

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA MONITORAMENTO ÓTICO DE
TENSÕES, DEFORMAÇÕES E TEMPERATURA EM OBRAS DE ENGENHARIA**

MARCO ROGÉRIO CALHEIRA LIMA

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD – 145/18

BRASÍLIA/DF: JULHO 2018.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA MONITORAMENTO ÓTICO DE
TENSÕES, DEFORMAÇÕES E TEMPERATURA EM OBRAS DE ENGENHARIA**

MARCO ROGÉRIO CALHEIRA LIMA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)

PROF. CARLOS MEDEIROS SILVA, DSc. (UNICEUB/EMBRE)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. WILSON CONCIANI, DSc. (IFB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, PhD. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF: 27 DE JULHO 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, MARCO ROGÉRIO CALHEIRA

Estudo de Técnicas Alternativas para Monitoramento Ótico de Tensões, Deformações e Temperatura em Obras de Engenharia. Distrito Federal, 2018. xxviii, 169p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2018).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1. Sensores em Fibra Óptica | 2. Sucção |
| 3. Provas de carga | 3. Ensaios de Laboratório |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, M.R.C. (2018). Estudo de Técnicas Alternativas para Monitoramento Ótico de Tensões, Deformações e Temperatura em Obras de Engenharia. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 145/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marco Rogério Calheira Lima

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo de Técnicas Alternativas para Monitoramento Ótico de Tensões, Deformações e Temperatura em Obras de Engenharia.

GRAU/ANO: Doutor/2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para produzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marco Rogério Calheira Lima
Condominio Ville de Montagne Qd, 21 Casa 11 Jardim Botânico
CEP 71680-357 - Brasília- DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

A **Deus**, pelas bênçãos em favor da conclusão deste curso.

A minha esposa **Maria de Lurdes** pelo apoio, compreensão e conselhos nos momentos difíceis e de minha ausência ao longo do trabalho.

Aos meus filhos **Ana Carolina** e **João Gabriel** pelo entendimento e orgulho que sentem da importância de sempre buscar melhorar a formação educacional.

Aos meus pais **Sansão e Filomena** por me incentivar a cada vez mais buscar conhecimentos novos.

Aos demais familiares e amigos que torcem pelo meu crescimento como pessoa.

“Dá instrução ao sábio, e ele se fará mais sábio ainda; ensina ao justo, e ele crescerá em prudência.”

Provérbios 9:9.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado sabedoria, perseverança e dedicação para superar os obstáculos e concretizar a realização desta grande conquista.

A minha família, em especial minha esposa e filhos pelo incentivo e apoio durante todo o período deste curso.

Ao prof. José Camapum de Carvalho pela inestimável ajuda e dedicação na condução da pesquisa, nas explicações e orientações facilitando o entendimento e ajudando a superar as minhas limitações no entendimento da área da Geotecnia, por ser da área de elétrica, eletrônica e telecomunicações.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelo acolhimento e aceite do projeto, nos dando a oportunidade de desenvolver o trabalho de pesquisa.

Aos professores e colegas do Instituto Federal de Brasília pelo incentivo e ajuda na liberação do afastamento para a realização deste curso.

Ao técnico Cláudio do Laboratório de construção do IFB-Campus Samambaia pela ajuda na realização dos corpos de provas e alguns ensaios.

Aos professores José Luís Fabris e Márcia Muller da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela parceria na execução deste trabalho, disponibilização de laboratórios, equipamentos e materiais óticos para realização desta pesquisa.

Ao professor Maurício Sales da Universidade Federal de Goiás por nos permitir usar equipamentos e materiais que ajudaram na validação dos dados desta pesquisa.

Ao professor Aleones do Instituto Federal Goiano pelo interesse na pesquisa, disponibilidade e participação nos ensaios de provas de cargas em Brasília DF.

Ao professor Bauer do Laboratório de Materiais do Departamento de Estruturas pelo uso dos equipamentos para realização dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto.

A professora Valdirene pela orientação e condução dos ensaios realizados no Laboratório de Materiais.

Aos professores André Luís Brasil e Juan Félix pela contribuição como Coordenadores do programa na condução e como facilitadores na execução do projeto.

Aos demais professores do Programa de Pós Graduação em Geotecnia Manoel Porfírio Cordão Neto, Gregório Luís Silva Araújo, Hernan E. M. Carvajal pelo interesse e conselhos durante a pesquisa.

Ao Professor Fábio do Laboratório de Mecânica pelo agendamento e disponibilização da prensa para realização dos ensaios nas barras instrumentadas com fibra ótica.

Ao colega Arthur do Laboratório de Mecânica pela ajuda em diversos momentos que viabilizaram a realização dos ensaios práticos desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia Rogério e Simon pelo apoio nos ensaios realizados.

Aos colegas e alunos do Programa de Pós Graduação em Geotecnia, em especial a Andrea, Janeth e Rocio pelo companheirismo, acompanhamento e orientação nos ensaios de laboratório.

À Empresa EMBRE pelo grande apoio logístico de equipamentos e profissionais na execução das construção das estacas e posteriormente das provas de cargas.

À Empresa SCCAP pelo profissionalismo e segurança na realização das provas de cargas das estacas.

E por fim ao SENAI DF, em especial da Coordenadora Célia Leitão por nos permitir utilizar os laboratórios e equipamentos necessários a realizar os ensaios de módulos, de carga e descarga dos pilaretes instrumentados.

ESTUDO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA MONITORAMENTO ÓTICO DE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E TEMPERATURA EM OBRAS DE ENGENHARIA

RESUMO

Esta tese apresenta o estudo e definição de um sistema de monitoramento ótico baseado na tecnologia de redes de Bragg para tensões, deformações e variações de temperatura em estacas submetidas a provas de carga por compressão axial. A validação da técnica proposta é feita em termos de tensão e deformação por meio da comparação com os resultados obtidos da instrumentação convencional utilizando-se sensores resistivos elétricos (*Strain Gages*). Já a validação dos sensores térmicos foi feita por meio da comparação com as temperaturas ambientes a que os pilaretes foram submetidos. Os sensores de fibra de Bragg Grating (FBG) surgiram como uma ferramenta confiável para monitoramento de estruturas civis. Neste trabalho, foram pensados, projetados e implementados um sistema de proteção dos sensores de fibra óptica para aplicação em estruturas de concreto. Para isso, foram construídos cinco pilaretes de concreto de 15 x 15 cm de base por 50 cm de altura, instrumentados com sensores resistivos elétricos e sensores óticos, estes em diferentes configurações de montagem. Os pilaretes foram submetidos à ensaios de cargas estáticas em laboratório sendo as respectivas deformações e variações de temperatura monitoradas em cada estágio de carga. Com base nesse estudo definiu-se como melhor opção de montagem a colagem da fibra ótica na parede interna do tubo protetor, sendo essa técnica adotada nas estacas ensaiadas em campo. Finalmente, as validações experimentais obtidas indicam que o sistema de proteção para sensores óticos comportou-se adequadamente no ambiente estrutural de concreto e verificou-se uma boa semelhança entre os resultados obtidos pelos sensores de fibra óptica e os medidores de deformações convencionais de resistência elétrica. Esta instrumentação foi aplicada em três níveis de profundidade em duas estacas submetidas à prova de carga, onde os resultados de tensões e deformações que corresponderam a transferência de carga ao longo da estaca foram equivalentes nos dois sistemas. Os resultados de temperatura se mostrou o grande diferencial da instrumentação ótica desenvolvida, pois apresentou coerente com as medidas feitas diretamente sobre o solo e ao se verificar em laboratório o impacto da temperatura sobre a curva característica do solo esse torna-se um

parâmetro relevante a ser monitorado quando das provas de carga uma vez que a sucção interfere diretamente na interação solo-estrutura. O estudo da variação da sucção e do comportamento do concreto com o tempo de cura constitui-se em mais uma contribuição importante dessa tese, pois a interação solo estrutura depende da sucção.

Palavra chave: Sensores em Fibra Óptica, Sensores de Bragg, Sucção do solo, Sucção do concreto, Curva de retenção de água, Módulo de elasticidade do concreto.

STUDY OF ALTERNATIVE TECHNIQUES FOR OPTICAL MONITORING OF TENSION, DEFORMATION AND TEMPERATURE IN ENGINEERING WORKS

ABSTRACT

This thesis presents the study and definition of an optical monitoring system based on the Fiber Bragg Grating technology for tensions, deformations and temperature variations in stakes subjected to axial compression load tests. The validation of the proposed technique is done in terms of tension and deformation by comparison with the results obtained from conventional instrumentation using electrical resistive sensors (Strain Gages). The validation of the thermal sensors was done by means of the comparison with the ambient temperatures to which the little concrete columns were submitted. Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have emerged as a reliable tool for monitoring civil structures. In this work, a system of protection of the optical fiber sensors for application in concrete structures was conceived, designed and implemented. For this, five concrete columns of 15 x 15 cm of base by 50 cm of height were built, instrumented with electrical resistive sensors and optical sensors, in different assembly configurations. The columns were subjected to static load tests in the laboratory and the respective deformations and temperature variations were monitored at each loading stage. Based on this study, the optic fiber bonding on the inner wall of the protective tube was chosen as the best option for assembly, and this technique was adopted in the stakes tested in the field. Finally, the experimental validations obtained indicate that the protection system for optical sensors behaved properly in the concrete structural environment and there was a good similarity between the results obtained by the optical fiber sensors and the conventional electrical resistance sensors. This instrumentation was applied in three levels of depth in two stakes submitted to the load test, where the results of tensions and deformations that corresponded to the transfer of load along the stake were equivalent in both systems. The results of temperature showed the great differential of the developed optical instrumentation, because it presented coherent with the measurements made directly on the ground and when it was verified in laboratory the impact of the temperature on the characteristic curve of the soil that becomes a relevant parameter to be monitored during loading tests since suction

directly interferes with soil-structure interaction. The study of the variation of the suction and the behavior of the concrete with the curing time constitutes another important contribution of this thesis, because the interaction soil structure depends on the suction.

Keywords: Fiber Optic Sensors, Fiber Bragg Grating (FBG) Strain and Temperature Sensors, Soil Suction, Concrete Suction, Water Retention Curve, Concrete Modulus of Elasticity.

ÍNDICE

| | Página |
|--|----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 – JUSTIFICATIVA | 3 |
| 1.2 – OBJETIVOS | 6 |
| 1.2.1 – OBJETIVO GERAL | 6 |
| 1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 6 |
| 1.3 – ESTRUTURA DA TESE | 7 |
| | |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2.1 - INSTRUMENTAÇÃO POR EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS | 9 |
| 2.2 - INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA | 9 |
| 2.2.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FIBRA ÓTICA | 10 |
| 2.2.2 - PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRA ÓTICA | 12 |
| 2.2.3 - SENSORIAMENTO POR REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA | 16 |
| 2.2.4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES REDES DE BRAGG | 19 |
| 2.2.5 - MÉTODOS DE GRAVAÇÃO DE UMA FBG | 22 |
| 2.2.6 - SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA | 25 |
| 2.2.7 - APLICAÇÕES DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA COMO SENSORES ÓTICOS | 28 |
| 2.3 - METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA SUCÇÃO | 30 |
| 2.3.1 - MÉTODO DO PAPEL FILTRO | 31 |
| 2.4 - SUCÇÃO NO SOLO | 32 |
| 2.5 - CURVA CARACTERÍSTICA NO SOLO | 34 |
| 2.5.1 - CURVA CARACTERÍSTICA TRANSFORMADA | 35 |
| 2.5.2 - CURVA CARACTERÍSTICA NO CONCRETO | 36 |
| 2.6 - SONDAGENS A PERCUSSÃO COM MEDIDA DE TORQUE – SPT-T | 37 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 3 - MATERIAIAS E MÉTODOS | 40 |
| 3.1- LOCAL DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO | 40 |
| 3.2 - INSTRUMENTAÇÃO COM EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS | 41 |
| 3.3 - INSTRUMENTAÇÃO COM FIBRA ÓTICA | 41 |
| 3.3.1 - PROTEÇÃO DAS FBG'S | 42 |
| 3.3.2 - INSTALAÇÃO DAS FIBRAS ÓTICAS E SENSORES FBGS NOS TUBOS | 43 |
| 3.3.3 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NOS ANÉIS DO TUBO DE PROTEÇÃO | 44 |
| 3.3.4 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NA AGULHA HIPODÉRMICA | 46 |
| 3.3.5 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NA PAREDE DO TUBO DE PROTEÇÃO | 47 |
| 3.3.6 - MONTAGEM DOS TUBOS SENSORES | 48 |
| 3.3.7 - BASE DE CÁLCULOS PARA TRANSFORMAÇÃO DAS LEITURAS DAS VARIAÇÕES DOS COMPRIMENTOS DE ONDAS PARA DEFORMAÇÃO EM MICROSTRAIN | 49 |
| 3.4 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DOS PILARETES DE CONCRETO | 50 |
| 3.5 - ENSAIOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DO CONCRETO | 52 |
| 3.5.1 - ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA OS PILARETES | 52 |
| 3.5.2 - ENSAIOS DE MÓDULO SOBRE O CONCRETO DAS ESTACAS INSTRUMENTADA | 53 |
| 3.6 - ENSAIOS DOS PILARETES INSTRUMENTADOS | 54 |
| 3.6.1 - ENSAIO DO PILARETE 1 | 55 |
| 3.6.2 - ENSAIO DO PILARETE 2 | 56 |
| 3.6.3 - ENSAIO DO PILARETE 3 | 57 |
| 3.6.4 - ENSAIO DO PILARETE 4 | 57 |
| 3.6.5 - ENSAIO DO PILARETE 5 | 58 |
| 3.7 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA A SER ADOTADO NA INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA | 58 |
| 3.8 - ENSAIOS COMPLEMENTARES | 59 |
| 3.8.1 - ENSAIOS DAS BARRAS DE AÇO E ALUMÍNIO INSTRUMENTADAS | 59 |
| 3.8.1.1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DAS BARRAS DE AÇO INSTRUMENTADAS | 60 |
| 3.8.1.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO DAS BARRAS DE ALUMÍNIO INSTRUMENTADAS | 62 |
| 3.9 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DAS ESTACAS ESCAVADAS | 63 |

| | |
|--|-----------|
| 3.9.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REAÇÃO | 63 |
| 3.9.2 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA 1 | 63 |
| 3.9.3 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA 2 | 69 |
| 3.9.4 - PROVA DE CARGA DA ESTACA 1 | 72 |
| 3.9.5 - PROVA DE CARGA DA ESTACA 2 | 73 |
| 3.10 - ENSAIOS DE SUCCÃO NO PERFIL DE SOLO PESQUISADO | 74 |
| 3.10.1 - ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO | 77 |
| 3.10.2 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA | 78 |
| 3.10.3 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO PELA TÉCNICA DO PAPEL FILTRO | 79 |
| 3.10.4 - EXECUÇÃO DOS ENSAIOS SEGUNDO AS TEMPERATURAS ESPECÍFICAS | 80 |
| 3.11 - ENSAIOS DE SUCCÃO EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO | 82 |
| 3.11.1 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO | 83 |
| 3.11.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO COM PAPEL FILTRO | 83 |
| 3.11.3 - EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO NA TEMPERATURA AMBIENTE | 85 |
| 3.11.4 - EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL | 86 |
| 3.11.5 - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO | 87 |
| 3.11.6 - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO AREIA E BRITA | 87 |
| 3.12 - ENSAIOS SPT E SPT-T | 87 |
| | |
| CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS | 89 |
| 4.1 – INTRODUÇÃO | 89 |
| 4.2 - AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO | 89 |
| 4.2.1 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA AVALIAÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS CONTENDO FIBRAS ÓTICAS | 89 |
| 4.2.2 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA PRIMEIRA ESTACA SUBMETIDA À PROVA DE CARGA | 90 |
| 4.2.3 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA SEGUNDA PROVA DE CARGA | 91 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS USADOS | 91 |
| 4.3 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA TÉCNICA DE MONITORAMENTO POR FIBRA ÓTICA | 92 |
| 4.3.1 - VALIDAÇÃO DA FIBRA ÓTICA COMO TÉCNICA DE MONITORAMENTO DAS TENSÕES | 93 |
| 4.3.1.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 1 | 93 |
| 4.3.1.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 2 | 98 |
| 4.3.1.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 3 | 100 |
| 4.3.1.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 4 | 101 |
| 4.3.1.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 5 | 103 |
| 4.3.2 - ANÁLISE DE TRASFERÊNCIA DE CARGA NOS PILARETES | 104 |
| 4.3.2.1 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 1 | 104 |
| 4.3.2.2 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 2 | 107 |
| 4.3.2.3 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 3 | 108 |
| 4.3.2.4 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 4 | 109 |
| 4.3.2.5 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 5 | 109 |
| 4.3.3 - AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DAS FIBRAS | 110 |
| 4.3.4 - AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DAS FIBRAS ÓTICAS EM MODELOS FÍSICOS DE CONCRETO PARA FINS DE AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO | 111 |
| 4.3.5 - AVALIAÇÃO DA FIBRA ÓTICA COMO TÉCNICA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA | 113 |
| 4.3.6 - ENSAIOS COMPLEMENTARES | 116 |
| 4.3.6.1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DA BARRA DE AÇO INSTRUMENTADA | 116 |
| 4.3.6.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO DA BARRA DE ALUMÍNIO INSTRUMENTADA | 119 |
| 4.4 - AVALIAÇÃO DA SUCCÃO ATUANTE NO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE | 120 |
| 4.4.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA SUCCÃO ATUANTE NO CONCRETO | 121 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.2 - INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO | 123 |
| 4.4.3 - INFLUÊNCIA DA SUCCÃO, DO TEMPO DE CURA E DO ÍNDICE DE VAZIOS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO | 126 |
| 4.5 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO | 129 |
| 4.5.1 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO EM FUNÇÃO DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA E VOLUMÉTRICA | 129 |
| 4.5.2 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO UTILIZANDO AS NOVAS EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO DEFINIDAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA | 133 |
| 4.6 - SONDAgens SPT E SPT-T PARA AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE SOLO | 132 |
| 4.6.1 - ENSAIOS SPT-T | 132 |
| 4.6.2 - AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE UMIDADE | 135 |
| 4.6.3 - AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA | 138 |
| 4.7 – INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE NA SUCCÃO ATUANTE NO SOLO | 140 |
| 4.8 – INTERAÇÃO SOLO-CONCRETO E AS SUCCÕES CARACTERÍSTICAS DOS DOIS MATERIAIS | 141 |
| 4.9 - RESULTADOS DAS PROVAS DE CARGA | 142 |
| 4.9.1 - PROVA DE CARGA 1 | 143 |
| 4.9.2 - PROVA DE CARGA 2 | 149 |
| 4.10 - AVALIAÇÃO DAS PROVAS DE CARGA FRENTE AOS DEMAIS RESULTADOS OBTIDOS | 155 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 157 |
| 5.1- CONCLUSÕES | 157 |
| 5.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 159 |
| CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 161 |

