



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO REGIONAL  
SUSTENTÁVEL**

**ANTONIO ALEX MATIAS LÊU**

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO CALCÁRIO LAMINADO NA EXECUÇÃO DE  
ESTACAS EM SOLOS COLAPSÍVEIS**

**CRATO**

**2020**

**ANTONIO ALEX MATIAS LÊU**

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO CALCÁRIO LAMINADO NA EXECUÇÃO DE  
ESTACAS EM SOLOS COLAPSÍVEIS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável, da Universidade Federal do Cariri, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável. Área de concentração: Meio Ambiente.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira  
Coorientador: Prof.<sup>o</sup> Dr. Alex Jussileno Viana Bezerra

**CRATO**

**2020**

Dados Internacionais de Publicação na Catalogação  
Universidade Federal do Cariri  
Sistema de Bibliotecas

---

- L652u Lêu, Antonio Alex Matias  
Utilização do resíduo do calcário laminado na execução de estacas em solos colapsíveis /  
Antonio Alex Matias Lêu. – 2020.  
95 f.; il. color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Cariri, Centro de Ciências Agrárias e da  
Biodiversidade, Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável, Crato, 2020.  
Orientação: Profa. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira.  
Coorientação: Prof.º Dr. Alex Jussileno Viana Bezerra.
1. Solos colapsíveis. 2. Estaca apiloada. 3. Resíduo de calcário laminado. 4. Comportamento  
carga-recalque I. Título.

---

CDD 624.15136

Bibliotecária: Valeska Paulino Nogueira – CRB 3/1198

ANTONIO ALEX MATIAS LÊU

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO CALCÁRIO LAMINADO NA EXECUÇÃO DE  
ESTACAS EM SOLOS COLAPSÍVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável, da Universidade Federal do Cariri, como requisito final à obtenção do Título de Mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável. Linha de pesquisa: Meio Ambiente.

Aprovada em: 13/03/2020

BANCA EXAMINADORA:

---

Profª. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira (Orientadora)  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

---

Prof. Dr. Alex Jussileno Viana Bezerra (Coorientador)  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. João Barbosa de Sousa Neto  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

---

Profª. Dra. Aline Figueiredo Nóbrega de Azerêdo  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Aos meus pais: Valdeci Lêu e Nena Matias pelo apoio e amor incondicional.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por iluminar o meu caminho, por me abençoar, pelo discernimento, saúde e fé para conduzir essa pesquisa. A Ele minha eterna gratidão por tudo!

Aos meus amados pais, Valdeci Lêu, o qual tenho muito orgulho e Nena Matias, rainha da minha vida, que sempre estiveram ao meu lado dando força, suporte, amor e carinho; fizeram-me chegar até aqui, apoiando e incentivando e são, sem dúvida alguma, os grandes mentores da minha vida; aos meus valorosos irmãos, Valdislan (Lanlan), Wylla e Alana, pelo amor e companheirismo, juntos somos um só; e aos meus queridos sobrinhos Mayra, Pedro Yuri, João Victor, Eric, Saulo e Benício, que enchem meu coração de alegria e sorrisos. É nessa família que eu encontro todo o meu sustento. À família de forma geral pelo apoio, eles estão sempre torcendo por mim.

Ao Programa de Pós-Graduação (nível Mestrado) em Desenvolvimento Regional Sustentável da Universidade Federal do Cariri, pela oportunidade e satisfação; e a todos os professores pelos ensinamentos ministrados. A toda secretaria do PRODOR, representada pelos integrantes Jacson Guedes e Amanda Bezerra, por todos os serviços prestados, atenção e simpatias distribuídas.

À minha orientadora, Dra. Ana Patrícia, pela orientação competente demonstrada ao longo do trabalho, pela confiança em mim depositada, pelos preciosos conhecimentos repassados que serviram de guia para cada etapa, atenção, paciência e pela sintonia que tivemos desde o primeiro momento. Não poderia ter sido outra orientadora. Ao meu Coorientador, Prof. Dr.º Alex Jussileno, que de imediato aceitou a colaborar com este trabalho, no qual foi de suma importância, pela atenção e pelos valorosos ensinamentos que nortearam a pesquisa. Muito obrigado pela contribuição! Aos examinadores, Prof. Dr.º João Barbosa e Prof. Dra.ª Aline Figueiredo, que se prontificaram com seu precioso tempo a participar da banca examinadora para sugerir e contribuir nesta pesquisa.

Aos colegas, e também amigos do mestrado, pela ajuda e amizade que se estenderam ao longo de todo o programa, em especial a Allan Bruno por toda ajuda e companheirismo ao longo dessa jornada e a Mirele, Maria e Katiane, pela convivência marcada por consideração e bom humor. Vou carregar comigo por toda a vida.

Ao Laboratório de Materiais de Construção do IFCE - Campos Juazeiro do Norte, e aos laboratórios de Materiais de Construção e o de Mecânica dos Solos, ambos da UFCA, pelo apoio e suporte na realização dos ensaios da pesquisa.

À todos os bolsistas e técnicos dos laboratórios, que de alguma forma contribuíram para este trabalho, em especial, o bolsista Cícero Cordeiro por todo suporte e ajuda ao longo de todo procedimento experimental. Externo também meus agradecimentos a dupla Sara e Pietra, pela ajuda no estágio inicial da pesquisa.

Às empresas parceiras Mizu, na pessoa do atencioso Marcelo Gomes, pela doação do cimento; a loja de materiais de construção “Di Casa” pela doação da areia; a Cariri Extratora de Pedra na pessoa de Marcone Firmino pela doação da brita e a Mineradora Pedra Branca, detentora do resíduo utilizado no estudo; a PLANA pelo transporte e armazenamento do resíduo. Externo meu agradecimento a empresa Polimix Concreto Ltda, na pessoa de Hugo Oliveira, por autorizar a retificação dos corpos de prova e por ceder o caminhão betoneira para compor o sistema de reação do ensaio de prova de carga.

Ao coordenador administrativo/financeiro do Centro de Tecnologia Mineral, Wilker Matos, pela disponibilidade, atenção e informações prestadas durante visita à Mineradora Pedra Branca, em Nova Olinda/CE.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a Deus por mais esta vitória!

Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês', diz o Senhor, 'planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro. Então vocês clamarão a mim, virão orar a mim, e eu os ouvirei. Vocês me procurarão e me acharão quando me procurarem de todo o coração.

Jeremias 29:11-13



## RESUMO

A região do Cariri Cearense se apresenta como um importante pólo mineral, no que tange a sua rica reserva de calcário sedimentar laminado, conhecido comercialmente como Pedra Cariri, usado como piso e revestimento na construção civil. Entretanto, os processos de mineração e beneficiamento produzem uma elevada quantidade de resíduo (70% é desperdiçado) responsável por grandes danos ao meio ambiente. Assim, a utilização de resíduos na construção civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e contribuição para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou estudar o reaproveitamento de resíduos de calcário laminado - RCL na composição de concreto, em substituição em massa ao agregado miúdo (areia), visando a sua utilização em estacas curtas escavadas e apiloadas, executadas em solos colapsíveis. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas atividades de laboratório e de campo. Na etapa de laboratório foram realizadas a caracterização dos materiais e posteriormente a moldagem de corpos de prova do concreto do tipo seco, através de cinco teores de resíduo: 0%, 30%, 50%, 80% e 100%. Os resultados demonstraram a viabilidade do processo do ponto de vista técnico nas substituições da areia pelo resíduo nas proporções de 30% e 50%, entretanto, optou-se para a confecção da estaca, a mistura composta por 50% de resíduo, tendo em vista um maior volume de aproveitamento do resíduo. Na etapa de campo, foram confeccionadas estacas no Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri, onde há presença de camadas de solos colapsíveis que perdem resistências quando inundadas. Para tal foram executadas duas estacas apiloadas de 15 cm de diâmetro e 5 metros de profundidade, sendo uma com concreto seco convencional e outra com concreto seco contendo resíduo do calcário laminado, as quais foram submetidas à ensaios de prova de carga do tipo lento, para verificação de recalque do solo no estado de umidade natural e após inundação. A estaca apiloadas com resíduo apresentou recalque de 1,30 mm quando foi carregada até 10t, com solo na umidade natural; após descarregamento até 5t e umedecimento intencional do solo, nesta carga de 5t, o recalque adicional foi de 3,11 mm, totalizando um recalque de 4,31 mm. Já para a estaca sem RCL no solo na umidade natural apresentou um recalque de 1,19 mm, recalque praticamente semelhante ao da estaca produzida com resíduo, mostrando que a técnica do uso do resíduo é promissora; ao inundar o solo de apoio da estaca nesta carga, submetido a 10t o recalque registrado foi de 14,67 mm, totalizando um recalque de 15,86 mm. Os resultados mostraram que os recalques medidos não ultrapassaram o critério de ruptura técnica referenciado pela NBR 6122/19, que corresponde a 25 mm. O método de execução de estacas apiloadas em solos colapsíveis na Região do Cariri se mostrou tecnicamente viável como solução de fundações para obras de pequeno porte.

**Palavras-chave:** solos colapsíveis, estaca apiloadas, resíduo do calcário laminado, comportamento carga-recalque.

## ABSTRACT

The Cariri Cearense region presents itself as an important mineral pole, in terms of its rich reserve of laminated sedimentary limestone, known commercially as Pedra Cariri, used as flooring and cladding in civil construction. However, the mining and processing processes produce a high amount of waste (70% is wasted) responsible for major damage to the environment. Thus, the use of waste in civil construction is an excellent alternative to reduce the environmental impact and contribute to sustainable development. In this context, the present work aimed to study the reuse of laminated limestone residues - RCL in the concrete composition, replacing in bulk the fine aggregate (sand), aiming at its use in short excavated and apylized cuttings, carried out on collapsible soils. For the development of this research, laboratory and field activities were carried out. In the laboratory stage, the characterization of the materials was carried out and, subsequently, the molding of dry-type concrete specimens, through five levels of residue: 0%, 30%, 50%, 80% and 100%. The results demonstrated the feasibility of the process from the technical point of view in replacing the sand with the residue in the proportions of 30% and 50%, however, it was decided to make the pile, the mixture composed of 50% of waste, in view of greater volume of waste utilization. In the field stage, piles were made at the Experimental Field of the Federal University of Cariri, where there are collapsible soil layers that lose resistance when flooded. For this purpose, two 15 cm diameter and 5 meters deep pile piles were made, one with conventional dry concrete and the other with dry concrete containing laminated limestone residue, which were subjected to slow load test tests for verification of soil settlement in the state of natural moisture and after flooding. The pile attached with residue showed a repression of 1.30 mm when it was loaded up to 10 tons, with soil in natural humidity; after unloading up to 5t and intentional wetting of the soil, in this 5t load, the additional settlement was 3.11mm, totaling a settlement of 4.31mm. For the pile without RCL in the soil in natural moisture, it showed a settlement of 1.19 mm, a settlement practically similar to that of the pile produced with waste, showing that the technique of using the waste is promising; when flooding the supporting ground of the pile in this load, submitted to 10t, the registered settlement was 14.67 mm, totaling a settlement of 15.86 mm. The results showed that the measured settlements did not exceed the technical rupture criterion referenced by NBR 6122/19, which corresponds to 25 mm. The technique of carrying out pile piles on collapsible soils in the Cariri Region proved to be technically approved as a solution for foundations for small works. These results make it possible to conclude that the use of laminated limestone residue in the execution of pile piles on collapsible soils is technically feasible.

**Keywords:** collapsible soils, apilo piles, laminated limestone residue, load-settlement behavior.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colorações da pedra cariri .....	26
Figura 2 - Equipamento de corte de placas do calcário laminado .....	27
Figura 3 - Fluxograma do processo de extração.....	28
Figura 4 - Placas estocadas ao lado da mineradora em Nova Olinda.....	28
Figura 5 - Área de extração da mineradora Pedra Branca.....	29
Figura 6 - Resíduos gerados na extração (a); resíduos gerados no beneficiamento (b) .....	29
Figura 7 - Efluente gerado da serragem das placas (a); excesso de pó no entorno da mineradora .....	30
Figura 8 - Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil .....	36
Figura 9 - NSPT, Torque/NSPT e perfil de umidade com a profundidade nos períodos chuvoso e seco .....	38
Figura 10 - Fluxograma das atividades metodológicas .....	44
Figura 11 - Localização do campo experimental da UFCA em Juazeiro do Norte no Ceará ..	45
Figura 12 - Disposição do agregado miúdo (ARE) e graúdo (BRI).....	47
Figura 13 - Cimento CP V ARI RS armazenado no laboratório .....	48
Figura 14 - Localização de Nova Olinda no Ceará .....	48
Figura 15 – Resíduo doado pela mineradora (a); Coleta do resíduo triturado (b).....	49
Figura 16 - Armazenamento do resíduo (a); Amostra do resíduo triturado (b).....	49
Figura 17 - Curva granulométrica da brita .....	52
Figura 18 - Curva granulométrica da areia e resíduo .....	52
Figura 19 - Curvas Granulométricas resultantes das misturas/proporções de areia e RCL .....	54
Figura 20 - Massas unitárias compactadas das misturas/proporções entre a areia e RCL .....	55
Figura 21 - Etapas da execução da mistura: proporção dos materiais pesados (cimento, areia, brita, água e RCL) (a); lançamento dos materiais na betoneira (b); mistura dos materiais (c); aspecto do concreto seco(d).....	58
Figura 22 - Aparelho para moldagem: molde metálico, cilindro complementar e base metálica .....	59
Figura 23 - Moldagem do corpo de prova com adensamento compactado .....	60
Figura 24 - Procedimento de extração, identificação e cura dos corpos de prova: extração do corpo de prova (a); corpos de prova identificados (b); cura (c).....	60
Figura 25 - Processo de retificação do corpo de prova: retificação do corpo de prova (a); aspecto do corpo de prova retificado (b).....	61

Figura 26 - Rompimento do corpo de prova do concreto.....	62
Figura 27 - Materiais (a) e equipamentos para execução das estacas .....	63
Figura 28 - Esquema da estaca apiloada.....	64
Figura 29 - Características geométricas do fuste da estaca .....	64
Figura 30 - Soquete com peso de 28,70 kg .....	65
Figura 31 - Layout do campo experimental - Locação das estacas apiloadas e dos ensaios executados em pesquisa anterior.....	66
Figura 32- Demarcação das estacas.....	66
Figura 33 - Escavação da cava (a); manilha posicionada na cava (b).....	67
Figura 34 - Perfuração do fuste (a); introdução do tubo de revestimento (b); lançamento do concreto (c).....	67
Figura 35 - Concretagem da estaca apiloada (a); Estaca concretada (b).....	68
Figura 36 - Furos dos drenos e do sensor .....	69
Figura 37 - Tapete drenante de brita e sensor instalado .....	70
Figura 38 - Sistema de transmissão de carga.....	71
Figura 39 - Extensômetros.....	72
Figura 40 - Inundação do solo no entorno da estaca .....	73
Figura 41 - Variação da resistência à compressão simples dos corpos de prova .....	74
Figura 42 - Curva x recalque das estacas ensaiadas em solo na umidade natural.....	76
Figura 43 - Curva carga x recalque – estaca apiloada (com resíduo).....	77
Figura 44 - Curva carga x recalque – estaca apiloada (sem resíduo) .....	78
Figura 45 - Curvas da carga x recalque das estacas .....	79
Figura 46 - Perfil de umidade do solo antes e após prova de carga .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais e ensaios realizados .....	46
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	51
Tabela 3 - Análise química do cimento de alta resistência inicial CPV ARI RS .....	52
Tabela 4 - Características físicas do cimento de alta resistência inicial CPV ARI .....	53
Tabela 5 - Resultados da caracterização granulométrica e de massa unitária compactada das misturas .....	54
Tabela 6 - Características dos materiais e concreto seco.....	56
Tabela 7 - Traço de Referência.....	57
Tabela 8 - Consumo de Materiais em kg de Concreto no TR (para 1m <sup>3</sup> ) .....	57
Tabela 9 - Traços definidos para o experimento, em massa.....	57
Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova em relação ao tempo de ensaio .....	62
Tabela 11 - Tolerância de tempo de ensaio em função da idade.....	62
Tabela 12 - Médias dos resultados da resistência característica do concreto a compressão ....	74
Tabela 13 – Teor de umidade do solo antes e depois da prova de carga – estaca apiloada (com resíduo).....	81
Tabela 14 - Teor de umidade do solo antes e depois da prova de carga – estaca apiloada (sem resíduo).....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGU	Água
ARE	Areia
AV	Avenida
BA	Bahia
BRI	Brita
CE	Ceará
CEEG	Campo Experimental de Engenharia Civil
CIM	Cimento
CM	Centímetro
CMMAD	Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CP V ARI RS	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfato
CP'S	Corpos de Prova
CTM	Centro de Tecnologia Mineral
D	Diâmetro
DF	Distrito Federal
Dmáx	Diâmetro Máximo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EA1	Estaca Apiloada com Concreto Seco convencional
EA2	Estaca Apiloada com Concreto Seco + Resíduo
EUA	Estados Unidos da América
FCK	Resistência Característica do Concreto à Compressão
FCM	Resistência Média à Compressão
H	Hora
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
KG	Quilograma
KGF	Quilograma-Força
KN	Quilonewton
L	Comprimento

M	Metro
M <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MF	Módulo de Finura
MM	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
N <sub>SPT</sub>	Índice de Resistência à Penetração do Solo
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PR	Paraná
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RCL	Resíduo de Calcário Laminado
RMC	Região Metropolitana do Cariri
RPC	Resíduo da Pedra Cariri
RPS	Resíduo da Pedra de Santana
RSPC	Rejeito de Serragem de Pedra Cariri
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SML	Slow Maintained Load Test
S/N	Sem Número
SP	São Paulo
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
TR	Traço de Referência
T	Tonelada
USP	Universidade de São Paulo
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UFCA	Universidade Federal do Cariri

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.1 Objetivo geral .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4 Estrutura da Dissertação .....</b>	<b>22</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Desenvolvimento Sustentável .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Mineração de calcário .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1 Processo de extração e beneficiamento do calcário laminado na Região do Cariri .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2 Geração de resíduos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 USO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4 Uso de resíduos de calcário laminado da Região Metropolitana do Cariri - RMC .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Geotecnia e Fundações .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6 Solos colapsíveis.....</b>	<b>35</b>
<b>2.7 Estaca broca apiloada .....</b>	<b>38</b>
<b>2.8 Provas de carga.....</b>	<b>39</b>
<b>2.9 Alguns estudos sobre estacas em solos colapsíveis .....</b>	<b>40</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.1 Agregado miúdo natural.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.2 Agregado graúdo .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.3 Aglomerante.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.4 Resíduo do calcário laminado .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.5 Água.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2 Atividades de Laboratório .....</b>	<b>50</b>
<b>A) Caracterização dos materiais .....</b>	<b>50</b>
<b>A.1) Agregados .....</b>	<b>50</b>



<b>A.2) Aglomerante</b> .....	52
<b>A.3) Influência da substituição da areia por RCL</b> .....	53
<b>B) Estudo da dosagem experimental e definição dos traços para confecção de corpos de prova</b> .....	55
<b>C) Ensaio de resistência à compressão simples</b> .....	60
<b>D) Definição da porcentagem de substituição da areia por resíduo</b> .....	63
<b>3.3 Atividades de Campo</b> .....	63
<b>A) Limpeza do campo experimental e preparação dos materiais</b> .....	63
<b>B) Execução das estacas</b> .....	64
<i>B.1) Características das estacas</i> .....	64
<i>B.2) Materiais e equipamentos necessários</i> .....	64
<i>B.3) Locação das estacas</i> .....	65
<i>B.4) Método de execução da estaca</i> .....	66
<i>B.5) Preparação do sistema de inundação das estacas</i> .....	68
<b>C) Ensaio de prova de carga</b> .....	70
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	74
<b>4.1 Resistência à compressão simples</b> .....	74
<b>4.2 Prova de carga</b> .....	76
<b>5.1 Sugestões para futuras pesquisas</b> .....	82
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84
<b>APÊNDICE A – MEDIÇÃO DE RECALQUES POR ESTÁGIO DE CARREGAMENTO – ESTACA APILOADA (COM RESÍDUO)</b> .....	91
<b>APÊNDICE B – MEDIÇÃO DE RECALQUES POR ESTÁGIO DE CARREGAMENTO – ESTACA APILOADA (SEM RESÍDUO)</b> .....	92
<b>ANEXO A – LAUDO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA DE POÇO DA UFCA</b> .....	93
<b>ANEXO B – CERTIFICADO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇO DA UFCA</b> .....	95

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

A concepção de desenvolvimento sustentável pode ser compreendida como a complexa coexistência de três processos: o desenvolvimento tecnológico, a manutenção das condições ambientais adequadas para a existência das diferentes formas de vida do planeta, e a garantia da continuidade em tempos futuros, tanto deste desenvolvimento tecnológico, como das condições ambientais necessárias à continuidade da vida (SANTOS, 2003).

Neste contexto, a relação vital do homem com os resíduos sólidos tem sido objeto de importantes discussões e atitudes na atualidade. Os resíduos sólidos são restos oriundos das atividades humanas ou de processos industriais e podem causar vários danos a natureza, pois a deposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação da água e do solo, por exemplo.

Um dos maiores problemas ambientais enfrentados no Brasil e no mundo é, sem dúvida, o aumento da geração de resíduos sólidos e os problemas decorrentes da falta de um gerenciamento adequado para seu destino final. Assim, a minimização e a destinação correta desses resíduos são um importante aliado para a promoção do desenvolvimento sustentável.

Dentre os diversos tipos de resíduos gerados no Ceará podem-se destacar aqueles oriundos do processamento/beneficiamento de pedras ornamentais. No entanto, Pfaltzgraff (2005) nos diz que “a quantidade de rejeitos gerada no processo de beneficiamento de rocha para fins ornamentais é muito elevada, causando impactos ao meio ambiente devido ao seu descarte sem nenhum planejamento, sendo uma problemática não só nacional quanto mundial”.

Na Região do Cariri, interior do Ceará, os resíduos gerados da atividade de mineração, mais especificamente da exploração do calcário laminado, material comercialmente conhecido como Pedra Cariri, consumido no Ceará e estados vizinhos, são causas de diversos problemas ambientais. A ineficiência do método da lavra e o rudimentarismo técnico causam prejuízos diretos e indiretos, do ponto de vista econômico, social e ecológico, nesta atividade de mineração na região.

Em virtude do grande impacto ambiental provocado quando descartados inadequadamente na natureza e do enorme potencial que possuem como matérias-primas para reutilização em outros materiais, os resíduos de mineração e beneficiamento de rochas estão sendo estudados. Em geral esses resíduos são descartados em lagos, rios, faixas de domínios de rodovias e ao redor de mineradoras (ou empresas de beneficiamento) causando uma série de

agressões à fauna e flora, bem como à saúde da população, principalmente quando se encontra em forma seca e pulverulenta (SILVA, 2008).

A preocupação crescente com este tipo de resíduo baseia-se também nos elevados índices de crescimento do setor mineral em todo mundo, especialmente no que diz respeito às rochas para fins ornamentais. Segundo Vidal, Padilha e Oliveira (2005), no processo de extração e beneficiamento da Pedra Cariri acarreta uma alta perda de material, estimado em 70% em volume de resíduos gerados, o que torna um cenário altamente preocupante para a sociedade em geral.

