cruz & Consoli *et al.* (2010) desmonstram que quanto menor o relação de vazios/teor volumetrico de cimento maiores são os resultados de resistência à compressão das amostras esse comportamento foi apresentado pela curva formada com os resultados do RCC melhorado. No entanto, mesmo as duas curvas demonstrando comportamentos equivalentes, observou-se divergência de resultados. Os resultados encontrados da ruptura do RCC estabilizado são maiores para

os mesmo teores de aglomerante, como explicado anteriormente. Notou-se que a divergência granulométrica do RCC e da areia de Osório, por se tratar de areia mais fina, com o módulo de finura menor em relação ao RCC, representou um fator de grande influência na análise dos resultados.

Figura 76: Variação da resistência à tração compressão diametral com a relação de η/Civ aos 7 dias de idade do RCC-C e de Cruz & Consoli (2010).



5 CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- Observou-se um volume considerável de resíduo de estaca tipo hélice contínua da obra estudada – confirmando a previsão do projeto –, o que demonstra a importância do reaproveitamento desses materiais, tendo em vista os elevados custos para o seu transporte, armazenamento e gestão.
- A caracterização física do resíduo de escavação da estaca tipo hélice contínua da obra estudada foi compatível com os resultados apresentados no projeto de prospecção geotécnica, sendo o resíduo caracterizado como uma areia média e fina.
- Observou-se que o RCC possui excelentes propriedades geotécnicas, revelando ser um material não plástico. Pela classificação TRB para solos, o RCC estudado enquadrou-se como um solo A3.
- Todos os critérios da NBR 12253/2012 de solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento – foram atendidos com o RCC-C, revelando que o RCC oriundo da execução de estaca hélice poderia ser reaproveitado para execução de camada de pavimentação.
- A metodologia proposta por Consoli *et al.* (2007) mostrou-se bastante adequada na interpretação dos ensaios realizados com a mistura solo-cimento. As resistências obtidas com o resíduo da estaca hélice usado na presente pesquisa foram maiores que a obtida com a areia de Osório (material empregado por pesquisas que adotaram a metodologia de Consoli *et al.* (2007)).

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento>. Acessado em 7 julho de 2015.

ACHILLAS, C.; BANIAS, G.; MOUSSIOPOULOS, N.; PAPAIOANNOU, I.; VLACHOKOSTAS, C. **A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste.** *Waste Management*, v. 31, n. 12, 2497-2502p, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484:** Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-Cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-Cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-Cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem e emprego como camada de pavimentação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BECHARA, M. F; FURLAN, A. P; GIGANTE, A. C. e FABBRI, G. T. P. Propriedades mecânicas de misturas solos-cimento com solo laterítico e solo não-laterítico. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 16. Salvador, 2010. **Anais...** Anpet, Salvador, 2010.

BONAFÉ, L.; SPECHT, L. P. Avaliação da técnica de estabilização mecânica, química e do microreforço na resistência ao cisalhamento de um solo residual. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36. Curitiba, 2005. **Anais... RAPv**, Curitiba, 2005.

Branco, F. E. F. **Uso Rodoviário de Alguns Subprodutos Industriais**. Memória nº 720. LNEC, Lisboa, 1988.

CLOUGH, G. W.; BACHUS, R. C. **Behavior of weakley cemented soil slopes under static and seismic loading**. n. 44, 152p. The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Stanford University, 1980.

CLOUGH, G. W.; SIITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. **Cemented sand under static loading**. V. 107, 799 – 817p. Journal of Geotechnical Engineering Divison, New York: ASCE, 1981.

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

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. **Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand**. 1347 – 1353p. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, 2009.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. **Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils** V. 62, 177 – 183p. Géotechnique, 2012.

CONSTRUFÁCIL RJ. Portal da Construção Civil. Disponível em <http://construfacilrj.com.br/tipos-de-fundacoes-de-edificios/>. Acessado em 31 de julho de 2015.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a activadores de baixo custo. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 120, Portugal, 2010.

CRUZ, R. C.; CONSOLI, N. C. Metodologia de dosagem de um solo cimentado submetido à tração. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15. Gramado, 2010. **Anais...** Gramado: ABMS, 2014.

DNER 129/94 – ME. Pavimentos flexíveis – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2009.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ed, Rio de Janeiro, 2006.

FARIAS, A. B. **Análise técnica e econômica de resíduos de Construção e demolição aplicados em Pavimentação**. 2013. 183p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Pernambuco. 2013.

FARIAS, A; FUCALÉ, S; GUSMÃO, A. D. **Technical and Economic Analysis of Construction and Demolition Waste Used in Paving Project**. V. 20, 5930 – 5938p. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015.