LISTA DE TABELAS

| TABELA | Página |
|--|---------------|
| Tabela 3.1 – Equações de calibração fundamentadas em Borges (2010). | 75 |
| Tabela 3.2 – Cronograma do procedimento de preparação dos corpos de provas de concreto. | 85 |
| Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade do concreto dos pilaretes. | 90 |
| Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto da Estaca 1. | 90 |
| Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto da Estaca 2. | 91 |
| Tabela 4.4 – Comparativo dos resultados dos ensaios de módulo. | 92 |
| Tabela 4.5 – Procedimento dos ensaios dos pilaretes. | 93 |
| Tabela 4.6 – Quadro comparativo dos resultados obtidos nos 3 ensaios sobre o pilarete 1. | 97 |
| Tabela 4.7 - Comparação dos métodos construtivos de instalação das Fibras Óticas. | 111 |
| Tabela 4.8 - Comparação dos métodos construtivos de instalação das Fibras Óticas simulando o 2º ensaio usando os dados do ensaio de rompimento para os tubos 2 e 4, antes de romper até o mais próximo do limite de carga aplicada no 1º ensaio. | 111 |
| Tabela 4.9 – Comparativo das temperaturas da Fibra Ótica na estaca 1 com as da sondagem. | 148 |
| Tabela 4.10 – Comparativo das temperaturas da Fibra Ótica na estaca 2 com as da Sondagem. | 154 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | Página |
|---|---------------|
| Figura 2.1 - Diagrama esquemático de uma fibra ótica (Klemba, 2005). | 11 |
| Figura 2.2 - (a) Fibra multimodo de índice degrau; (b) Fibra multimodo de índice gradual; (c) Fibra monomodo de índice degrau (Silva Júnior, 1990). | 11 |
| Figura 2.3 - Diagrama esquemático de conexão entre um segmento fibra ótica e aparatos de transmissão e recepção de sinais. (Giozza et al., 1991). | 15 |
| Figura 2.4 - Esquema do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra ótica (FBG). (Hill & Meltz, 1997). | 21 |
| Figura 2.5 – Esquema de utilização de máscara de fase na inscrição de uma FBG (Oliveira, 2013). | 24 |
| Figura 2.6 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995). | 31 |
| Figura 2.7 - Curva Característica e Curva Característica Transformada Camapum de Carvalho & Pereira (2001). | 35 |
| Figura 2.8 (a) - Amostrador - padrão "Raymond" (NBR 6484/80). | 39 |
| Figura 2.8 (b) - Ilustração do ensaio SPT. | 39 |
| Figura 3.1 – Local da realização dos ensaios em campo e retirada de amostras para os ensaios de laboratório desta pesquisa. | 41 |
| Figura 3.2 (a) – Projeto do tubo de proteção da Fibra Ótica com Redes de Bragg. | 42 |
| Figura 3.2 (b) - Tubo de proteção da Fibra Ótica com Redes de Bragg. | 43 |
| Figura 3.3 - Cabo de fibra ótica com conector – Pigtail: (a) Extração de 10 cm da capa externa; (b) Remoção de 5 cm do acrilato; (c) Visualização da fibra ótica exposta. | 44 |
| Figura 3.4 – (a) Aparelho de clivagem da fibra; (b) Aparelho de fusão aberto para colocação das fibras (c) Aparelho de fusão da fibra fechado. | 44 |
| Figura 3.5 (a) – Projeto de montagem da fibra ótica nos anéis do tubo de proteção. | 45 |
| Figura 3.5 (b) (c) e (d) - Montagem da fibra ótica nos anéis do tubo de proteção. | 45 |
| Figura 3.6 (a) - Projeto de instalação da fibra ótica na agulha hipodérmica. | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.6 (b) (c) e (d) - Instalação da fibra ótica na agulha hipodérmica. | 47 |
| Figura 3.7 (a) – Projeto de instalação da fibra ótica na parede do tubo de proteção. | 47 |
| Figura 3.7 (b) - Instalação da fibra ótica na parede do tubo de proteção. | 48 |
| Figura 3.8 (a) – Formas dos pilaretes; (b) Armações de ferro dos pilaretes. | 50 |
| Figura 3.9 (a) e (b) – Proteção da saída das fibras óticas dos tubos sensores. | 51 |
| Figura 3.10 – Instalação dos tubos sensores ótico e strain gage nas armações de ferro. | 51 |
| Figura 3.11 (a) – Colocação da armação instrumentada na forma; (b) – Concretagem dos pilaretes. | 52 |
| Figura 3.12 - Execução de ensaio de módulo de elasticidade em corpos de prova 15 x 30 cm | 53 |
| Figura 3.13 – Ensaio de Módulo de Elasticidade dos corpos de provas 10 x 20 cm da Primeira Estaca. | 54 |
| Figura 3.14 (a) – Pilaretes preparados para teste | 54 |
| Figura 3.14 (b) – Realização de ensaio sobre pilarete. | 55 |
| Figura 3.15 – Pilarete 1 montado para ensaio instrumentado com uma Fibra leitura de deformação outra de temperatura (cabos azuis) e strain gages para leitura de deformação (cabo bege). | 56 |
| Figura 3.16 – Barra de aço instalada com Strain gages e Fibras sensoras longitudinal e transversal. | 60 |
| Figura 3.17 – Barra de alumínio instalada com <i>Strain gages</i> e Fibra sensora longitudinal. | 60 |
| Figura 3.18 – Ensaio na Barra de Aço. | 61 |
| Figura 3.19 – Ensaio da Barra de Alumínio. | 62 |
| Figura 3.20 – Sistema de reação para prova de carga da estaca instrumentada. | 63 |
| Figura 3.21 (a) – Execução das estacas com trado mecanizado. | 64 |
| Figura 3.21 (b) – Escavação da cava para o bloco de coroamento. | 64 |
| Figura 3.22 – (a) tubos apresentados com as fibras óticas apenas com sua capa de proteção natural; (b) tubos com pedaços de mangueira corrugada de 1 polegada encaixados nas extremidades; (c) revestimento das proteções das extremidades dos tubos com fita isolante; (d) e (e) proteção das fibras óticas com mangueira corrugada de ½ polegada; (f) revestimento de toda a extensão das mangueiras corrugadas com várias camadas de fita isolante. | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.23 (a) – Projeto de instalação dos tubos sensores óticos ligados em série. | 66 |
| Figura 3.23 (b) – Esquema de instalação dos sensores óticos e resistivos elétricos na primeira estaca. | 67 |
| Figura 3.24 – Sensores óticos e resistivos elétricos instalados na armação de ferro. | 68 |
| Figura 3.25 – Colocação da armação de ferro instrumentada no furo. | 68 |
| Figura 3.26 – (a) Concretagem da estaca instrumentada; (b) Colocação da armação de ferro do bloco de coroamento na cova; (c) Concretagem do bloco de coroamento. | 68 |
| Figura 3.27 – Fibra ótica de leitura de deformação colada diretamente na barra de aço. | 70 |
| Figura 3.28 – Sensores óticos e resistivos elétricos instalados na armação de ferro. | 70 |
| Figura 3.29 – Esquema de instalação dos sensores óticos e resistivos elétricos na segunda estaca. | 71 |
| Figura 3.30 – Colocação da armação instrumentada no furo e concretagem da estaca junto com bloco de coroamento. | 72 |
| Figura 3.31 – Realização das leituras do sistema ótico e elétrico strain gages durante a prova de carga na estaca 2. | 73 |
| Figura 3.32 – Comparação das umidades de nossa pesquisa em março de 2018 com os resultados apresentados por Sousa Júnior (2017). | 74 |
| Figura 3.33 - Curvas de calibração: a) Umidade gravimétrica Borges (2010); b) Umidade volumétrica fundamentadas em Borges (2010); c) Umidade do papel filtro em função da temperatura segundo a norma ASTM D5298-10(2016). | 76 |
| Figura 3.34 - Comparação das succões em função das umidades gravimétrica e volumétricas fundamentadas em Borges (2010) e corrigidas segundo a norma ASTM D5298-10(2016). | 77 |
| Figura 3.35 – Pentapictômetro | 78 |
| Figura 3.36 – Moldagem dos Corpos de Provas de solos | 78 |
| Figura 3.37 – Detalhe da montagem dos papéis filtros no corpo de prova | 79 |
| Figura 3.38 – Corpos de Provas de solo e papeis filtros embalados | 80 |
| Figura 3.39 – Ensaio dos Corpos de Provas a Temperatura de 40 °C | 81 |
| Figura 3.40 – Moldagem dos Corpos de Provas de concreto | 83 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.41 – Separador de geotêxtil | 84 |
| Figura 3.42 – Detalhe da montagem dos papéis filtros no corpo de prova de concreto | 84 |
| Figura 3.43 – Ensaio de resistência à tração por compressão por compressão diametral | 87 |
| Figura 3.44 – Leitura Digital e Analógica da Temperatura do perfil do solo. | 88 |
| Figura 4.1 - Variação do módulo de elasticidade com o tempo de cura do concreto. | 92 |
| Figura 4.2 – Resultado Tensão x Deformação do 1º ensaio do Pilarete 1. | 94 |
| Figura 4.3 – Resultado Tensão x Deformação do 2º ensaio do Pilarete 1. | 95 |
| Figura 4.4 – Resultado Tensão x Deformação do 3º ensaio do Pilarete 1. | 96 |
| Figura 4.5 – Resultado dos ensaios de carregamento sobre o Pilarete 1. | 98 |
| Figura 4.6 – Resultado do sensor ótico tensão x deformação do ensaio do Pilarete 2 com a Fibra ótica instalada na parede e nos anéis do tubo. | 99 |
| Figura 4.7 – Resultado sensor ótico Tensão x Deformação do ensaio de rompimento do Pilarete 2 com a Fibra ótica instalada na parede do tubo. | 100 |
| Figura 4.8– Análise de dados Tensão x Deformação do ensaio de carregamento e rompimento do Pilarete 2 com a fibra ótica instalada na parede do tubo. | 100 |
| Figura 4.9 – Resultado do sensor ótico para o ensaio do Pilarete 3 com a Fibra ótica instalada nos anéis do tubo. | 101 |
| Figura 4.10 – Resultados dos sensores óticos no ensaio do Pilarete 4 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo. | 102 |
| Figura 4.11 – Resultado sensor ótico Tensão x Deformação do ensaio de rompimento do Pilarete 4 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo. | 103 |
| Figura 4.12 – Resultados dos sensores óticos do ensaio do Pilarete 5 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo. | 104 |
| Figura 4.13 - Correlação das cargas transferidas pelo sistema ótico e pelo sistema <i>strain gage</i> . | 105 |
| Figura 4.14 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 1º ensaio. | 106 |
| Figura 4.15 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 2º ensaio. | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.16 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 3º ensaio. | 107 |
| Figura 4.17 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 2. | 108 |
| Figura 4.18 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 3. | 108 |
| Figura 4.19 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 4. | 109 |
| Figura 4.20 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 5. | 110 |
| Figura 4.21 – Resultados Tensão x Deformação dos primeiros ensaios de carregamento dos Pilaretes. | 112 |
| Figura 4.22 – Resultado do sensor ótico Temperatura x Horário do ensaio. | 113 |
| Figura 4.23 – Resultado sensor ótico Temperatura x Horário do ensaio. | 114 |
| Figura 4.24 – Resultado sensor ótico Temperatura x Horário do ensaio. | 115 |
| Figura 4.25 – Resultado ensaio de tração com a fibra sensora longitudinal à barra de aço. | 117 |
| Figura 4.26 – Resultado ensaio de tração com a fibra sensora transversal à barra de aço. | 117 |
| Figura 4.27 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora longitudinal à barra. | 118 |
| Figura 4.28 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora transversal à barra. | 118 |
| Figura 4.29 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora longitudinal à barra. | 119 |
| Figura 4.30 - Sucção matricial versus sucção total. | 120 |
| Figura 4.31 – Influência do tempo de cura do concreto na sucção mátrica nele atuante. | 121 |
| Figura 4.32 - Resultados de e.pF x Sr. | 122 |
| Figura 4.33 – Influência do tempo de cura do concreto na Resistência à Tração. | 123 |
| Figura 4.34 – Influência da Sucção na Resistência à Tração. | 124 |
| Figura 4.35 – Influência do índice de vazios na resistência à tração por compressão diametral do concreto. | 124 |
| Figura 4.36 – Influência da Sucção (pF)/ Índice de vazios na Resistência à Tração. | 125 |
| Figura 4.37 – Influência da Sucção (pF)/ Índice de vazios (e) na Resistência à Tração por Compressão Diametral. | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.38 – Influência da Sucção (kPa) no Módulo de Elasticidade do concreto. | 127 |
| Figura 4.39 – Influência do tempo de cura no Módulo de Elasticidade do concreto. | 127 |
| Figura 4.40 – Influência do Índice de vazios no Módulo de Elasticidade do concreto. | 128 |
| Figura 4.41 – Amostra oriunda de 2 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova. | 131 |
| Figura 4.42 – Amostra oriunda de 8 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova. | 131 |
| Figura 4.43 – Amostra oriunda de 9 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova. | 131 |
| Figura 4.44 – Perfis de Resistência a Penetração dos solos estudados. | 133 |
| Figura 4.45 – Perfil de torque ao longo da profundidade dos ensaios SPT-T. | 134 |
| Figura 4.46 – Tendência de crescimento do torque em relação a resistência à penetração. | 135 |
| Figura 4.47 – Perfil de umidade em estações do ano diferentes. | 136 |
| Figura 4.48 – Perfil do torque máximo em relação à umidade natural. | 137 |
| Figura 4.49 – Perfil do torque residual em relação à umidade natural. | 137 |
| Figura 4.50 – Perfil da Resistência à penetração em relação à umidade natural. | 138 |
| Figura 4.51 – Perfil de temperatura em relação à profundidade. | 139 |
| Figura 4.52 – Perfil de temperatura em relação à umidade. | 140 |
| Figura 4.53 – Influência da sazonalidade na sucção atuante no solo. | 141 |
| Figura 4.54 – Influência da sazonalidade na sucção atuante no solo e no concreto. | 142 |
| Figura 4.55 – Curva carga recalque da prova de carga da estaca 1. | 144 |
| Figura 4.56 – Cálculo do módulo de elasticidade da estaca 1 pelos sistemas strain gage e ótico. | 145 |
| Figura 4.57 – Transferência de carga medido pelo strain gage da prova de carga da estaca 1. | 146 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.58 – Transferência de carga medido pela fibra ótica da prova de carga da estaca 1. | 146 |
| Figura 4.59 – Comparação de cargas medidas pelos dois sistemas. | 147 |
| Figura 4.60 – Medidas de temperaturas durante a prova de carga da estaca 1. | 148 |
| Figura 4.61 – Medidas de temperaturas do Sensor ótico e a sondagem SPT na da estaca 1. | 149 |
| Figura 4.62 – Curva carga recalque da prova de carga da estaca 2. | 150 |
| Figura 4.63 – Cálculo do módulo de elasticidade da estaca 2. | 151 |
| Figura 4.64 – Transferência de carga medido pelo strain gage da prova de carga da estaca 2. | 152 |
| Figura 4.65 – Transferência de carga medido pela fibra ótica da prova de carga da estaca 2. | 153 |
| Figura 4.66 – Comparação de cargas medidas pelos dois sistemas. | 153 |
| Figura 4.67 – Medidas de temperaturas durante a prova de carga da estaca 2. | 154 |
| Figura 4.68 – Medidas de temperaturas do Sensor ótico e a sondagem SPT na da estaca 2. | 155 |
| Figura 4.69 – Comparação das curvas carga recalque das duas provas de carga. | 156 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

| | |
|---------------------|---|
| A | Área da seção transversal |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| c | Velocidade da luz no vácuo. |
| CDO | Comprimento de onda medido na temperatura de 20 °C na calibração |
| CDOL | Comprimento de onda medido sob carga L em nanômetro (nm). |
| CDOLo | Comprimento de onda medido sob carga zero em nanômetro (nm). |
| CDOT | Comprimento de onda medido em nm na temperatura T do ensaio |
| CP | Corpo de prova |
| D | Diâmetro |
| DL | Diodos laser |
| e | Índice de vazios |
| E | Módulo de Elasticidade |
| EFPI | Sensor de fibra ótica baseado em interferômetro extrínseco de Fabry-Pérot |
| FBG | (Fiber Bragg Grating) |
| Fck | Resistência à Compressão do Concreto |
| GPa | Giga Pascal |
| HE11 | Modo híbrido |
| J _v (κr) | Função de Bessel no núcleo da fibra ótica |
| k | Número de onda |

| | |
|-----------|---|
| L | Comprimento da estaca |
| LED | Diodos emissores de luz |
| LP01 | Modo linearmente polarizado |
| m | Ordem do feixe difratado |
| n | Índice de refração do material |
| N | Resistência à penetração |
| n1 | Índices de refração da casca |
| n2 | Índices de refração do núcleo |
| n3 | Índices de refração dos planos da rede |
| NBR | Norma Brasileira |
| n_{eff} | Índice de refração efetivo do modo de propagação da luz |
| ϕ | Ângulo de difração da ordem 1 |
| P | Carga de ruptura convencional |
| p11 e p12 | Componentes do tensor foto-elástico |
| PCE | Provas de cargas estáticas |
| pe | Constante foto-elástica efetiva |
| pF | Logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água |
| PVC | Plástico “Polyvinyl chloride” - Policloreto de polivinila |
| r | Coordenada radial |
| RT | Resistência à tração |
| s | Sucção |

| | |
|-------------------|---|
| SFBG | Superestrutura de rede de Bragg em fibra |
| SPT-T | (Standard Penetration Test-Torque) - sondagens a percussão com medida de torque |
| Sr | Grau de saturação |
| SWRC | Curva de retenção de água do solo |
| TR | Índice de torque |
| u_a | Pressão de ar |
| $u_a - u_w$ | Sucção mátrica |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| UV | Radiação ultravioleta |
| u_w | Pressão de água |
| w | Umidade |
| WDM | Wavelength-division Multiplex - Multiplexação por divisão de |
| \vec{B} | Vetor densidade de fluxo magnético |
| \vec{D} | Vetor densidade de fluxo elétrico |
| \vec{E} | Vetor campo elétrico, |
| \vec{H} | Vetor campo magnético, |
| β | Constante de propagação |
| γ | Modos de propagação na casca |
| $\Delta\lambda_b$ | Variação do comprimento de onda de Bragg |
| ϵ' | Permissividade elétrica |
| ϵ'_1 | Permissividades do núcleo |

| | |
|---|---|
| ε'_2 | Permissividades da casca |
| ε_z | Componente de deformação relativa por unidade de comprimento comprimento de onda. |
| θ_i | Ângulo da radiação incidente |
| θ_m | Ângulo da ordem difratada |
| Λ | Período espacial da modulação do índice de refração |
| λ_B | Comprimento de onda de Bragg |
| Λ_{mf} | Periodicidade espacial da máscara de fase |
| λ_w | Comprimento de onda da radiação incidente |
| μ' | Permeabilidade magnética do meio |
| $\mu\epsilon$ | 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| Φ | Componente angular do campo |
| φ | Coordenada angular |
| Ψ | Equação de onda |
| ω_c | Frequência de corte |
| $\partial n_{eff} / \partial l$ | Propriedades elasto-ópticas da fibra (variação de índice de refração induzido por efeitos de deformação) |
| $\partial n_{eff} / \partial T$ | Efeito da temperatura, relacionando propriedades termo-ópticas (mudança de índice de refração devido à temperatura) |
| $\alpha = (1/\Lambda)(\partial \Lambda / \partial T)$ | Coefficiente de expansão térmica para a fibra |
| $\zeta = (1/n_{eff})(\partial n_{eff} / \partial T)$ | Coefficiente termo-ótico |

1 – INTRODUÇÃO

As preocupações com a qualidade e eficiência das fundações dos grandes empreendimentos de engenharia civil como pontes, viadutos e edifícios geraram a necessidade de monitoramento, avaliação e controle dos efeitos oriundos não só das tensões atuantes como de modificações ambientais como clima e morfologia do terreno.

A fundação é um dos elementos essenciais de qualquer estrutura. Avaliar a qualidade e o desempenho deste elemento é uma das principais condições para sua eficiência e durabilidade. Determinar a capacidade de carga e recalque das fundações é uma das grandes preocupações da engenharia geotécnica.

A NBR 6122 (2010) define fundação profunda como o elemento que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo a três metros. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões.

Uma das ações, visando preservar a qualidade dos empreendimentos e a segurança das estruturas frente à ação modificadora causada pelas tensões e deformações inerentes ao ambiente das fundações, é o melhoramento do atual sistema convencional de medições e monitoramento das deformações e tensões nestas estruturas utilizando-se dispositivos sensores como o Strain Gages (Huston *et al.*, 1994; Aktan *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2015; Massad, 2015; Palmeira, 2016; Albuquerque *et al.*, 2017; Lukiantchuki *et al.*, 2017).

Na busca por sistemas mais eficientes e de menor custo que pudessem melhorar a instrumentação das fundações, em especial para uso durante a realização de provas de carga, propõe-se e analisa-se nessa tese uma técnica alternativa ao atual sistema de monitoramento em *strain gages* utilizando os benefícios da eletrônica e telecomunicações com sensoriamento por Fibra Ótica, como tecnologia de monitoramento das tensões e deformações estruturais sofridas pelas estacas quando solicitadas (Choquet *et al.*, 2000; Watkins, 2003; Kukureka *et al.*, 2005). Esse novo sistema tem o objetivo de identificar, com mais precisão e baixo custo, as alterações destas grandezas nas fundações, visando propiciar melhor conhecimento das características do material e da estrutura, contribuindo para

implantação de medidas de prevenção de patologias que possam interferir positivamente na segurança e na durabilidade dos empreendimentos.

Adicionalmente o sistema estudado permite ainda verificar a temperatura atuante ao longo do comprimento da estaca, e por consequência, supondo o equilíbrio de temperatura estaca-macço, se conhecer também a temperatura atuante no perfil de solo durante a realização da prova de carga. A instrumentação implantada permite ainda o monitoramento dessa temperatura a longo prazo caso se considere necessário. Essa informação é particularmente importante nos mantos de solo não saturados devido a influência da temperatura na sucção/capilaridade atuante no solo (Michel & Kaufmann, 1973; Tang *et al.*, 2011).

O potencial desta tecnologia está fundamentado em um conjunto de vantagens que apresenta quando confrontada com as tecnologias convencionais. Realça-se a sua elevada precisão, estabilidade, imunidade a interferências eletromagnéticas e capacidade de multiplexagem (Graver *et al.*, 2004). No entanto, o desenvolvimento de soluções mais confiáveis, robustas e competitivas para medição de algumas grandezas estruturais torna-se necessária para a expansão desta tecnologia na engenharia civil (Ko e Ni, 2005; Ansari, 2009; Li e Song, 2004; Cursaw e Kersy, 2008; Tennyson *et al.*, 2000; Ansari, 2005; Glisic e Inaudi, 2007).