Nesse contexto, a utilização de resíduos de várias cadeias produtivas tem ganhado cada vez mais espaço na construção civil como uma possibilidade para alcançar padrões sustentáveis de produção. Nos últimos anos, várias pesquisas têm sido dedicadas ao estudo da reutilização de resíduos da indústria da mineração de calcário laminado (Pedra Cariri), com a finalidade de transformar tais resíduos em matérias primas alternativas para a indústria da construção civil (SILVA, 2008; BASTOS, 2014; OLIVEIRA, 2016; PEREIRA, 2019).

A respeito da utilização do resíduo da Pedra Cariri, destacam-se as desenvolvidas por Bandeira *et al.* (2019), no qual estudou o potencial de utilização do resíduo na fabricação de tijolo ecológico; e por Souza Neto, Bandeira e Vidal (2019), que estudou a viabilidade da utilização desse resíduo em base e sub-base de rodovias. A grande maioria destes trabalhos constatou o bom desempenho do uso desses resíduos como composição de novos materiais.

Há estudos sobre o uso de outros resíduos em fundações profundas (WADA, 2010; EDLER, 2011), no entanto, não se observam trabalhos analisando a potencialidade de reutilização do resíduo de calcário laminado para fins de fundações, principalmente para estacas apiloadas em solos colapsíveis, no qual este trabalho se propõe. Inclusive, esse tipo de solo é um problema para a engenharia de fundações.

A respeito disso, os solos colapsíveis são solos não saturados, submetidos a um determinado estado de tensão, que sofrem considerável redução de volume quando submetidos a um eventual processo de umedecimento. As obras apoiadas sobre terrenos formados por estes solos podem apresentar algum dano. Nesse sentido, se faz necessária a busca de soluções para o fenômeno da colapsibilidade.

Assim, essa dissertação de mestrado tem por objetivo apresentar o estudo da utilização do resíduo da pedra cariri com vista na sustentabilidade, buscando analisar a potencialidade de aproveitamento do resíduo para fins de execução de estacas apiloadas em solos colapsíveis.

## 1.2 Justificativa

No município de Nova Olinda (CE) a extração do calcário laminado, assim como o seu beneficiamento nas serrarias, onde são esquadrejadas para posterior comercialização como rochas ornamentais, produz um elevado volume de resíduos, que segundo estudos de Correia, Vidal e Ribeiro (2006), chega a representar cerca de 70% da extração (considerando, desde a sua lavra até seu beneficiamento). Recentemente algumas mineradoras têm adotado a utilização de maquinários específicos para a extração do calcário nas lavras e para o processo de beneficiamento. Este fato acarretou em uma pequena redução de material desperdiçado, porém, devido a maior produtividade, a quantidade de resíduo gerada ainda é elevada.

Apesar de alguns estudos sobre o aproveitamento de resíduos da Pedra Cariri (OLIVEIRA, 2016; BANDEIRA *et al.* 2018; SOUZA NETO *et al.* 2018; PEREIRA, 2019) em diferentes aplicações na engenharia civil, a utilização de fato desses resíduos na prática é mínima comparada a quantidade elevada de resíduos gerados diariamente pelas mineradoras. Um dos casos relevantes a citar, sobre a maior utilização desse resíduo, trata-se da fabricação de cimento na ITAPUÍ Barbalhense Indústria de Cimento S/A. No ano de 1998, a empresa firmou uma parceria com a Associação dos Produtores de Lajes e Rochas para fins Ornamentais de Nova Olinda, onde os resíduos eram retirados das mineradoras e levados para a indústria de cimento em Barbalha. Na época, estima-se que a ITAPUÍ consumia cerca de 7.000 toneladas/mês de rejeito (VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, 2005). Com a desativação da fábrica de cimento, em 2016, o resíduo tem aumentado cada vez mais.

Nesse contexto, a geração de resíduos e sua destinação inadequada vêm degradando o meio ambiente, mais especificamente a fauna e a flora, e conseqüentemente o assoreamento de rios da região e poluindo o ar e águas de superfície, além da poluição visual nas proximidades das frentes de lavras e serrarias.

Segundo Vidal (2010), ao longo de trinta anos de exploração já se acumulam cerca de 2,4 milhões de toneladas de resíduos, que relacionando essa estimativa aos dias de hoje estima-se uma quantidade de resíduo muito maior. Apesar de atualmente os resíduos estarem sendo aproveitados por meio de confecção de peças de artefatos, através do Centro de Tecnologia Mineral, localizado em Nova Olinda, o volume de resíduo em forma de pó e, também, mais granular ainda é muito grande. A incorporação desses resíduos em processos industriais é urgente, tratando-se de uma solução para o desenvolvimento sustentável da Região do Cariri.

Neste sentido, dentre as possibilidades de aproveitamento de resíduos de mineração está o setor da construção civil, que inclusive é um dos setores que atualmente mais cresce e que mais

utiliza os recursos naturais em seus processos construtivos. Há uma estimativa que se consome entre 20% e 50% de todos os recursos naturais (JONH, 2000).

Uma estratégia para se contribuir com a gestão dos resíduos sólidos de Nova Olinda, especificamente os resíduos de mineração é a sua reciclagem para utilização na indústria da construção civil, como por exemplo, na confecção de estacas de fundações. A utilização desses resíduos na confecção de concreto para execução de estacas na construção civil, além de preservar o meio ambiente, proporcionando uma destinação mais adequada dos resíduos, apresenta-se como uma excelente maneira de preservar as reservas naturais de matéria-prima, como por exemplo, a areia.

As fundações, objeto principal de estudo deste trabalho, são elementos que têm por finalidade transmitir as cargas de uma edificação para as camadas resistentes do solo sem provocar ruptura do terreno de fundação ou recalques excessivos e, pode ser feita de diversos tipos de materiais. Dependendo do tipo de terreno encontrado no local das obras, adota-se tipos diferentes de fundações, utilizando vigas baldrames, sapatas, estacas, etc., cada uma com seu processo executivo específico.

A esse respeito, alguns solos da região do Cariri apresentam colapsibilidade, provocando trincas e rachaduras nas edificações, em alguns casos. Desse modo, a escolha por estes temas envolvendo os resíduos do calcário laminado e dos solos colapsíveis se justificam em face da recorrência destes problemas na prática da engenharia e no mundo.

Nessa conjuntura, esse estudo se justifica pela a necessidade de encontrar uma aplicação viável do resíduo de calcário laminado (pedra cariri), obedecendo às resistências mínimas exigidas pelas as normas da ABNT e, assim, mitigar os impactos ambientais decorrentes do acúmulo inadequado do mesmo. Deste modo, o aproveitamento de resíduos na confecção de estacas de fundações visa ganho ambiental, por reduzir o aporte de resíduos lançados no meio ambiente, e técnico, por contribuir com um material de construção alternativo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

A presente pesquisa tem como objetivo principal apresentar um estudo de viabilidade técnica da utilização de resíduos de calcário laminado na confecção de estacas apiloadas em solos colapsíveis.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Em termos específicos, esta pesquisa propõe os seguintes objetivos:

- i) Analisar as propriedades tecnológicas das amostras dos materiais estudados;
- ii) Estudar o comportamento de corpos de prova de concreto seco confeccionado por meio de diferentes teores de resíduos para execução de estacas apiloadas;
- iii) Verificar a influência do uso do resíduo no comportamento carga x recalque de estacas apiloadas;
- iv) Atestar a viabilidade técnica do aproveitamento do resíduo do calcário laminado em estacas apiloadas em solos colapsíveis.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Além do Capítulo 1 aqui descrito (introdução), a dissertação é composta pelos seguintes capítulos:

- a) Capítulo 2: foi escrita a revisão bibliográfica que consta de informações da literatura nacional e internacional sobre os assuntos objetos de estudo que norteiam o trabalho;
- b) Capítulo 3: estão apresentados os materiais e métodos usados para a elaboração da presente pesquisa;
- c) Capítulo 4: são apresentados e analisados os resultados do programa experimental estabelecido;
- d) Capítulo 5: são apresentadas as principais conclusões da pesquisa desenvolvida e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, as referências bibliográficas, apêndice e o anexo estão apresentados após os capítulos deste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Desenvolvimento Sustentável

O termo “desenvolvimento sustentável” surgiu a partir de estudos da Organização das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas, como uma resposta para a humanidade perante a crise social e ambiental pela qual o mundo passava a partir da segunda metade do século XX.

Na Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), também conhecida como Comissão de Brundtland, presidida pela norueguesa Gro Haalen Brundtland, no processo preparatório a Conferência das Nações Unidas – também chamada de “Rio 92” foi desenvolvido um relatório que ficou conhecido como “Nosso Futuro Comum”. Lélé (2013) complementa que o Relatório Brundtland dispôs o termo “desenvolvimento sustentável” como núcleo das discussões de desenvolvimento.

Tal relatório contém informações colhidas pela comissão ao longo de vários anos de pesquisa e análise, destacando várias vertentes além das ambientais, inclusive em relação às questões sociais. Neste relatório está exposta uma das definições mais difundidas do conceito: “o desenvolvimento sustentável é aquele que atende as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades”.

Para a ONU (Organização das Nações Unidas), o desenvolvimento sustentável não se restringe à preservação dos recursos naturais, mas também se reflete nas sociedades humanas, que para serem consideradas sustentáveis devem adotar, por princípio, a equidade econômica, justiça social, tolerância à diversidade cultural e a conservação ambiental.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi firmado na Agenda 21, documento desenvolvido na Conferência “Rio 92”, e incorporado em outras agendas mundiais de desenvolvimento e de direitos humanos. Este conceito vem sendo bastante discutido ao longo dos anos e está em constante construção, segundo a maioria dos autores que escrevem sobre o tema, como por exemplo, Carla Canepa (2007), José Eli da Veiga (2005) e Henri Ascelard e Leroy (1999).

De acordo com Sousa *et al.* (2015), a sustentabilidade pode ser definida através de atividades e ações humanas que têm como objetivo sustentar os interesses humanos, porém sem colocar em risco as gerações futuras. As práticas sustentáveis, por sua vez, estão relacionadas com o desenvolvimento econômico sem agressão ao meio ambiente, utilizando recursos naturais de maneira perspicaz fazendo com que estes mesmos recursos se mantenham futuramente, resultando em um desenvolvimento sustentável (DESCHAMPS, 2017).

No entendimento de Sachs (2008), o desenvolvimento sustentável está estruturado em cinco pilares ou dimensões, que são:

(a) social: fundamental por motivos tanto intrínsecos quanto instrumentais, por causa da perspectiva de disrupção social que paira de forma ameaçadora sobre muitos lugares problemáticos do planeta;

(b) ambiental: com as suas duas dimensões (os sistemas de sustentação da vida como provedores de recursos e como "recipientes" para a disposição de resíduos);

(c) territorial: diz respeito à distribuição espacial dos recursos, populações e das atividades;

(d) econômica: trata-se da viabilidade econômica, condição essencial ao sucesso do desenvolvimento;

(e) político: a governança democrática e a liberdade são valores instrumentais para o desenvolvimento sustentável.

Assim, um dos desafios da sustentabilidade é a conscientização de que esta é um processo a ser percorrido e não algo definitivo a ser alcançado. A busca por uma conceituação urbana sustentável traz consigo uma série de proposições e estratégias que buscam atuar em níveis tanto locais quanto globais. Priorizar o desenvolvimento social e humano com capacidade de suporte ambiental, gerando cidades produtoras com atividades que podem ser acessadas por todos é uma forma de valorização do espaço incorporando os elementos naturais e sociais (BARBOSA, 2008).

## **2.2 Mineração de calcário**

Mineração é uma palavra derivada do latim *mineralis* (relativo às minas) e pode ser definido como o processo de extração de minerais ou compostos minerais de valor econômico para usufruto da humanidade (CONFEDERACAO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2012). A Organização das Nações Unidas (ONU) define mineração como sendo a extração e beneficiamento de minerais que se encontra em estado natural: sólido, como o carvão e o ouro; líquido, como o petróleo bruto; e gasoso, como o gás natural.

De acordo com Falco *et al.* (2009), o Brasil é o quinto país com maior extensão territorial do mundo e o sexto com maior produção de minério. Brasil (2010) cita que em 2009 o país possuía 2.445 minas, sendo que 65,5% delas se concentravam na Região Sudeste, com São Paulo possuindo o maior número de minas, seguido de Minas Gerais e do Rio de Janeiro. A região Norte se encontrava em segundo lugar, seguida da região Nordeste, que contava com um total de



316 minas (12,8% das minas do Brasil). Na região Nordeste, o estado que detinha o maior número de minas era o Piauí, seguido da Bahia, Sergipe e Ceará.

A região do cariri cearense se apresenta como um importante pólo mineral, no que tange a sua rica reserva de calcário laminado, que segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) possuem cerca de 97 milhões de metros cúbicos, equivalentes a 241 milhões de toneladas, e abrange principalmente os municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda (CORREIA; VIDAL; RIBEIRO, 2006). A utilização desses calcários é feita sob a forma de lajes e utilizadas principalmente em pisos, enquanto que o calcário cristalino dos municípios de Altaneira e Farias Brito, são utilizados mais na indústria da cal. A cadeia produtiva da Pedra Cariri, que vai da lavra ao beneficiamento (esquadrejamento) acarreta uma perda de material em torno de 70%.

A atividade mineral nos calcários da região de Nova Olinda e Santana do Cariri tem provocado diversos impactos negativos, como o assoreamento de riachos, alteração do pH das águas e o aumento de zonas de erosão, poluição do ar, dentre outros impactos. Esses fatos mostram a necessidade de adotar medidas para o correto direcionamento do material descartado e a contenção da poluição gerada pelos elementos químicos; tornando-se necessário pensar na utilização sustentável dos recursos minerais a fim de garantir a sua existência para as gerações futuras.

### **2.2.1 Processo de extração e beneficiamento do calcário laminado na Região do Cariri**

O calcário sedimentar do Cariri, localizado na Chapada do Araripe, situada no sul do estado cearense, é formado essencialmente de carbonato de cálcio (VIDAL; PADILHA; OLIVIERA, 2005), sendo utilizada na indústria de rochas ornamentais, conhecida comercialmente como pedra cariri. Na região do cariri, o calcário laminado é chamado de Pedra Cariri e é utilizado na construção civil em forma de revestimento de pisos e fachadas.

A pedra cariri é um calcário calcítico, laminado, apresentando algumas variações de cor em função de sua composição química, existindo maiores quantidades de rochas de cor de cor amarelada a creme (Figura 1). É usado, normalmente, *in natura*, sem polimento ou acabamento superficial, como revestimento externo de fachadas, muros e em ambientes de lazer como bordas de piscinas, por causa de seu aspecto rústico (MENDES, 2009).

**Figura 1 - Colorações da pedra cariri**



Fonte: Autor (2020)

Uma vez delimitada a área a ser explorada e adquirido o poder de lavra diante do Departamento Nacional de Proteção Mineral (DNPM), inicia-se o processo, no qual é realizado o decapeamento, que consiste na retirada da cobertura vegetal e do solo propriamente dito que dá a sustentabilidade à cobertura. Após a limpeza inicia-se a extração do calcário laminado.

Na região do Cariri a extração é feita basicamente de duas formas: manual e semimecanizada. Algumas mineradoras extraem o calcário de forma manual, ou seja, feita com o uso de ferramentas manuais, tais como: martelo, pás, picaretas, carro de mão, punção, talhadeira e alavanca; outras já extraem o calcário de forma semimecanizada, isto é, a extração é feita com uma máquina que corta a placa em tamanhos pré-determinados. A placa extraída pelo processo manual apresenta formato (geometria) irregular, necessitando posteriormente de um beneficiamento que resulta em volumes maiores de resíduos. Por outro lado, a extração semimecanizada gera menos resíduos no momento da extração, porém devido ter uma maior produtividade acabam gerando também acúmulos de resíduos. Por meio de visita realizada em uma das mineradoras da região do Cariri foi possível entender o processo de extração e perceber os impactos gerados. A seguir apresenta-se uma descrição das etapas de extração citada por Barbosa, Leite e Silva (2003), sendo complementada com algumas informações obtidas durante a visita realizada na mineradora.

**Marcação da área:** Após a limpeza, a extração do calcário laminado é iniciada com a marcação, que consiste em determinar a área a ser extraída o minério. Inicialmente o operário delimita pontos que são unidos por uma linha e marcados na laje com uma punção. Em seguida traçam-se linhas paralelas e perpendiculares entre si com uma determinada distância, resultando no tamanho da placa comercialmente vendido (o tamanho mais comercializado é 40 cm x 50 cm).

**Corte da Pedra:** O corte é feito com uma máquina que, quando ligada, aciona um motor elétrico que transmite movimento a um eixo e faz girar uma lâmina (disco de diamante) (Figura 2). Quando a lâmina está em contato com a superfície usa-se água para evitar o desgaste do disco e diminuir o excesso de pó do calcário. A água utilizada na mineradora é oriunda de poço profundo e é armazenada em caixas de água com capacidade de 5.000 a 10.000 mil litros nas áreas dos talhados. Com a marcação definida o operador posiciona a lâmina, liga a máquina e em seguida começa a movimentar a máquina na direção da linha demarcada. Chegando ao final da linha marcada, o operador retorna ao início, para cortar uma nova placa. No retorno o operador puxa a máquina. Anteriormente a energia elétrica era oriunda da rede elétrica rural, através de uma ligação improvisada, porém há dois anos, a companhia de energia exigiu que cada mineradora tivesse sua subestação.

**Figura 2 - Equipamento de corte de placas do calcário laminado**



Fonte: Autor (2020)

**Retirada da Pedra:** Após o corte, com o auxílio de uma alavanca, o operário descola a placa de calcário laminado com pancadas na sua base. Em seguida apoia a alavanca com uma pedra (ou um pedaço de placa), suspende a alavanca e coloca sobre a placa uma segunda pedra para assim poder levantar e carregar para um local ao lado. As placas variam entre 25 a 30 kg.

**Separação:** A placa ao ser retirada vem em forma de “capas”, ou seja, uma única placa pode ser dividida em duas ou até cinco novas placas. As placas resultantes da separação têm propriedades distintas. Após ser retirada a placa é colocada ao lado e com auxílio de uma talhadeira e um martelo o operário faz a divisão, ou seja, a separação. Depois de separada as placas (produto acabado) são transportadas, em carrinho de mão, para o esquadrejamento nas serrarias (MENDES FILHO, 2009), em dimensões compatíveis a sua aplicação, geralmente se

enquadrando nas seguintes especificações: 50 X 50 cm, 40 X 40 cm, 30 X 30 cm, 20 X 20 cm e 15 X 30 cm ou em barras de 15 X 15 cm.

Para melhor compreensão do processo de extração da Pedra Cariri foi elaborado um fluxograma destacando as etapas de marcação da lavra até o esquadrejamento nas serrarias, conforme pode ser visto na Figura 3. A Figura 4 mostra as placas estocadas após as etapas de extração, ao lado da principal Mineradora em Nova Olinda.

**Figura 3 - Fluxograma do processo de extração**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 4 - Placas estocadas ao lado da mineradora em Nova Olinda**



Fonte: Autor (2020)

Segundo Mendes Filho (2009) a área total de extração de calcário laminado, no município de Nova Olinda, abrange 1.737,14 hectares. Essa superfície total inclui setores de exploração mineral, áreas de servidão, áreas de preservação ambiental e áreas de preservação permanente, com 127,87 hectares. A Figura 5 mostra uma área explorada pela mineradora Pedra Branca, em Nova Olinda, no qual a retirada do material aumenta para baixo ou para os lados, formando paredões, que chegam algumas vezes a ultrapassar mais de 10 m de altura. Percebe-se que essa atividade vem causando intensa degradação ambiental, implicando em mudanças na paisagem.

**Figura 5 - Área de extração da mineradora Pedra Branca**



Fonte: Autor (2020)

### 2.2.2 Geração de resíduos

A indústria da extração e beneficiamento de rochas ornamentais de calcário laminado utilizado no revestimento interno e externo de pisos, gera uma enorme quantidade de resíduos, tanto na sua extração (figura 6a), como no seu beneficiamento (Figura 6b).

**Figura 6 - Resíduos gerados na extração (a); resíduos gerados no beneficiamento (b)**



Fonte: Autor (2020)

Os resíduos produzidos na etapa de extração podem se apresentar em formas de sobras de rocha oriunda da quebra e corte das placas durante seu manuseio. Estima-se que as perdas na lavra variam de 60 a 90% do total extraído, conforme a operação seja com o uso de máquina com disco diamantado ou manual (VIDAL; PADILHA, 2003).

No processo de beneficiamento, ou seja, na serragem das placas para enquadrar nos tamanhos comerciais é gerado resíduos em forma de filetes sem nenhum valor comercial. Outro resíduo gerado nessa etapa, é o do pó da serragem, geralmente misturado com água, e dessa mistura resulta em lama e efluente (Figura 7a), uma vez que o corte é realizado com o uso de disco diamantado com água (SILVA; MATOS, 2016). A essa lama denomina-se Rejeitos de Serragem de Pedra Cariri (RSPC).

De acordo com informações obtidas na visita a mineradora, a limpeza dos tanques consiste em liberar os pontos de descarga para que a lama possa escoar por gravidade e o efluente retorna para as máquinas, onde é reutilizado no corte de novas placas. Estima-se que cerca de 850 toneladas de RSPC são geradas anualmente (BASTOS, 2014). Em relação ao material pulverulento gerado nessa etapa, o mesmo fica acumulado no entorno da mineradora, podendo causar problemas de saúde aos próprios colaboradores ao ser inalado; além disso, esse pó, por vezes é carregado pelo vento, alterando o aspecto da paisagem local, causando poluição visual e do ar, provocando impactos negativos para o entorno da vizinhança. A Figura 7b mostra o excesso de pó disposto no entorno da mineradora, causando uma certa dificuldade de caminhar.

**Figura 7 - Efluente gerado da serragem das placas (a); excesso de pó no entorno da mineradora**



Fonte: Autor (2020)

Estima-se que o volume de resíduos da mineração do calcário laminado é de 755.000,000 m<sup>3</sup> em Nova Olinda e 275.000,00 m<sup>3</sup> em Santana do Cariri, o que equivale a um total de aproximadamente, 2,4 milhões de toneladas (VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, 2005).

São quase quatro décadas de exploração intensa desse mineral na região e a cidade de Nova Olinda chega a ser líder na exploração do mineral, principalmente pela mina da Pedra Branca. Atualmente não há mineração em Santana do Cariri, segundo o coordenador do Centro de Tecnologia Mineral do Cariri (CTMC). As minas de Santana do Cariri foram exploradas por vários anos, e desde 2018 essa área não é mais explorada. Ainda segundo o coordenador, a falta de organização dos próprios mineradores, a concorrência entre si, o custo elevado para explorar e a inexistência de cooperativa de produtores contribuíram para que Santana do Cariri deixasse de explorar o calcário da pedra cariri. Assim, como não ocorre mais o processo de exploração e beneficiamento da pedra cariri nesse município, conseqüentemente também não se gera resíduos.