FLOSS, M. F.; FONSECA, A. J. P. V.; CONSOLI, N. C. Estudo de dosagem de solos arenosos graníticos artificialmente cimentados. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17.; Congresso Luso-Brasileiro de Geotécnica, 7. Goiânia, 2014. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014.

FONINI, A. **Comportamento mecânico de uma areia cimentada: análise experimental e micromecânica**. 2012. 209p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

FRAENKEL, B. B. **Engenharia Rodoviária**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A, 1980.852p, Rio de Janeiro, 1980.

GONZALES, M. A. S.; RAMIRES, M. V. V. Análise de Gestão dos Resíduos Gerados Dentro dos Canteiros de Obras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 4.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 1., Porto Alegre, 2005. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2005.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações do conhecimento geológico à prática da engenharia**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1998.

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife/PE. Gráfica Editora, 2008.

GUSMÃO, A. D. **Práticas de Fundações na Região Metropolitana do Recife.** Notas de Aula. Universidade de Pernambuco. 2011.

HACHICH, Waldemar; FALCONI, Frederico F.; SAES, José Luiz; FROTA, Régis G. Q.; CARVALHO, Celso S.; NIYAMA, Sussumu. **FUNDAÇÃO TEORIA E PRÁTICA.** 2. ed. São Paulo, 1998.

LOPES, L, S, L, J. **Parâmetros de controle de resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** 2007. 147p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARQUES, S.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. SONAGLIO, G.; **NORMALIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA AREIA COM CIMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15. Gramado, 2010. **Anais...** Gramado: ABMS, 2014.

MORAES, R. R.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C. Estimativa da resistência à compressão diametral de um solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15. Gramado, 2010. **Anais...** Gramado: ABMS, 2014.

PAZ, D. H. F.; BEZERRA, J. S.; LAFAYETTE, K. P. V. Análise das áreas de descarte inadequado de resíduos da construção e demolição (RCD) na cidade do Recife/PE. In: Congresso Brasileiro de Geosintéticos, 7.; Congresso Brasileiro de Geotécnica Ambiental, 8. Brasília, 2015. **Anais...** Brasília: UNICEUB, 2015.

PAZ, D. H. F. **Desenvolvimento de um sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil em canteiros de obras de edificações urbanas.** 2014. 161p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Pernambuco. 2014.

PECK, R. B.; HANSON, W. E.; THORNBURN, T. H.; **FOUDATION ENGINEERING.** 1 ed. NY. JOHN WILEY E SONS, INC. 514p. 1974.

PENNA, A. S. D.; CAPUTO, A. N.; MAIA, C.; PALERMO, G.; GOTLIEB. M.; PARAÍSO. S. C.; ALONSO. U. R. **A ESTACA HÉLICE CONTÍNUA – A EXPERIÊNCIA ATUAL.** 1 ed. São Paulo: Falconi, F. F. & Marzionna, J. D. 162p. 1999.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. 125p. Dissertação (Mestrado). Universidade federal do rio grande do norte. Natal. 2012.

RESENDE, R. J; MARTINS, M. Estudo comparativo de viabilidade dos principais tipos de fundações profundas. **Revista Pensar Engenharia**, v. 2, n. 1, Rio de Janeiro, 2014.

RODRIGUES, C. B. **Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas.** 2015. 141p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Pernambuco. 2015.

SILVA, S. S. Estudo da viabilidade técnica do uso de misturas de solo, cimento e RCD para fins de pavimentação. In: Seminário de Engenharia Civil. Paraná, 2011. **Anais...** UEM, Paraná, 2011.

SEVERO, R, N, F. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformados e cimentados artificialmente.** 2011. 228p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco. 2011.

SOLOSSANTINI. Tecnologia na Construção. Disponível em <http://http://www.solossantini.com.br/interna.php?p=9>. Acessado em 05 de julho de 2015.

VELLOSO, D. A.; Lopes, F. R. **FUNDAÇÃO: CRITÉRIOS DE PROJETO/ INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO/ FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS/ FUNDAÇÕES PROFUNDAS.** 1 ed. São Paulo. 568p. 2010.

VENSON, G, I. **Módulo de resiliência e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada.** 2015. 158p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ZHANG, Z; TAO, M. **Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils.** 203-213p. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engeneering, 2008.

APÊNDICE A

Planilhas com resultados das amostras de RCC-C

ANEXO A
Ensaio de sondagem à percussão

ANEXO B
Projeto de prospecção geotécnica

ANEXO C
Projeto executivo de fundação