Devido à fragilidade do sensor de fibra ótica, torna-se de fundamental importância o desenvolvimento de um sistema capaz de proteger a fibra durante a concretagem da estaca, sem prejudicar a sua eficiência na medição das grandezas estruturais. Portanto, se esta proteção não for bem desenvolvida, o sistema de sensoriamento ótico pode ser facilmente danificado, limitando sua aplicação em estruturas de concreto. Para isso, foi desenvolvido um sistema de proteção para os sensores de fibra ótica constituído de um tubo de aço com 30 cm de comprimento, onde os sensores óticos foram montados em seu interior. Os resultados indicam que o sistema ótico foi bem protegido, pois apresentaram uma concordância muito boa em comparação com as respostas dos medidores de deformação de resistência elétrica de referência *Strain Gages*.

Nesta tese serão definidas as principais características e vantagens deste novo sistema de monitoramento de tensões, deformações e temperatura em estacas, utilizando os benefícios dos sensores óticos, contribuindo com melhores respostas e eficiência nos

resultados de monitoramento de fundações. De modo a justificar preocupações com a necessidade de controle da temperatura, essa tese contempla ainda o estudo da variação da sucção com o tempo de cura do concreto e a influência da temperatura na sucção atuante no solo segundo o seu nível de intemperização.

1.1 - JUSTIFICATIVA

A instrumentação utilizada na Engenharia Civil foi dominada durante muitos anos pelos sensores de natureza elétrica. A título de referência destaca-se a importância dos extensômetros de resistência elétrica, dos extensômetros de cordas vibrantes, das células de carga extensométricas, etc., utilizados na medição das mais diversas grandezas estruturais (Aktan *et al.* 2002).

Ainda nos dias presentes são muito usados métodos de monitoramento de carregamentos estáticos em estacas, utilizando os sensores de resistências elétricas *strain gages* para realização das leituras. Esse sistema monitora apenas deformações na estrutura submetida a cargas estáticas, não medindo as variações das grandezas ambientais como a temperatura, parâmetro que interfere na sucção atuante na interação solo-estrutura de concreto e por consequência na capacidade de carga da fundação.

Além do elevado custo de produção e instalação, o sistema convencional em *strain gages* apresenta limitações como as listadas a seguir (Phillips, 2004):

- Medida de tensão apenas no ponto em que eles estão ligados;
- Medida de tensão em uma só direção;
- Devem ser usados em grupos de três sensores por ponto para determinar os valores de deformação nas direções principais;
- Determina apenas a tensão média na região do elemento sensor;
- Necessita de cinco fios condutores em paralelo para apenas um elemento sensor;
- Conduz falsos sinais, como ruídos eletromagnéticos.

A evolução tecnológica tem apontado para soluções cada vez mais confiáveis, robustas e econômicas. A aplicação de sensores em fibra ótica na monitoração estrutural é ainda um tema emergente conforme comprova as publicações sobre este assunto. É objetivo de toda a comunidade técnico-científica encontrar soluções mais práticas, modernas e competitivas

para medição de um conjunto mais amplo de grandezas relevantes do ponto de vista estrutural. O desenvolvimento e aplicação de soluções em fibra ótica na monitoração estrutural é, portanto, um tema a perseguir e melhorar como mostrado ao longo dessa tese.

Com a possibilidade de monitoração ótica do comportamento estrutural passa a ser possível dispor, em qualquer momento, de informações atualizadas relativamente ao comportamento efetivo da estrutura, ou seja, o sistema proposto tem um alcance mais amplo que o simples controle de tensões e temperatura na execução de provas de carga. São, por isso, vastas as potencialidades da monitoração estrutural como benefício da manutenção preventiva (Ko e Ni, 2005; Ansari, 2009).

Durante a última década, várias tecnologias e propriedades óticas têm sido abordadas para avaliação de diferentes grandezas ligadas à medição de variações nas propriedades da luz transportada nas fibras óticas, tais como, a sua intensidade, frequência, comprimento de onda, fase ou polaridade (Li e Song, 2004; Culshaw e Kersey, 2008). Os sensores óticos têm demonstrado excelentes atributos para a medição de parâmetros mecânicos, físicos e químicos (Tennyson *et al.*, 2000; Ansari, 2005; Glisic e Inaudi, 2007).

Para o sucesso da instrumentação baseada em fibra ótica, muito tem contribuído um conjunto de vantagens que a destacam quando confrontada com as tecnologias convencionais (Graver *et al.* 2004), justificando assim os estudos voltados para a viabilização do seu uso no monitoramento de provas de carga sobre fundações.

Vantagens:

- Adequada para utilização em ambientes explosivos, por não apresentar risco de faíscamento;
- Isolamento elétrico, imune a raios e relâmpagos;
- Tolerante a ampla faixa de temperaturas (-200 a 800 °C);
- Dimensões reduzidas;
- Alta sensibilidade, resolução e resposta rápida;
- Apresenta sensibilidade a diversas grandezas físicas, como temperatura, tensão, pressão, umidade etc;
- Estabilidade, repetibilidade e durabilidade ao longo do tempo;

- Os sensores óticos tem codificação em comprimento de onda da luz, e não em intensidade. Assim, as características do sensor não se alteram ao longo do tempo e não requerem re-calibrações.

Desvantagens:

- Fragilidade das fibras;
- Dificuldade de conexão das fibras óticas.

Do ponto de vista metrológico, sublinha-se a sua elevada estabilidade, precisão e resolução.

Do ponto de vista da durabilidade, distingue-se o fato de serem constituídas por um material não corrosível e quimicamente estável. Para aplicações em campo, torna-se relevante o fato de apresentarem total imunidade a interferências eletromagnéticas, o que resulta na prática na total ausência de ruído elétrico, bem como o fato de permitirem a transmissão do sinal ao longo de grandes distâncias sem qualquer degradação ou interferência.

Neste contexto, os benefícios inerentes à tecnologia ótica são em muitos casos, por si só, capazes de justificar a sua utilização na monitoração estrutural. Começa-se, mesmo, a verificar que as soluções óticas são, em muitos casos, economicamente vantajosas, permitindo uma grande flexibilidade na arquitetura da rede de sensores devido às possibilidades de multiplexagem em série e em paralelo, ou seja, a utilização de vários sensores óticos distribuídos ao longo da estrutura com os dados coletados sendo transmitidos ao mesmo tempo e no mesmo meio de transmissão que é a Fibra Ótica.

Outro fator tecnológico relevante que justifica o presente estudo é a carência de experiências em instrumentação por fibra ótica no Brasil. Esta é limitada a alguns poucos esforços em desenvolvimento de sensores não distribuídos e a quase nenhum foco no conceito de Estruturas Inteligentes ou “*Smart Structures*” e materiais inteligentes ou “*Smart Materials*”, conforme citado em Watkins (2003) enquanto que no mundo, cada vez mais os países estão investindo significativamente no desenvolvimento de pesquisas sobre assunto.

A adequação da tecnologia ótica às exigências da engenharia civil necessita, no entanto, ser melhorada para uma aplicação mais rápida, versátil e eficiente. Torna-se premente a adequação dos atributos dos sensores em fibra ótica de forma a melhor ajustar os

requisitos específicos da monitoração das estruturas de engenharia civil, sendo fundamental a combinação de conhecimentos técnicos relativos à tecnologia dos sensores em fibra ótica com as características técnicas no ambiente da engenharia estrutural.

A integração dos sensores óticos nas estruturas carece ainda de desenvolvimentos com vista à sua plena exploração. Exige-se o desenvolvimento de novas arquiteturas de redes de sensores. A identificação das soluções e processos de instalação mais adequados é igualmente vital para se sistematizar processos de instalação mais robustos e duradouros. São notórias as condições adversas das instalações em obra, assim como é evidente a fragilidade natural da fibra ótica para ser integrada nesses meios sem a definição de técnicas adequadas de instalação. Portanto, é fundamental que as pesquisas avancem na área da aplicação dos sensores óticos no mundo da construção civil pesada, propiciando assim, retirar os melhores resultados da aplicação deste novo sistema em benefício da monitoração eficiente e prevenção de possíveis patologias estruturais.

1.2 - OBJETIVOS

Esta tese centra-se no estudo de soluções baseadas em sensores de fibra ótica para o monitoramento estrutural de fundações submetidas a provas de carga. Neste âmbito e tendo por base a contextualização apresentada nessa introdução, estabelecem-se os seguintes objetivos:

1.2.1 – OBJETIVO GERAL

Propor um sistema alternativo eficiente de medições e monitoramento de tensões, deformações e temperatura em estacas por meio do uso de sensoriamento por Fibra Ótica.

1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a técnica ideal de montagem dos sensores de fibra ótica de Redes de Bragg (FBG) e as metodologias, os equipamentos e os dispositivos mais apropriados para esse fim.
- Desenvolvimento e aplicação de solução para proteção dos sensores e da fibra ótica, com características de robustez e durabilidade.
- Validação do sistema de monitoramento ótico de tensões, deformações e temperatura.

- Estudo da influência da variação da temperatura na sucção do solo por meio da análise de curvas características.

1.3 - ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em seis capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre as necessidades do monitoramento de grandezas que permitem a preservação do desempenho estrutural das obras de engenharia e destaca os objetivos geral e específicos concernentes ao desenvolvimento do estudo segundo a estrutura proposta para essa tese.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura, buscando fundamentar o conhecimento teórico necessários ao desenvolvimento dessa tese. Realizou-se uma vasta pesquisa buscando citações, referências e conhecimento do que já foi pesquisado e desenvolvido a respeito do tema focando-se em especial os estudos voltados para os objetivos dessa tese. Foram apresentados aspectos teóricos que fundamenta a pesquisa, voltados para a análise da atuação da sucção em solos e concreto, sondagens SPT e SPT-T e sensoriamento ótico e suas aplicações.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta a metodologia que foi utilizada nesta tese nos ensaios de laboratório e de campo, a descrição dos materiais utilizados e suas principais características e a avaliação e definição da aplicação das técnicas de sensoriamento ótico no monitoramento estrutural das fundações.

Capítulo 4 – Análise dos Resultados

São apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios de curva de retenção de água pelo método do papel filtro do solo e do concreto, sendo que no caso do solo foi estudada a influência da temperatura e para o concreto avaliou-se a influência do tempo de cura e os resultados se sondagens SPT e SPT-T com determinações dos perfis de umidade e de

temperatura. São apresentados ainda estudos de laboratório em protótipos de concreto voltados para a definição de uma metodologia adequada de instalação de fibra ótica nas estacas a serem submetidas a provas de cargas estáticas. Finalmente são apresentados e analisados os resultados obtidos nas provas de carga realizadas sobre duas estacas escavadas.

Capítulo 5 – Conclusões

Nesse capítulo são apresentadas as principais conclusões oriundas das avaliações e análises realizadas nesta tese e algumas sugestões para estudos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma resumida, este capítulo aborda os principais conceitos utilizados no desenvolvimento desta tese, como sucção, curva de retenção de água dos solos e concretos, ensaio de sondagens a percussão com medida de torque SPT-T (*Standard Penetration Test-Torque*), sensoriamento por fibra ótica e suas aplicações.

No campo da instrumentação, é de fundamental importância para a engenharia monitorar através de instrumentação grandezas como deformação e temperatura. Em conformidade com o objetivo desta pesquisa, será abordado para efeito de comparação dos resultados, o sistema de medições de deformações utilizando os sensores resistivos elétricos *Strain Gages* já testado em Cruz Júnior (2016) e o estudo do método de sensoriamento ótico FBG (*Fiber Bragg Grating*) que utiliza a fibra ótica para o monitoramento de tensões, deformações e temperatura em estruturas de concreto.

2.1 – INSTRUMENTAÇÃO POR EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

Os extensômetros elétricos são largamente usados para medida das deformações em estruturas de concreto (Almeida & Rodrigues, 2002). Tais medidas seguem o princípio de transformar pequenas variações nas dimensões dos elementos estruturais em variações equivalentes a resistência elétrica do extensômetro.

Cruz Júnior (2016) desenvolveu sensores utilizando extensômetros elétricos com o objetivo de instrumentar e verificar a distribuição de cargas em uma estaca submetida a esforços de compressão axiais. Nesta pesquisa, foram citados diversos trabalhos que comprovam a larga experiência e utilização deste tipo de instrumentação na Geotecnia, inclusive com um breve resumo do seu princípio de funcionamento.

Esse sistema já muito usado no monitoramento de estacas durante a realização de provas de carga, será usado nessa tese para efeito de comparação.

2.2 - INSTRUMENTAÇÃO POR FIBRA ÓTICA

Os sensores de fibra ótica vêm nas últimas décadas sendo objeto de muitos estudos e pesquisas, resultando em uma vasta oferta de tipos com características diferentes e que podem ser aplicados para leitura e medição de diversas grandezas de acordo com as

necessidades do projeto que se queira submeter a monitoração ótica, utilizando o máximo possível de suas propriedades para as medições. A seguir se irá conhecer um pouco sobre a fibra e os sensores óticos, mostrando as características e benefícios que podem oferecer nos processos de leituras e medições.

2.2.1- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FIBRA ÓTICA

Uma fibra ótica é um guia de onda cilíndrico feito de material dielétrico, transparente, e homogêneo, usualmente vidro, que conduz luz na região espectral do visível e do infravermelho por longas distâncias. A estrutura mais simplificada de uma fibra ótica consiste em um núcleo de sílica envolvido por uma casca de mesmo material, mas com índice de refração menor que o do núcleo. Como o índice de refração do núcleo é maior do que o da casca, um feixe de luz acoplado ao guia de onda é confinado ao seu núcleo por reflexão interna total, conforme a Lei de Snell-Descartes da ótica geométrica (Hecht, 2001), de forma a garantir que a luz lançada no seu núcleo se propague ao longo do comprimento da fibra com pequenas perdas de intensidade.

A banda passante de uma fibra ótica é função, além de seu comprimento, da sua geometria e do seu perfil de índices de refração. O perfil de índice pode ser em degrau, quando o índice de refração é constante ao longo da seção reta do núcleo, ou gradual, quando o índice diminui gradativamente a partir do eixo central do núcleo até a interface núcleo-casca (Agrawal, 1997).

A luz acoplada à fibra é guiada através do núcleo e, devido a baixas perdas de intensidade, pode percorrer grandes distâncias ao longo do guia. Nas fibras compostas principalmente por sílica e dopantes semicondutores, existem regiões espectrais nas quais a atenuação é mínima, as chamadas janelas de transmissão em torno de 850 nm, 1300 nm e 1550 nm, (Giozza *et al.*, 1991).

Muitas fibras possuem uma capa protetora sobre a casca, Figura 2.1. Essa capa cujo material geralmente é um polímero, protege a fibra de choques mecânicos sem afetar suas propriedades óticas ou físicas.

As fibras óticas são classificadas em função do número de modos propagantes através do núcleo e também do perfil de índice de refração do núcleo (Figura 2.2), os tipos mais usuais são (Agrawal, 1997):

- Fibra multimodo de índice degrau;
- Fibra multimodo de índice gradual;
- Fibra monomodo de índice degrau.

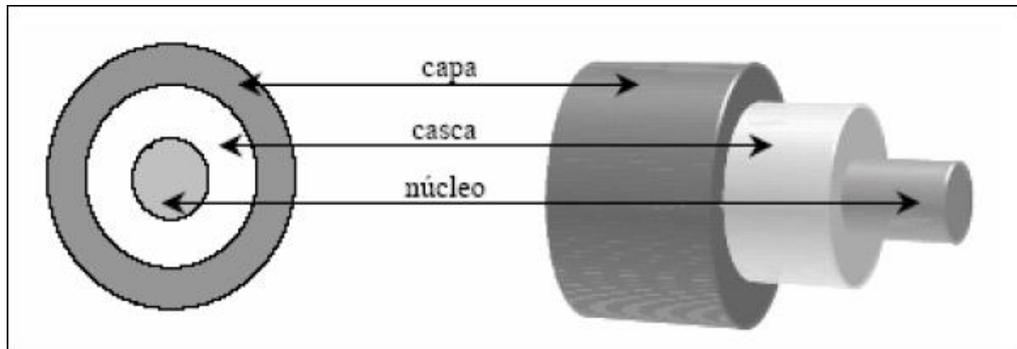


Figura 2.1 - Diagrama esquemático de uma fibra ótica (Klemba, 2005).

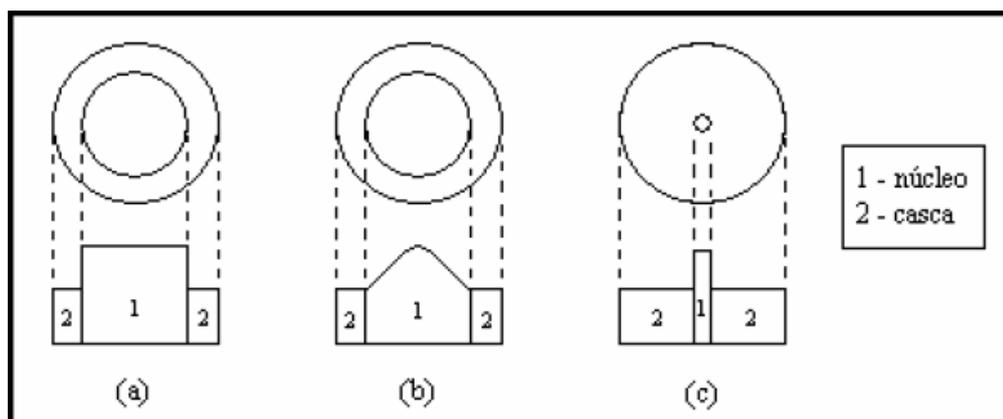


Figura 2.2 - (a) Fibra multimodo de índice degrau; (b) Fibra multimodo de índice gradual; (c) Fibra monomodo de índice degrau (Silva Júnior, 1990).

Enquanto uma fibra monomodo conduz somente um modo de propagação, as fibras multimodo conduzem muitos modos de propagação. As fibras monomodo têm diâmetro de núcleo menor do que as multimodo, e a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca também é pequena ($\sim 10^{-3}$).

Quanto ao perfil do índice de refração, enquanto uma fibra de índice degrau possui apenas um tipo de material compondo o núcleo de forma a ter um índice de refração constante ao longo de sua seção reta, a fibra de índice gradual tem seu núcleo composto por materiais de diversos índices de refração que diminuem gradualmente a partir do eixo central da fibra em direção a interface núcleo-casca (Silva Júnior, 1990).

2.2.2 - PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRA ÓTICA

A fibra ótica é um guia de onda que canaliza a luz em determinados modos, que nada mais são do que ondas com certas distribuições de campos eletromagnéticos definidas matematicamente pelas equações de Maxwell e governadas pela teoria eletromagnética. Sendo assim, a teoria que leva aos modos de propagação inicia-se com as equações de Maxwell que são escritas a seguir na forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{D} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Nestas equações, \vec{E} representa o vetor campo elétrico, \vec{H} vetor campo magnético, \vec{D} o vetor densidade de fluxo elétrico e \vec{B} o vetor densidade de fluxo magnético e c é a velocidade da luz no vácuo. (Senior, 1992). Estas equações estão relacionadas entre si por:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica e μ é a permeabilidade magnética do meio.

Estas equações levam a uma equação de onda para os campos elétrico e magnético que se propagam no meio em questão. A equação de onda para uma única variável, \vec{E} ou \vec{H} , representada aqui por Ψ é escrita na forma a seguir (Gowar, 1984; Senior, 1992; Agrawal, 1997):

$$\nabla^2 \Psi = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

onde Ψ representa o vetor campo elétrico ou o vetor campo magnético, c é a velocidade da luz no vácuo e n é o índice de refração do material.

Como as fibras óticas possuem simetria radial, as soluções são expressas em coordenadas cilíndricas (r, φ, z), para uma onda propagando-se ao longo do eixo z :

$$\frac{\delta^2 \Psi_z}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \Psi_z}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 \Psi_z}{\delta \varphi^2} + \kappa^2 \Psi_z = 0 \quad (2.8)$$

onde $\kappa^2 = k^2 - \beta^2$, k é o número de onda, β é a constante de propagação, r é a coordenada radial e φ a coordenada angular.

Usando a técnica de separação de variáveis, podem-se obter soluções para as componentes angular e radial. A componente z do campo pode ser escrita em termos destas soluções:

$$\Psi_z(\varphi, r) = A \Phi(\varphi) F(r) \quad (2.9)$$

Com a simetria circular da fibra é possível escolher uma função circular para a componente angular do campo:

$$\Phi(\varphi) = e^{j\nu\varphi} \quad (2.10)$$

sendo ν é um número inteiro.