### **2.3 USO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO**

Para Silva (2008) os resíduos industriais e urbanos vêm-se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade moderna enfrenta. Sua deposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação dos mananciais de água e solo. Por outro lado, a indústria da construção civil cada vez mais utiliza os recursos naturais. Nesse sentido, a reciclagem destaca-se como uma das melhores alternativas para se minimizar um dos grandes problemas da sociedade.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS define em seu Título I – Disposições Gerais – Capítulo II parágrafo Definições – Inciso XIV o termo RECICLAGEM como sendo: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa).

A inserção dos resíduos num ciclo produtivo representa uma opção de recuperação desses materiais, tornando tal ação em algo de interesse, tanto no aspecto ambiental, como no econômico (ANDREOLA *et al.*, 2002).

Nos últimos anos, várias pesquisas têm sido realizadas ao estudo da reutilização de resíduos da indústria da mineração e de beneficiamento, com a finalidade de transformar tais resíduos em matérias primas alternativas, como por exemplo, na formulação de argamassa (SILVA, 2008) e na produção de telhas (BARROSO *et al.*, 2016). Porém, não se encontrou trabalhos voltados para utilização do resíduo de mineração em estaca apiloadas, o que torna esse trabalho inovador.

É necessário, assim, ter um planejamento ambiental voltado para o desenvolvimento sustentável na mineração, manter relações estreitas com os órgãos ambientais para que seja possível a redução de impactos na produção, para planejar a racionalização do consumo, incrementar a reciclagem e a reutilização das substâncias minerais a fim de manter e melhorar a qualidade do meio ambiente para a sociedade atual e futura. Porém, o que se nota é a inobservância da legislação voltada à proteção ambiental e respectivas ações de fiscalização.

#### **2.4 Uso de resíduos de calcário laminado da Região Metropolitana do Cariri - RMC**

Os resíduos provenientes da mineração e beneficiamento de rochas estão sendo estudados por conta do grande impacto que provocam, quando são descartados aleatoriamente na natureza e, também, por seu potencial como matéria-prima. Nos últimos anos, vários estudos já foram realizados na tentativa de reutilizar esses resíduos, por exemplo, na área da Engenharia Civil.

Ribeiro *et al.* (2007) realizaram estudos sobre o uso do calcário do Cariri cearense (calcário cristalino) proveniente de Farias Brito/CE. O objetivo do trabalho foi utilizar o resíduo como agregado mineral em pavimentação asfáltica. Fizeram vários ensaios, dentre eles o de granulometria, abrasão Los Angeles, índice de forma, densidade real e aparente, dureza e desgaste. Os autores obtiveram bons resultados de resistência mecânica dos agregados, porém concluíram que nenhuma das misturas asfálticas testadas atendeu às especificações requeridas, por exemplo, no ensaio Lottman e no ensaio de adesividade, impedindo seu uso na pavimentação. Os autores atribuíram que possivelmente isso se deve aos problemas de adesividade que poderiam ser corrigidas com o uso de doping.

Silva (2008) utilizou resíduo de calcário sedimentar, oriundo de Nova Olinda, como componente na formulação de argamassa. Para tal, decidiu-se por realizar a adição do calcário na argamassa em duas etapas distintas: A primeira com substituição da areia pelo calcário em proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do peso da areia, mantendo-se constante o peso do cimento e o fator água/cimento; A segunda com a substituição do cimento pelo calcário, também em proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do peso do cimento, mantendo-se constante o peso da areia e o fator água/pó (cimento + calcário). Os resultados apontaram viabilidade técnica do uso desses resíduos como substituto parcial da areia, com exceção do traço com adição de 20% e que a utilização do resíduo como substituto parcial do cimento não atende as normas da ABNT, pois houve queda na resistência com o aumento da idade de rompimento, exceto com o teor de adição de calcário entre 15 e 20% do cimento.



Menezes *et al.* (2010) fizeram misturas de resíduos da serragem de calcário laminado provenientes de empresas do município de Nova Olinda e Santana do Cariri, CE. O objetivo do trabalho foi caracterizar e avaliar a viabilidade técnica do resíduo para incorporação em massas cerâmicas, para a produção de telhas e blocos cerâmicos. Os autores puderam concluir que o resíduo é constituído por calcita e dolomita, apresenta elevada finura e que é possível a incorporação de até 10% de resíduo em formulações para a produção de telhas e blocos cerâmicos.

Pinto (2011) utilizou o resíduo da Pedra Cariri (calcário laminado) como material para camadas granulares de pavimento flexível. A autora misturou um solo fino da zona rural de Barbalha com o resíduo de Pedra Cariri e realizou a caracterização do solo e do resíduo. Fez-se misturas com três teores: 30%, 50% e 70% em massa e o melhor resultado obtido foi de 60 % para o teor de 50 % de mistura solo/resíduo.

Suassuna, Brasileiro e Prado (2012) propuseram avaliar a potencialidade de uso do rejeito da extração e beneficiamento da pedra cariri como matéria-prima em massa cerâmicas. Realizou-se a caracterização química, física e mineralógica. Os resultados indicaram que, como fontes de calcita pura, os rejeitos podem ser usados em matéria-prima de placas cerâmicas monoporosas, bem como em aplicações agrícolas, como corretivo de acidez de solo.

Moura, Leite e Bastos (2013) pesquisaram sobre o resíduo decorrente da serragem da Pedra Cariri, denominado de RSPC (Resíduo de Serragem da Pedra Cariri), proveniente de Nova Olinda. O trabalho verificou a viabilidade técnica da utilização do RSRP como adição mineral do tipo filer, em substituição ao cimento, para produção de concretos. Considerando os resultados das propriedades estudadas, os autores concluíram que não é tecnicamente recomendável a utilização de RSPC como substituição do cimento na produção de concreto.

Oliveira (2016) estudou o Resíduo da Pedra Cariri (RPC), produzido na Região Metropolitana do Cariri (RMC), como material alternativo para incorporação em camadas granulares de pavimentos. O autor conclui que os resultados experimentais mostraram que o Resíduo Pedra Cariri se mostrou viável tecnicamente e economicamente para construção de camadas granulares dos pavimentos.

Vidal *et al.* (2019) realizaram estudos do aproveitamento do resíduo da Pedra Cariri em base e sub-base de pavimentos. O resíduo foi proveniente de Nova Olinda e o estudo consistiu na estabilização granulométrica do resíduo e avaliação da resistência por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). Como resultados, os autores constataram que na energia de compactação Proctor intermediária, os valores de CBR variaram

entre 22% e 30%, mostrando-se adequado para uso em sub-base de pavimentos, bem como camadas de reforço.

Pereira (2019) buscou avaliar a qualidade do concreto produzido a partir do resíduo da Pedra Cariri para uso na construção civil. O trabalho teve como objetivo utilizar o resíduo em substituição parcial dos agregados graúdos para produção de concreto convencional. Assim, foram feitos três traços de concreto (100% brita, 80% de calcário com 20% de brita e 100% de calcário) para obter uma resistência à compressão de 25 MPa. Os resultados apontaram que o traço base foi o único que apresentou a resistência proposta pelo trabalho e que o traço com 80% e 100% de calcário apresentou resistência próxima e inferior, respectivamente, a 25 MPa, ambos não indicados para confecção do concreto.

Oliveira *et al.* (2019) fizeram um estudo para reutilização do Resíduo da Pedra de Santana (RPS) como agregado graúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural. No estudo foram produzidos dois traços, 1:5 e 1:7, com um total de 5 grupos em cada traço com porcentagens de 0% a 100% do RPS. Dos resultados obtidos os autores concluíram que o traço 1:5, com incorporação de RPS nos percentuais de 25% e 50%, atenderam às normas técnicas, sendo possível o seu emprego, deferentemente do traço 1:7, que tendem a apresentar baixas resistências.

Após a pesquisa realizada especificamente sobre o uso de resíduos de calcário laminado oriundo da Região do Cariri, observou-se que os resíduos provenientes de extração e beneficiamento da pedra cariri têm diversas aplicações nas áreas de construção civil e pavimentação, no entanto a utilização em estacas ainda não tinha sido estudada na região. Os resultados das pesquisas mostram que é possível minimizar a problemática da disposição inadequada do resíduo na natureza, e que há uma grande necessidade de que os estudos sejam aplicados na prática do desenvolvimento sustentável.

## **2.5 Geotecnia e Fundações**

O primeiro requisito para se abordar qualquer questão sobre obras geotécnicas é o conhecimento das condições do subsolo, isto é, reconhecimento da disposição, natureza e espessura das suas camadas, assim como das suas características com relação ao que se pretende. Este conhecimento implica na prospecção do subsolo e na amostragem ao longo de seu curso. Assim, sob o ponto de vista geotécnico, devem ser analisadas: as propriedades das camadas do solo, o acesso ao terreno, a viabilidade técnica de execução em relação ao tipo de solo, dentre outros.

No caso de obras de fundações é importante conhecer as características geotécnicas do maciço rochoso da fundação (BARROS, 2012), assim como dos materiais que compõem elemento estrutural de fundação. Cintra e Aoki (1999) consideram como “elemento isolado de fundação” o sistema composto pelo elemento estrutural de fundação e o maciço de solo que o envolve.

De acordo com a NBR 6122/2019, para qualquer edificação deve ser feita uma campanha de investigação geotécnica preliminar, constituída no mínimo por sondagens a percussão (com SPT), visando a determinação da estratigrafia e classificação dos solos, a posição do nível d'água e a medida do índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$ .

Ainda de acordo com a NBR 6122/2019, para a elaboração e projeto e previsão de desempenho das fundações devem ser considerados os seguintes aspectos:

- a) visita ao local;
- b) feições topográficas e eventuais indícios de instabilidade de taludes;
- c) indícios da presença de aterro (bota-fora) na área;
- d) indícios de contaminação do subsolo por material contaminante lançado no local ou decorrente do tipo de ocupação anterior;
- e) prática local de projeto e execução de fundações;
- f) estado das construções vizinhas;
- g) peculiaridades geológico-geotécnicas na área, tais como: presença de matacões, afloramento rochoso nas imediações, áreas brejosas e minas d'água.

Azeredo (1988) menciona que o terreno onde a fundação se apoia deve apresentar resistência mecânica para suportar as tensões devido aos esforços solicitantes, rigidez suficiente para não provocar a ruptura e controlar deformações. Assim, para projetar uma fundação adequada é necessário atender alguns requisitos, tais como: não recalcar excessivamente, não sofrer rupturas e não prejudicar a vizinhança; sendo importantes esses requisitos para garantir o bom desempenho das fundações. Dessa forma a escolha do tipo de fundação depende de algumas variáveis, dentre elas: das características do solo, da existência de lençóis freáticos e das cargas transmitidas pela superestrutura.

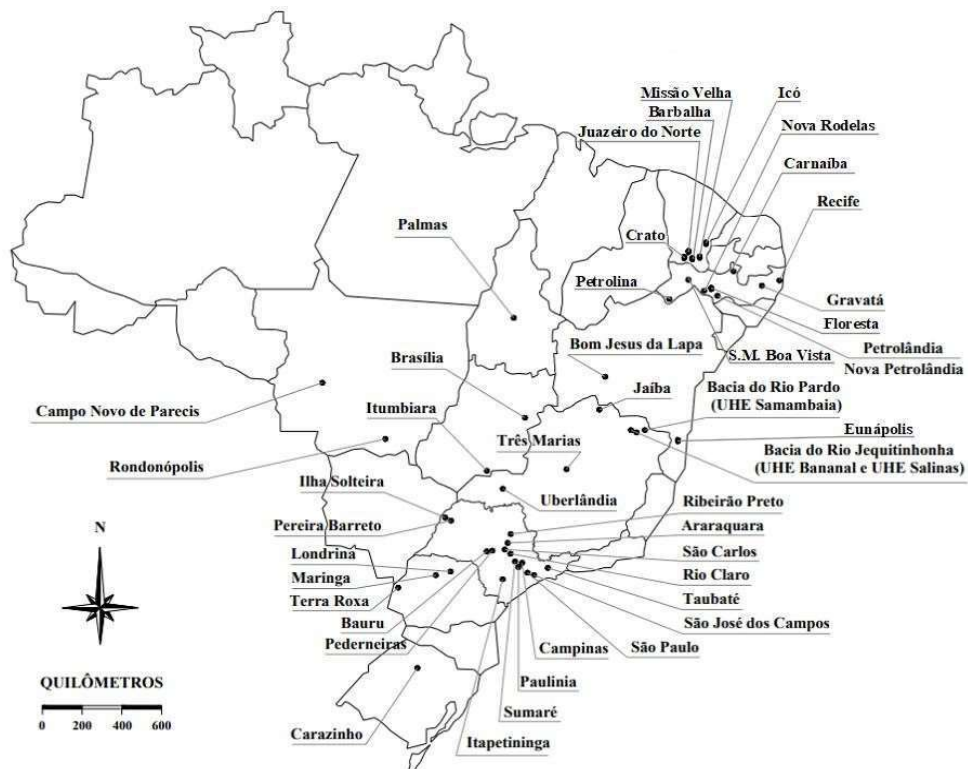
## **2.6 Solos colapsíveis**

Segundo Cintra (1998) todos os tipos de solos quando submetidos a um carregamento sofrem algum tipo de recalque, sendo que a magnitude desses recalques varia de solo para solo. Esses recalques acontecem em solos saturados e não saturados e devem ser previstos no cálculo

de fundações. Ainda segundo o autor, alguns tipos de solos, quando umedecidos, sofrem um tipo de colapso de sua estrutura que se caracteriza por recalques repentinos e de grandes proporções. Os solos que sofrem esse fenômeno são denominados de solos colapsíveis. Então, os solos colapsíveis podem ser definidos como sendo solos que sofrem bruscas e significativas reduções de volume quando umedecidos, sem que ocorra a variação da tensão ou carga à qual estão submetidos.

Para o meio técnico é de grande valia a identificação dos locais onde ocorrem os solos colapsíveis, pois suas características e carga de colapso podem ser levadas em consideração no cálculo e na elaboração de projetos de fundações. A Figura 8 mostra ocorrências de solos colapsíveis em várias regiões, inclusive no Nordeste; nesta região brasileira destacam-se os trabalhos de SOUZA NETO (2004). Na Região Metropolitana do Cariri já foi identificada ocorrências de solos colapsíveis em diversas áreas (MOREIRA, 2011; BANDEIRA *et al.*, 2012; BATISTA; BANDEIRA, 2012; XAVIER, 2018).

**Figura 8 - Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil**



Fonte: Xavier 2018 (*apud* adaptado de SAAB, 2016)

No início da implantação de um elemento de fundação, o solo pode se encontrar instável ou em processo de estabilização. Durante um período de tempo esta fundação pode se comportar de forma satisfatória, mas com um aumento no teor de umidade do solo até um valor crítico, mesmo sem atingir a sua completa saturação, pode ocorrer um repentino deslocamento,

comprometendo a estrutura, devido a uma diminuição brusca de volume do solo (ELL, 2003). A elevada ocorrência destes solos no mundo tem causado preocupação em engenheiros de fundação, devido ao deslocamento da estrutura pelo colapso do solo.

O colapso ocorre quando as partículas, constituintes de uma estrutura altamente porosa, estão em pseudo-equilíbrio, à custa de uma resistência adicional momentânea, produzida por pressões capilares, por forças eletromagnéticas de superfície e pela eventual existência de agentes cimentantes como carbonatos, óxidos de ferro, etc. (DUDLEY, 1970).

Em Juazeiro do Norte-CE já foram encontrados solos com esse tipo de comportamento em diversos locais. Os trabalhos de Silva Filho *et al.* (2010), Moreira (2011), Bandeira *et al.* (2012), Batista e Bandeira (2012), Bandeira e Melo (2013), Batista (2014), Tavares (2019) apresentam resultados de potenciais de colapso estimados em diversas áreas, e/ou soluções para fundações nesse tipo de solo. No Campo Experimental da UFCA foi encontrado solos colapsíveis e o local tem sido alvo de estudos de soluções de fundações para esse tipo de solo (XAVIER, 2018 e GONÇALVES, 2017).

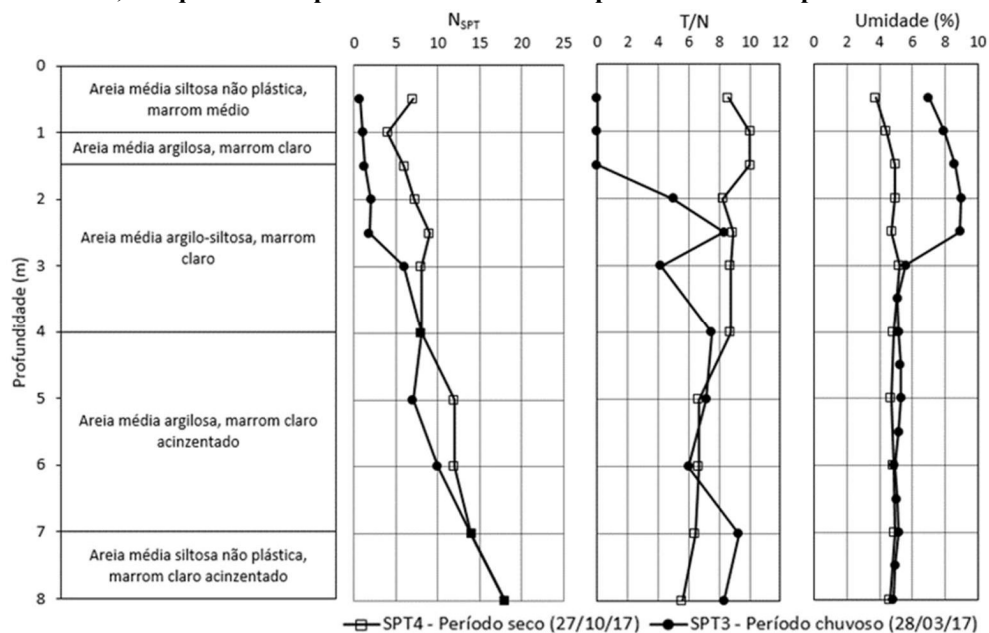
Nesse contexto, muitas edificações são construídas sobre solos deformáveis e, quando ocorre o fenômeno da colapsibilidade, as fundações dessas edificações, apoiada em solos colapsíveis, sofrem recalques, acompanhando a ação do solo. As deformações por colapso ocorrem devido ao umedecimento da camada de apoio das fundações; no caso das fundações superficiais, as camadas que sofrem naturalmente alteração do teor de umidade, devido às ocorrências de chuvas apresentam, com mais frequência, comportamentos de colapso. Por consequência, os recalques por colapso causam significativos danos às estruturas das edificações, aparecendo trincas e rachaduras ou até o desaprumo e a ruína de algumas delas. Por isso, se faz necessário conhecer o tipo de solo do terreno no qual se erguerá a edificação, inclusive procurar soluções viáveis para diferentes tipos de solos.

A região do perfil do solo limitada pela profundidade onde se verifica significativa variação de umidade e a superfície livre do terreno é definida como “camada ativa” ou “zona ativa” (JUCÁ e PONTES FILHO, 1997), a qual será função do clima, tipo do solo e topografia. É na camada ativa onde, geralmente, estão apoiadas as fundações superficiais, motivo pelo qual uma das razões das obras de pequeno e médio porte, onde se utilizam este tipo de fundação, serem as mais afetadas pelo fenômeno do colapso (SOUZA NETO, 2004).

Xavier (2018), desenvolvendo pesquisas no Campo Experimental da UFCA, apresenta resultados de sondagens SPT e de perfis de umidade obtidos durante o período seco e chuvoso da Região do Cariri, onde foi possível identificar o limite da zona ativa do solo da área de estudo.

A Figura 9 apresenta o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ), o perfil de umidade e o Torque/ $N_{SPT}$  do solo realizados por Xavier (2018), nos períodos seco (junho a dezembro) e chuvoso (janeiro a maio). Verificou-se que existe maior variação do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) nos primeiros 3,0 m de profundidade. Percebe-se também que as maiores variações de umidade ocorrem até os 3,0 m de profundidade, sendo pequenas nas profundidades superiores, dando indicativo de que esta profundidade é o limite da zona ativa do solo. Esses resultados nortearam a definição do comprimento da estaca executada no presente estudo.

**Figura 9 -  $N_{SPT}$ , Torque/ $N_{SPT}$  e perfil de umidade com a profundidade nos períodos chuvoso e seco**



Fonte: Xavier (2018)

## 2.7 Estaca broca apiloada

Segundo a norma NBR 6122/2019, fundação profunda é o elemento estrutural de fundação que transfere a carga proveniente da estrutura ao terreno através da sua base (resistência de ponta), da superfície lateral (resistência lateral) ou da combinação de ambas. A NBR 6122/2019 também define que sua cota de assentamento deve ser superior ao dobro da menor dimensão, em planta, e de no mínimo 3 m, exceto com justificativa. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões.

A NBR 6122/2019 define estaca como sendo “elemento de fundação profunda executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase de sua execução, haja trabalho manual em profundidade. As estacas são classificadas conceitualmente, de acordo com seu processo executivo, podendo ser de deslocamento (com fuste pré-fabricado ou moldado *in situ*) ou escavadas (moldadas *in situ*). Os materiais empregados podem ser:

madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco*, argamassa, calda de cimento, ou qualquer combinação dos anteriores”.

No meio geotécnico costuma-se classificar as estacas pelo material, método executivo, processo de transferência de carga e inclinação. Assim, as estacas podem ser classificadas quanto ao seu modo executivo e o material nela utilizado. Para este trabalho, é de extrema relevância o método executivo das estacas, pois as estacas executadas tiveram duas características bem definidas: escavadas com trado manual e concretadas por meio de apiloamento, tanto na ponta quanto no fuste. Sendo assim, denominou-se de estaca tipo broca apiloada.

Em relação à estaca apiloada, a NBR 6122/1996, classificou no item 3.16 como “estaca apiloada: tipo de fundação profunda executada por perfuração com o emprego de soquete”. Nesta norma, observa-se que este tipo de estaca é tratado também como estaca tipo broca. Porém, vale mencionar que a referida estaca denominada “estaca apiloada” não consta mais na norma após atualizações em 2010 e 2019.

O processo executivo da estaca apiloada é basicamente composto por: locação, perfuração, lançamento do concreto seguido do apiloamento através de um soquete caindo de uma altura pelo tripé.

Esse tipo de estaca é bastante utilizado em obras de algumas regiões. Segundo Ell (2003) é comum, no interior do estado de São Paulo, a execução de estacas apiloadas, também conhecidas como estacas pilão ou soquetão. São estacas que provocam o deslocamento do solo para a lateral e para baixo, sendo moldadas *in loco*. A autora ainda constata que este tipo de fundação também tem sido muito utilizado em Brasília/DF e Campo Grande/MS.

## 2.8 Provas de carga

Conforme Milititsky (1994) as provas de carga em estacas podem ser efetuadas objetivando prover dados para projeto; avaliar as fundações executadas de obra específica ou estudar as características de comportamento no conjunto estaca-solo.

A NBR 12131/2006 especifica o método de prova de carga em estacas, visando fornecer elementos para avaliar o comportamento da curva carga x recalque e estimar suas características de capacidade de carga.

A natural dificuldade de conhecimento das propriedades do solo onde as fundações serão construídas, a alteração das condições iniciais provocada pela execução das estacas e o comportamento complexo do conjunto estaca-solo, justificam a necessidade de utilização destes ensaios em verdadeira grandeza (MILITITSKY, 1994). Para Melo (2009) a utilização de provas

de carga é considerada a forma mais correta, eficiente e confiável na avaliação do comportamento da curva carga x recalque e determinação da carga de ruptura de estacas.

Segundo a NBR 12131/2006: “A prova de carga consiste basicamente em aplicar esforços estáticos crescentes à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes. Os esforços aplicados podem ser axiais de tração ou compressão, ou transversais”. Usualmente, para realização de provas de carga em fundações, considera-se um dos três métodos de ensaio, o ensaio lento, o rápido e o misto.

A NBR 12131/2006 especifica o ensaio tipo lento (SML – *Slow Maintained Load Test*), onde o carregamento é realizado em estágios sucessivos de, no máximo, 20% da tensão admissível provável do solo. A mudança de estágio deve acontecer depois da estabilização dos recalques, considerando a tolerância máxima de 5% do recalque total. Esta norma ainda estabelece que, em cada estágio de carga, os recalques devem ser lidos imediatamente após a aplicação da carga em intervalos dobrados tempo (2, 4, 8, 15, 30 minutos, etc.), contados a partir do início do estágio, até se atingir a estabilização.

## 2.9 Alguns estudos sobre estacas em solos colapsíveis

Conforme relatado anteriormente, os solos colapsíveis sofrem bruscas e significativas reduções de volume quando umedecidos, podendo acarretar danos às edificações assentadas nesse tipo de solo; esse comportamento do solo levou a vários autores a investigar o comportamento de estacas em solos colapsíveis, na busca de soluções para esse tipo de fenômeno, que é a colapsibilidade, presente no mundo, e inclusive no semiárido brasileiro, em especial na Região Metropolitana do Cariri-CE. Tais pesquisas descritas a seguir foram tomadas como parâmetros-guia para o estudo deste trabalho.

Holtz e Gibbs, em 1953, nos EUA, segundo relata Cintra (1998), estudaram estacas para a construção de estruturas hidráulicas em *loess* (solo colapsível geralmente constituído por partículas relativamente uniformes de silte, que são “cimentadas”, apresentando alta resistência quando secas). Já naquela época, o recalque era considerado um problema importante nas construções nesse tipo de solo, por causa da “destruição da estrutura do solo, sob carga e inundação”.

Teixeira (1993) analisou os efeitos produzidos pela inundação do solo em estacas escavadas, isoladas, submetidas a esforços de compressão. Realizou três provas de carga lentas em estacas escavada mecanicamente e concretada *in loco*, com diâmetros de 0,40 m e 0,50 m e



comprimentos de 10,0 m. Neste estudo o autor verificou uma redução de 28% na capacidade da estaca D50 e de 34% na estaca D40, após a inundação do solo. Com base nos resultados, o autor pôde concluir que o solo inundado é menos rígido do que o que se verifica em sua condição natural, como era esperado.

Ferreira *et al.* (2000) realizaram seis provas de carga (duas à compressão e quatro à tração) em estacas apiloadas implantadas num conjunto habitacional da cidade de Bauru/SP, cujo solo é colapsível. As estacas possuíam diâmetro  $D = 20$  cm e comprimentos de  $L = 8$  m (E-06) e  $L = 9$  m (E-13). As provas de carga foram do tipo rápido e pretendia-se atingir duas vezes a carga admissível prevista para a fundação ou um deslocamento mínimo de 25mm. Os resultados obtidos pelos autores consistiu-se: na primeira prova de carga (estaca E-13), atingiu-se um deslocamento próximo aos 25 mm, quando o ensaio teve que ser interrompido devido à ocorrência de ruptura da interação estaca-solo em uma das estacas de reação, a qual sofreu um arrancamento de mais de 60 mm; a carga máxima atingida nesse ensaio foi de 28,5 t. A segunda estaca ensaiada (E-06) teve uma carga máxima 26 t, quando o ensaio teve que ser interrompido também por motivo da ruptura de uma das reações. Analisando os resultados das provas de carga das estacas submetidas à compressão, os autores não conseguiram observar uma ruptura nítida.

Miguel *et al.* (2001) realizaram quatro provas de carga horizontal em estacas escavadas a trado mecânico em solo colapsível da região de Londrina, Estado do Paraná, em duas condições: sem inundação e com pré-inundação por 48 horas, com a finalidade de se obter o coeficiente de reação horizontal do solo e sua variação quanto ao efeito da colapsibilidade. As estacas tinham um comprimento unitário de 12 m (10 m de fuste embutido em solo evoluído e 2 m em solo residual) e diâmetro de 0,30 m. Para a confecção dos fustes, utilizou-se concreto de resistência característica à compressão de 15 MPa. Os resultados indicaram que as curvas de carga horizontal *versus* deslocamento horizontal encontradas nas provas de carga, realizadas na condição de pré-inundação do solo por 48 horas, apresentaram maiores deslocamentos; os valores obtidos de carga de colapso nas estacas escavadas com trado mecânico foram, em média, 21,3 t; a redução na capacidade de carga horizontal das estacas escavadas ensaiadas, em função da colapsibilidade do solo, foi de 30,8%.

Moraes e Segantini (2002) apresentaram os resultados obtidos em seis provas de carga estáticas à compressão realizadas em três estacas apiloadas executadas em solo colapsível na cidade de Ilha Solteira /SP. Foram realizadas duas provas de carga para cada estaca sendo a primeira na condição não saturada e a segunda na condição inundada. Os autores observaram que as três curvas carga x recalque obtidas nos ensaios com solo não saturado apresentaram um ponto

de inflexão quando atingiram um recalque de 50 mm. Isso significa que somente após este recalque é que a resistência de ponta começou a contribuir para a capacidade de carga. A carga média de ruptura para o solo não saturado foi de 12 t, enquanto para o solo umedecido foi de 9 t; portanto, as estacas apresentaram redução de capacidade de carga devido ao colapso de 25 % em média.

Fernal *et al.* (2003) analisaram estacas escavadas com trado manual (brocas) que foram submetidas a provas de carga à compressão realizadas no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina - UEL. As estacas brocas, de concreto, possuíam diâmetros de 20 cm e comprimentos de 3 m e 6 m, embutidas em solo colapsível, típico da camada superficial do subsolo da região de Londrina/PR. As estacas foram ensaiadas com o solo no teor de umidade natural e, depois, reensaiadas com o solo pré-inundado por 48 horas. Os autores concluíram que, para as estacas de 6 m, na condição de solo inundado, houve uma redução na capacidade de carga de cerca de 90%, em relação as estacas na condição não inundado, quando esteve sob carregamento de 1 t. Para as estacas de 3 m, com o solo na condição inundado, apresentou uma redução na capacidade de carga de 71%, em relação a condição de solo natural, sob carregamento de 1, 27 t. Esta grande redução da capacidade de carga, está relacionada à influência da colapsibilidade do solo em estudo.

Gonçalves (2006) estudou o comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível, em Londrina-PR, para solo não saturado e para solo umedecido por inundação superficial. Foram executadas doze estacas apiloadas de diâmetro 20 cm, sendo seis de 3 m de comprimento e seis de 6 m de comprimento. Algumas estacas apresentaram redução da capacidade de carga média devida ao colapso de 43,9% e 48,4%, para os comprimentos  $L = 3,0$  m e  $L = 6,0$  m, respectivamente, quando estiveram sob carregamento de cerca de 9 t. O autor destaca que fundações por estacas de pequeno diâmetro e relativamente curtas ficam sujeitas à influência da colapsibilidade do solo. Isso sugere um estudo semelhante, para os solos colapsíveis na Região do Cariri, verificando resultados para outros tipos de estacas.

Castro (2011) executou um programa de investigação de campo, em solos colapsíveis no município de Eunápolis – BA, e realizou provas de carga estática em duas estacas, com o solo na condição natural e na condição inundado. O autor observou que a inundação do solo reduziu a capacidade de carga da estaca, sendo a resistência lateral reduzida na ordem de 37%.

Gonçalves (2017) estudou o comportamento de uma estaca escavada executada em solo colapsível no Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri – UFCA, por meio de prova de carga com sistema estaca-solo na umidade natural e posteriormente umedecido por

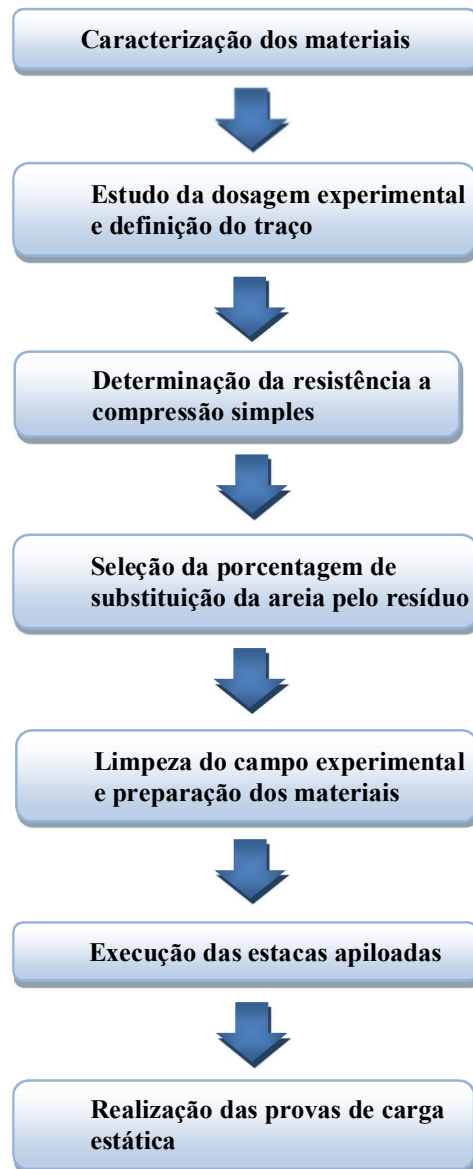
inundação superficial. A estaca do tipo broca não armada foi executada com concreto convencional (plástico), com diâmetro de 15 cm e comprimento de 5m, ultrapassando a zona ativa do solo (3,0 m) prevista por Xavier (2018). A capacidade de carga prevista para a estaca, utilizando métodos semiempíricos (Aoki-Velloso (1975); Pedro Paulo Costa Velloso (1981); Decourt-Quaresma (1978); Alberto Henriques Teixeira (1996); Urbano Rodrigues Alonso (1991)), foi em média de 10,5 t, para o período seco, sendo adotada uma carga admissível média de 5 t, com coeficiente de segurança 2, conforme recomenda a NBR 6122/2019. O recalque obtido na estaca, submetida a um carregamento de 5t, na condição de umidade natural do solo, foi inferior a 1 mm; e após uma inundação de 16 h, obteve um recalque superior a 36 mm, mostrando um recalque por colapso do sistema estaca-solo.

Martins, Bandeira e Souza Neto (2019) analisaram o comportamento de uma estaca broca, com ponta apilada com concreto seco e o fuste com concreto plástico, apoiada no solo colapsível do Campo Experimental da UFCA, com 150 mm de diâmetro e profundidade de 5 m, mesmo local estudo por Gonçalves (2017) e neste presente trabalho. O ensaio de prova de carga foi realizado no período chuvoso da região, quando o solo apresentava umidade variando entre 6,5% a 8% ao longo dos 5,0 m de profundidade. Com uma carga máxima aplicada na estaca de 10 t, os autores observaram-se um pequeno recalque total, no valor de 6,47 mm, sendo este considerado aceitável para recalque absoluto de fundações de edifícios convencionais.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas atividades de laboratório e de campo, conforme fluxograma apresentado na Figura 10. As atividades em laboratório, compreende as etapas de caracterização dos materiais à seleção da porcentagem de substituição da areia pelo resíduo; as atividades de campo, compreende as etapas de limpeza do campo experimental e preparação dos materiais à realização das provas de carga estática.

**Figura 10 - Fluxograma das atividades metodológicas**

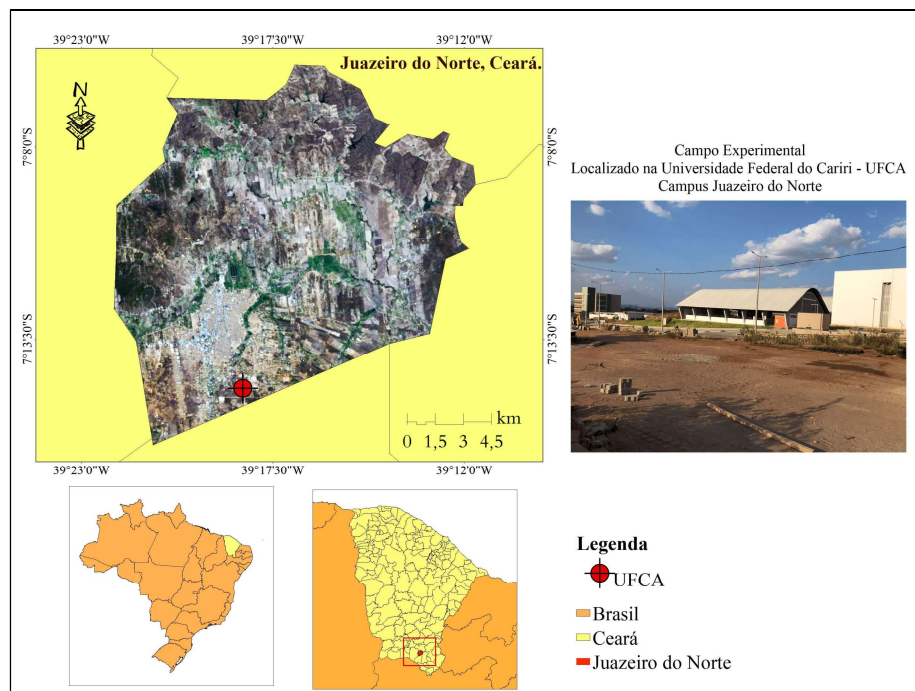


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

O local escolhido para a realização das atividades de campo trata-se do Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri, situado à Av. Tenente Raimundo Rocha, s/n, Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - Ceará (Figura 11). O tipo de solo do local é constituído, predominantemente, por uma areia média argilo-siltosa (XAVIER, 2018).

A escolha do local de estudo está associada a danos existentes em edificações situadas em alguns bairros em Juazeiro do Norte (Lagoa Seca e São José, por exemplo), inclusive no próprio *Campus* da UFCA. Estudos geotécnicos realizados por alguns pesquisadores identificaram a colapsibilidade do solo, onde está localizada a UFCA, e este tipo de solo é comum em outras áreas no município. Xavier (2018) realizou um estudo sobre a colapsibilidade do solo do local, com limite da zona ativa do solo na profundidade de 3,0 m da superfície do terreno; o solo natural foi classificado como colapsível segundo o critério de Vargas (1978), como condicionalmente colapsível pelo critério de Reginatto e Ferrero (1973) e de problema grave quanto aos danos que pode provocar em uma obra, de acordo com as classificações de Jennings e Knight (1975) e Lutenegger e Saber (1988).

**Figura 11 - Localização do campo experimental da UFCA em Juazeiro do Norte no Ceará**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Com base na profundidade limite da zona ativa identificada por Xavier (2018), o comprimento da estaca executada neste trabalho foi de 5 m, a fim de ultrapassar esta referida zona (3,0 m). A carga admissível do sistema estaca-solo foi adotada em 5,0 T conforme resultados obtidos por Gonçalves (2017). Sendo assim, a tensão estrutural da estaca foi adotada

no valor de 20 MPa, conforme resistência mínima estabelecida pela NBR 6122:2019, ou seja, o estudo e a escolha do traço para confecção da estaca foram baseados neste valor de referência.

### 3.1. Materiais

Para a confecção dos corpos de prova e execução das estacas foram utilizados os materiais descritos na Tabela 1 que apresenta os ensaios realizados e suas respectivas normas vigentes. Todos os materiais foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal do Ceará – *Campus Juazeiro do Norte*, por meio de ensaios normatizados. A etapa de dosagem e confecção dos corpos de prova foi realizada na Universidade Federal do Cariri. Com relação à caracterização do cimento foram considerados os dados do próprio fabricante.

**Tabela 1 - Materiais e ensaios realizados**

<b>Materiais</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>
Agregado Miúdo (Areia)	Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa unitária solta	ABNT NBR NM 45:2006
	Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45:2006
	Absorção de água	ABNT NBR NM 53:2009
	Massa específica	ABNT NBR NM 53:2009
	Teor de argila em torrões	ABNT NBR NM 7218:2010
	Material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003
	Matéria orgânica	ABNT NBR NM 49:2001
Agregado Graúdo (Brita)	Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa unitária solta	ABNT NBR NM 45:2006
	Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45:2006
	Absorção de água	ABNT NBR NM 53:2009
	Massa específica	ABNT NBR NM 53:2009
	Material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003
Agregado Miúdo Artificial (Resíduo de Calcário Laminado - RCL)	Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa unitária solta	ABNT NBR NM 45:2006
	Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45:2006
	Absorção de água	ABNT NBR NM 53:2009
	Massa específica	ABNT NBR NM 53:2009
Aglomerante (Cimento Portland)	Material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003
	Fabricante	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### 3.1.1 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural utilizado no trabalho foi a areia proveniente de uma jazida localizada no distrito denominado Jamacaru, pertencente ao município de Missão Velha – CE. Este material proveniente desta jazida é bastante utilizado nas obras locais.

### 3.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo foi a brita 1 de origem mineralógica granítica, que segundo a NBR-7211 (ABNT, 2009) tem sua delimitação através da abertura de peneiras com tamanho de 4,75mm. A brita em questão foi oriunda da Cariri Extratora de Pedra (Master Brita), cuja mina de extração está localizada no sítio Pau Seco no município de Juazeiro do Norte. Posteriormente, os agregados (areia e brita) foram depositados no campo experimental, cobertos por lonas protegidas de intempéries e feita a identificação dos materiais, conforme Figura 12.

**Figura 12 - Disposição do agregado miúdo (ARE) e graúdo (BRI)**



Fonte: O Autor (2020)

### 3.1.3 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland de alta resistência inicial do tipo CP V – ARI RS. A escolha desse aglomerante se deu em função pela dispensa de adições pozolânicas e conter baixas adições carbonáticas no seu processo de fabricação. Em vista disso, possui menor interveniência nos resultados, se comparado aos demais tipos de cimentos Portland. Além disso, esse produto contém teores de calcário e argila diferenciados na produção do clínquer, suas partículas são extremamente finas, atingindo aos 7 dias de idade cerca de 80% de resistência obtida aos 28 dias.

Os sacos de cimento foram estocados no Laboratório de Mecânica dos Solos segundo as recomendações da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), ou seja, suspensos

do chão, em estrados seco e afastados das paredes, além de utilizados dentro do prazo de validade de três meses (Figura 13).

**Figura 13 - Cimento CP V ARI RS armazenado no laboratório**

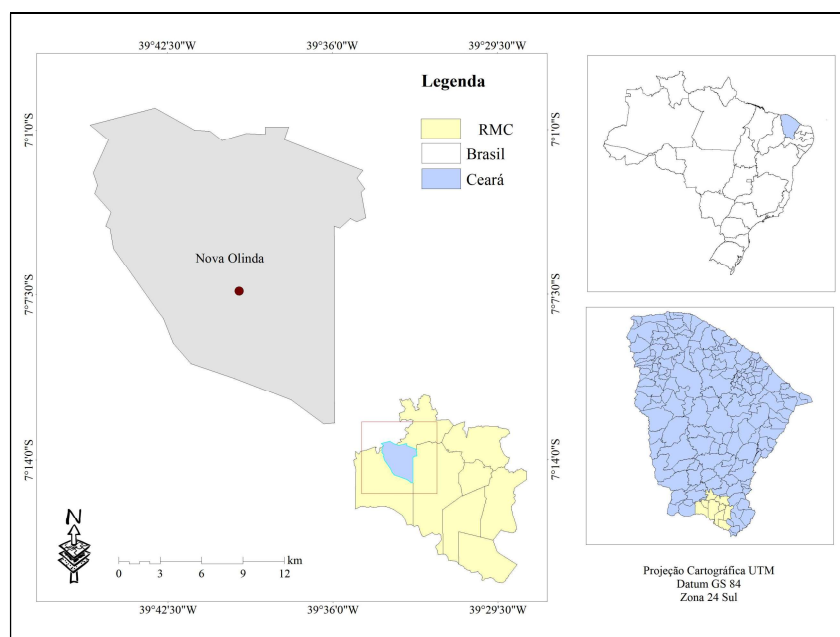


Fonte: O Autor (2020)

### 3.1.4 Resíduo do calcário laminado

O resíduo de calcário laminado utilizado na presente pesquisa foi oriundo da Mineradora Pedra Branca, situada no município de Nova Olinda. Este município é integrante da Região Metropolitana do Cariri no Ceará - RMC (Figura 14), distante de 560 km da capital Fortaleza e próximo a centros como Crato (cerca de 41 km) e Juazeiro do Norte (cerca de 52 km).

**Figura 14 - Localização de Nova Olinda no Ceará**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)



O volume de resíduos doado pela Mineradora Pedra Branca encontrava-se em tamanhos grandes e variados (Figura 15a). Diante disso o material foi transportado para a empresa Master Brita, em Juazeiro do Norte, para realização da trituração, a fim de reduzir os resíduos em três diferentes faixas, 1, 2 e 3 com os diâmetros máximos de 4,8 mm, 12 mm e 19 mm, respectivamente, de forma a se enquadrar nas dimensões de interesse para aplicações em pesquisas que estão sendo realizadas na UFCA. Após a trituração, os resíduos foram armazenados na empresa Planna Empreendimentos e Asfalto Ltda, a poucos quilômetros da UFCA; e conforme a necessidade de utilização nos experimentos, os resíduos seriam coletados nesta empresa. A Figura 15b mostra a coleta do resíduo de menor granulometria ( $D_{m\acute{a}x}$  4,8 mm) utilizada nesta pesquisa.

**Figura 15 – Resíduo doado pela mineradora (a); Coleta do resíduo triturado (b)**



Fonte: O Autor (2020)

Após a coleta, iniciou-se o processo de quarteamento do material e em seguida colocado em sacos rafia devidamente fechados, com capacidade de 60 quilos e depositados no laboratório de Mecânica dos Solos da UFCA (Figura 16a). Após o beneficiamento e escolha da menor granulometria, o agregado miúdo artificial foi submetido aos mesmos ensaios de caracterização aplicados ao agregado miúdo natural, conforme as normas técnicas brasileiras. A Figura 16b ilustra uma amostra do resíduo ensaiado.

**Figura 16 - Armazenamento do resíduo (a); Amostra do resíduo triturado (b)**



Fonte: O Autor (2020)

### **3.1.5 Água**

Para a execução dos ensaios de laboratório e de campo desta pesquisa foi utilizada água potável de poço, proveniente do sistema de abastecimento da UFCA, considerada dentro dos padrões exigidos pela NBR 15900:2009 (Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos), conforme laudo e certificado de qualidade da água no Anexo A e B, respectivamente.