Substituindo a Equação 2.9 na Equação 2.10, é possível obter a seguinte equação:

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (2.11)$$

A Equação 2.11 tem a forma da equação de Bessel, que possui soluções conhecidas para dadas condições de contorno:

1. O campo deve ser finito no núcleo da fibra, especialmente em $r = 0$.
2. O campo na casca da fibra deve decair exponencialmente para grandes distâncias do centro da fibra.

A condição 1 tem como solução, no núcleo da fibra, a função de Bessel $J_\nu(\kappa r)$, portanto:

$$\Psi_z = A J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\varphi} \quad (2.12)$$

A condição 2 resulta na forma $e^{-\gamma r}$ para o campo na casca. Quando $\kappa = j\gamma$, as funções de Hankel modificadas de primeiro tipo descrevem o comportamento do campo na casca:

$$\Psi_z = B H_\nu^1(j\gamma r) e^{j\nu\varphi} \quad (2.13)$$

As constantes A e B são determinadas através das condições de contorno nas interfaces núcleo-casca e casca-ar. As Equações 2.12 e 2.13 descrevem os campos que se propagam no núcleo e na casca.

Nas fibras óticas, a diferença de índice de refração entre núcleo e casca é pequena ($\Delta n \ll 1$), assim as combinações possíveis dos modos podem ser simplificadas. O modo linearmente polarizado (LP) corresponde à superposição de modos de núcleo caracterizados por constantes de propagação próximas.

Os modos de propagação na casca são determinados pela constante γ . Para grandes valores de γ o modo está fortemente confinado no núcleo. A medida que o valor de γ diminui, o modo começa a penetrar na casca. Quando $\gamma = 0$, o modo deixa de ser guiado, nesta situação o modo é chamado de modo irradiado. A frequência na qual isto acontece é chamada de frequência de corte, ω_c :

$$\omega_c = \frac{\kappa_c}{\sqrt{\mu_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)}} \quad (2.14)$$

onde ϵ_1 e ϵ_2 são as permissividades do núcleo e da casca, respectivamente.

Quando $\kappa_c = 0$, a frequência de corte é nula e apenas um modo pode existir. Este modo é chamado modo híbrido HE₁₁ ou LP₀₁ e esta é a condição para que uma fibra seja monomodo.

Os modos podem ser classificados também como propagantes e contra-propagantes em relação ao sentido segundo o qual a luz é injetada na fibra.

Portanto, ao resolver as equações de Maxwell para as condições de contorno da fibra encontra-se certo número de soluções finitas. Assim, a luz acoplada a uma fibra ótica é propagada com distribuições de campo que satisfazem as equações de Maxwell e que

correspondem aos modos de propagação. Além disso, cada modo tem a propriedade de possuir uma distribuição espacial que não é alterada com a propagação (Agrawal, 1997).

Outro aspecto importante a se considerar é o material que constitui a fibra ótica, pois a potência ótica poderá ser mais ou menos atenuada de acordo com as propriedades desse material. Um dos objetivos das fibras óticas é transportar informações por meio de ondas eletromagnéticas e, para isso, é necessário um conjunto de elementos básicos. De um modo geral, um sistema de transmissão de dados óticos é composto por um transmissor, um receptor e a fibra ótica (guia de onda). A Figura 2.3 exibe um diagrama esquemático de conexão entre um segmento de fibra ótica e aparatos de transmissão e recepção de sinais.

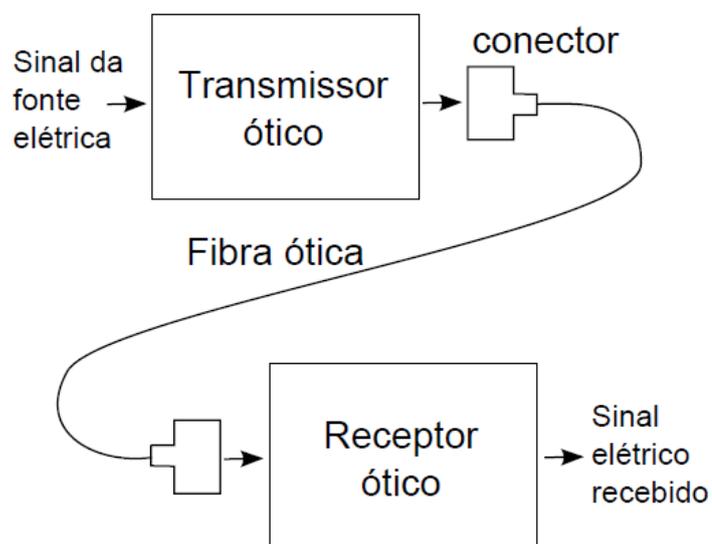


Figura 2.3 - Diagrama esquemático de conexão entre um segmento fibra ótica e aparatos de transmissão e recepção de sinais. (Giozza *et al.*, 1991)

O transmissor é o responsável pela conversão de sinais elétricos em feixes óticos. Normalmente, são utilizados como fontes óticas diodos laser (DL) e os diodos emissores de luz (LED). A capacidade de transmissão depende do tipo de transmissor ótico, sendo que o do tipo DL é tipicamente superior ao LED.

O receptor ótico converte o sinal recebido do guia de onda em sinal elétrico. Para conectar as partes do sistema de transmissão (transmissor ótico, guia de onda e receptor ótico), são necessários acoplamentos. Um bom alinhamento entre os núcleos das fibras óticas permite um acoplamento com menor perda possível da potência ótica. Junções ponto a ponto

de dois ou mais segmentos de fibra ótica podem ser realizadas de modo permanente, por meio de emendas, ou temporariamente, por meio de conectores mecânicos de precisão (Giozza *et al.*, 1991).

2.2.3 – SENSORIAMENTO POR REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

A fotossensibilidade da fibra ótica, chave para o avanço tecnológico de dispositivos de sensoriamento baseados em redes em fibras, foi descoberta em 1978 pelo grupo de Kenneth O. Hill, no Centro Canadense de Pesquisas em Comunicação. Acoplando a uma fibra de sílica dopada com germânio a luz de um laser de argônio no visível, foi observado um aumento da intensidade da luz refletida. Esse fenômeno resulta de alterações produzidas no índice de refração da sílica pela incidência da luz, fenômeno conhecido como fotossensibilidade. A analogia da reflexão de Fresnel da luz do laser na extremidade final da fibra produz uma onda estacionária ao longo do seu comprimento. Nas regiões com alta intensidade de iluminação o índice de refração do núcleo da fibra é alterado de forma permanente gerando uma modulação espacial periódica do índice de refração do núcleo da fibra (Hill *et al.*, 1978). Esta modulação periódica de índice de refração atua como um conjunto de refletores distribuídos acoplando o modo propagante com o contra-propagante. O dispositivo produzido foi denominado inicialmente “rede de Hill”.

No entanto, a operação das redes de Hill está limitada ao comprimento de onda do laser de argônio de 488 nm (nanometro) usado para a sua produção e refletividades úteis só são alcançadas com dispositivos longos, em torno de um metro de comprimento.

Em princípio, a característica de fotossensibilidade da fibra ótica não ganhou destaque na comunidade científica por dois fatores: o fenômeno era considerado exclusivo de fibras especiais e as frequências de trabalho das fibras óticas utilizadas em telecomunicações eram diferentes daquelas do experimento.

Em 1981, Lam e Garside mostraram que a fotossensibilidade observada por Hill estava associada a um processo de absorção de dois fótons do laser de argônio em 488 nm. Portanto, o processo de alteração de índice de refração é mais eficiente quando é empregada luz ultravioleta em torno 244 nm. Tal conclusão surgiu com base na observação de que a refletividade da rede aumentava em função do quadrado da intensidade da luz. Isso sugeriu

que um único fóton com a energia dobrada poderia ser mais eficiente no processo de formação das redes de Hill (Lam & Garside, 1981).

Em 1989, Meltz *et al.*, utilizaram a luz de um laser ultravioleta (UV) de 244 nm e um interferômetro para produzir FBGs (Fibre Bragg Grating) pelo método de gravação permanente do núcleo de uma fibra por meio de irradiação externa, utilizando um laser operado na faixa do ultravioleta (UV). Na ocasião, verificou-se que ocorria uma modificação do índice de refração ao se expor uma fibra ótica dopada com germânio a um feixe ótico na região do UV entre 240 e 250 nm, que é próximo ao comprimento de onda do pico de absorção de um dos defeitos do germânio. Nesse método, a modulação periódica do índice de refração é induzida por um padrão de iluminação periódico gerado pela interferência de dois feixes de luz UV coerentes. A fibra ótica foi, então, posicionada perpendicularmente ao feixe para modificar o índice de refração no núcleo do guia ótico, gerando uma rede com índices de refrações diferentes. Esse método trouxe uma grande vantagem em relação à técnica apresentada por Hill *et al.* (1978), além de produzir redes com modulação de índice de refração mais significativa em comparação com o método do Hill, a técnica apresenta a vantagem da sintonia do comprimento de ressonância pelo controle do ângulo de interferência dos feixes (Meltz *et al.*, 1989).

O método exposto por Meltz *et al.* (1989) despertou novamente o interesse na área, uma vez que solucionou o problema referente à limitação da gravação de FBG (Fiber Bragg Grating) proposta por Hill *et al.* (1978).

Nos anos 90, Hill *et al.* (1993) propôs um método de gravação de redes de Bragg no qual a fibra é exposta ao padrão de interferência produzido pela iluminação direta de uma máscara de fase constituída de sílica. Nesse modelo, uma máscara é posicionada paralelamente à fibra ótica. Um feixe UV é lançado perpendicularmente contra a máscara, projetando na fibra pontos com intensidades luminosas diferentes, originando uma rede. O método apresenta como principais vantagens a simplicidade do alinhamento e a estabilidade do padrão sendo capaz de produzir redes com boa reprodutibilidade (Hill & Meltz, 1997). No entanto, o período da FBG gravada depende do período da máscara.

Para obter redes com grande modulação de índice de refração, Lemaire *et al.* (1993) desenvolveram uma técnica para aumentar a fotossensibilidade das fibras, que consistia em armazená-las em uma atmosfera de alta pressão de hidrogênio (20 atm - 750 atm) com a

temperatura entre 20°C e 75°C. Outro processo proposto para promover o aumento da fotossensibilidade das fibras foi a varredura à chama (Bilodeau *et al.*, 1993).

Os sensores de instrumentação por fibra ótica buscam utilizar ao máximo as propriedades da fibra ótica para efetuar medições de grandezas físicas (Ansari, 1997). A medição é feita de diferentes maneiras, porém de uma forma geral se utilizam do princípio das fibras óticas permitirem o deslocamento de feixes de luz (Johansson & Watley, 2005).

Conforme Choquet *et al.* (2000), a instrumentação por fibra ótica tem oferecido excelente vantagem em comparação com sistemas tradicionais. Dentre elas a facilidade de transmissão de sinais, capacidade inerente de multiplexação, tamanho reduzido, a não condutividade elétrica, a resposta rápida, resistência à corrosão, a imunidade contra interferências eletromagnéticas e frequências de rádio, eliminando a necessidade de custos com acessórios de proteção contra descargas elétricas e outras interferências. Conforme o mesmo autor, outra característica é que a medição por fibra ótica utiliza técnica altamente sensível possibilitando medições precisas, absolutas e perfeitamente lineares sem a necessidade de meios de estabilização.

Já Inaudi & Glisic (2005) informam que a possibilidade exclusiva que a fibra ótica tem frente a instrumentos convencionais de se medir temperatura e deformação em milhares de pontos ao longo de uma única fibra, é ferramenta fundamental para monitoramento de grandes estruturas.

Kukureka *et al.* (2005) citam a longa durabilidade de fibras óticas como outra característica importante deste sistema de instrumentação. Segundo o autor, testes foram efetuados em fibras comuns e em fibras marcadas em ambientes úmidos e secos (umidade relativa do ar de 40 a 80%). Estes testes visaram reproduzir a fadiga dinâmica e estática da aplicação em um túnel de raios de 4,5 m e 2,095 m.

Mais tarde, Tait & Rogowski (2005) propõem o emprego de sensores baseados em FBGs para o monitoramento da estrutura de aeronaves. O objetivo da aplicação seria obter informações relacionadas a desgastes em determinadas regiões do equipamento. Esses dados forneceriam informações para a manutenção preventiva da máquina, possibilitando verificar os desgastes sofridos no equipamento com base nas deformações e temperaturas mensuradas na estrutura da aeronave.

Há algum tempo as FBGs estão disponíveis comercialmente e são empregadas em diferentes dispositivos usados na área das comunicações (Xiang, 2010). FBGs estão presentes em filtros, roteadores, controle e amplificação de sinais óticos em redes de telecomunicações de WDM de alta capacidade, além de lasers a fibra (Hill & Meltz, 1997).

Estudos realizados com FBGs em um sistema de sensoriamento de vibrações mecânicas em embarcações demonstraram que o monitoramento em tempo real pode fornecer vantagens, uma vez que é possível mensurar os níveis de vibrações sofridas em alguns pontos da estrutura e estabelecer uma relação entre a velocidade de navegação e a vibração gerada durante o deslocamento. Quando há vibrações acima das projetadas para a embarcação, provoca-se um desgaste prematuro da máquina e desconforto para tripulação ou passageiros (Ivce *et al.*, 2011).

Devido as excelentes vantagens e características de sensoriamento ótico, as FBGs foram extensivamente estudadas e aplicadas como sensores. Atualmente, é possível gerar FBGs com diferentes propriedades óticas. No campo do sensoriamento ótico as FBGs têm sido empregadas na medição de diferentes parâmetros. Isso ocorre devido aos vários métodos de produção, que possibilitam obter transdutores com respostas variadas às amplitudes e fases, com um baixo custo. Por esse motivo, verificam-se diversos estudos utilizando este componente para medir parâmetros físicos como corrente elétrica (Cheng *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2006), temperatura (Yu *et al.*, 2000; Rao *et al.*, 2002; Chojnowski & Jędrzejewski, 2006; Lourenço *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2015; Singh; Sirkis, 1997), deformação e vibrações (Kersey *et al.*, 1997; Bai *et al.*, 2011; Adhami, 2012; Yi *et al.*, 2012), sensoriamento de índice de refração (Liang *et al.*, 2005; Coradin *et al.*, 2010; Negri *et al.*, 2011; Corotti JR *et al.*, 2015) e sensoriamento táctil (Heo *et al.*, 2006; Cowie *et al.*, 2007; Kamizi *et al.*, 2015).

2.2.4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES REDES DE BRAGG

Em geral, dispositivos de transdução óticos são fabricados com materiais totalmente dielétricos, que são quimicamente inertes. O fato dos sensores a fibra ótica serem totalmente imunes a qualquer tipo de interferência eletromagnética é outra vantagem, além de serem biocompatíveis e suportarem temperaturas relativamente altas graças ao alto ponto de fusão da fibra. Graças ao pequeno tamanho, transdutores leves podem ser feitos, o que é importante quando se deseja uma tecnologia optoeletrônica integrada. (López-Higuera, 1998)

Os sensores à fibra ótica podem ser classificados pelo tipo de modulação ótica utilizada, (López-Higuera, 1998). Por esta classificação tem-se: sensores de amplitude ou intensidade, de fase ou interferométrico, polarimétrico e espectroscópico. As influências externas dos mensurados nas aplicações de sensoriamento são: intensidade, fase, polarização e comprimento de onda.

Quando modulados em intensidade, a magnitude da radiação ótica varia de acordo com valores do mensurando. Mudanças de intensidade ótica são fáceis de detectar e assim estes sensores são de fácil reprodução e conceitualmente simples.

Os sensores espectroscópicos são aqueles nos quais o mensurando altera as características espectrais da luz propagada. As redes de Bragg são classificadas como sensores espectroscópicos e sua decodificação pode ser feita em comprimento de onda evitando assim efeitos cruzados resultantes de flutuações de intensidade da fonte luminosa. Além disso, as redes de Bragg possuem alta sensibilidade, capacidade de multiplexação, larga faixa dinâmica e perdas baixas.

As redes de difração de Bragg em fibra ótica são estruturas que resultam de uma modulação do índice de refração produzida do núcleo da fibra ótica ao longo do seu comprimento. A sua designação é devida à semelhança existente entre o fenômeno de espalhamento de raios X em planos de uma rede cristalina, inicialmente estudado pelo cientista inglês Lawrence Bragg, e a interferência que ocorre entre a onda incidente na estrutura e o conjunto de ondas geradas pela modulação periódica de índice de refração.

Conforme Ansari (1997), inicialmente sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg foram desenvolvidos como filtros de frequência para sistemas de telecomunicação óticos. A primeira experiência produziu fibras com redes de Bragg aplicando uma série de linhas equidistantes dentro de uma amostra de vidro de uma fibra de telecomunicação monomodo padrão utilizando laser. Segundo o mesmo autor, estas linhas que compreendem as redes de Bragg são caracterizadas por um índice de reflexão de uma amostra regular de fibra. A propagação da luz na amostra de vidro da fibra é refletida pelas interfaces entre as regiões que possuem diferentes índices de reflexão.

Pela comparação entre os picos do comprimento de onda que depende do espaçamento entre as linhas formadas, pode-se obter medições de deformação, pois se a fibra é esticada o comprimento de onda Bragg aumenta. Por estas características, o interesse pela utilização de

sensores utilizando fibras marcadas com redes de Bragg (FBG), cresceu rapidamente e várias estruturas foram instrumentadas com sensores de deformação. Os sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg permitem a aplicação de diferentes sensores em série em uma mesma fibra, tornando possível transformá-lo em um sistema multiplexado (Ansari e Meng, 2013b), (Culshaw e Kersey, 2008), (Ran *et al.*, 2005).

Um feixe de luz guiado pelo núcleo da fibra será difratado por cada plano da rede e as frequências, que satisfazem à condição de Bragg, contribuem construtivamente na direção contra-propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central específico. (Othonos, 1997). A Figura 2.4 representa uma rede de Bragg sendo iluminada por uma fonte de luz banda larga, onde são identificados alguns dos parâmetros estruturais, sendo Λ o período da modulação, e n_1 , n_2 e n_3 os índices de refração da casca (n_1), do núcleo (n_2) e dos planos da rede (n_3), respectivamente. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg λ_B , é refletida, e o restante do espectro é transmitido. Esta reflexão seletiva permite o seu uso como filtro em sistemas de comunicação e também como sensores, quando sujeita a perturbações externas.

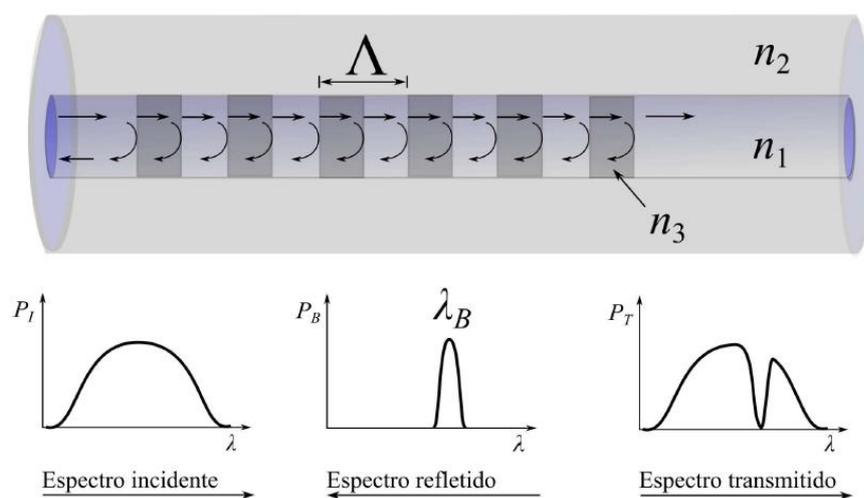


Figura 2.4 - Esquema do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra ótica (FBG). (Hill & Meltz, 1997).

As redes de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*) são formadas pela exposição do núcleo da fibra a um padrão de interferência ótica intenso, e apresentam como característica

principal a reflexão de parte da potência ótica propagando-se pela fibra. Essa reflexão é baseada na difração do feixe luminoso pela estrutura de modulação do índice de refração, acoplando uma parte do espectro em um modo de núcleo contra-propagante. O acoplamento mais forte ocorre no comprimento de onda de Bragg (λ_B) dado por:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.15)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e Λ é o período espacial da modulação do índice de refração (Hill e Meltz, 1997). Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente se torna progressivamente fora de fase e pode eventualmente cancelar-se. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida em cada plano da rede contribuem construtivamente na direção contra-propagante formando um pico de reflexão com o comprimento de onda definido pelos parâmetros da rede. Qualquer mudança nas propriedades da fibra, tais como tensão longitudinal ou temperatura, que varie o índice de refração ou o período da rede, mudará o comprimento de onda de Bragg e, portanto, o comprimento de onda refletido.

Cada FBG é sensível a um determinado comprimento de onda, uma vez que, para originar uma forte reflexão, é necessário atingir uma condição de ressonância na qual as ondas geradas pelos planos estejam em fase. Pode-se dizer que cada FBG reflete um sinal ótico com uma característica espectral bem definida, podendo ser descrita por uma distribuição gaussiana, estreita e centrada no comprimento de onda de Bragg. Essa característica possibilita a utilização de vários transdutores em uma mesma fibra ótica, ligados em série, e monitorados simultaneamente por meio de um interrogador.

2.2.5 - MÉTODOS DE GRAVAÇÃO DE UMA FBG

Existem diferentes técnicas para a fabricação de FBGs. A primeira FBG foi observada por acaso em um experimento onde uma fibra ótica foi iluminada por um laser de argônio (Hill *et al.*, 1978). Uma extremidade da fibra ótica foi clivada de forma a refletir parte do sinal e formar um padrão de interferência, resultando na gravação da FBG ao longo da fibra ótica, com periodicidade determinada pelo comprimento de onda do laser.

Uma maior flexibilidade na gravação de FBGs foi obtida com o desenvolvimento de técnicas de gravação com incidência do feixe do laser na lateral da fibra. Um exemplo está no

uso da técnica de gravação por máscaras de fase (Hill *et al.*, 1993), que possibilitou a gravação de FBGs cuja periodicidade é determinada pelo período da máscara, e não do laser.

Máscara de fase é um objeto composto de sílica, transparente à radiação ultravioleta (UV). Em uma de suas faces, existem ranhuras longitudinais. Quando a face oposta às ranhuras é irradiada por um feixe UV coerente, geram-se duas ordens de difrações. Após a máscara de fase, obtém-se a sobreposição das ordens de difrações, originando franjas de interferências. A fibra ótica é posicionada na zona de sobreposição UV, para que os pontos de máximas intensidades atuem no núcleo da fibra. Dessa forma, os índices de refração nas regiões atingidas são alterados. A modificação do índice de refração no núcleo da fibra ótica por UV é originado pelo fenômeno da fotossensibilidade. Esse mecanismo é observado em fibras óticas de sílica com dopagem de Germânio ou em fibras submetidas a tratamento com hidrogênio em altas pressões (Oliveira, 2012).

A inscrição das redes de Bragg no núcleo da fibra ótica utilizando máscara de fase permite gerar FBGs de forma simples e com uma boa reprodutibilidade (Oliveira, 2012).

Uma das técnicas mais eficazes e práticas aplicadas na produção de redes de Bragg é a técnica interferométrica baseada na iluminação direta de uma máscara de fase (Othonos, 1997). A máscara de fase é uma rede de difração de transmissão em fase. As máscaras são produzidas com uma profundidade das ranhuras adequada para o comprimento de onda ultravioleta (UV) usado de tal forma que a intensidade na ordem zero seja minimizada. Tipicamente a ordem zero carrega menos do que 3% da potência transmitida e as ordens -1 e +1 em torno de 40%.

A produção da FBG é feita pelo posicionamento da fibra próxima a máscara, na região de sobreposição das ordens -1 e +1 de difração. O padrão de interferência gerado modula o índice de refração da fibra dando origem a FBG. Na prática, quando o feixe UV incide perpendicularmente na máscara, a radiação é difratada em diversas ordens, sendo que as regiões de interesse são as mais privilegiadas (Hill & Meltz, 1997). A Figura 2.5 exemplifica a utilização da máscara para gravação de uma FBG.

Nessa técnica, para que os raios UV incidentes na máscara tenham melhor desempenho, a utilização de uma lente cilíndrica melhora significativamente a eficiência da gravação, devido a sua capacidade de convergir à radiação longitudinalmente sobre a fibra.

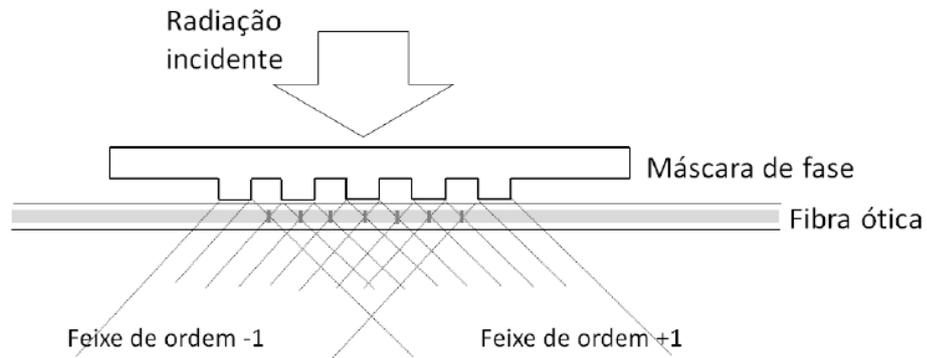


Figura 2.5 – Esquema de utilização de máscara de fase na inscrição de uma FBG (Oliveira, 2013).

O período espacial da modulação de índice de refração causado pela interferência dos feixes difratados define o período espacial da rede de Bragg inscrita na fibra ótica. O comprimento de onda de ressonância da FBG está relacionado ao comprimento de onda da radiação incidente e ao ângulo de difração dos feixes (Othonos, 1999).

$$\lambda_B = \frac{n_{eff}\lambda_w}{\text{sen}(\vartheta)} \quad (2.16)$$

em que λ_B é o comprimento de onda de Bragg, n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica, λ_w é o comprimento de onda da radiação incidente e ϑ é o ângulo de difração da ordem 1.

Ao substituir a Equação 2.15 na Equação 2.16 encontra-se uma relação entre o período espacial da rede de Bragg (Λ), o comprimento de onda da radiação incidente e o ângulo de difração dos feixes.

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2\text{sen}(\vartheta)} \quad (2.17)$$

A periodicidade espacial da máscara de fase (Λ_{mf}) pode ser determinada pela equação geral da rede de difração (Kashyap, 1999):

$$\Lambda_{mf} = \frac{m\lambda_{uv}}{\text{sen}(\theta_m/2) - \text{sen}\theta_i} \quad (2.18)$$

onde m é a ordem do feixe difratado ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), e λ_{uv} é o comprimento de onda da radiação incidente. O valor do ângulo da ordem difratada é $\theta_m/2$ e o ângulo da radiação incidente é θ_i .

Quando a radiação incide perpendicularmente à máscara de fase ($\theta_i = 0$), ao substituir a Equação (2.17) na Equação (2.18), constata-se que a periodicidade espacial da rede de Bragg inscrita com uma máscara de fase terá comprimento equivalente à metade do período da máscara e este período é independente do comprimento de onda da radiação incidente (Othonos; Kalli, 1999; Oliveira, 2012):

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.19)$$

Portanto, este método não permite a gravação de redes com diferentes comprimentos de onda de ressonância utilizando-se a mesma máscara de fase.

Uma técnica de gravação mais flexível utiliza um interferômetro de Talbot modificado para produzir as redes. O interferômetro emprega dois espelhos planos móveis que fazem a recombinação, na região da fibra, das ordens +1 e -1, difratadas por uma máscara de fase. Por meio da rotação dos espelhos é possível ajustar o ângulo entre os feixes interferentes e, portanto, a separação entre as franjas de interferência do padrão. Com essa técnica é possível escrever redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda de ressonância.

2.2.6 - SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA

O índice de refração efetivo, assim como a periodicidade entre os planos da rede podem ser afetados por deformações mecânicas ou variações térmicas, variando assim, a posição relativa do espectro de reflexão da rede de Bragg. Ao esticar ou comprimir longitudinalmente uma fibra ótica, o índice de refração efetivo e a periodicidade entre os planos da FBG (Λ) varia. Este fenômeno faz com que a FBG possa ser utilizada como

elemento sensor de deformação e temperatura. Diferenciando a condição de Bragg, Equação (2.15), em relação à temperatura (T) e à deformação (l), chega-se à expressão matemática que fornece o deslocamento do comprimento de onda ressonante de Bragg devido às variações térmicas e deformações mecânicas (Othonos, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.20)$$

em que, l é o comprimento da FBG e T é a temperatura. O termo $\partial n_{eff} / \partial l$ reflete as propriedades elasto-ópticas da fibra (variação de índice de refração induzido por efeitos de deformação). Enquanto o termo $\partial n_{eff} / \partial T$ reflete o efeito da temperatura, relacionando propriedades termo-ópticas (mudança de índice de refração devido à temperatura). Os termos $\partial \Lambda / \partial l$ e $\partial \Lambda / \partial T$ refletem deformações mecânicas e térmicas da sílica, à deformação e à temperatura, respectivamente. Pode-se determinar assim que uma variação em $\Delta\lambda_b$ é consequência da soma das perturbações térmicas e mecânicas que está acontecendo sobre a rede de Bragg.

Sendo assim, Othomos (1997) definiu que qualquer alteração na periodicidade espacial ou no índice de refração efetivo de uma rede acarretará numa mudança na posição espectral de reflexão da rede de Bragg. Portanto, qualquer perturbação que venha a alterar estas grandezas, como deformação mecânica ou variações de temperatura, afetará o espectro de reflexão da rede mudando o comprimento de onda de Bragg que é dada por (Othonos, 1997):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon_z + (\alpha + \eta) \Delta T \quad (2.21)$$

O primeiro termo à direita da Equação 2.21 representa o efeito da deformação sobre a rede, que corresponde a uma mudança no espaçamento da rede e à mudança foto-elástica induzida no índice de refração, podendo ser também representado por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (2.22)$$

onde ε_z representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento, e p_e representa a constante foto-elástica efetiva, definida como:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.23)$$

Na Equação 2.23, p_{11} e p_{12} são componentes do tensor foto-elástico e ν é o coeficiente de *Poisson*. Para uma fibra ótica de núcleo de sílica $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ e $n_{eff} = 1,482$. Quando estes parâmetros forem utilizados na Equação 3.32, a sensibilidade à deformação em aproximadamente 1550 nm é de 1,2 pm, resultante da deformação relativa da rede de Bragg de 1 $\mu\epsilon$ (1 $\mu\text{m}/\text{m}$) (Othonos, 1997).

Para o caso da aplicação de tração na fibra, uma variação positiva do comprimento de onda de ressonância será obtida como consequência dos efeitos combinados das variações de índice de refração efetivo (propriedade elasto-ótica) e do distanciamento dos planos da rede de Bragg. Quando a fibra está sujeita a compressão, a variação do comprimento de onda será para menores valores, devido ao efeito inverso, resultado da compressão sobre a rede de Bragg.

O segundo termo da Equação 2.21 representa o efeito da temperatura na rede. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à expansão térmica é resultante das mudanças no espaçamento da rede e no índice de refração. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg para uma variação de temperatura ΔT pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2.24)$$

onde $\alpha = (1/L)(\partial L/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a sílica). A quantidade $\zeta = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-ótico, que é aproximadamente igual a $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a fibra de sílica dopada com germânio. Claramente se observa que a variação do índice de refração é dominada pelo efeito termo-ótico, sendo o principal responsável pelo deslocamento no comprimento de onda de ressonância. Da Equação 2.24, a sensibilidade para uma FBG com comprimento de onda de Bragg em 1550 nm é de aproximadamente 13,7 pm/ $^\circ\text{C}$ (Othonos, 1997).

2.2.7 - APLICAÇÕES DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA COMO SENSORES ÓTICOS

Com o objetivo de propor um sistema alternativo de medições e monitoramento de estacas, iniciou-se as pesquisas desta tese para conhecer, aprofundar e aplicar melhor os benefícios da tecnologia moderna em monitoramento de fundações profundas. Diversos materiais apontaram para a utilização e aplicação de sensores óticos para realização destas leituras, devido suas características apresentarem diversos benefícios favoráveis ao desenvolvimento deste projeto.

Particularmente no que diz respeito à medição de deformações mecânicas e temperatura, sensores baseados em redes de Bragg encontraram aplicação na monitoração estrutural, sendo o foco do trabalho a aplicação deste dispositivo para a monitoração da deformação e temperatura ao longo de uma fundação em estaca.

O'Dwyer *et al.* (1998) utilizaram um microssensor dielétrico e uma FBG (Fiber Bragg Grating) para monitorar as mudanças de condutividade e de deformação, respectivamente, em um composto de fibra de carbono reforçada. As medidas foram realizadas simultaneamente e em tempo real e foi feita a correlação entre os dois sensores durante o processo de cura do compósito. A montagem utilizada por eles permitiu monitorar, em um primeiro instante, os níveis de deformação durante as etapas de liquefação, formação das cadeias poliméricas e vitrificação. Eles analisaram a secagem do composto para diferentes ciclos de temperatura e a partir dos dados coletados um perfil de cura foi gerado.

Guan *et al.* (2000) propuseram a utilização de uma superestrutura de rede de Bragg em fibra (SFBG) para medidas simultâneas de deformação e temperatura. Foram analisadas as variações de comprimento de onda e a intensidade de picos laterais estreitos do sinal de transmissão. Assim os dois efeitos foram separados a partir de interpretações matemáticas.

Rao *et al.* (2002) realizaram medidas simultâneas de deformação mecânica e temperatura em compósitos trançados resistentes à laminação. Foi utilizado um sistema em série composto de uma FBG (Fiber Bragg Grating) e um sensor de deformação à fibra ótica baseados em um interferômetro extrínseco de Fabry-Pérot (EFPI).

Conforme Davis *et al.* (1997) e Polosso (2001), pode se afirmar que os sensores baseados nas redes de Bragg (Redes de difração ótica estudadas pelo cientista inglês

Lawrence Bragg) são bastante utilizados na instrumentação de estruturas de concreto. Os sensores nas redes de Bragg permitem monitoramento de diversas características de estruturas de concreto (Ansari & Meng, 2013b e Ansari, 1997).

Segundo Choquet *et al.* (2000), utilizando-se sensores FBG (Fiber Bragg Grating) embutidos ou aplicados superficialmente ao concreto pode se medir continuamente as condições de danos, deformação, tensão, formação de fissuras, pressão intersticial e temperatura. Ansari (1997) apresenta também a possibilidade de se medir o teor de ar incorporado ao concreto com este tipo de sensor. Polosso (2001) apresenta resultados da aplicação deste sensor na detecção de corrosão em concreto armado. Yeo *et al.* (2005) utiliza este sensor para detectar a penetração de água na porosidade do concreto.

Podem ser citadas várias aplicações de sensores de fibra ótica utilizando redes de Bragg em estruturas de concreto, como por exemplo, a aplicação descrita por Watkins (2003) que aplica os sensores de fibra ótica para medir deformações em pontes de concreto. Kukureka *et al.* (2005), utilizaram sensores FBG no monitoramento de deslocamento de um túnel.

Em 2006, Pan & Liang fabricaram três tipos de sensores a fibra ótica do tipo distribuído, a fim de monitorar a saúde de compostos estruturais. Estes sensores eram pequenos e construídos da seguinte maneira: o primeiro método utilizou uma FBG entre dois filmes finos de poliamida; no segundo, a rede de sensores a fibra ótica foi imersa numa solução de poliamida e seca; e o terceiro utilizou um filme fino de poliamida fluorada para construir guias de ondas e sensores óticos. A poliamida pôde ser utilizada por resistir a altas temperaturas e possuir alta resistência mecânica. Os autores concluíram que após testes mecânicos e de sensibilidade os sensores construídos são aptos a integrar um sistema de monitoração a fibra ótica, garantindo maior proteção aos sensores quando embebidos em compósitos, mesmo com os problemas encontrados sobre a influência na sensibilidade do sensor causada pelos filmes de poliamida (Pan & Liang, 2006).

Em 2010, Lourenço *et al.* utilizaram FBGs encapsuladas como sensores de deformação e temperatura durante o processo de secagem de tintas látex comercial. O sensor construído permitiu a análise temporal dos estágios de secagem de filmes poliméricos com diferentes concentrações de solvente. Uma segunda FBG encapsulada foi utilizada como sensor de temperatura para assim evitar efeitos de sensibilidade cruzada. O objetivo do experimento era

determinar os estágios de secagem do filme de tinta (evaporação, ordenação das partículas e formação do filme) com base no estresse mecânico sofrido por ele.

Como visto, um conjunto extenso de artigos foram identificados por apresentarem diversas aplicações de sensores em fibra ótica na monitoração estrutural. Os sensores óticos baseados em redes de Bragg indicam serem os de maiores aplicabilidades face aos interesses da engenharia estrutural. Nesta mesma linha de pesquisa, pelo enfoque nas estruturas de engenharia civil destacam-se também as seguintes publicações: Villalba e Casas (2012), Li e Song (2004), Graver *et al.* (2004).

Nesta área, a tecnologia em torno dos sensores em fibra ótica tem sido um dos assuntos de maior atualidade no que diz respeito às novas tecnologias de sensores. Ao longo das duas últimas décadas, tendo em vista o interesse geral da comunidade técnica e dada a especificidade do tema, envolvendo conceitos teóricos de física e ótica aplicada, têm sido publicados alguns livros introdutórios dedicados aos sensores em fibra ótica. Destacam-se, neste contexto, alguns dos livros mais relevantes: Grattan e Meggitt (1998), Krohn (2000), López-Higuera (2002), Gupta (2006), Yin, Ruffin e Yu (2008), Udd e Spillman (2011).

Numa linha mais técnica, há outro conjunto de publicações orientadas a aplicações de sensores de fibra ótica na monitoração das estruturas de engenharia civil. Neste contexto destacam-se os livros publicados por Tennyson (2001), Measures (2001) e por Glisic e Inaudi (2007) que, além de introduzirem a tecnologia dos sensores, se dedicam à introdução de um conjunto de metodologias na avaliação do comportamento das estruturas.

2.3 - METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA SUCÇÃO

A Sucção pode ser definida como total, osmótica e matricial. Para medir as sucções utilizam-se os métodos diretos ou indiretos. Com estes métodos relacionando a sucção com o teor de umidade ou com o grau de saturação do solo não saturado, obtém-se a curva característica de retenção de água do solo. A placa de sucção, a centrífuga, o tensiômetro, o psicrômetro e o aparelho de membrana de pressão constituem os métodos diretos e, entre os métodos indiretos estão o dessecador de vazios, a balança de adsorção e o papel filtro (Marinho & Pinto, 1997). Todavia, o método utilizado nesta tese foi à medição da sucção pela técnica do papel filtro, descrito a seguir.

2.3.1 - MÉTODO DO PAPEL FILTRO

O ensaio de papel filtro consiste em colocar uma amostra de solo em contato com um papel filtro, de calibração conhecida, em um ambiente hermeticamente fechado até que o sistema entre em equilíbrio.

Marinho (1995) descreve o método do papel filtro, que consiste na utilização de um material poroso com a capacidade de absorver água e atingir um equilíbrio de sucção com a amostra. A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do solo para o papel. Na situação em que ocorre fluxo por capilaridade a sucção mátrica é determinada, pois o fluxo ocorre através das partículas de solo e das fibras do papel filtro. No caso onde o fluxo ocorre por meio de vapor, a sucção que será medida é a total, visto que para a saída das moléculas de água do interior do solo, estas deverão vencer as forças capilares e osmóticas, como mostra a Figura 2.6.

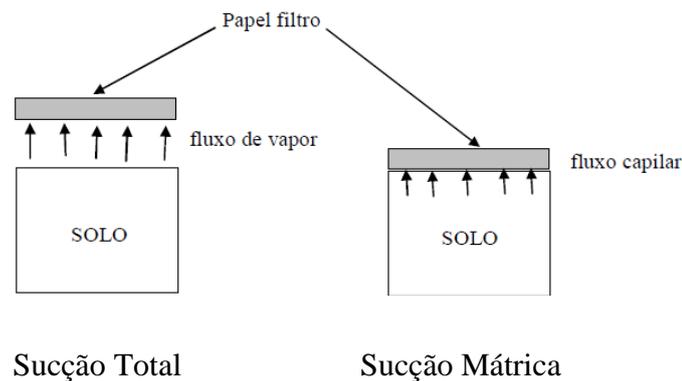


Figura 2.6 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995).

Os papéis filtro mais utilizados são o Whatman n° 42 e o Schleicher e Schuell n° 589. No entanto, Borges *et al.* (2010), após realizar um estudo sobre o papel filtro Quanty, afirma que este pode ser empregado para medição da sucção pelo método de papel filtro.

Borges *et al.* (2010) em seu estudo, anteriormente mencionado, apresenta a calibração para o Quanty:

$$Sucção \ (kPa) = e^{[(161,44 - w) / 24,07]} \ , \text{ para } w > 55\% \quad (2.25)$$

$$Sucção \ (kPa) = e^{[(79,782 - w) / 6,26]} \ , \text{ para } w \leq 55\% \quad (2.26)$$

Onde, w é a umidade do papel filtro.

Outro fator extremamente importante para uma correta determinação da sucção pelo método do papel filtro é o tempo de equilíbrio. Segundo Marinho (1995) para a determinação da sucção matricial o tempo de equilíbrio de 7 dias é suficiente, mas para a sucção total este tempo é função do nível de sucção atuante. Considerando a faixa de valores de sucção que interessam a engenharia geotécnica, esse tempo é de 15 dias.