## **3.2 Atividades de Laboratório**

As atividades metodológicas desta etapa de trabalho, constam de: (A) caracterização dos materiais utilizados na pesquisa; (B) estudo da dosagem experimental dos concretos e definição do traço; (C) determinação da resistência dos concretos à compressão simples; e (D) seleção da porcentagem de substituição. A seguir serão descritos as técnicas e métodos empregados nesta etapa.

### **A) Caracterização dos materiais**

Nesta etapa foram caracterizados os agregados (graúdos, miúdos e resíduo do calcário laminado) utilizados na produção do concreto para execução de corpos de prova e posteriormente das estacas de acordo com as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A areia teve suas porcentagens de incorporação variando com o agregado artificial (resíduo). Assim, foi feito o ensaio de composição granulométrica e o de massa unitária compactada para análise do comportamento de tais composições.

O procedimento da coleta, transporte e armazenamento de todos os materiais seguiu as recomendações da ABNT NBR NM 26 e preparados para os ensaios de laboratório, conforme a ABNT NBR NM 27.

#### **A.1) Agregados**

Os valores encontrados na caracterização dos agregados (areia, RCL e brita) ficaram dentro da faixa aceitável utilizadas na produção de concretos, consistindo de um critério satisfatório para a utilização deste agregado, pois ficou dentro do intervalo estabelecido por norma para as areias de concreto e argamassas.

A dimensão máxima característica da areia encontrada foi de 4,75mm e a massa unitária compactada foi de 1590 kg/cm<sup>3</sup>, que se refere à densidade do agregado com os vazios existentes. O módulo de finura encontrado foi de 2,10, se encaixando dentro dos parâmetros ideais da NBR

7211/2009. Pelas características ideais do agregado miúdo segundo a norma, o módulo de finura utilizável inferior deve variar de 1,55 a 2,20. A Tabela 2 apresenta resultados dos ensaios de caracterização.

Em relação ao resíduo, o módulo de finura encontrado foi de 3,0, confirmando o que a análise táctil-visual já sugeria, uma granulometria bastante grossa. Esse valor se encaixa dentro do parâmetro da NBR 7211/2009 que conforme a norma, o módulo de finura da zona utilizável superior deve variar entre 2,90 e 3,50. A dimensão máxima característica encontrada foi de 4,75 mm, mesmo valor encontrado na areia. A massa específica encontrada foi 2180 kg/cm<sup>3</sup> e massa unitária compactada de 1510 kg/cm<sup>3</sup>, pouco inferiores aos valores encontrados para os demais componentes do concreto. Esse valor permite que o cálculo do agregado seja realizado de melhor maneira para a elaboração do volume do traço de concreto. Comumente, a massa unitária aproximada dos agregados usados em concreto varia de 1300 kg/m<sup>3</sup> a 1750 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados**

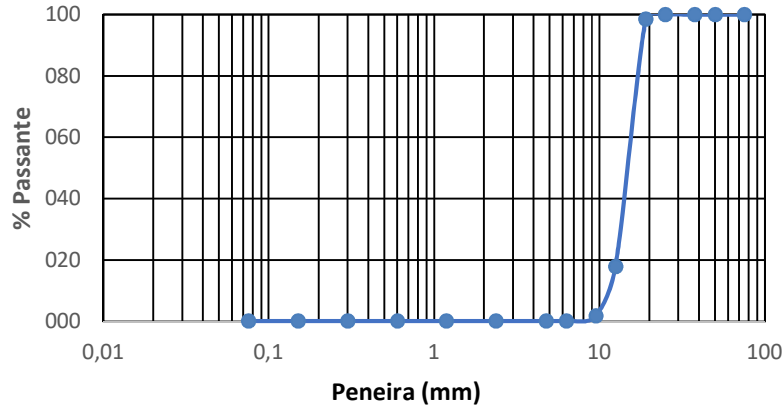
<b>Agregados</b>	<b>Diâmetro máximo (mm)</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Massa específica (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária compactada (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Teor de argila em torrões (%)</b>	<b>Teor de material pulverulento (%)</b>
Areia	4,75	2,1	2620	1590	0,27	2,80	5,26
RCL	4,75	3,0	2180	1510	10,2	-	8,7
Brita	19,0	8,8	2670	1540	0,98	-	0,55

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

No tocante a brita, os valores da massa unitária compactada foram de 1540 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que a massa unitária solta foi de 1350kg/m<sup>3</sup>. Esses valores estão dentro dos indicados pela NBR NM 45/2006. Foi possível verificar que a brita teve um valor de absorção muito baixo, não ultrapassando 1%. Observa-se que a brita possui um diâmetro máximo característico de 19,0 mm, e módulo de finura igual a 8,8. Todos os materiais foram isentos de matéria orgânica.

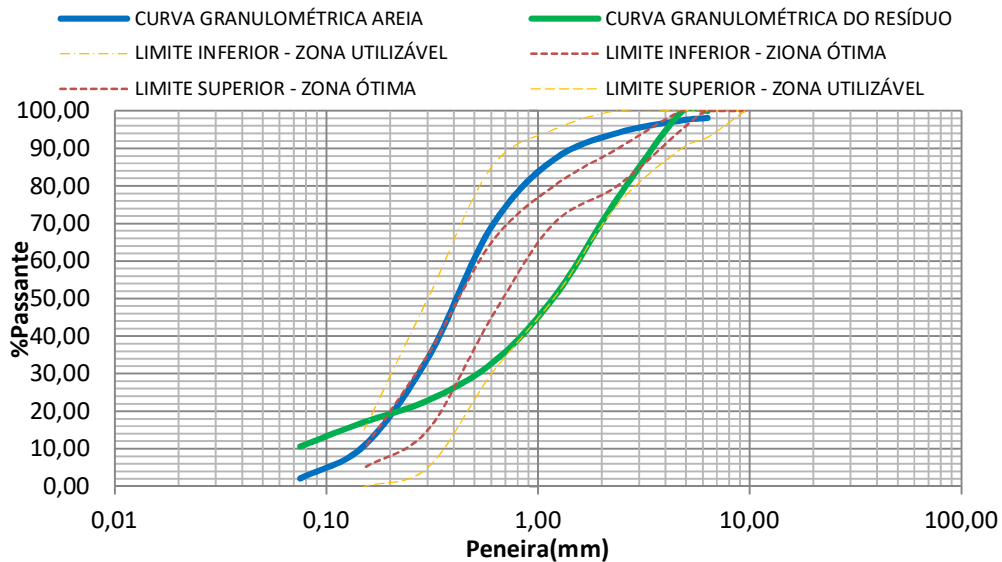
Por meio dos valores encontrados para as porcentagens passantes, traçou-se a curva granulométrica dos agregados. É possível constatar que a curva da brita encontra-se praticamente toda inserida na zona granulométrica 9,5/25 para agregados graúdos da norma NBR 7211/2009 (Figura 17). É possível visualizar que a areia possui sua granulometria situada entre a zona ótima e a zona utilizável e que o resíduo está na zona utilizável para concretos, conforme prescrito pela NBR 7211/2009 (Figura 18).

**Figura 17 - Curva granulométrica da brita**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

**Figura 18 - Curva granulométrica da areia e resíduo**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## A.2) Aglomerante

As características químicas e físicas referentes ao cimento utilizado (CP V ARI RS) estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4, conforme dados dos ensaios fornecidos pelo fabricante. É importante ressaltar que as exigências físicas e químicas obrigatórias e facultativas atendem a especificação da NBR 16697/2018.

**Tabela 3 - Análise química do cimento de alta resistência inicial CPV ARI RS**

Composição Química	CP V ARI RS	Requisitos NBR 16697:2018
	(%)	(ABNT)
Perda ao fogo	2,27	≤ 6,5%

Resíduo Insolúvel	1,09	≤ 3,5%
Anidrido Sulfúrico – SO <sub>3</sub>	2,74	≤ 4,5%
Óxido de Cálcio - CaO	1,13	-
Óxido de Magnésio - MgO	3,84	≤ 6,5%

Fonte: Adaptado pelo Autor por informações do fabricante MIZU (2019)

**Tabela 4 - Características físicas do cimento de alta resistência inicial CPV ARI**

Característica Física	CP V – ARI RS	Requisitos NBR 16697:2018 (ABNT)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	-
Área específica (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	4204,47	-
Finura – Resíduo na peneira #0,075mm (%)	1,32	-
Finura – Resíduo na peneira #0,032mm (%)	0,25	≤ 6,0
Expansibilidade – quente (mm)	0,77	≤ 5
Tempo de pega – início (min)	155,42	≥ 60
Tempo de pega – fim (min)	192,71	≤ 600
Consistência normal (%)	27,23	-
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	18,52	≥ 14,0
Resistência a compressão – 03 dias (MPa)	29,13	≥ 24,0
Resistência a compressão – 07 dias (MPa)	37,16	≥ 34,0
Resistência a compressão – 28 dias (MPa)	47,0	-

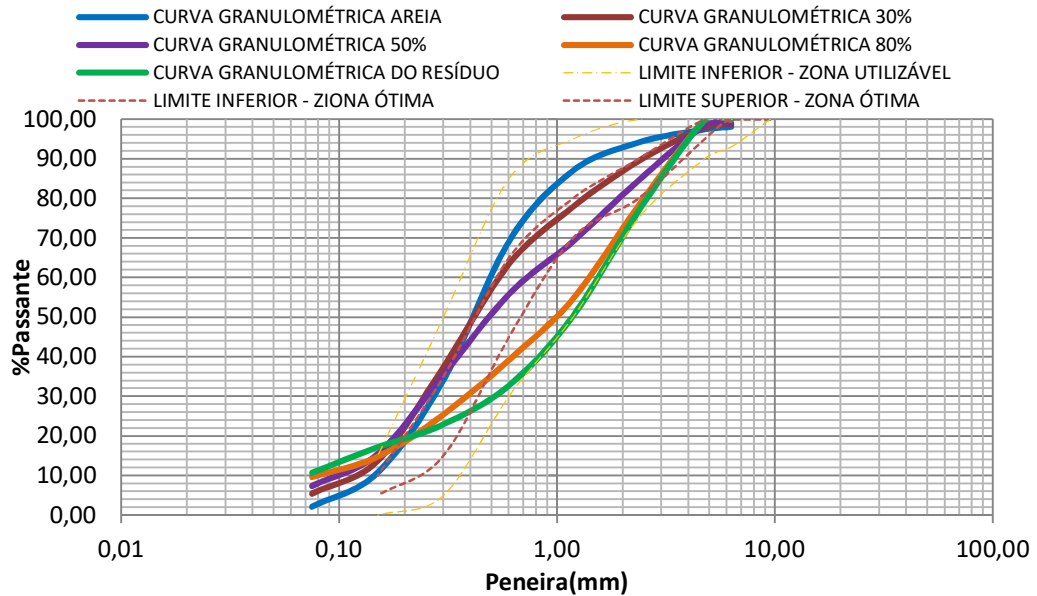
Fonte: Adaptado pelo Autor por informações do fabricante MIZU (2019)

### A.3) Influência da substituição da areia por RCL

A Figura 19 apresenta o gráfico das curvas granulométricas das cinco composições das misturas: 1 (100% AREIA + 0% RCL); 2 (70% AREIA + 30% RCL); 3 (50% AREIA + 50% RCL); 4 (20% AREIA + 80% RCL); e 5 (0% AREIA + 100% RCL). Todas elas se encontram dentro da zona utilizável; no entanto, as curvas resultantes das composições 1, 2 e 3 apresentaram distribuição granulométrica mais adequada, muito próxima à faixa ótima para agregados miúdos, ou seja, as dimensões das partículas abrangem uma extensa faixa de valores, no qual resulta em uma curva granulométrica suave, apresentando uma concavidade típica dos materiais bem graduados. Já as curvas das proporções 4 e 5 apresentaram comportamento diferente, a medida em que a composição contém uma maior quantidade de resíduo a curva vai se distanciando da zona ótima.

A Tabela 5 apresenta resultados do ensaio da distribuição granulométrica e da massa unitária compactada da composição de todos os teores de misturas. Observa-se que todas as misturas analisadas apresentaram dimensão máxima de 4,75mm e que o módulo de finura foi variado, ou seja, a medida em que o material contém mais resíduo seu módulo de finura aumenta. Quanto maior o módulo de finura, mais grossa é a granulometria.

**Figura 19 - Curvas Granulométricas resultantes das misturas/proporções de areia e RCL**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

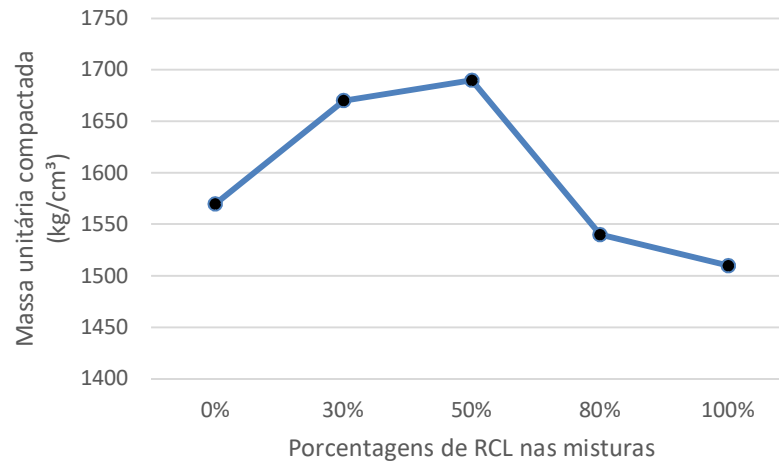
Em relação a massa unitária compactada, houve um aumento dessa compactação nas misturas 2 e 3 (30% e 50% de resíduo), porém a massa unitária compactada diminuiu na mistura 4 (80% de resíduo) e, principalmente na composição 5 (100% de resíduo). Isso sugere que o concreto pode ter um melhor empacotamento nas proporções 2 e 3 (30% e 50% de resíduo). A Figura 20 apresenta as massas unitárias compactadas das proporções das misturas entre a areia e resíduo.

**Tabela 5 - Resultados da caracterização granulométrica e de massa unitária compactada das misturas**

Traço	%de substituição	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura (%)	Massa unitária compactada (kg/cm <sup>3</sup> )
1	0%	4,75	2,1	1570
2	30%	4,75	2,2	1670
3	50%	4,75	2,4	1690
4	80%	4,75	2,9	1540
5	100%	4,75	3,0	1510

Fonte: Elaborador pelo Autor (2020)

**Figura 20 - Massas unitárias compactadas das misturas/proporções entre a areia e RCL**



Fonte: Elaborador pelo Autor (2020)

Observa-se da Figura 20 que há uma ascensão nos valores das massas unitárias até a proporção 3 (50% RCL) e depois ocorre uma queda acentuada para a proporção 4 (80% RCL), e, em seguida, uma queda suave para a proporção 5 (100% RCL). Portanto, isso demonstra que há um intervalo entre as proporções de 50% e 80%, em que as partículas dos agregados fiquem mais bem arrançadas entre si, gerando um menor volume de vazios e deixando-os mais compactados, o que melhoraria a resistência à compressão simples do concreto.

## **B) Estudo da dosagem experimental e definição dos traços para confecção de corpos de prova**

Neste trabalho, o estudo de dosagem experimental do concreto seco foi obtido com base no método de dosagem ACI/ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Tal método foi escolhido pelo fato dos materiais apresentarem características apropriadas em relação aos requisitos exigidos pelo método. Este método pode ser adotado apenas quando se tem agregado miúdo retirado de rios e agregado graúdo proveniente de processos industriais de britagem, características estas dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Helene e Tutikian (2011) afirmam que no Brasil, ainda não há um consenso de como deve ser um estudo de dosagem e, a falta de uma norma brasileira tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos. Quando se trata de concreto seco a literatura sobre o assunto é mais escassa. Há poucos estudos sobre dosagem do concreto seco, logo algumas observações e adaptações nos métodos de dosagem foram necessárias nesta pesquisa, para alcançar os objetivos do trabalho.

Para a utilização do referido método fez-se necessária uma prévia designação das características dos materiais utilizados e do concreto seco, conforme apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Características dos materiais e concreto seco**

<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>Concreto</b>
Tipo: CP V ARI RS	MF= 2,1	Dmáx = 19 mm	Fck = 20 MPa
Massa Esp. = 3120 kg/m <sup>3</sup>	Massa Esp. = 2620 kg/m <sup>3</sup>	Massa Esp. = 2670 kg/m <sup>3</sup>	Abatimento = 0
Resist. Aos 28 dias: 47 MPa (NBR 16697)	Massa Unit comp. = 1590 kg/m <sup>3</sup>	Massa Unit. Comp = 1540 kg/m <sup>3</sup> Massa unit.solta = 1350 kg/m <sup>3</sup>	Condição B = 5,5

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Com as características dos materiais e do concreto já definidos foi estabelecida uma resistência para dosagem do concreto em função do desvio padrão aos 28 dias, segundo a NBR 6118/2014, e em seguida determinado o consumo dos materiais. As etapas foram as seguintes:

- a) Fixar a relação água/cimento (utilizando-se o gráfico de resistência normal - requer o conhecimento do tipo de cimento utilizado e a resistência de dosagem requerida);
- b) Determinar o consumo aproximado de água do concreto, utilizando o quadro de consumo de água aproximado (necessita da dimensão máxima característica do agregado graúdo e da consistência desejada);
- c) Determinar o consumo de cimento - o consumo de cimento é a relação entre o consumo de água e a relação água cimento;
- d) Determinar o consumo de agregados.

A definição dos traços foi obtida pelo método da ABCP, sendo inicialmente definido o Traço de Referência (TR) e posteriormente os traços de substituição do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado miúdo artificial (resíduo de calcário laminado - RCL). Assim, o traço em massa de referência utilizado neste estudo é apresentado na Tabela 7, dosado para atingir resistência de 20 MPa, a partir da resistência característica do concreto definida para estacas que, segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), deve ser de fck=20 MPa. Para melhor compreensão, o traço foi detalhado na Tabela 8.



**Tabela 7 - Traço de Referência**

Cimento	Areia	Brita	Água
1	2,50	2,96	0,54

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

**Tabela 8 - Consumo de Materiais em kg de Concreto no TR (para 1m³)**

Materiais	Consumo (kg/m³)
Cimento	342,6
Areia	854,12
Brita	1012,5
Água	185

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Após a definição do traço de referência (0% de resíduo) foram calculados os traços individuais com os valores das substituições de parte do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado miúdo artificial (Resíduo de Calcário Laminado - RCL) nas porcentagens de 30%, 50%, 80% e 100%. Foi realizado o cálculo do consumo de material para cada traço, levando em consideração a quantidade necessária para confeccionar 30 corpos de provas em tamanhos pré-estabelecidos. Assim, os cinco traços definidos para o experimento estão apresentados na Tabela 9. Optou-se por alterar apenas a variável de substituição dos agregados miúdos, mantendo-se constante seu peso, o da brita, do cimento e sem modificar a composição água/cimento.

**Tabela 9 - Traços definidos para o experimento, em massa**

Traço	% da substituição	Composição (kg)				
		Cimento	Areia	RCL	Brita	Água
1	0%	3,38	8,45	0,00	10,0	1,82
2	30%	3,38	5,91	2,53	10,0	1,82
3	50%	3,38	4,22	4,22	10,0	1,82
4	80%	3,38	1,69	6,76	10,0	1,82
5	100%	3,38	0,00	8,45	10,0	1,82
Consumo total (kg)		16,89	20,27	21,96	50,0	9,12

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Por se tratar da produção de concreto seco, algumas observações e adaptações para a moldagem dos corpos de prova foram necessárias para o alcance dos objetivos. Para tanto, a moldagem dos corpos de prova do concreto foi baseada na NBR 7182/2016 e a cura ocorreu de acordo com a NBR 5738/2015, que regulamenta o procedimento para o ensaio de compactação e cura dos corpos de prova de concreto, respectivamente. O procedimento para a mistura,

modalagem e cura dos corpos de prova foi realizado no laboratório de materiais de construção da UFCA e consistiu nas etapas descritas a seguir.

1. separação do material e pesagem;
2. colocação de parte da água;
3. acréscimo de todo o agregado graúdo;
4. mistura dos materiais em betoneira por cerca de 1 (um) minuto;
5. adição do cimento;
6. colocação do agregado miúdo;
7. acréscimo do resíduo;
8. adição do restante de água e;
9. mistura mecânica em betoneira, por aproximadamente 5 minutos.

A Figura 21 demonstra as etapas de execução das misturas na betoneira, na qual tem seu eixo inclinado e contém capacidade de 120 l. É importante salientar que todo o processo de pesagem, transporte, operação e manuseio foi inteiramente manual.

**Figura 21 - Etapas da execução da mistura: proporção dos materiais pesados (cimento, areia, brita, água e RCL) (a); lançamento dos materiais na betoneira (b); mistura dos materiais (c); aspecto do concreto seco(d)**



Fonte: O Autor (2020)

Por se tratar de concreto seco, foi necessário utilizar o molde cilíndrico utilizado no ensaio de compactação de solo, com dimensões próximas das dimensões mínimas (10 cm de diâmetro de 20 cm de altura) recomendadas pela NBR 5378/2015 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Sendo assim, a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples foi realizada em um molde cilíndrico metálico de 10 cm de diâmetro e 18 cm de altura, disposto no laboratório de Mecânica dos Solos. Para atingir essa altura utilizou-se um anel complementar de 6 cm de altura e mesmo diâmetro do molde, e uma base metálica com dispositivo de fixação ao molde cilíndrico e ao anel complementar (Figura 22). Ao todo foram moldados 06 corpos de prova para cada traço estudado, totalizando 30 corpos de prova.

A moldagem dos corpos de provas seguiu os requisitos da ABNT NBR 7182/2016 (Solo – Ensaio de compactação), ou seja, os corpos de provas do concreto seco foram compactados na energia de Proctor Normal, assim como foi a execução da estaca no campo experimental. As moldagens foram feitas dinamicamente, em 5 camadas de concreto e 22 golpes em cada camada sendo a compactação realizada com soquete metálico cilíndrico de peso 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,8cm (Figura 23) a fim de atingir a energia normal de compactação, no valor de  $6\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ , conforme apresentada na Equação 1.

**Figura 22 - Aparelho para moldagem: molde metálico, cilindro complementar e base metálica**



Fonte: O Autor (2020)

$$E_c = M \times H \times N \times N_c / V \quad (1)$$

Sendo:

$E_c$  = energia de compactação, por unidade de volume ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ );

$M$  = massa do soquete (kg);

$H$  = altura de queda do soquete (cm);

$N$  = número de golpes por camada;

$N_c$  = número de camadas;

$V$  = volume da amostra compactada ( $\text{cm}^3$ ).

**Figura 23 - Moldagem do corpo de prova com adensamento compactado**



Fonte: O Autor (2020)

Após a compactação da última camada, foi feita a regularização da superfície dos corpos de prova com a borda do molde com colher de pedreiro. Concluído o processo de moldagem, os corpos de prova foram imediatamente extraídos do molde, na qual isso foi permitido devido sua característica seca. Em seguida, os mesmos CP's foram identificados e armazenados em uma superfície plana, protegidos de intempéries. Após a cura inicial de 24 horas, os corpos de prova foram imersos em água para cura, nos quais permaneceram até obter as idades de 7 e 28 dias para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples. Os procedimentos de extração e cura dos corpos de prova estão apresentados na Figura 24 (a, b e c).