O ensaio de papel filtro consagrou-se pela simplicidade e economia. No entanto, o seu uso requer muito cuidado em sua execução, principalmente na determinação do teor de umidade do papel, e em sua interpretação, visto que os resultados estão intimamente relacionados aos procedimentos realizados.

Observa-se então que, o papel filtro é um método indireto, onde a sucção é obtida através de uma curva de calibração, que relaciona sucção com a umidade do papel filtro e o papel filtro encontrando-se em equilíbrio de sucção com o solo fornecerá a sucção do solo.

2.4 - SUCCÃO NO SOLO

Quando os vazios num solo estão ocupados, em parte por ar e em parte por água, diz-se que o solo está não saturado. Quando o teor de umidade é baixo, o ar está presente em condutos contínuos, enquanto a água se concentra principalmente ao redor das partículas de argila e nos contatos entre partículas. As interfaces entre estas duas fases, ar-água, estão na forma de meniscos dentro dos vazios do solo podendo aparecer ainda no caso das argilas como simples contatos entre a água e o ar, uma vez que as forças de adsorção por serem significativas comandam a orientação das moléculas de água mesmo no contato ar-água. Entre as partículas de argila, no entanto, termina ocorrendo a formação de meniscos.

Quando o teor de umidade é elevado, o ar pode estar ocluído no solo na forma de bolhas isoladas.

Os fenômenos envolvidos na não saturação do solo geram uma pressão na água, sucção osmótica, ou na interação ar-água, sucção matricial, inferior à pressão atmosférica. Esta pressão é chamada de sucção sendo que no caso de predomínio do fenômeno capilar ela é intitulada capilaridade.

O comportamento mecânico dos solos não saturados é fortemente influenciado pela sucção (Gallipoli *et al.*, 2003; Wheeler & Karube, 1996). De uma maneira simplificada, esta pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais e o ganho e perda de umidade afeta a própria sucção e por consequência o comportamento hidromecânico do solo.

A sucção é normalmente dividida em duas componentes, a matricial quando é relacionado com a matriz do solo, isto é, a combinação do tipo de partículas e arranjo estrutural e a osmótica devido à composição química da água presente nos vazios do solo. A sucção total é a soma da sucção matricial (ou mátrica) e da sucção osmótica. Normalmente a sucção osmótica é inferida pela diferença entre a sucção total e a matricial (Marinho & Pinto, 1997).

A sucção matricial presente num solo não saturado é a diferença entre os valores de pressão de ar (u_a) e pressão de água (u_w). Segundo vários autores, a sucção matricial é o parâmetro mais importante para o estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados. A componente osmótica é a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água, em equilíbrio com uma solução de composição idêntica à da água intersticial, em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com água pura (Marinho & Pinto, 1997). Cabe destacar, que embora pouco considerada a sua influência no comportamento mecânico, em casos específicos como o das fundações moldadas *in loco*, no entanto, como o fluido presente no concreto apresenta propriedades distintas da do solo ela pode exercer certa influência na interação solo estrutura.

A sucção matricial varia inversamente com a quantidade de água, ou seja, ela tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação ($S_r = 100\%$), e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero. A relação entre a quantidade de água armazenada no solo e a sucção atuante é definida como curva de retenção de água do solo (SWRC).

Segundo Ceratti *et al.* (1996) como os solos têm seus poros preenchidos parcialmente por água, devido às variações ambientais constantes nos países tropicais, a pressão de água nos mesmos será menor que a pressão atmosférica, portanto negativa. Esta pressão negativa é definida como sucção ou energia livre da água e, apresenta-se como função da temperatura, umidade relativa, pressão de vapor dentre outros fatores. Embora pouco considerada, a

temperatura, como ela afeta a viscosidade e densidade da água ela também interfere na sucção matricial atuante no solo.

Segundo Walsh & Houston (1997) em regiões onde os solos estão sempre cimentados, as mudanças no regime subterrâneo e superficial das águas, que se originam da urbanização, representam a fonte da grande maioria dos problemas geotécnicos. Observa-se então, a importância de se determinar a sucção nos solos não saturados, pois esta influi diretamente no comportamento mecânico dos materiais e, conseqüentemente, no dimensionamento e na vida útil dos pavimentos assim como das fundações assentes total ou parcialmente em solos não saturados. Cabe ressaltar que nos estudos realizados pelos autores, a sucção representou o parâmetro de maior influência na resistência dos solos, e, a cimentação química apresentou-se como parâmetro de pouca influência.

Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), também destacam a importância de se avaliar a influência da sucção no comportamento desses solos. Segundo os autores, a elevada porosidade dos solos do DF aliada à baixa capacidade de retenção de água dos minerais nele presentes faz com que as variações de teor de umidade em uma dada profundidade sejam importantes ao longo do ano. O interesse na determinação da sucção consiste basicamente em se determinar o impacto das variações de umidade (saturação ou redução de pressão negativa e da secagem) na resistência dos solos, já que em solos não saturados esta resistência é controlada pela tensão normal e pela sucção, em especial a matricial (Fredlund & Rahardjo, 1993).

2.5 - CURVA CARACTERÍSTICA NO SOLO

A relação entre o teor de umidade ou o grau de saturação e a sucção é definida como curva característica. Esta curva é uma propriedade do solo que determina a quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar, através da tensão de sucção.

Acreditava-se que a curva de retenção era única para um dado solo. No entanto alguns autores, a exemplo de Gallipoli *et al.* (2003), afirmam que variações no índice de vazios produzem alterações nos poros do solo e em suas interconexões, modificando conseqüentemente o grau de saturação. Assim, a relação ($S_r \times s$) não é única para um solo, pois depende do índice de vazios.

2.5.1 - CURVA CARACTERÍSTICA TRANSFORMADA

Visando integrar os aspectos físico e químico, Camapum de Carvalho & Lerouil (2000), desenvolveram um método que simplifica o estudo e a análise do comportamento dos solos não saturados a partir da definição da curva característica do solo transformada em relação ao índice de vazios.

Para um dado solo têm-se curvas características ($pF \times Sr$) variando com o índice de vazios; pois quanto menor o índice de vazios, maior será a sucção para um mesmo grau de saturação. Portanto, ao solicitar-se em solo ocorre redução de índice de vazios e, conseqüente mudança de curva característica. Sendo assim, a transformação da curva característica é realizada multiplicando-se a sucção (pF) pelo índice de vazios (e), este produto gera uma curva característica única, representativa de diferentes índices de vazios para a mesma distribuição de poros do solo (Figura 2.7).

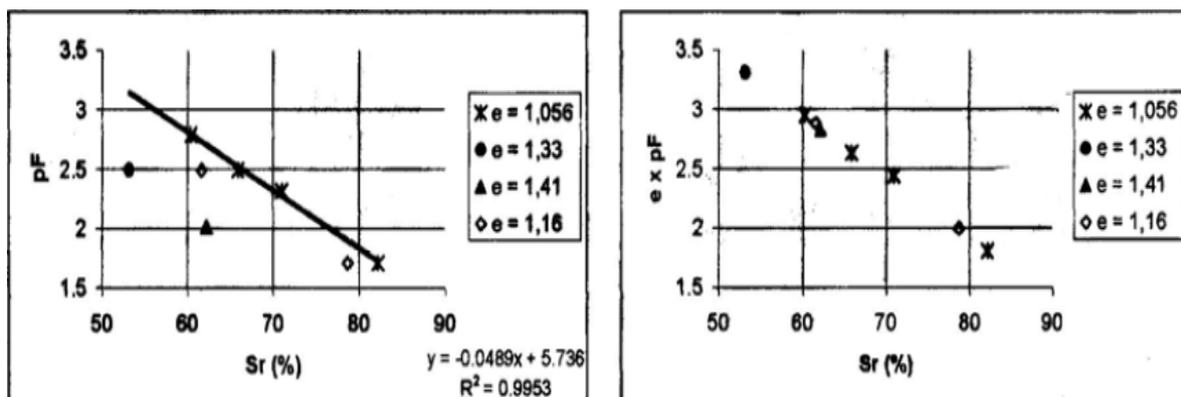


Figura 2.7 - Curva Característica e Curva Característica Transformada Camapum de Carvalho & Pereira (2001).

Baseando-se no mesmo princípio utilizado no desenvolvimento do modelo de transformação da curva característica, pode-se analisar o comportamento mecânico de um solo considerando conjuntamente os parâmetros índice de vazios e a sucção matricial ($u_a - u_w$) em pF , onde pF é o logaritmo da sucção.

Fisicamente a sucção e o comportamento mecânico de um solo não saturado dependem do teor de umidade (w) e do índice de vazios (e).

2.5.2 - CURVA CARACTERÍSTICA NO CONCRETO

As curvas de retenção de água em corpos de prova de concreto correlacionam o conteúdo de água de meios porosos com o estado de energia da água intersticial, que em condições não saturadas, vazios não totalmente preenchidos por água, é normalmente negativo em relação às condições normais de temperatura e pressão, sendo denominado de sucção. Embora possa ser descrita como uma ferramenta básica de caracterização de solos não saturados, o uso da curva de retenção de água em concretos ainda não é introduzido com frequência na prática da engenharia para a maioria dos materiais de construção. Pode-se dizer, contudo, que não somente a permeabilidade, mas também a curva de retenção desempenha um papel fundamental no fluxo de água e substâncias solúveis pelos poros do material, sendo imprescindível o seu conhecimento, para, por exemplo, estimar a vida útil das estruturas de concreto armado.

No caso específico das fundações, conhecer as curvas características do concreto e do solo torna-se relevante para o melhor entendimento da interação solo-estrutura.

A sucção nos meios porosos é uma medida do estado da energia da água intersticial que está associada com a sua capacidade de reter água, sendo normalmente expressa em termos de carga hidráulica que é a energia por peso ou de pressão que é a energia por volume. Quando a água livre é posta em contato com um meio poroso, como no concreto, ela é retida ou absorvida por ele, até o limite em que todos os vazios estejam preenchidos com água, condição de meio poroso saturado. Para remover esta água do meio poroso, energia tem de ser aplicada, indo de encontro às forças de retenção do material, que se originam, principalmente, dos fenômenos de capilaridade, adsorção e osmose. Quanto mais secos os concretos, maior será a sua sucção, de forma que, durante um processo de secagem, a água passa a ser armazenada nos poros de menores diâmetros e na superfície das partículas sólidas, formando o filme de água adsorvido.

No caso específico de fundações em concreto moldadas *in loco*, além das variações de umidade ao longo do tempo do próprio solo suporte, tem-se ainda a variação da umidade do concreto com o tempo e condições de cura podendo assim interferir na interação solo-estrutura.

Assim como nos solos, os dois principais mecanismos de retenção de água pelo concreto são a capilaridade e a adsorção, mas as reações químicas presentes no processo de

cura terminam afetando a quantidade de água presente no solo (MONTEIRO, 2016). Estes mecanismos diminuem a energia específica do fluido de forma que, sob a condição de não saturação dos poros, a pressão da água intersticial apresenta-se menor do que a atmosférica. Isso explica o fenômeno da ascensão capilar. Ascender significa galgar cotas mais elevadas, ou seja, o fluido se desloca para uma posição de maior potencial gravitacional. Como todo fluido somente flui de um maior potencial de energia para um menor, considerando-se os termos da equação de Bernoulli, a pressão da água dentro do meio não saturado necessariamente deve ser menor que a atmosférica. Para que se trabalhe sempre com valores positivos, é comum se utilizar o conceito de sucção intersticial ou matricial, que nada mais é do que a diferença entre os valores de pressão do ar, normalmente atmosférica e da água, provocada pelos fenômenos de capilaridade e adsorção, ou seja: sucção matricial = $(u_{ar} - u_w)$, onde u_{ar} corresponde à pressão na fase ar e u_w à pressão na fase água.

Segundo Vilasboas *et al.* (2016), não se encontrou na literatura a informação de que curvas de retenção para o concreto tenham sido determinadas a partir do método do papel-filtro e muito poucas são as curvas de retenção obtidas para o concreto, independentemente do método empregado. Mediante isso, eles determinaram experimentalmente a curva característica de sucção no concreto utilizando a técnica de papel filtro. Foram fabricados concretos com uma única consistência, e relações água/cimento iguais a 0,45; 0,55 e 0,65. Para cada traço, foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm, perfazendo um total de 12 CPs.

Os resultados dos ensaios de sucção pelo método do papel-filtro efetuados em amostras de concreto indica que o uso de diferentes valores de água/cimento não foi capaz de alterar a distribuição de microporos do meio poroso e conseqüentemente os valores de sucção. Desse modo, não ficou evidenciada a influência da relação água/cimento nesse caso.

2.6 - SONDAgens A PERCUSSÃO COM MEDIDA DE TORQUE – SPT-T

O ensaio de penetração dinâmica (“*Standard Penetration Test*”-SPT) constitui-se na técnica de investigação mais utilizada na elaboração de projetos de fundações no Brasil. A grande vantagem deste ensaio sobre outros que se destinam ao mesmo fim, é a de ser simples e de baixo custo, além de reunir em uma só operação a retirada de amostras, a medida da resistência à penetração e a determinação da profundidade da ocorrência do nível d’água.

O ensaio SPT é normalizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da Norma Brasileira NBR 6484 de 1980 (Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos - Método de ensaio), e consiste em se determinar o valor do índice de resistência à penetração, que corresponde ao número de golpes necessário à penetração dos 30 cm finais de um amostrador padrão no solo (Figura 2.8 a) após a cravação de 15 cm iniciais. A cravação do amostrador é feita por meio de golpes de um martelo, peso de bater constituído de uma massa de 65 kg de ferro, caindo de uma altura determinada de 75 cm com auxílio de um tripé (Figura 2.8 b). Concluída a cravação é feita a classificação táctil visual da amostra de solo, obtida no amostrador. Essa amostra pode ser utilizada para outras finalidades como determinação do teor de umidade e temperatura.

No ensaio de torque o procedimento é simples, sendo que ao término da cravação do amostrador, após o ensaio de penetração (SPT), o operador remove a cabeça de bater e acopla o disco centralizador até apoiar no tubo guia e rosqueia-se na mesma luva, onde estava acoplada a cabeça de bater, o pino adaptador do torquímetro. A seguir, encaixa-se no pino adaptador uma chave soquete, acoplando-se em seguida o torquímetro à chave soquete. Inicia-se o movimento de rotação da haste do amostrador a uma velocidade fixa, lenta e constante, usando-se o torquímetro como braço de alavanca. Esta operação deve ser realizada até se obter a leitura máxima, geralmente encontrada no início do giro, mantendo-se o torquímetro na horizontal, não forçando, assim, o encaixe do mesmo com a chave soquete e desta com o pino adaptador. Em alguns casos, é anotado também o valor residual, que por sugestão de Alonso (1996 b), deve ser medido ao final de pelo menos um giro completo do amostrador. A operação é repetida a cada metro, observada a capacidade do torquímetro e sua precisão.

Com o ensaio SPT-T obtém-se mais uma medida de resistência, o torque, que é medido em kgf.m. Normalmente o valor medido varia de 1 kgf.m à 48 kgf.m, que seria o torque máximo que um homem conseguiria aplicar em condições normais de trabalho (Soares, 1999).

Com resultados dos ensaios SPT e SPT-T pode-se obter o índice de torque (TR), que é definido pela relação entre o valor do torque medido em kgf.m e o valor da resistência à penetração N do SPT (T/N), utilizado em diversas correlações.

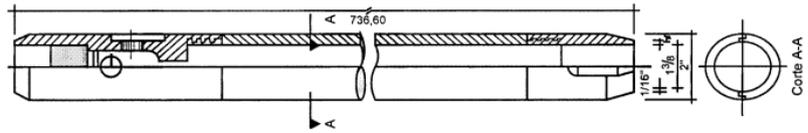


Figura 2.8 a - Amostrador - padrão "Raymond" (NBR 6484/80).



Figura 2.8 b - Ilustração do ensaio SPT.

3 - MATERIAIAS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os principais aspectos dos procedimentos práticos realizados ao longo dessa tese como a descrição dos materiais utilizados, ensaios realizados e metodologias empregadas em laboratório e em campo para execução do programa experimental proposto. Foram realizados ensaios de sucção em solos, concreto, curvas de retenção pelo método do papel filtro, umidade, sondagem do tipo SPT-T para determinação da resistência umidade e temperatura ao longo da profundidade e prova de carga estática em estacas escavadas com monitoramento elétrico e ótico para determinação de deformações e temperatura também ao longo da profundidade. O objetivo principal desse programa experimental foi verificar a variação da temperatura ao longo do próprio perfil de solo assim como a influência das variações térmicas no comportamento da curva característica de retenção de água do solo quando este é submetido a mudanças climáticas com variação de temperatura ao longo do ano.

Para a realização do monitoramento ótico e elétrico, esta pesquisa visa planejar e desenvolver uma instrumentação utilizando a tecnologia de Fibra Ótica capaz de medir as deformações em uma estaca submetida à prova de carga. Pretende-se ainda focar nesse planejamento e desenvolvimento o uso das fibras óticas como sensor térmico. Com a finalidade de validação dos dados oriundos das fibras óticas, foram colocados em paralelo uma instrumentação utilizando extensômetros elétricos já bastante utilizada em monitoração estrutural no Brasil (Cruz Júnior, 2016).

3.1 - LOCAL DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO

Para realizar as provas de cargas estáticas nas estacas instrumentadas e demais ensaios de campos realizados nessa pesquisa, bem como a retirada de amostras de solo para os ensaios de laboratórios, foi utilizado uma área localizada no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, localizado entre a Avenida L3 Norte e o Prédio da Sismologia situado em frente ao prédio SG 12 da Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro (Figura 3.1). O local do ensaio é definido pelas coordenadas -15.7659738 de Latitude e -47.8732728 de Longitude.

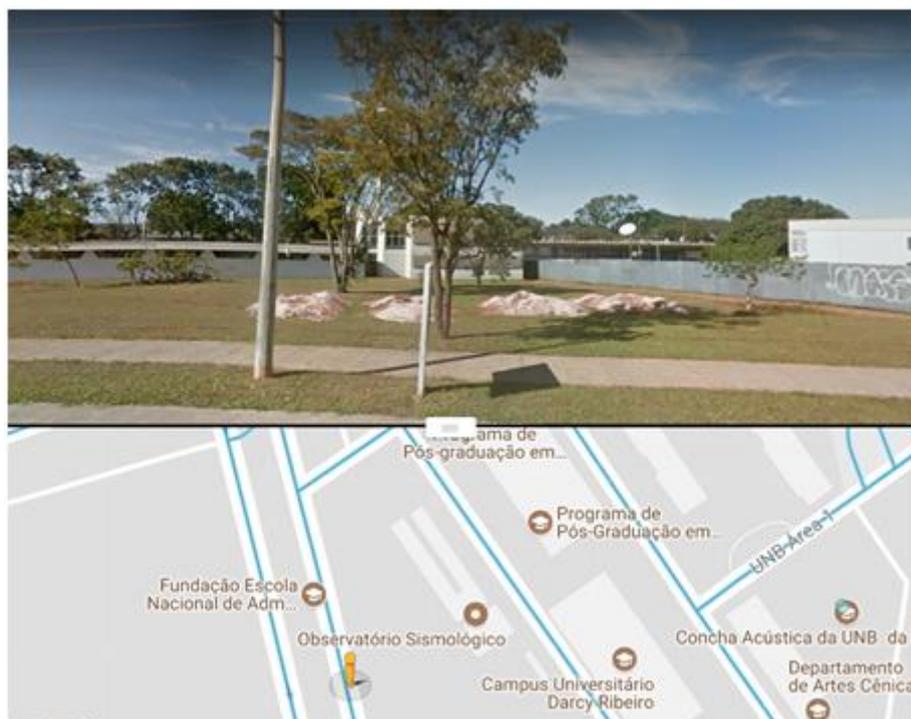


Figura 3.1 – Local da realização dos ensaios em campo e retirada de amostras para os ensaios de laboratório desta pesquisa.

3.2 - INSTRUMENTAÇÃO COM EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

Para fins de comparação instrumentou-se um pilarete e as duas estacas submetidas a provas de carga com o sistema dotado de extensômetros elétricos desenvolvido por Cruz Júnior (2016).

3.3 - INSTRUMENTAÇÃO COM FIBRA ÓTICA

Com a necessidade de iniciar o desenvolvimento do sistema de sensoriamento ótico proposto nesta pesquisa e tendo em vista o fato da Universidade de Brasília não possuir laboratórios de Fibras Óticas especializado em sensoriamento, realizou-se parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Para iniciar a construção do sensor ótico com a finalidade específica de instrumentar estacas a serem submetidas a provas de carga foi fundamental planejar e pensar primeiro em um sistema de proteção para a Fibra ótica visto que ela é muito frágil e vai estar inserida em um ambiente muito hostil quando da concretagem de uma estaca.