**Figura 24 - Procedimento de extração, identificação e cura dos corpos de prova: extração do corpo de prova (a); corpos de prova identificados (b); cura (c)**



Fonte: O Autor (2020)

### **C) Ensaio de resistência à compressão simples**

Depois de atingida a quantidade de dias necessária para cura dos corpos de prova, antes do ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de provas passaram por um processo

de preparação de suas bases, como recomenda a NBR 5738/2015. Portanto, a preparação das bases foi feita por retificação.

A retificação consiste na retirada, de forma mecânica, de uma fina camada das superfícies do material, possibilitando assim atingir uma superfície lisa perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova. O processo de retificação e o corpo de prova retificado podem ser vistos na Figura 25. Esse processo de retificação dos corpos de prova foi realizado na empresa Polimix Concreto Ltda, localizada no município de Barbalha/CE. Após a retificação, os corpos de prova foram colocados diretamente sobre o prato inferior da prensa, centrados em relação ao eixo do carregamento e executado o ensaio de resistência à compressão simples.

**Figura 25 - Processo de retificação do corpo de prova: retificação do corpo de prova (a); aspecto do corpo de prova retificado (b)**



Fonte: O Autor (2020)

A cada idade de ruptura, três corpos de prova, de cada traço, foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, sendo 15 corpos de prova rompidos aos 7 dias e 15 corpos de prova rompidos aos 28 dias.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado segundo a norma NBR 5739/2017. O equipamento utilizado para a ruptura foi uma máquina de marca SOLOTEST, modelo 1501220, com capacidade de 100 t, disponível no laboratório de materiais de construção da UFCA. A Tabela 10 resume a quantidade de corpos de prova utilizada na pesquisa. Para a execução do ensaio, os corpos de prova estavam com as superfícies limpas e foram colocados de maneira centralizada com relação aos pratos da prensa, conforme Figura 26.

**Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova em relação ao tempo de ensaio**

Traço	%de substituição	Quantidade de cps para 7 dias	Quantidade de cps para 28 dias	Quantidade de cps por traço
1	0%	3	3	6
2	30%	3	3	6
3	50%	3	3	6
4	80%	3	3	6
5	100%	3	3	6
Número de corpos de prova		15	15	30

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

**Figura 26 - Rompimento do corpo de prova do concreto**

Fonte: O Autor (2020)

O carregamento para a compressão axial foi aplicado continuamente com velocidade de carregamento de 0,4 MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

Nos ensaios realizados neste trabalho, o tempo excedido foi de no máximo de duas horas para cada idade, o que demonstra está conforme o tempo de tolerância para rompimento de corpos de prova da NBR 5739/2018, descrita na Tabela 11. Para a análise dos resultados, utilizou-se uma estatística descritiva, no qual os dados foram sintetizados de maneira direta, preocupando-se menos com variações e intervalos de confiança dos dados.

**Tabela 11 - Tolerância de tempo de ensaio em função da idade**

Idade de ensaio	Tolerância permitida (h)
7 dias	6
28 dias	24

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018).

#### D) Definição da porcentagem de substituição da areia por resíduo

A partir dos resultados dos ensaios com o concreto padrão, foram feitas as substituições em massa, do agregado miúdo natural pelo RCL nas quantidades de 30%, 50%, 80% e 100%. Estes traços foram ensaiados visando a obtenção de um teor ótimo de substituição, para a confecção das estacas apiloadas de comprimento  $L = 5$  m e com diâmetro de 0,15m. Assim, a escolha da melhor composição para a execução das estacas foi baseada pela curva granulométrica, massa unitária compactada e resistência à compressão simples das proporções de mistura correspondente a cada traço.

### 3.3 Atividades de Campo

As atividades de campo compreenderam a segunda etapa da pesquisa, constando das seguintes atividades: (A) limpeza do campo experimental e preparação dos materiais; (B) execução de estacas escavadas apiloadas; e (C) realização das provas de carga estática. As atividades realizadas e as técnicas e métodos que foram empregados nas atividades são descritas a seguir.

#### A) Limpeza do campo experimental e preparação dos materiais

Para a execução das estacas e da prova de carga destinadas a pesquisa, foi necessário a remoção da camada vegetação superficial (mato e pequenos arbustos) e a retirada de materiais indesejáveis (pedras e entulho em geral), que se encontrava no local. A topografia do terreno era levemente inclinada, assim necessitou de um nivelamento para deixar o terreno plano. Para a limpeza e preparação do terreno foi necessário o uso de enxada, pá e carrinho de mão. Por conseguinte, os materiais e os equipamentos necessários para a execução das estacas foram encaminhados para o Campo Experimental, conforme apresentados na Figura 27 (a e b).

**Figura 27 - Materiais (a) e equipamentos para execução das estacas**



Fonte: O Autor (2020)

## B) Execução das estacas

### B.1) Características das estacas

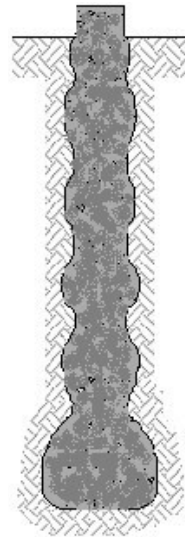
A fim de analisar o comportamento do resíduo de calcário laminado na estaca e compará-lo com uma estaca executada com materiais convencionais, foram executadas duas estacas apiloadas no Campo Experimental. As duas estacas tiveram comprimento de 5 m e 0,15 m de diâmetro (Figura 28). Dessa maneira, utilizou-se o diâmetro mínimo da estaca recomendado pela NBR 6122/2019, no valor de 150 mm. Em relação a profundidade, optou-se por 5 m, para que a estaca ultrapassasse a camada ativa do local estudado, que corresponde a profundidade de 3 metros, conforme encontrado por Xavier (2018). As estacas foram denominadas de EA1, para a estaca feita de concreto seco convencional, e EA2, para estaca feita de concreto seco com resíduo. A Figura 29 ilustra um corte esquemático da estaca apiloadada.

**Figura 29 - Características geométrica do fuste da estaca**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

**Figura 28 - Esquema da estaca apiloadada**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

### B.2) Materiais e equipamentos necessários

Para a abertura do furo das estacas foi utilizado um trado tipo IPT de 150 mm de diâmetro. Para a concretagem foi utilizado um tubo de revestimento de diâmetro de 150 mm, um tripé e um soquete para o apiloamento do concreto seco. O tubo de revestimento do tipo PVC de comprimento de 5 m foi dividido em duas partes iguais (2,5 m cada) e em seguida foi colocado uma luva de 150 mm entre as duas partes do tubo para conectá-los. Isso se fez necessário, pois, a medida que o concreto era lançado, uma parte do tubo era retirada. Caso contrário, não seria possível retirar o tubo no comprimento de 5 m, pois tocaria no tripé e impediria a concretagem.



O tripé é formado por tubos metálicos desmontáveis e apresenta altura da ordem de 6,0 m. O soquete tinha o formato cilíndrico de comprimento de 42 cm (considerando sua base até a alça) acoplado a uma base de diâmetro de 14 cm constituído de dois dispositivos de fixação ao cilíndrico, sendo o peso do soquete de 25 kg e da base de 3,70 kg, totalizando 28,70 kg ao todo (Figura 30). O soquete foi confeccionado em uma metalúrgica da região em relação as características da estaca com a finalidade de atender o seu uso.

**Figura 30 - Soquete com peso de 28,70 kg**

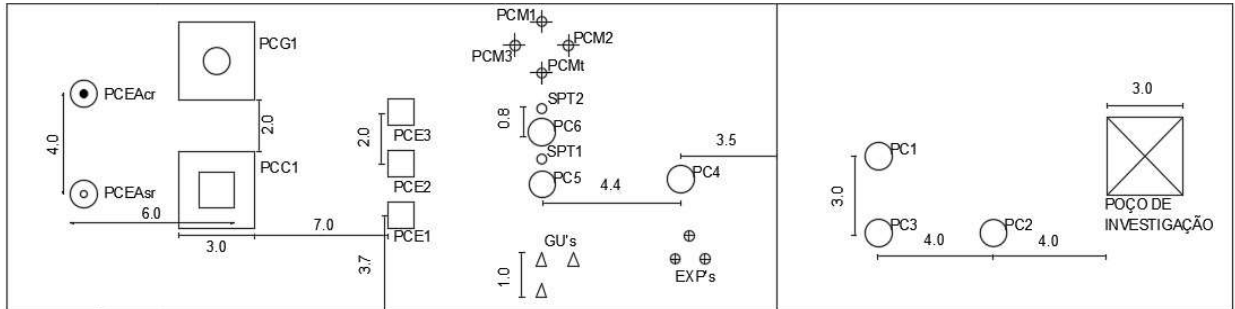


Fonte: O Autor (2020)

### *B.3) Locação das estacas*

Inicialmente, foi feita a locação das estacas. As duas estacas foram locadas no sul do Campo Experimental, espaçadas de 4 m de uma a outra, distante de 6 m das fundações diretas executadas por Tavares (2019) e próximas das estacas de Gonçalves (2017), que por sua vez foram adotadas suas dimensões e seus resultados para fins de comparação com este trabalho. Esta distância foi adotada tendo em vista a necessidade de espaço para montagem de equipamentos para a concretagem, bem como para o ensaio de prova de carga. O croqui de localização das estacas apiloadas desta pesquisa e a locação dos ensaios realizados anteriormente no local está indicado na 31. A Figura 32 mostra o processo de locação das estacas.

**Figura 31 - Layout do campo experimental - Locação das estacas apiloadas e dos ensaios executados em pesquisa anterior**



LEGENDA

- |   |  |
|---|--|
| Prova de carga em estaca (PCEi)   | Ensaio de sondagem SPT (SPTi)                |
| Prova de carga em placa com geossintético (PCGi)                            | Ensaio com expansocolapsometro (EXPi)        |
| Prova de carga em placa com solo compactado (PCCi)                          | Ensaio de prova de carga em miniatura (PCMi) |
| Prova de carga em estaca apiloada com resíduo de calcário laminado (PCEAcr) | Permeabilidade com Guelph (GUi)              |
| Prova de carga em estaca apiloada sem resíduo (PCEAsr)                      | Prova de carga em placa (PCi)                |

Fonte: Modificado de Tavares (2020)

**Figura 32- Demarcação das estacas**



Fonte: O Autor (2020)

#### B.4) Método de execução da estaca

Definido o local de execução das estacas foi realizada a escavação de uma cava, com diâmetro de 1,0 m e profundidade de 0,5 m (Figura 33a), e em seguida foi posicionada uma manilha de concreto (Figura 33b), com a finalidade de proporcionar estabilidade às paredes da escavação.

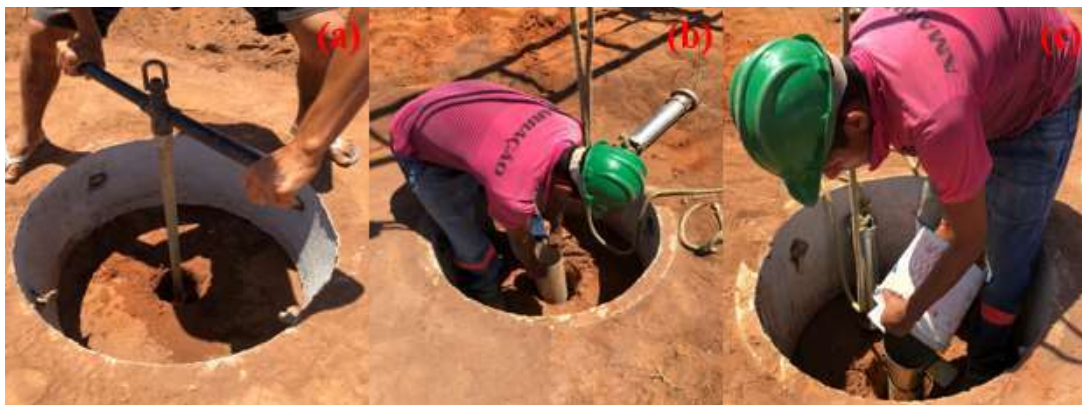
**Figura 33 - Escavação da cava (a); manilha posicionada na cava (b)**



Fonte: O Autor (2020)

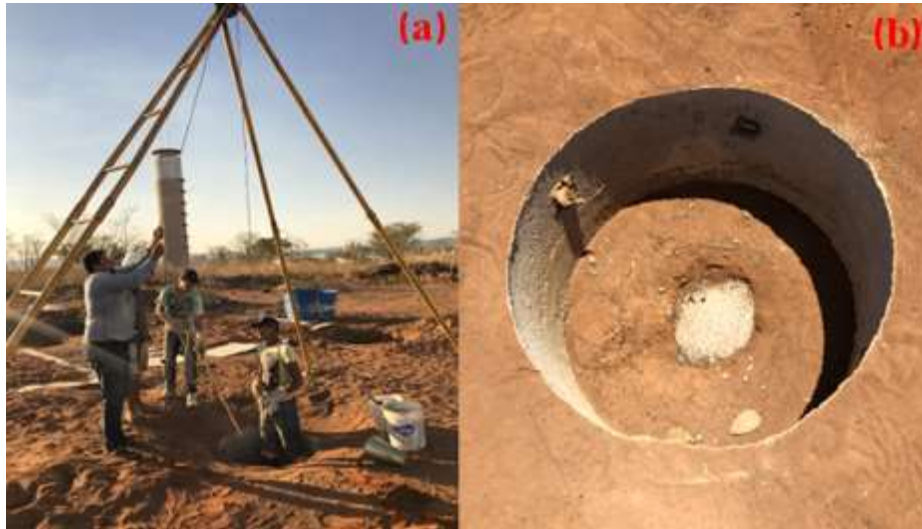
Por conseguinte, foi realizada a perfuração do fuste com equipamento de escavação manual (trado do tipo IPT, Figura 34a), até a profundidade desejada de 5,0 m e diâmetro 15 cm. Após a abertura do furo, foi introduzido o tubo de revestimento (Figura 34b), lançado o concreto (Figura 34c), e em seguida realizado o apiloamento das camadas da estaca, com retirada simultânea e parcial do tubo de revestimento. O apiloamento da estaca foi composto de 25 camadas de 20 cm cada, com posterior apiloamento de 8 golpes com o soquete de 14 cm de diâmetro, peso de 28,70 kg e a altura de queda de 1,0 m, até o preenchimento total da estaca (Figura 35a). Para o preenchimento de cada camada foi lançada uma quantidade de concreto que preenchia 80 cm de fuste, pois, após o apiloamento, a camada concretada era reduzida para 20cm. Para tanto, foi lançada a quantidade de 13 kg de concreto seco por camada, totalizando 325 kg de concreto por estaca. Após o final foi feito o nivelamento das cabeças das estacas (Figura 35b).

**Figura 34 - Perfuração do fuste (a); introdução do tubo de revestimento (b); lançamento do concreto (c)**



Fonte: O Autor (2020)

**Figura 35 - Concretagem da estaca apiloada (a); Estaca concretada (b)**



Fonte: O Autor (2020)

O processo de apiloamento do concreto foi utilizado com o objetivo melhorar o comportamento mecânico das estacas (maior capacidade de carga e rigidez), através do alargamento da base e da formação de pequenos bulbos laterais ao longo do fuste, melhorando o atrito lateral e a resistência de ponta.

Para melhor compreensão, a sequência a seguir resume a execução deste tipo de estaca:

- Locação da estaca;
- Escavação da cava;
- Posicionamento da manilha de concreto;
- Perfuração do fuste;
- Introdução do tubo de revestimento;
- Apiloamento das camadas da estaca, com retirada simultânea e parcial do tubo de revestimento;
- Nivelamento do topo da estaca.

#### *B.5) Preparação do sistema de inundação das estacas*

Após a execução das estacas foi feita a preparação do sistema de inundação, para que a estaca fosse submetida a uma inundação, a partir da superfície, de todo comprimento do fuste, posteriormente à conclusão do ensaio de prova de carga da estaca no solo natural, com objetivo de analisar o comportamento de colapso do solo devido ao aumento do teor de umidade.

Para o sistema de inundação foi necessária a confecção de três furos para cada estaca, dois para os drenos verticais e um para a instalação de um sensor para detectar o umedecimento do solo, todos até a profundidade de 5 m (Figura 36), correspondente ao comprimento da estaca. Foi necessário escavar em torno de 20 cm para expor a cabeça da estaca para posterior formação do tapete drenante e para facilitar a realização da montagem do sistema de reação.

**Figura 36 - Furos dos drenos e do sensor**



Fonte: O Autor (2020)

Para a confecção dos drenos, foram abertos dois furos no entorno da estaca, com um trado concha de 5 cm de diâmetro, distante 30 cm da estaca, dispostas uma cava a direita, e a outra a esquerda da estaca. Em seguida os dois drenos foram preenchidos com brita, bem como foi formado um tapete drenante na superfície da estaca, deixando um espaçamento de 10 cm entre a camada de brita e o topo da estaca. O objetivo da confecção dos drenos composto por brita foi o de possibilitar a infiltração e percolação da água mais rápida e homogênea até a profundidade da estaca, de modo que todo o solo do entorno da estaca estivesse devidamente umedecido e/ou saturado, simulando situações críticas, como a ocorrência de um evento pluviométrico de grande volume, uma elevação no nível do lençol freático ou até mesmo o vazamento de tubulações próximas da estaca.

Para a instalação do sensor foi utilizado um trado concha de 10 cm de diâmetro para abrir um furo com profundidade de 5 m. O sensor foi composto por dois plugs instalados nas extremidades de um fio de 6 m de comprimento, envelopado por uma mangueira transparente de 10 mm. Após atingir a profundidade desejada do furo, o sensor foi instalado e em seguida aterrado com o próprio solo da escavação, de modo que uma extremidade do fio ficasse em contato com o solo na profundidade de 5 m abaixo da superfície e a outra extremidade acima da

superfície, conectado ao equipamento central de alarme. Sendo assim, a água ao entrar em contato o plug na profundidade de 5 m com umidade acarretou-se o disparo do alarme, a qual é confirmada a partir de um sinal luminoso e um sinal sonoro. O tapete drenante com brita e a instalação do sensor estão apresentados na Figura 37.

**Figura 37 - Tapete drenante de brita e sensor instalado**



Fonte: O Autor (2020)

Para a inundação superficial foi utilizada uma mangueira conectada a um ponto da rede de abastecimento de água nas proximidades do campo experimental, cuja água é oriunda de um poço artesiano. Para garantir vazão e lâmina de água constantes, foi utilizado um registro, com o qual foi possível controlar o fluxo.

### **C) Ensaios de prova de carga**

Após a cura de 28 dias do concreto das estacas foram realizadas as provas de carga, a fim de verificar a capacidade de carga das estacas, nas condições de no solo na umidade natural e submetido à inundação. Estas estacas foram submetidas a provas de carga estática por esforço axial de compressão pelo método ensaio lento com base na NBR 12131/2006.

Para a execução das provas de carga deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Caminhão betoneira carregado: como sistema de reação foi utilizado um caminhão betoneira de 13 t, e possui dois eixos. O caminhão foi carregado com 10 t de brita, e o sistema de carregamento passou-se a atingir uma carga maior, em torno de 23 t.
- b) Macaco hidráulico e célula de carga: utilizou-se um macaco hidráulico com capacidade de carga de 50 t e uma célula de carga com capacidade para 500 kN e precisão de 10 N.

O sistema foi montado sobre uma placa de aço, que por sua vez era assentada diretamente sobre a cabeça nivelada da estaca.

- c) Placa de aço e bases magnéticas: a placa de aço utilizada tem 60 cm de diâmetro e 20 cm de espessura. Para aumentar a altura de forma a garantir o nível do eixo do caminhão foram colocados alguns pesos entre a placa de aço e a célula de carga.
- d) Extensômetros: Foram utilizados dois extensômetros de resolução de 0,01 mm de cursor total de 50 mm, montados em dois pontos diametralmente opostos.
- e) Rótula: para manter a verticalidade da carga.
- f) Viga de referência: para fixação dos instrumentos de medição e referência para leitura dos recalques.

De posse dos equipamentos no campo experimental, a placa de aço de 60 cm foi posicionada em cima da cabeça da estaca, no qual foi nivelada e concêntrica à cava. Para aumentar a altura de forma a garantir o nível do eixo do caminhão foram colocados alguns pesos entre as placas e a célula de carga. Logo em seguida foi posicionado o macaco hidráulico e posteriormente foi utilizada uma rótula, para garantir a verticalidade dos carregamentos. Todos esses componentes juntos formaram o sistema de transmissão de carga (Figura 38).

**Figura 38 - Sistema de transmissão de carga**



Fonte: O Autor (2020)

As leituras dos recalques foram realizadas com dois extensômetros mecânicos da marca Digimess, com precisão de 0,01 mm e um cursor total de 50 mm. Foram espaçados com uma distância entre si de 120°, no qual estavam em contato com hastes conectadas a placa. Durante o ensaio, com o recalque da estaca, as hastes dos extensômetros registravam as medidas de recalque (de 0 mm até 50 mm).

Os extensômetros foram fixados em bases magnéticas, sendo essas, por sua vez, fixadas em uma viga de madeira, de aproximadamente 2 m de comprimento, adotada como viga de referência, tendo em vista reduzir ao máximo as interferências externas. Junto à viga de madeira foi fixada uma cantoneira de aço de aproximadamente 30 cm de comprimento, com o intuito da melhor fixação das bases magnéticas. A viga foi apoiada e fixada sob o solo, de tal forma que permanecesse imóvel. A Figura 39 mostra os extensômetros usados para leitura dos recalques.

**Figura 39 - Extensômetros**



Fonte: O Autor (2020)

A realização das provas de carga seguiu as recomendações da NBR 12131/2006 e compreendeu basicamente as seguintes etapas:

- a) Instalação do sistema de reação (constituído por um caminhão betoneira + carregamento);
- b) Calibração da célula de carga e dos extensômetros usados para a aquisição dos dados;
- c) Preparação e montagem do ensaio;
- d) Aplicação dos carregamentos por estágio, até a carga de 10 t na estaca apiloada com resíduo e em seguida descarregamento até 5,0 t, com posterior inundação de todo fuste da estaca;
- e) Aplicação do carregamento por estágio, até a carga de 10 t na estaca apiloada sem resíduo com posterior inundação de todo fuste da estaca;
- f) Desmontagem do ensaio.

Os ensaios de prova de carga foram realizados para simular uma situação de uma fundação profunda apoiada em solo colapsível no estado natural, submetida a um posterior umedecido. Diante desse cenário, os ensaios foram realizados em dezembro de 2018, data essa em que a região se encontra no período seco, que é caracterizado entre os meses de julho a dezembro.