3.3.1 - PROTEÇÃO DAS FBG'S

Para uma proteção eficiente do sistema ótico avaliou-se as possibilidades de uso de tubo de PVC e de aço, optando-se devido à maior segurança pelo uso de um tubo de aço de 30 cm de comprimento com secção transversal circular de 2 cm de diâmetro interno. Para facilitar a instalação e ancoragem das FBGs, esse tubo foi cortado ao longo do comprimento, paralelamente ao eixo maior resultando em dois semi-tubos. Uma série de chapas circulares com dois orifícios no centro, foram soldadas em um dos semi-tubos, para ancoragem das FBGs de medida de *strain* e passagem das FBG de medida de temperatura. Para juntar os dois semi-tubos e formar o tubo novamente, foram soldados em cada semi-tubo 4 suportes com um furo no centro milimetricamente alinhadas para que deem aperto e façam a junção perfeita das duas metades do tubo. Após a instalação das fibras, o tubo era fechado, parafusado formando a cabeça sensora que a ser instalada na estaca antes da concretagem. Estes suportes externos parafusados completam o transdutor, pois além da função de fechamento do tubo servem também como aletas laterais para ancoragem do tubo ao concreto, Figura 3.2 (a) e (b).

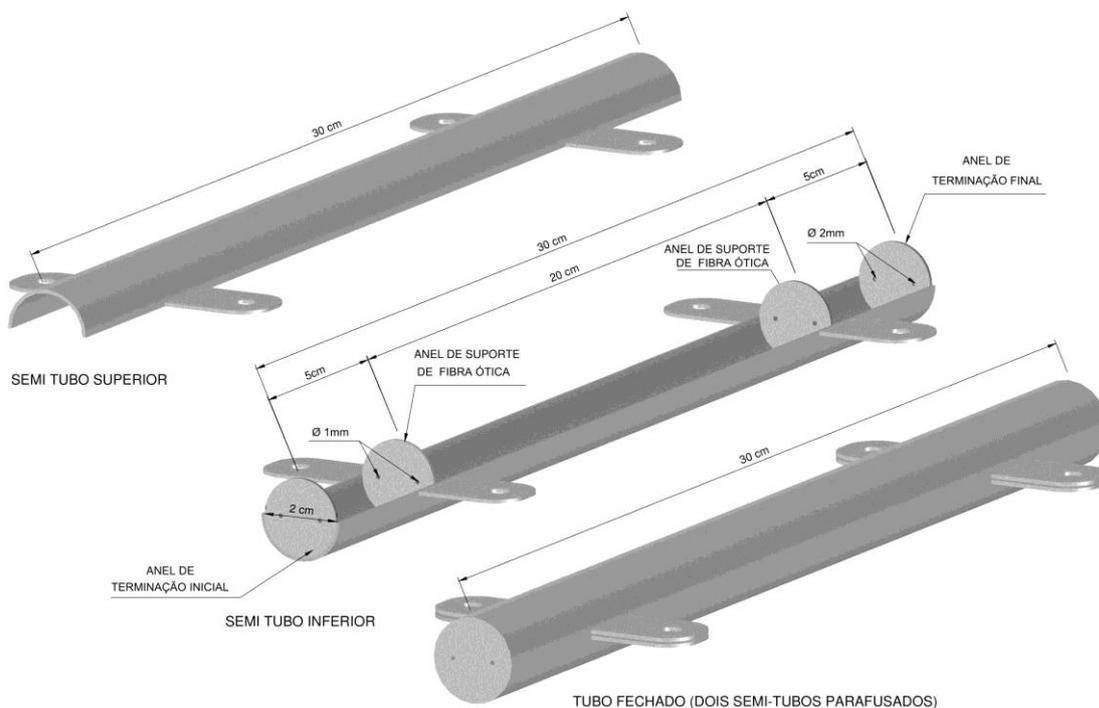


Figura 3.2 (a) – Projeto do tubo de proteção da Fibra Ótica com Redes de Bragg.



Figura 3.2 (b) - Tubo de proteção da Fibra Ótica com Redes de Bragg.

3.3.2 - INSTALAÇÃO DAS FIBRAS ÓTICAS E SENSORES FBGS NOS TUBOS

Para a realização desta etapa, alguns procedimentos prévios foram realizados como limpeza das fibras após a remoção da capa protetora (acrilato) com lenço de papel e álcool isopropanol. Preparação do cabo de fibra ótica com conector ótico já instalado em uma extremidade (*Pigtail*). Na outra extremidade removeu-se 10 cm da capa externa Figura 3.3 (a) e 5 cm do acrilato Figura 3.3 (b) e (c), colocando esta extremidade no aparelho de clivagem deixando 3 mm para fora do suporte do clivador, Figura 3.4 (a).

A clivagem de uma fibra ótica consiste no corte das extremidades das fibras em um ângulo de 90° , ou seja, cada ponta da fibra deve ter sua face paralela à ponta da outra fibra para uma perfeita fusão. Em seguida pega-se a outra fibra em que foram gravadas as redes de Bragg (sensor FBG), remove-se 3.5 cm do acrilato na extremidade que será emendada ao *pigtail* e coloca na outra extremidade no aparelho de clivagem deixando 3 mm para fora do suporte do clivador. Após isso coloca-se as duas extremidades clivadas no aparelho de fusão para a realização da emenda (Figura 3.4 b).

Com a fusão concluída, passa-se à instalação da fibra no tubo de proteção. Foram realizadas três formas de instalações diferentes para se verificar nos ensaios sobre corpos de provas em laboratório, qual o método apresentava melhor resultado nas medições das deformações. Foram adotadas: instalação da fibra ótica passando pelos anéis presentes no interior do tubo; a fibra ótica passando por uma agulha hipodérmica e esta colada na parede do tubo; a fibra ótica colada diretamente na parede do tubo. Este último método mostrou-se

mais eficiente e foi escolhido para a instrumentação das estacas a serem submetidas a provas de carga no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

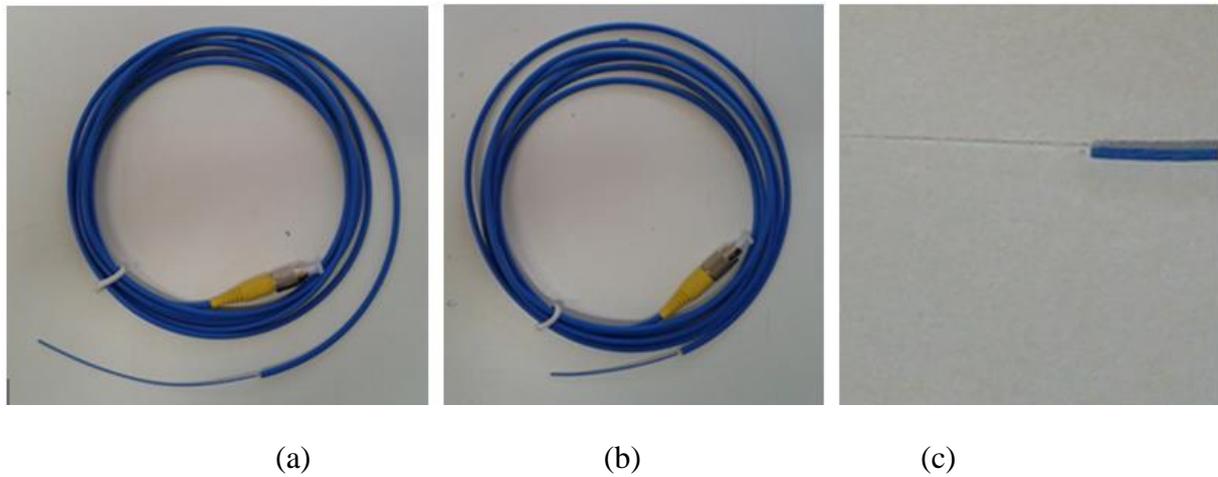


Figura 3.3 - Cabo de fibra ótica com conector – *Pigtail*: (a) Extração de 10 cm da capa externa; (b) Remoção de 5 cm do acrilato; (c) Visualização da fibra ótica exposta.

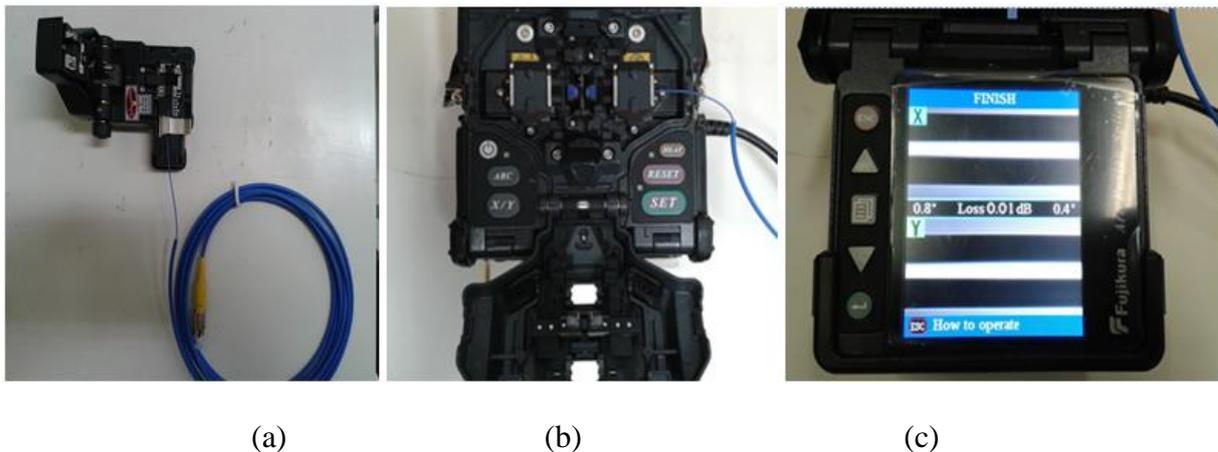


Figura 3.4 – (a) Aparelho de clivagem da fibra; (b) Aparelho de fusão aberto para colocação das fibras (c) Aparelho de fusão da fibra fechado.

3.3.3 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NOS ANÉIS DO TUBO DE PROTEÇÃO

Nessa disposição insere-se a fibra pela parte de cima do tubo, passando por todos os orifícios de suporte dos anéis. Solda-se a extremidade livre (0.5 cm de folga) no anel interno inferior com amálgama de dentista (Figura 3.5 b). Após a cura de 15 min, monta-se o tubo de cabeça para baixo em um suporte vertical e coloca-se uma massa para promover a tração

prévia da FBG e soldar no anel interno superior do tubo aguardando-se por mais 15 minutos para completar a cura (Figura 3.5 c). Em seguida, solda-se a fibra com resina dentária no anel externo superior do tubo (Figura 3.5 d).

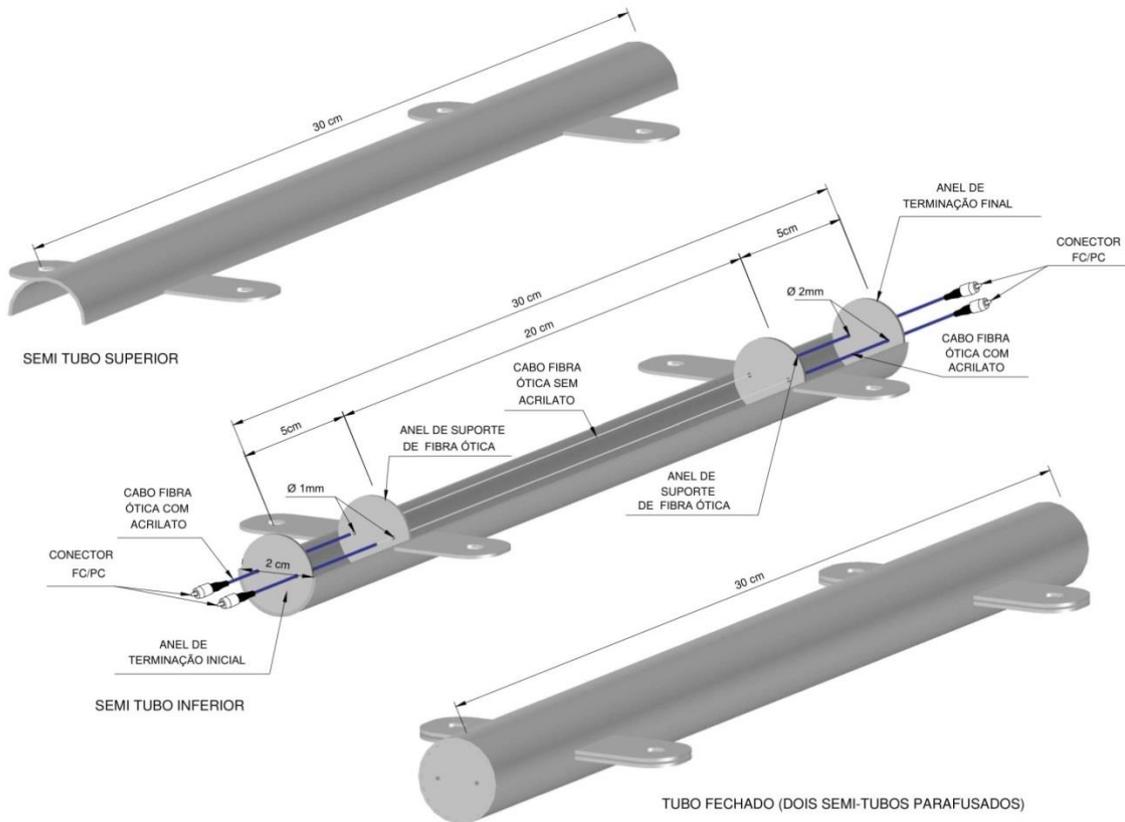


Figura 3.5 (a) – Projeto de montagem da fibra ótica nos anéis do tubo de proteção.

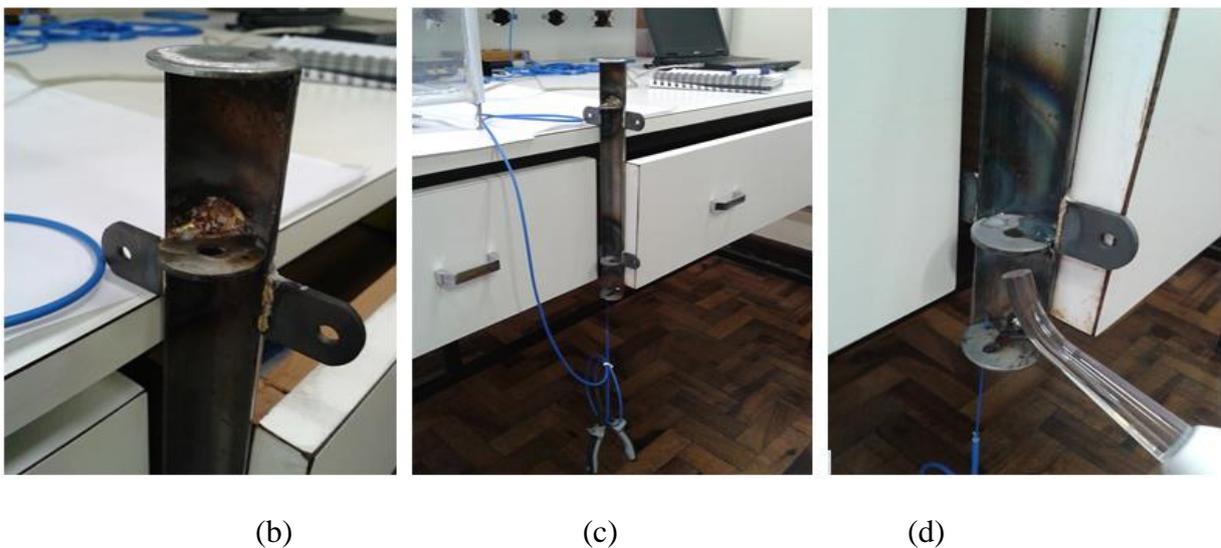


Figura 3.5 (b) (c) e (d) - Montagem da fibra ótica nos anéis do tubo de proteção.

3.3.4 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NA AGULHA HIPODÉRMICA

Nessa disposição de montagem insere a fibra sensora com as FBG por dentro da agulha hipodérmica, cola-se a fibra com resina dentária nas extremidades da agulha previamente cortada no tamanho adequado, Figura 3.6 (b), em seguida realiza-se a inserção no tubo pelos orifícios destinados à passagem das fibras e nos anéis de fixação (Figura 3.6 c). Neste método de instalação sem pré-tração na fibra já se cola a fibra e a agulha com amálgama na parede do tubo Figura 3.6 (d) e finaliza-se com a colagem da fibra no anel inferior. O método de instalação com pré-tração é semelhante à instalação anterior, porém antes da colagem coloca-se o tubo na vertical de cabeça para baixo e tensiona-se a fibra com um peso, escora a agulha na parede do tubo utilizando uma pinça hemostática e realiza-se a colagem.

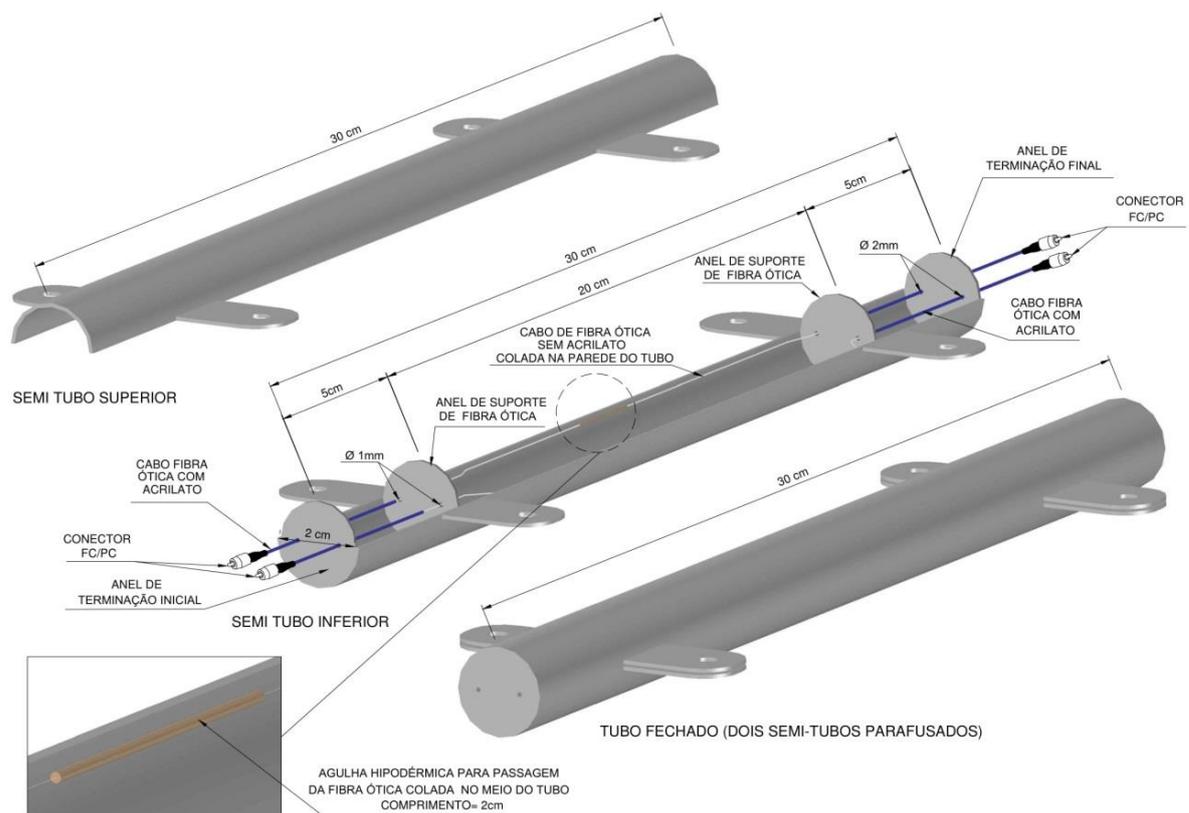


Figura 3.6 (a) - Projeto de instalação da fibra ótica na agulha hipodérmica.

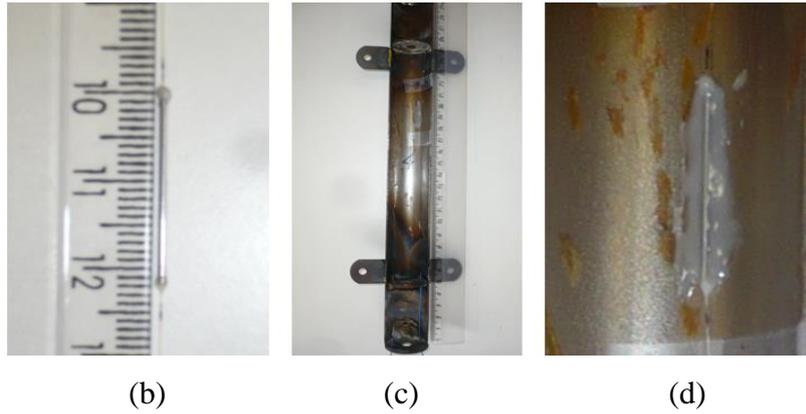


Figura 3.6 (b) (c) e (d) - Instalação da fibra ótica na agulha hipodérmica.