Diante disso, os carregamentos foram aplicados em estágios iguais e sucessivos e o incremento de carga não foi superior a 20% da carga admissível estimada. Cada estágio de carregamento foi mantido até a estabilização dos deslocamentos. As leituras dos deslocamentos, em cada estágio, foram feitas nos tempos 2; 4; 8; 15 e 30 minutos, conforme a NBR 12131/2006. Caso não houvesse deslocamentos maiores que 5% entre as leituras de 15 e 30 minutos, aplicava-se um novo carregamento com o devido incremento de carga; caso contrário, era necessário que fossem aguardados mais 30 minutos para a próxima leitura. Após a estabilização dos recalques, iniciava-se o próximo carregamento e assim, sucessivamente, até completar o carregamento referente ao valor de carga prevista.

O descarregamento foi feito, retirando-se o carregamento do último estágio de 10T para 8 t, 6 t e 5 t, com as leituras realizadas nos tempos 2; 4; 8; 15 e 30 minutos.

Após a estabilização dos recalques na carga de 5 t da estaca apiloada com resíduo, e de 10 t na estaca apiloada sem resíduo procedeu-se à inundação do solo no entorno da estaca, via drenos verticais (Figura 40) e após 24h de inundação foi mantida a carga e medidos os recalques.

**Figura 40 - Inundação do solo no entorno da estaca**



Fonte: O Autor (2020)

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em seis corpos de prova, para cada um dos cinco traços analisados. Para tanto, utilizou-se a estatística descritiva para a análise dos resultados, sendo realizados ensaios aos 7 e 28 dias de cura dos corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 12.

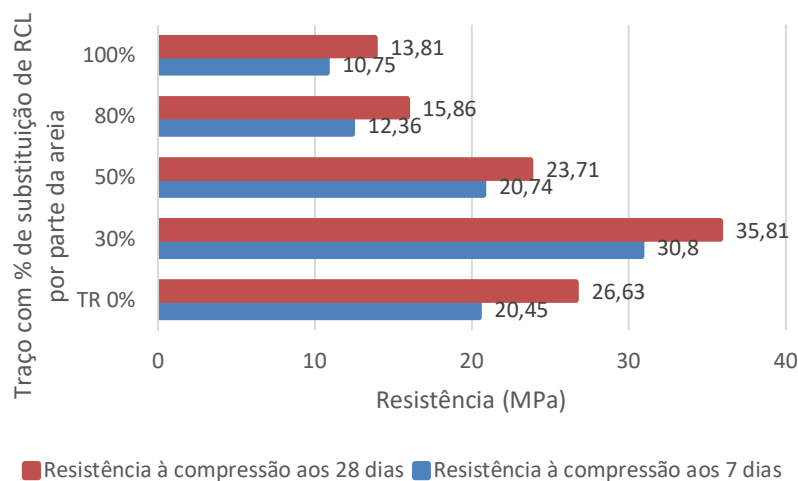
**Tabela 12 - Médias dos resultados da resistência característica do concreto a compressão**

Traço	%de substituição	fck médio aos 7 dias (MPa)	fck médio aos 28 dias (MPa)
1	0%	20,45	26,63
2	30%	30,80	35,81
3	50%	20,74	23,71
4	80%	12,36	15,86
5	100%	10,75	13,81

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Analisando a Tabela 12 verifica-se que o concreto de referência (1 - 0% RCL) apresentou uma resistência aos sete dias de 20,45 MPa e aos vinte e oito dias de 26,63 MPa, superior ao esperado para este traço, que era de cerca de 20 MPa. Assim, o traço padrão atendeu à expectativa de dosagem quanto à elaboração de um concreto seco que atendesse os 20 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os dados mostrados na Tabela estão apresentados na Figura 41 em forma de gráfico de barras.

**Figura 41 - Variação da resistência à compressão simples dos corpos de prova**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Analisando a Figura 41 observa-se que as substituições de parte da areia pelo resíduo de calcário laminado, nas porcentagens de 30% e 50% apresentaram resistências superiores a 20 MPa, aos 7 e 28 dias de cura.

Aos sete dias de cura, o traço com 30% de RCL apresentou resistência de 30,80 MPa. Porém nesta idade, o traço com 50% de RCL atingiu o segundo melhor desempenho (20,74 MPa), com diferença de 32,66% em relação ao primeiro.

Em relação à resistência à compressão simples dos corpos de prova produzidos nos traços com 80% e 100% de RCL, verificou-se queda considerável nos valores obtidos, à medida que se aumentou a porcentagem de resíduo. Pode-se inferir que a queda ocorreu devido ao deficiente empacotamento granular, com a inclusão de maior quantidade de resíduo, no qual apresentou vazios e descontinuidades no concreto observados tanto na moldagem dos corpos de prova, quanto nos resultados de massa unitária compactada, conforme demonstrado na Figura 40. Outro fato que pode ter contribuído trata-se da própria resistência mecânica do calcário laminado, que é inferior à resistência da areia, o que resulta na diminuição da resistência a compressão simples do concreto.

Aos vinte e oito dias de cura, os corpos de prova com 50% de resíduo apresentaram resistência média de 23,71MPa, enquanto os corpos de prova com 30% de RCL apresentaram resistência média final de 35,81 MPa. As demais substituições apresentaram resistências inferiores a 20 MPa. É importante destacar que as resistências a compressão simples, dos corpos de prova produzidos com 50% de resíduo, apresentaram valores próximos das resistências dos corpos de prova sem resíduo, tanto aos 7 dias de cura quanto aos 28 dias.

Observa-se que os valores de resistência do concreto, das misturas de 30% e 50% de resíduo, foram superiores ao valor de resistência do material proposto para execução das estacas (20 MPa), sendo assim, verificou-se que ao utilizar qualquer uma dessas proporções de mistura, a estaca suportaria a carga máxima que seria utilizada no ensaio de prova de carga estática, no valor de 10 t. Nestas condições, optou-se pela execução da estaca no campo com 50% de resíduo, visando um maior volume de aproveitamento do material que é depositado de maneira inadequada no meio ambiente.

Quando comparados aos resultados de referência aos 28 dias de idade, nota-se que há uma diferença positiva de 26,63% (aprox. 9,18 MPa) nos corpos de prova contendo 30% de resíduo. Essa diferença de resistências tão significativa pode estar ocorrendo devido a uma melhora do empacotamento das partículas do concreto em função granulometria e da massa unitária compactada da mistura.

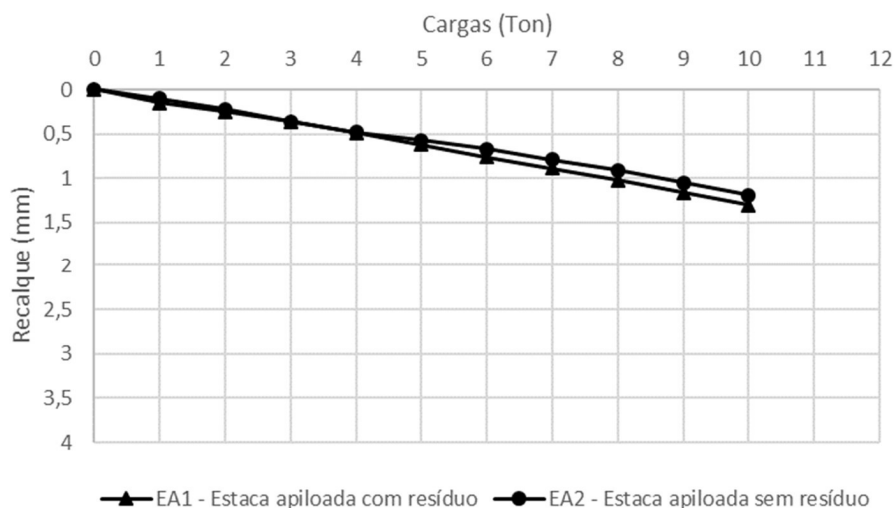
Apesar da substituição de 80% e 100% de areia por resíduo de calcário laminado não produzir concretos de resistência adequada para produção de estacas em estudo, esses traços poderão ser utilizados como enchimentos, contrapiso, calçadas e fabricação de peças pré-moldadas de caráter não estrutural, como placas ou blocos de concreto para alvenarias de vedação, meio fios, intertravados, sarjetas, dentre outros, conforme presente na NBR 15116/2004.

## 4.2 Prova de carga

No Campo Experimental da UFCA foram realizados dois ensaios de provas de carga, sendo um ensaio executado na estaca apiloada, utilizando materiais convencionais, e outro realizado na estaca utilizando 50% de resíduo em substituição da areia.

Primeiramente os ensaios foram realizados com o solo na umidade natural, no período seco da região (dezembro/2019), onde o solo apresentava umidade média variando de 5,58% a 5,80%. A carga máxima aplicada nos ensaios foi de 10 t. Nessa carga os recalques medidos nas duas estacas foram semelhantes, nos valores de 1,3 mm para a estaca com resíduo e de 1,19 mm para a estaca sem resíduo, ou seja, o resíduo utilizado na produção do concreto praticamente não alterou a resistência da estaca, atendendo aos requisitos da capacidade de carga estrutural. A Figura 42 apresenta a curva carga x recalque das duas estacas ensaiadas.

**Figura 42 - Curva x recalque das estacas ensaiadas em solo na umidade natural**



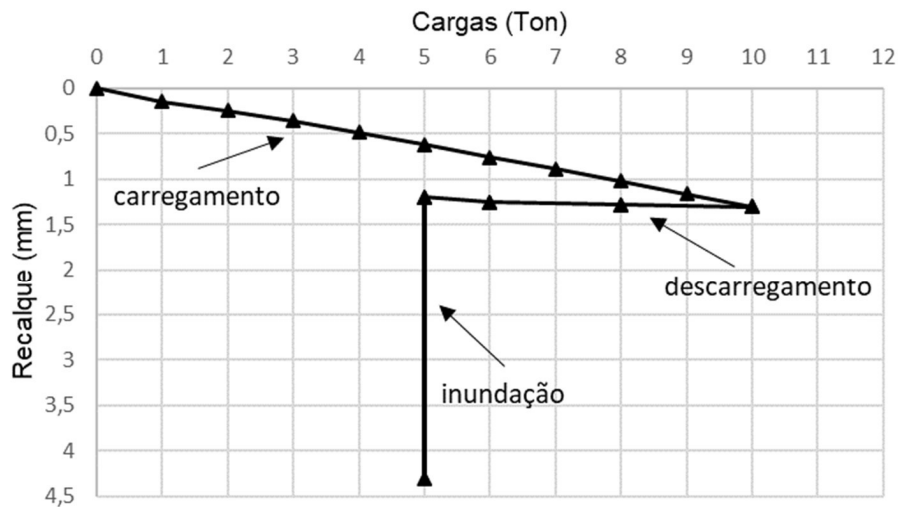
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

A fim de avaliar o melhoramento da capacidade de carga da estaca-solo devido ao processo de apiloamento, os ensaios deram continuidade para verificação dos recalques após inundação das camadas de solo que envolvia todo comprimento do fuste.

A primeira estaca ensaiada foi descarregada até 5 t e submetida a uma inundação. A inundação foi realizada com uma vazão inicial de fluxo de água de 0,137 l/s, onde foi possível formar uma lâmina de água após 45min do início da inundação, sendo utilizado nesta etapa cerca de 371 litros de água. Por conseguinte, para manter a altura da lâmina constante, a vazão foi reduzida para 0,115 l/s, permanecendo neste valor por um período de 23 h e 15min. O volume total de água utilizada no primeiro ensaio foi de aproximadamente 9500 litros.

Nesta situação, o recalque medido, após o processo de inundação (duração de 24 horas), foi de 3,11 mm, totalizando um recalque de 4,31 mm, conforme apresentados no Apêndice A. A Figura 43 apresenta a curva Carga x Recalque do ensaio realizado na estaca apiloada com resíduo nas condições do solo natural e com inundação.

**Figura 43 - Curva carga x recalque – estaca apiloada (com resíduo)**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

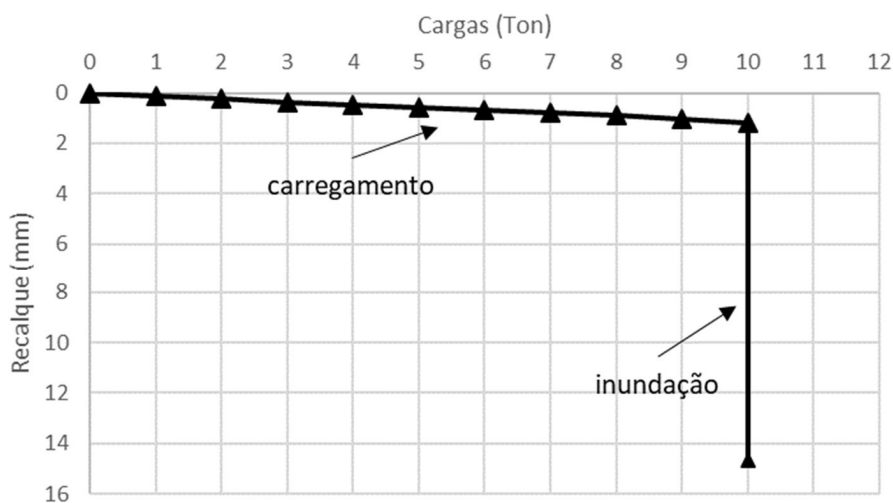
Gonçalves (2017) realizou ensaios de prova de carga em estaca na mesma área de estudo, sendo a estaca do tipo broca, de concreto plástico convencional, com as mesmas dimensões das executadas neste atual trabalho. Nos estudos de Gonçalves (2017), quando a estaca esteve submetida a um carregamento de 5 t, na condição de umidade natural do solo, o recalque medido foi inferior a 1 mm; porém, após uma inundação de 16 h de duração, constatou-se um recalque superior a 36,6 mm, ultrapassando o valor recomendado pela NBR 6122/2019. Comparando os resultados obtidos por Gonçalves (2017) e os obtidos nesta atual pesquisa,

percebe-se que o apiloamento da estaca contribuiu para o ganho de sua capacidade de carga, minimizando o comportamento de colapso do solo-estaca.

Devido ao baixo valor de recalque medido na estaca com resíduo, após a inundação em 5 t, optou-se por realizar a inundação na segunda estaca (sem resíduo) quando esteve submetida a carga de 10 t. Nesta condição a estaca apiloada sem resíduo apresentou um recalque de 14,67 mm após a inundação e um recalque total acumulado de 15,86 mm, conforme apresentado na Tabela 16 (Apêndice B). O processo de inundação durou 24 horas e foi utilizado cerca de 9500 litros de água.

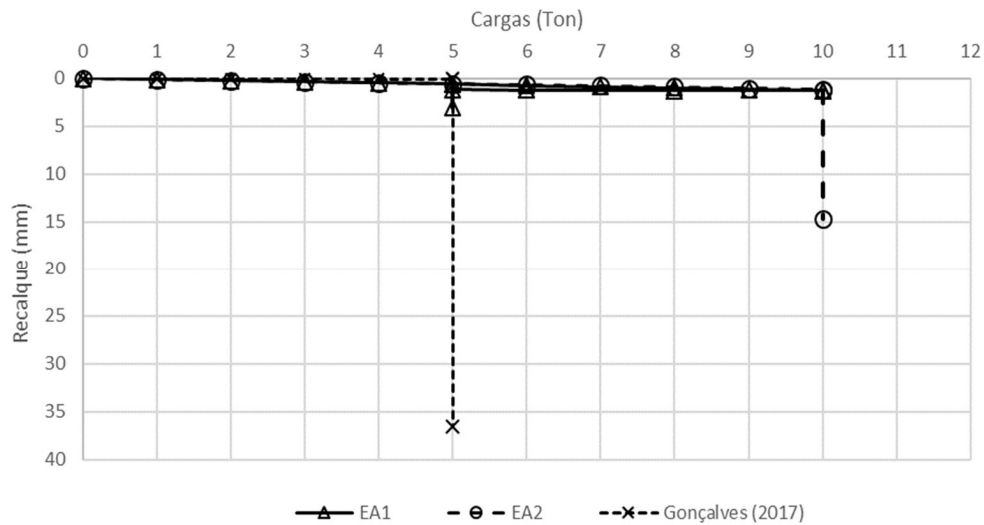
A Figura 44 apresenta a curva Carga x Recalque do ensaio realizado na estaca apiloada sem resíduo nas condições do solo natural e com inundação. A Figura 45 apresenta as curvas Carga x Recalques das estacas ensaiadas nesta pesquisa e na pesquisa de Gonçalves (2017), onde é possível perceber que a estaca desta atual pesquisa ofereceu maior redução do colapso do solo devido ao processo de apiloamento da estaca, que provocou provavelmente um maior enrijecimento do solo do entorno das estacas, pelo deslocamento do solo e redução dos vazios.

**Figura 44 - Curva carga x recalque – estaca apiloada (sem resíduo)**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 45 - Curvas da carga x recalque das estacas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

As curvas carga x recalque obtidas nas provas de carga realizadas com a estaca em concreto seco convencional e na estaca com RCL apoiadas no solo natural tiveram estágios de carregamentos de até 10 t e as duas mostram um comportamento bastante similar. Verificando nessas duas curvas, pode-se observar uma pequena dispersão em seu traçado, possibilitando uma maior confiabilidade nos resultados. Em relação a realização da prova de carga em solo umedecido, as estacas tiveram condições de inundação deferentes. Em ambas as condições de inundação do solo, os valores desses recalques foram relativamente pequenos e dentro das condições de segurança. No ponto de vista prático de engenharia, a diferença de material empregado não apresentou diferença de comportamento geotécnico das estacas.

O processo executivo da estaca apiloada contribuiu para o ganho de capacidade de carga da estaca, quando comparadas com a estaca broca executada com concreto convencional. Ao comparar os resultados da estaca apiloada com RCL ensaiada neste trabalho e a estaca de concreto convencional, ensaiadas em solo com as mesmas características físicas, por Gonçalves (2017), em estudo anterior, tornou-se possível verificar que as estacas de concreto com RCL, apresentaram recalques menores às estacas moldadas em concreto convencional. Na carga de 5 t no solo na umidade natural as duas apresentaram pequenos recalques, ambas inferiores a 1 mm. Assim sendo, o carregamento aplicado não causaria danos à fundação com o solo na umidade natural do período seco. Entretanto, as estacas em questão apresentaram um comportamento diferente na tensão de 5 t no solo na umidade após a inundação. Percebe-se que o recalque da estaca broca convencional, no solo inundado, foi de 36,6 mm, enquanto a estaca apiloada com

RCL obteve um recalque de apenas 3,11 mm, constatando que o processo executivo da estaca apiloada é eficaz para esse tipo de fundação assente em solo colapsível.

Analisando outros trabalhos apresentados na literatura, percebe-se que a técnica empregada neste trabalho se apresentou satisfatória para o problema do colapso em comparação a outros casos, especialmente os desenvolvidos em Londrina – PR por Gonçalves (2006), onde o colapso das estacas apiloadas de 20cm de diâmetro e 3m e 6m de comprimento foi representativo, quando submetida a uma carga de 9 t, enquanto as estacas apiloadas desse trabalho, de 15 cm de diâmetro e 5 m de comprimento o recalque foi mínimo quando submetida a uma carga de 10 t. Assim, notou-se que as estacas apiloadas neste estudo apresentaram um comportamento satisfatório em relação aos resultados apresentados pelas estacas brocas das mesmas dimensões por Gonçalves (2017), e estacas apiloadas por Fernal *et al.* (2003) e Gonçalves (2006), tanto para solo não saturado quanto para solo umedecido. A técnica construtiva de apiloamento do concreto usada deste trabalho melhorou a resistência por atrito lateral e a resistência de ponta da estaca.

Os teores de umidade obtidos no solo natural (antes do ensaio de prova de carga) e no solo inundado (após o ensaio de prova de carga) na estaca apiloada com e sem resíduo são apresentados nas Tabelas 13 e 14, cujos resultados estão ilustrados no gráfico da Figura 46. Observa-se no gráfico que a máxima umidade do solo natural para a estaca com resíduo, até a profundidade de 5,0 m, é cerca de 7% e a umidade do solo após a inundação superficial apresentou teores variando de 11,5% a 16,4%, que inclusive a máxima umidade do solo apresentou-se na profundidade de 5m, indicando que a base do fuste estava com umidade elevada.

Em relação à estaca apiloada sem resíduo, a máxima umidade do solo natural foi cerca de 7% e a umidade do solo após a inundação superficial apresentou teores variando de 12% a 17%, no qual o solo apresentou teor de umidade mais elevado entre 4,5 m e 5 m, constatando também que o fuste até a base estava com umidade elevada. Ao se traçar o perfil de umidade do solo de contato das duas estacas, tanto no solo natural como no solo inundado, observou-se entre os gráficos que o perfil de umidade foi similar. Percebe-se que a variação de umidade após a inundação superficial é alta para as duas estacas, dando indicativo de que o solo atingiu um elevado teor de umidade, constatando assim que a inundação ocorreu em toda a profundidade da estaca, conforme esperado.



Tabela 13 – Teor de umidade do solo antes e depois da prova de carga – estaca apiloada (com resíduo)

Profundidade (m)	Teor de umidade do solo natural (%)	Teor de umidade no solo inundado (%)
0,5	4,26	11,49
1	6,85	12,96
1,5	5,18	13,01
2	5,59	13,30
2,5	5,60	12,60
3	4,52	12,32
3,5	5,61	13,95
4	5,89	15,14
4,5	6,28	15,38
5	5,97	16,42

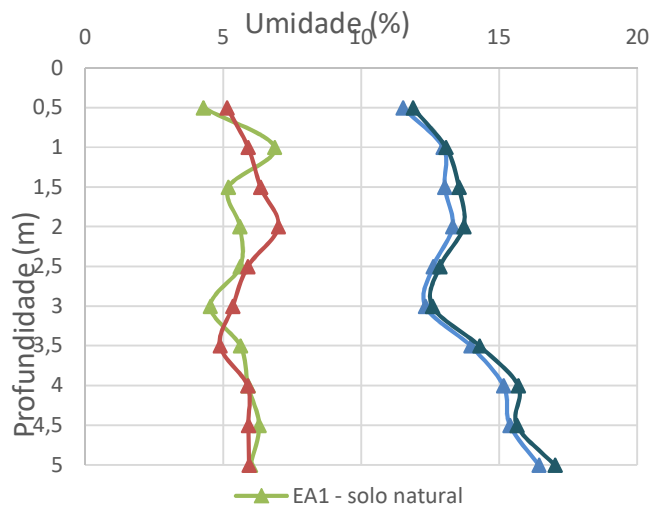
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Tabela 14 - Teor de umidade do solo antes e depois da prova de carga – estaca apiloada (sem resíduo)

Profundidade (m)	Teor de umidade do solo natural (%)	Teor de umidade no solo inundado (%)
0,5	5,13	11,86
1	5,89	13,06
1,5	6,34	13,53
2	6,98	13,70
2,5	5,87	12,84
3	5,34	12,57
3,5	4,87	14,28
4	5,87	15,68
4,5	5,89	16,62
5	5,92	17,01

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

Figura 46 - Perfil de umidade do solo antes e após prova de carga



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e de campo é possível chegar às seguintes conclusões:

- O emprego do resíduo de calcário laminado na formulação de concreto seco em estacas apiloadas, moldadas *in loco*, é tecnicamente viável, podendo ser empregada, por exemplo, em fundações de residências unifamiliares, uma vez que apresentam resistência semelhante às executadas com concreto seco convencional.
- A mistura que melhor atendeu as características de resistência referente ao maior percentual de reaproveitamento do resíduo foi aquela contendo 50% de resíduo de calcário laminado e 50% de areia, utilizada para a confecção do concreto.
- Apesar da diferença de materiais utilizados na execução das estacas ensaiadas nesta pesquisa (uma sem resíduo e a outra com resíduo) e às executadas por Gonçalves (2017), verificou-se uma semelhança no traçado das curvas de Carga x Recalque no solo natural, podendo assim, concluir que o material utilizado não teve influência negativa.
- Em condições iguais de inundação e mediante carregamentos, o ensaio de prova de carga na estaca apiloadada com resíduo apresentou recalque inferior ao da estaca executada por Gonçalves (2017), levando a aferir que o processo executivo da estaca apiloadada se apresenta como uma solução para fundações em solos colapsíveis.

### 5.1 Sugestões para futuras pesquisas

O presente trabalho apresentou a viabilidade técnica e ambiental do emprego do resíduo de calcário laminado na produção de concreto para execução de estacas apiloadas moldadas *in loco*. Este trabalho mostrou que a utilização desta nova tecnologia é viável e promissora, assim como já foi comprovado em outros trabalhos em que a temática é semelhante. Mas ainda há muito a se contribuir com o meio técnico, abordando temas relacionados ao concreto seco, estacas apiloadas e solos colapsíveis.

Portanto, cabem algumas sugestões para futuros trabalhos:

- Desenvolver um estudo de dosagem de concreto seco utilizando diferentes métodos.
- Testar outros traços com outras porcentagens de resíduos no intuito de encontrar o melhor teor.
- Analisar o aproveitamento do resíduo como substituto parcial do cimento ou brita.
- Avaliar a utilização do resíduo de calcário laminado na formulação de argamassa e outros tipos de concretos, como auto adensável.

- Verificar a viabilidade do uso do resíduo para produção de blocos de concreto.
- Confeccionar o concreto para estacas com substituição de resíduo, utilizando outros tipos de cimento, como o CPII.
  - Executar estacas com menor comprimento, até o limite da zona ativa;
  - Realizar prova de carga em estaca com as mesmas características do presente estudo com aplicação de cargas superiores a 10T.
  - Confeccionar outros tipos de estacas utilizando o resíduo do calcário laminado, como a estaca solo cimento e verificar o recalque.
  - Analisar o envelhecimento do concreto produzido com o resíduo do calcário laminado.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO DE BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2018.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15900**: Água para Amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. 3. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro - RJ, 2004.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 26**. Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro - RJ, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 27**. Agregados - Redução da Amostra de Campo Para Ensaio de Laboratório. Rio de Janeiro - RJ, 2001.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 248**. Agregados - Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro - RJ, 2003.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 45**. Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro - RJ, 2006.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 53**. Agregado Graúdo - Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água. Rio de Janeiro - RJ, 2009.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7218/2010**. Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 46**. Determinação do Material Fino que Passa Através da Peneira 75 µm. Rio de Janeiro - RJ, 2003.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 49**. Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro - RJ, 2001.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6122** – Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6122** – Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro. 2014.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7182**. Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2016.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12131.** Estacas - Prova de Carga Estática - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6489.** Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15116.** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACSELRAD, Henri e LEROY, Jean P. **Novas premissas da sustentabilidade democrática.** *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 1, 1999.

ALONSO, U. R. (1991). **Previsão e controle das fundações.** Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo/SP, 142 p.

ANDREOLA, F. *et al.* **Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 1457-1462, 2002.

AOKI, N. & VELLOSO (1975) **An approximated method to estimate the bearing capacity of piles.** In: V PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FONDATION ENGENEERING, Buenos Aires, v. 1, p 367 – 376

AZEREDO, H. A. **O Edifício até sua Cobertura.** *Sao Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1988.*

BANDEIRA, A. P. N; RODRIGUES, P. G; RODRIGUES, F. S; SILVA, L. A. **Tijolos ecológicos fabricados com predominância de finos do resíduo da pedra cariri.** In: I Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação da UFCA, 2019, JUAZEIRO DO NORTE.

BANDEIRA, A. P. N.; Souza Neto, J. B.; Melo, C. E.; Moreira, E. B. **Caracterização de Solos Colapsíveis no Município de Juazeiro do Norte, interior do Ceará.** XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas-PE, Setembro de 2012.

BANDEIRA, A. P. N; MELO, C. E. **Estudo de Solos Colapsíveis na Região do Cariri-CE.** In: 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2013, Rio de Janeiro. 14 CBGE. São Paulo: ABGE, 2013.

BARBOSA, G. S. **O desafio do desenvolvimento sustentável.** *Revista Visões* 4ª Edição, N°4, Volume 1 - Jan/Jun 2008.

BARBOSA, R. S; LEITE, A. L. S; SILVA, C. M. G. da. **Análise ergonômica no processo produtivo da extração de calcário laminado - estudo de caso.** 2003. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG.

Barros, N. B. F. **Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estaca hélice contínua.** Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, (2012).

Barroso, M.D.B; Marinho, R.M.M; Pereira, F.M; Santos, I.S; Melo, P.S. **Avaliação da incorporação de pedra cariri em massas de telhas cerâmicas**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2016, Natal, RN, Brasil.

BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais**. 2014.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana.

BATISTA, W. F. B. **Análise de colapso de solo por meio de ensaio de campo**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Campus Cariri, Juazeiro do Norte, 2014.

BATISTA, Wanks F. B. e BANDEIRA, Ana P. N. **Estudo do Potencial de Colapso Do Solo De Fundação do Campus da Ufc/Cariri**. IV Encontro Universitário da UFC no Cariri, Juazeiro do Norte-CE, Dezembro de 2012.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**.

BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Sumário Mineral. Brasília, 2003.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável: Território do Cariri – MDA/SDT/AGROPOLOS**. Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceara, v 1, 2010.

CAMPELO, N. Z. **Comportamento de estacas submetidas a esforços verticais de tração, em solo colapsível**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1994.

CAMPOS, M. et al. **Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles**. Journal of the European Ceramic Society, v. 24, p. 811-819, 2004.

CANEPA, Carla. **Cidades Sustentáveis: o município como lócus da sustentabilidade**. São Paulo: Editora RCS, 2007.

Carta da Terra – **Organização das Nações Unidas**, 2002. CINTRA, J. C. A. (1998) **Fundações em solos colapsíveis**. São Calos: Serviço Gráfico da EESC/USP, São Carlos, 116 p.

CASTRO, Bruno Pereira Fernandes de. **Estudo de um solo colapsível e sua consideração na capacidade de carga de fundações profundas**. Dissertação de Mestrado, UFPE. Recife, 2011.

CINTRA, J. C. A. (1998) **Fundações em solos colapsíveis**. São Calos: Serviço Gráfico da EESC/USP, São Carlos, 116 p.

CINTRA, J. C. A. & AOKI, N. (1999) **Carga admissível em fundações profundas**. Editora EESC-USP, São Carlos/SP, Brasil, 61 p.

CONFEDERACAO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Mineração & economia verde. Encontro da indústria para a sustentabilidade**. Brasileiro de Mineração. 1. ed. - Brasília: IBRAM, 2012.

CORREIA, J. C. G.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, R. C. C. **Caracterização tecnológica dos calcários do Cariri do Ceará.** In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 5, 2005, Recife, Anais..., Rio de Janeiro, 2006, p.65-73.

CMMAD – **Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.** Nosso futuro comum. 2a ed. Tradução de Our common future. 1a ed. 1988. Rio de Janeiro : Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

DÉCOURT, L. & QUARESMA, A. R. (1978). **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT.** Anais do 6o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Rio de Janeiro, volume 1, p. 45 – 54.

DESCHAMPS, L. P. **Sustentabilidade emergente e construção civil: um estudo de caso em Florianópolis.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/176965/TCC%20SUSTENTABILIDADE%20EMERGENTE%20E%20CONSTRU%20C3%87%20C3%83O%20CIVIL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08/07/2019.

DUDLEY, J. H.. **Review of collapsing soils.** *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE. SM 3, (96), p. 925-947, 1970.

EDLER, Patrícia. **Comportamento de estacas broca compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras preciosas a partir de provas de carga estática.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo.

ELL, Sandra Mauren. **Análise do comportamento à tração de estacas apiloadas executadas em solos arenosos do interior do Estado de São Paulo /** Sandra Mauren Ell.-Campinas, SP: [s.n.], 2003.

FALCO, M.B.; JONES, A.; MEREGUETTI, M.; STERN, C. **Global Business Reports.** *Engineering & Mining Journal. A mineração brasileira.* 2009.

FERNAL, F. *et al.* **Provas de carga em estacas escavadas com trado manual em solo colapsível de Londrina/PR.** IV ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA. ENTECA, 2003.

FERREIRA, C. V.; LOBO, A. da S.; RENOFIO, A. e CARVALHO, D. de (2000) **Capacidade de carga de estacas apiloadas implantadas em solo residual.** IV Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo, v. 2, p 161 – 168.

GONÇALVES, D. R. L. **Estudo do comportamento de uma estaca em solo colapsível.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte - Ce, 2017.

GONÇALVES, Rafael Leite. **Estudo do comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível da região de Londrina/Pr.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. Concreto: Ciência e Tecnologia – IBRACON, 2011.

John VM, **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) – USP, São Paulo, 2000. <http://engcarlos.com.br/brocas-manuais>. Acesso em 28 de maio de 2019.

JUCÁ, J.F.T. e PONTES FILHO, I.D.S. (1997). **“Comportamento de Solos Expansivos”**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, Vol. 2, pp.461-489.

LÉLÉ, S. Rethinking sustainable development. *Current History*, v. 112, n. 757, p. 311-316, 2013.

MARTINS, W. S; BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes; SOUZA NETO, J. B. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UMA ESTACA BROCA COM PONTA APILOADA**. In: I Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, 2019, JUAZEIRO DO NORTE.

MELO, B. N. **Análise de provas de carga à compressão à luz do conceito de rigidez**. 2009. 256f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

Mendes Filho, Edilson. **Uma Avaliação do Programa de Apoio ao Arranjo Produtivo Local da Pedra Cariri – Ceará** / Edilson Mendes Filho. - Fortaleza, 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia do Setor Público)- CAEN, UFC.

MENEZES, Romualdo R. *et al.* **Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos**. *Rev. Esc. Minas* [online]. 2010, vol.63, n.4, pp.667-672. ISSN 0370-4467.

MIGUEL, M. G. *et al.* **Provas de carga horizontal em estacas escavadas a trado mecânico em solo colapsível da região de Londrina, Estado do Paraná**. *Acta Scientiarum*. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1579-1587, 2001

MILITITSKY, Jarbas. **Provas de carga estáticas**. II Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. São Paulo, 1994.

MORAIS, A. S. de & SEGANTINI, A. A. da S. (2002). **Influência da colapsibilidade do solo na capacidade de carga de estacas curtas, do tipo apiloadas, executadas no solo colapsível de Ilha Solteira – SP**. In XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo/SP. ABMS, v3 p 1395 – 1404.

MOREIRA, E. B. **Estudo do Potencial de Colapso da Região Metropolitana do Cariri**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Campus Cariri, Juazeiro do Norte, 2011.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 07-24, Mar 2013.



OLIVEIRA, D. B. **O uso do resíduo pedra Cariri como material alternativo para aplicação em camadas granulares de pavimentos.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

OLIVEIRA, M. T. N. *et al.* **ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUO DA PEDRA CALCÁRIA LAMINADA DO CARIRI CEARENSE COMO AGREGADO GRAÚDO PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO.** Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto, Ceará, 2019.

PEREIRA, J. A. **Aproveitamento de resíduo do beneficiamento da pedra cariri para a produção de concreto.** TCC (Graduação) - Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte - Ce, 2019.

PINTO, S. L. **Utilização de rejeito da extração e mineração de calcário laminado como material para as camadas granulares de um pavimento flexível.** 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2011.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Impacto Ambiental na Lavra de Rochas Ornamentais.** 1º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 2005, Guarapari, Brasil.

RIBEIRO, R. C. C. *et al.* **Utilização do calcário do Cariri cearense como agregado mineral em pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007a. 34p. (Série Tecnologia Mineral, 86).

SAAB, A. L. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado.** (Dissertação de Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016. 106 p.

SACHS, Ignacy. **Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado.** Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SANTOS, M. **Reflexões sobre Desenvolvimento Sustentável: agentes e interações sobre a ótica multidisciplinar.** São Paulo, SP, 2003.

SILVA, A. D. A da. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa.** 2008. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)- Programa de Pós-graduação em engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVA FILHO, F. C.; MOURA, A. S.; FUTAI, Marcos Massao. **Uma solução para fundações em solos colapsíveis no Campus da UFC no Cariri.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado – RS. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica 2010, 2010.

SILVA, J.V.G.; MATOS, L.H.L.D.M. **As novas diretrizes para o controle de aceitação do concreto simples.** 2016. Disponível em:  
<http://www.firb.br/editora/index.php/interatividade/article/viewFile/184/270>. Acesso em: 01/06/2019.

SOUSA, A. A. P.; CRUZ, B. P. C.; CORREA, M. P. C.; GOMES, C. **A responsabilidade ambiental na formação do engenheiro civil.** Maranhão: Revistado CEDS, v. 1, n.3, 2015.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso).** Tese. 432 p. 29,7 cm. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

SOUZA NETO, J. B.; VIDAL, A. R.; BANDEIRA, A. P. N. **Uso de resíduo da pedra cariri em base e sub-base de pavimentos estabilizada granulometricamente.** In: I Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação da UFCA, 2019, JUAZEIRO DO NORTE.

SUASSUNA, P. M. BRASILEIRO, M. I.; PRADO, A. C. A. **Reaproveitamento do rejeito da extração e beneficiamento da pedra cariri em massas cerâmicas.** In: Encontro Universitário da UFC no Cariri, 4., 2012. Anais... Juazeiro do Norte.

TAVARES, M. W. L. **ESTUDO DO MELHORAMENTO DE UM SOLO COLAPSÍVEL.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte - Ce, 2019.

TEIXEIRA, C.Z. **Comportamento de estacas escavadas em solos colapsíveis.** São Carlos, Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, 1993.

VEIGA, José Eli da. **Cidades Imaginárias – o Brasil é menos urbano do que se calcula.** Campinas: Editora da Unicamp, 2005.

VELLOSO, D. A. **Fundações** (Vol. I). Sao Paulo: Oficina de Textos, 1991.

VIDAL, A. R. M. *et al.* **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA PEDRA CARIRI EM BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS.** In: V Mostra UFCA, 2018, JUAZEIRO DO NORTE. V Mostra UFCA. JUAZEIRO DO NORTE: UFCA, 2018

VIDAL, F. L. H. **Oportunidades e desafios para o fortalecimento do APL calcário cariri-CE.** Monografia Especialização para formação de agentes gestores de Arranjos Produtivos Locais. UNIFOR, Fortaleza, 2010.

VIDAL, F. W. H., PADILHA M. W. M. **A indústria extrativa da pedra cariri no estado do Ceará.** In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 4. *Anais...* Ceará, 2003.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; OLIVEIRA, R. R. 2005. **Aspectos do Aproveitamento dos Rejeitos da Pedra Cariri.** In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS, Guarapari, ES, 2005.

WADA, Patrycia Hanna. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco.** 2010. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista.

XAVIER, J. M. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

**APÊNDICE A – MEDIÇÃO DE RECALQUES POR ESTÁGIO DE CARREGAMENTO  
– ESTACA APILOADA (COM RESÍDUO)**

<b>Carga (T)</b>	<b>Recalque (mm)</b>	<b>Tempo (h)</b>
<b>CARREGAMENTO</b>		
	0	0
1	0,15	1
2	0,10	0,50
3	0,11	1
4	0,13	0,50
5	0,13	1
6	0,14	1
7	0,13	1
8	0,13	1
9	0,14	0,50
10	0,14	0,50
Subtotal	1,30	8
<b>DESCARREGAMENTO</b>		
8	-0,02	1
6	-0,03	0,50
5	-0,05	0,50
Subtotal	-0,10	2
<b>INUNDAÇÃO</b>		
5	3,11	24
Total	4,31	34

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

**APÊNDICE B – MEDIÇÃO DE RECALQUES POR ESTÁGIO DE CARREGAMENTO  
– ESTACA APILOADA (SEM RESÍDUO)**

<b>Carga (T)</b>	<b>Recalque Médio (mm)</b>	<b>Tempo (h)</b>
<b>CARREGAMENTO</b>		
0	0	0
1	0,10	0,50
2	0,12	0,50
3	0,14	1
4	0,12	1
5	0,09	1
6	0,10	0,50
7	0,12	0,50
8	0,12	0,50
9	0,14	1
10	0,14	1
Subtotal	1,19	7,5
<b>INUNDAÇÃO</b>		
10	14,67	24
Total	15,86	31,5

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

## ANEXO A – LAUDO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA DE POÇO DA UFCA



LABOR SAÚDE – SERVIÇOS DE ANÁLISES E COMÉRCIO LTDA  
 CNPJ: 11.048.968/0001-04  
 Rua Antônio Pompeu, 115 | Fortaleza - CE | CEP: 60.040-005 | Centro/José Bonifácio  
 +55 85 3472.1326 | +55 85 3472.1921 | +55 85 3099.9455  
 www.laborsaude.com | facebook.com/laborsaude | contato@laborsaude.com

## Laudo Nº: 15286.2019.B- V.0

### 01. Dados Contratação:

#### Solicitante:

**Razão Social:** LIDER LIMPEZA ESPECIALIZADA LTDA

**Endereço:** Avenida Visconde do Rio Branco,2634 Fatima - Fortaleza/CE CEP: 60055364

**Proposta Comercial:** 5195.2019.V1

**Contato:** JOSE ALEX **E-mail:** financeiro@liderambiental.net **Fone:** (85) 3254-9393

### 02. Dados da Amostragem:

**Descrição da Amostra:** POÇO CASTELO -UFCA JUAZEIRO

**Endereço Amostragem:** Avenida Visconde do Rio Branco,2634, Fatima - Fortaleza/CE CEP: 60055364

**Matriz e Origem Amostra:** Água - Poço

**Data de Amostragem:** 17/11/2019 12:30:00

**Característica da Amostra:** Simple

**Informações Adicionais:** RESPONSÁVEL: JOSÉ ALEX

**Data Recebimento:** 18/11/2019

**Data Conferência:** 27/11/2019 15:01:4

**Responsável pela Conferência:** elisio.soares

**Data Início Amostra:** 21/11/2019 14:49:14

**Data Conclusão Amostra:** 27/11/2019 14:34:4

### 03. Resultados:

Parâmetros	Resultados	PRC	n	Un	L.Q. Metodologia	Início Ensaio
ALCALINIDADE TOTAL	12,00 Não Específico			mg/L mg/L	- SM 2320	21/11/2019
CÁLCIO	3,20 Não específico		at	µS/cm uH	- SM 3500-Ca	21/11/2019
CLORETOS	12,50 250,0 de 0,2 a 2,0			mg/L mg/L	- SM 4500-Cl	21/11/2019
CLORO RESIDUAL LIVRE	<0,10 Não Específico		at	Intensidade	- SM 4500-Cl	21/11/2019
CONDUTIVIDADE	56,00 15,0			mg/L U pH	- SM 2520	21/11/2019
COR APARENTE	<1,00			mg/L mg/L	- SM 2120	21/11/2019

DUREZA TOTAL	11,00	até 500,0	UNT	-	SM 2340	21/11/2019
FERRO TOTAL	<0,10	até 0,3		-	SM 3500-Fe	21/11/2019
GAS CARBONICO DISSOLVIDO (LIVRE)	9,89	Não Específico até 10,0		-	SM 4500-N SM	21/11/2019
NITRATO (como N)	1,00	até 6,0		-	2150	21/11/2019
ODOR	5,50	Não Específico 6,0 ; 9,5		-	SM 4500-O	21/11/2019
OXIGENIO DISSOLVIDO	6,09	Não específico		-	SM 4500-H+	21/11/2019
pH	6,00	Não Específico até 7,0		-	SM 3500-K	21/11/2019
POTASSIO	30,80	200,0 até 5,0		-	SM	21/11/2019
RESIDUO TOTAL	4,50			-	SM 3500-Na	21/11/2019
SÓDIO	0,80			-	SM 2130	21/11/2019
TURBIDEZ						

**Interpretações e Opiniões:** Laudo Físico-Químico: Amostra de acordo com os padrões legais vigentes.

**Legislação:** Valores de referência estabelecidos conforme Portaria de Consolidação nº 5, de 28/09/2017 MS.

**Referência(s) Normativa(s):** Standard Methods for the Examination of Water and

Wastewater, Relatório de Ensaio tipo B

#### Legenda

mg/L - Miligrama por Litro, µS/cm - Microsiemens por Centímetro, uH - Unidades de Cor Hazem, Intensidade - Intensidade, U pH - Unidade de pH, UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez, L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplicável

**Software Ultra Lims - Versão: - Amostra: 15286.2019 Data Emissão:27/11/2019 - Página:1/2 Relatório N.:15286.2019.B- V.0**

#### 04. Informações Importantes:

Ensaio de CLORO RESIDUAL LIVRE, executados *in loco*

CLORO RESIDUAL LIVRE \*0,2 a 2,0 mg/L - PRC nº 5 Anexo XX Art.39 §2º "Recomenda-se que o teor máximo de cloro residual livre em qualquer ponto do sistema de abastecimento seja de 2,0 mg/L."

O presente resultado restringe-se a amostra analisada.

Código de Verificação: 000501275926864760201900000

LABOR SAÚDE SERV. DE ANÁL. E COM. LTDA EPP  
CNPJ: 13.048.965/0001-04  
  
Etelza Soares Neto  
Químico Responsável  
CRQ-CE: 10100061  
CPF: 048.473.853-49

LABOR SAÚDE SERV. DE ANÁLISE E COM. LTDA EPP  
CNPJ: 13.048.965/0001-04  
  
Francisco Alton Abrantes de Lima  
Sócio  
CPF: 036.393.983-00 / CRQ: 10700250-Técnico

## ANEXO B – CERTIFICADO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇO DA UFCA



### CERTIFICADO

Certificamos que examinamos uma amostra de água do(a) LIDER LIMPEZA ESPECIALIZADA LTDA situado à Avenida Visconde do Rio Branco, 2634 Bairro: Fatima Cidade: Fortaleza/CE sob o nosso registro N° 15285.2019 dia 17/11/2019 amostra de água proveniente do(a) DIRETO DO POÇO CASTELO - UFCA JUAZEIRO e encontramos:

Amostra SATISFATÓRIA de acordo com os padrões microbiológicos de Potabilidade da Portaria de Consolidação N° 5, de 28/09/2017 MS.

LABOR SAÚDE SERV. DE ANÁLISE E COM. LTDA-EPP  
CNPJ: 21.098.968/0001-04  
Renata de Souza Rocha  
Sócia  
CPF: 036.393.983-00

Renata de Souza Rocha

LABOR SAÚDE SERV. DE ANÁLISE E COM. LTDA-EPP  
CNPJ: 21.098.968/0001-04  
Francisco Airton Abrantes de Lima  
Sócio  
CPF: 036.393.983-00 / CRQ: 10700250-Técnico

Francisco Airton Abrantes de Lima