3.3.5 - INSTALAÇÃO DA FIBRA SENSORA (FBG) NA PAREDE DO TUBO DE PROTEÇÃO

Nesse método passa-se a fibra sensora (FBG) pela parte de cima do tubo, passando pelo orifício de suporte do primeiro anel, e sem tracionamento fixa-se a fibra com fita adesiva na parede do tubo e passa nos orifícios dos próximos anéis. Depois cola com resina dentária toda a extensão da fibra em contato com a parede do tubo. (Figura 3.7 a e b).

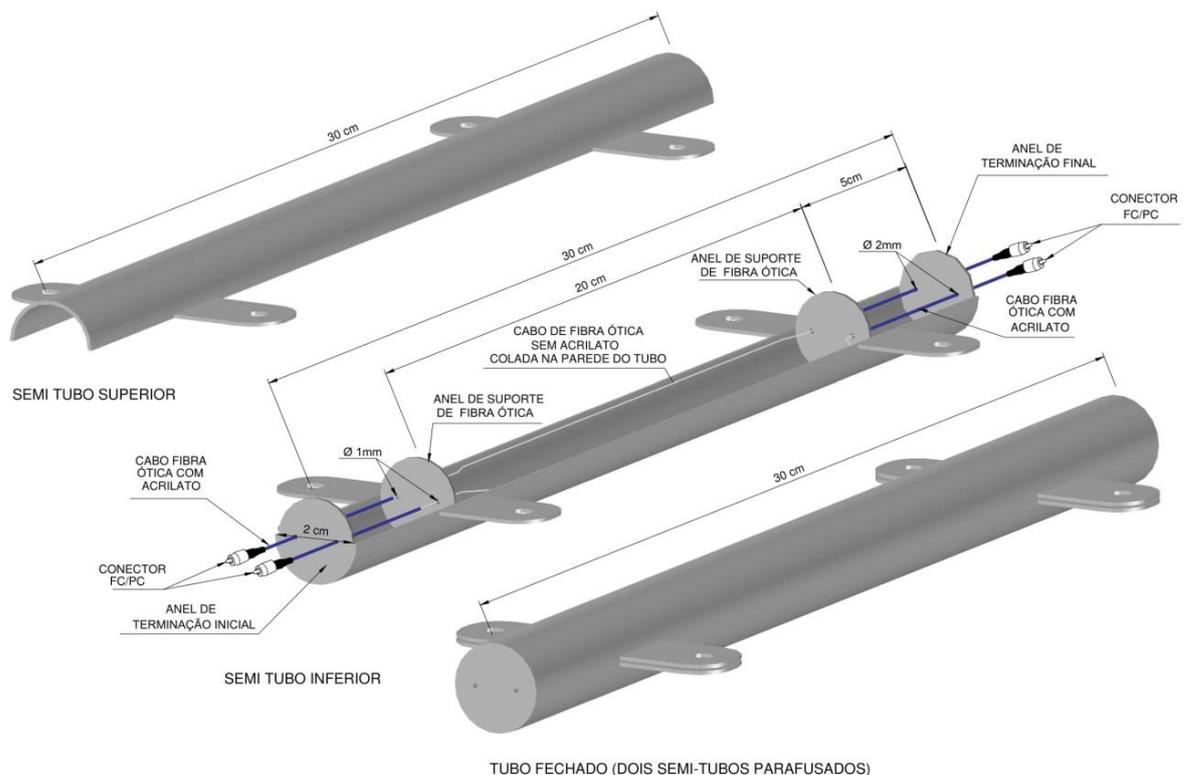


Figura 3.7 (a) – Projeto de instalação da fibra ótica na parede do tubo de proteção.

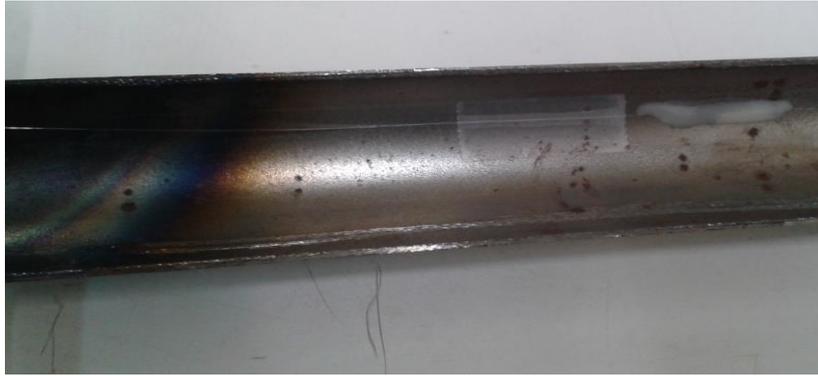


Figura 3.7 (b) - Instalação da fibra ótica na parede do tubo de proteção.

3.3.6 - MONTAGEM DOS TUBOS SENSORES

Tubo 1: laboratório a 20 °C.

Foi instalada fibra FBG (no. 122) para medida de *strain* com comprimento de onda de 1529.74 nm sem tracionamento, e depois de tracionada com massa de 60.5728 g apresentando comprimento de onda de 1530.53 nm. Também foi instalada uma FBG (n° 104) para controle de temperatura com comprimento de onda de 1536.46 nm a 20 °C a qual foi colada no anel superior e passou solta pelo anel inferior.

Tubo 2: Laboratório a 20 °C.

Foi instalada FBG (no. 112) com comprimento de onda de 1543.762 nm. Com massa de tração de 121.52 g, o comprimento de onda deslocou-se para 1545.472 nm. Esta FBG foi colada na superfície interna do tubo com amálgama, como alternativa para medir o *strain* diretamente na parede.

Foi instalada uma nova FBG no mesmo tubo, que solta apresentava comprimento de onda de 1536.892 nm e quando tracionada com uma massa de 60.5728 g, o comprimento de onda deslocou-se para 1537.803 nm após 15 minutos da colagem.

Tubo 3: Laboratório a 20 °C.

Foram instaladas duas FBGs para medida de *strain* nos suportes em anel. Uma FBG no. 124, solta com comprimento de onda de 1529.62 nm e estirada apresentou comprimento de onda de 1530.26 nm. Outra FBG no. 103, solta com comprimento de onda de 1537.22 nm e estirada com comprimento de onda de 1537.86 nm.

Tubo 4: Laboratório a 20 °C.

Foram instaladas duas FBGs para medida de *strain*. Uma FBG no. 110 instalada nos anéis de suporte, apresentando solta comprimento de onda de 1539.32 nm, e quando estirada 1540.14 nm.

Outra FBG *strain* no. 35 apresentando sem estiramento comprimento de onda igual a 1530.87 nm. Ela foi instalada sem pré-estiramento dentro de uma agulha hipodérmica (30x7, 22 Gx1 ¼”, diâmetro externo 0.75 mm, colada a FBG nas extremidades da agulha com resina dentária). A agulha foi cortada nessas dimensões. A FBG foi desencapada de maneira que 2 mm de cada lado da parte sem acrilato ficasse para fora da agulha.

Tubo 5: Laboratório a 19 °C.

Instalada FBG de *strain* no. 125 com comprimento de onda igual a 1529.48 nm quando solta e com pré-estiramento apresentou comprimento de onda igual a 1529.96 nm, dentro de uma agulha hipodérmica (30x7, 22Gx1 ¼”, diâmetro externo 0.75 mm, colada com resina dentária nas extremidades da agulha). A agulha foi cortada nessas dimensões. A FBG foi desencapada de maneira que 8 mm de cada lado da parte sem acrilato ficasse para fora da agulha.

Outra FBG *strain* no. 101, foi instalada nos anéis de suporte, e quando solta apresentou comprimento de onda igual a 1537.56 nm, e quando estirada 1538.49 nm.

3.3.7 - BASE DE CÁLCULOS PARA TRANSFORMAÇÃO DAS LEITURAS DAS VARIACÕES DOS COMPRIMENTOS DE ONDAS PARA DEFORMAÇÃO EM MICROSTRAIN

Como os equipamentos de leitura ótica registram o comprimento de onda nos ensaios, se faz necessário realizar os cálculos para que se obtenha a deformação em *microstrain* e a temperatura em °C, que são realizados respectivamente através das Equação 3.1 e Equação 3.2.

$$\text{Deformação: } (\mu\epsilon) = (\text{CDOL} - \text{CDOLo}) / 0.0012 \quad (3.1)$$

Onde: CDOLo é o comprimento de onda medido sob carga zero em nanômetro (nm).

CDOL é o comprimento de onda medido sob carga L em nanômetro (nm).

Como os comprimentos de ondas são em nm, o fator de sensibilidade das FBG para transformar para *microstrain* é de 0.0012 (nm/*microstrain*).

$$\text{Temperatura: } T=20+(\text{CDOT}-1536.46)/0.0098 \quad (3.2)$$

Onde: CDOT é o comprimento de onda medido em nm na temperatura T no momento do ensaio.

CDO é o comprimento de onda medido na temperatura de 20 °C na fase de calibração que é de 1536.46 nm.

Como os comprimentos de ondas são em nm, o fator de sensibilidade térmica das FBG para transformar de nm para °C é de 0.0098 (nm/°C).

3.4 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DOS PILARETES DE CONCRETO

Com a instrumentação toda preparada, iniciou-se a construção dos pilaretes. Todos foram executados com dimensões transversais de 15 por 15 cm e altura de 50 cm em concreto com resistência característica (fck) de 25 MPa, como descrito a seguir:

- Foram construídas 05 formas em madeirite preto plastificado de 12 mm de espessura nas dimensões de 15x15 cm e com 50 cm de comprimento para a concretagem dos respectivos pilaretes, Figuras 3.8 (a).
- Construção de 5 armações em ferro 10.0 mm com estribos de 5.0 mm nas dimensões de 10x10 cm e comprimento de 50 cm para compor o concreto armado dentro das formas, Figuras 3.8 (b) adotando-se assim o mesmo modelo já usado por Cruz Júnior (2016).



(a)



(b)

Figura 3.8 – (a) Formas dos pilaretes; (b) Armações de ferro dos pilaretes.

- Elaboração de proteção da saída das fibras óticas dos tubos sensores com mangueira corrugada e fita isolante, evitando assim que as fibras óticas fossem danificadas ou rompidas durante a concretagem, Figuras. 3.9 (a) e (b).

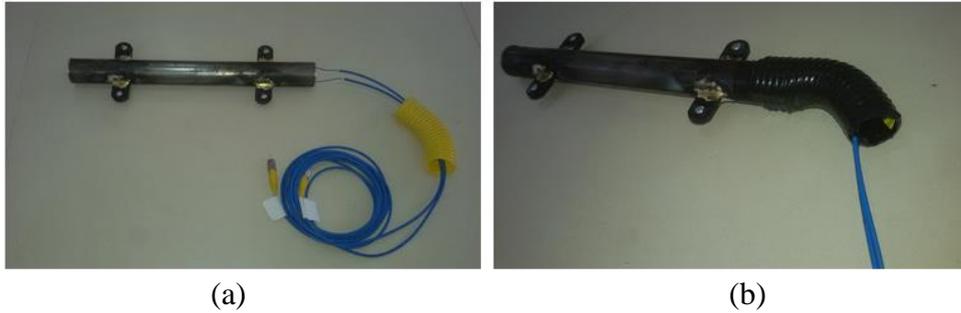


Figura 3.9 (a) e (b) – Proteção da saída das fibras óticas dos tubos sensores.

- Instalação dos tubos com os sensores óticos e também do elemento sensor elétrico resistivo *strain gage* nas armações de ferro conforme os esquemas de instalação mostrados na Figura 3.10 (a), de forma que eles fiquem bem alinhados longitudinalmente na estrutura de ferro. Para isso foram utilizados barbantes de nylon com um pouco de elasticidade com o objetivo de não influenciar nas leituras de tensões e deformações dos pilaretes, Figuras. 3.10 (b) e (c).

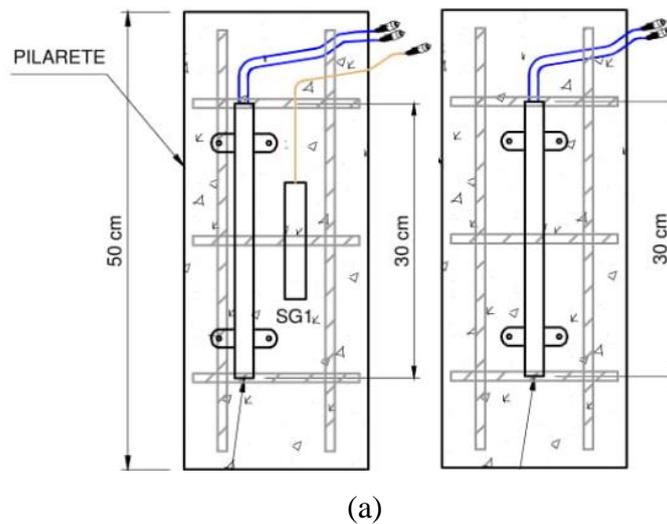


Figura 3.10 – Instalação dos tubos sensores ótico e *strain gage* nas armações de ferro.

- Colocação das estruturas com os sensores instalados nas formas de madeirite e posteriormente a concretagem com os devidos cuidados no Laboratório de construção civil do IFB-Samambaia, dos cinco pilaretes mais os corpos de provas cilíndricos para os ensaios de ruptura e módulo do concreto, Figuras 3.11 (a) e (b). Após esta etapa aguardou-se o período de cura do concreto para iniciar os ensaios em laboratório. Devido a necessidade de agendamentos de laboratório e pessoas envolvidas nos experimentos o tempo de cura foi de 150 dias.



Figura 3.11 - (a) Colocação da armação instrumentada na forma; (b) – Concretagem dos pilaretes.

3.5 - ENSAIOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Com o objetivo de comparar os resultados das deformações, e conseqüente cálculo dos módulos de elasticidade, dos concretos medidos pelos sistemas de sensoriamento ótico e elétrico instalados nos pilaretes e nas estacas instrumentadas, realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade em laboratório sobre corpos de provas moldados com o concreto utilizado nos pilaretes experimentais e nas estacas instrumentadas e submetidas a provas de carga.

3.5.1 - ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA OS PILARETES

Os ensaios de módulo de elasticidade do concreto usado nos pilaretes teste foram realizados no laboratório do Instituto Senai de Tecnologia em Construção Civil, em 08 corpos de prova cilíndricos medindo 15 x 30 cm e concretados no mesmo dia com o mesmo concreto (fck 25 MPa) utilizado nos pilaretes. Os ensaios foram realizados após 110 dias de cura em câmara úmida período esse próximo ao tempo de cura dos pilaretes. Foi utilizado no uma prensa EMIC modelo DL60000. Primeiro foi realizado o ensaio de rompimento em dois corpos de prova para se determinar a tensão máxima de ruptura conforme especifica a norma NBR 8522. Em seguida, a partir das tensões mínimas e máximas da região elástica do

concreto, inseriu-se na configuração da prensa para a realização do ensaio, onde foram obtidos os módulos de elasticidade, Figura 3.12.



Figura 3.12 - Execução de ensaio de módulo de elasticidade em corpos de prova 15 x 30 cm.

3.5.2 - ENSAIOS DE MÓDULO SOBRE O CONCRETO DAS ESTACAS INSTRUMENTADAS

No mesmo dia da concretagem da primeira estaca instrumentada em 01/11/2017 e usando o mesmo concreto, foram moldados 10 corpos de prova 10 x 20 cm e guardados na câmara úmida para cura do concreto. O ensaio de módulo de elasticidade destes corpos de provas foi realizado no dia 12/06/2018 no Laboratório de Materiais no prédio SG-12 da Universidade de Brasília. Cabe salientar que a prova de carga foi realizada antes, em 29/11/2017. Os ensaios seguiram as recomendações da norma NBR 8522 (Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação) de maio de 1984, onde se executa primeiro a retificação dos corpos de prova e em seguida faz-se o ensaio de rompimento em dois corpos de provas para determinar a tensão máxima de ruptura. Com esses valores, calibra-se o software da prensa EMIC DL 3000 para execução do ensaio de módulo de elasticidade em mais três corpos de prova dentro da região elástica do concreto conforme especifica a referida norma (Figura 3.13).

A segunda estaca instrumentada foi concretada em 20/03/2018 e da mesma forma, foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos medindo 10 x 20 cm e guardados na câmara úmida para cura do concreto. No dia 13/06/2018 foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade no Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília adotando-se o mesmo procedimento dos ensaios realizados sobre o concreto da estaca instrumentada 1.



Figura 3.13 – Ensaio de Módulo de Elasticidade dos corpos de provas 10 x 20 cm da Primeira Estaca.

3.6 - ENSAIOS DOS PILARETES INSTRUMENTADOS

Foram realizados no laboratório do Instituto Senai de Tecnologia em Construção Civil em Taguatinga-DF, Figuras 3.14 (a) e (b), os ensaios de compressão com carregamento e descarregamento nos 5 pilaretes instrumentados conforme a sequência apresentada nos subitens a seguir.



Figura 3.14 (a) – Pilaretes preparados para teste.

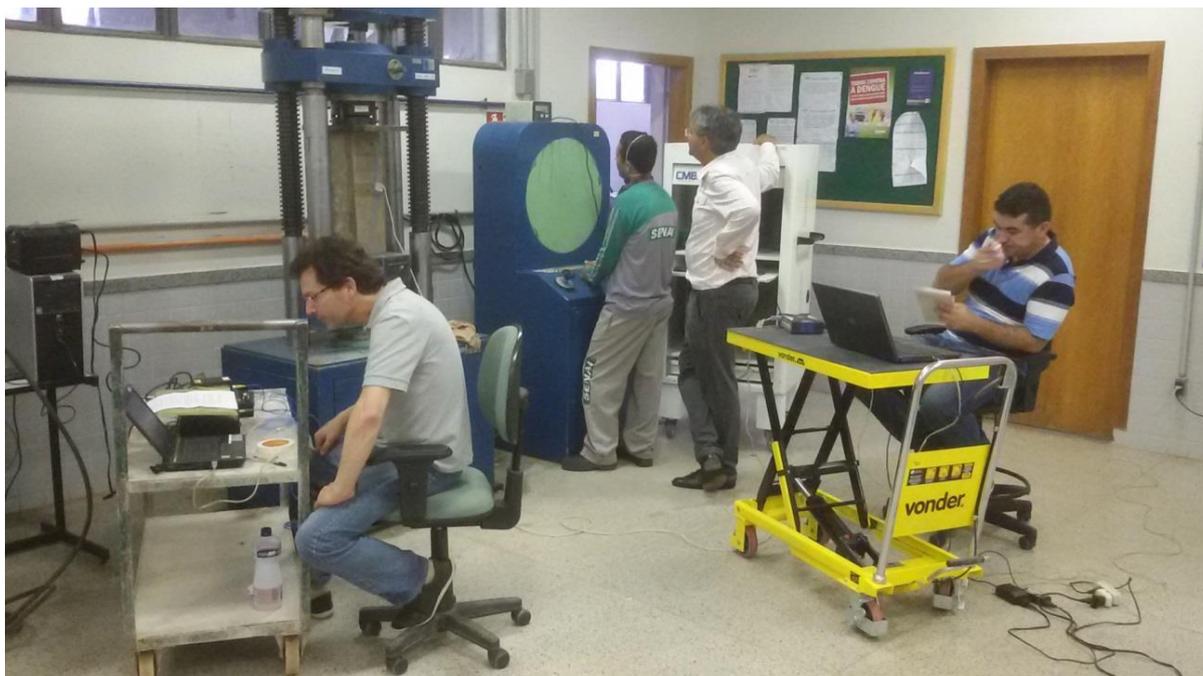


Figura 3.14 (b) – Realização de ensaio sobre pilarete.

3.6.1 - ENSAIO DO PILARETE 1

Instrumentado com a cabeça sensora ótica com monitoramento de deformação e temperatura com as fibras instaladas nos anéis do tubo, e em paralelo também instrumentado com extensômetros elétricos *strain gages* para leitura de deformação conforme o modelo apresentado por Aleones (2016). Foram realizados três ensaios nesse pilarete com as seguintes características:

1º Ensaio – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e a temperatura ambiente estava a 26°C com umidade relativa 62,3%, e colocado na prensa para início do ensaio de compressão axial por estágio compreendendo as fases de carregamento e descarregamento, Figura 3.15. Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete com acréscimo por estágio de 30 kN até atingir a carga 202 kN que corresponde a uma tensão final de 8,98 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.



Figura 3.15 – Pilarete 1 montado para ensaio instrumentado com uma Fibra leitura de deformação outra de temperatura (cabos azuis) e *strain gages* para leitura de deformação (cabo bege).

2º Ensaio – O pilarete 1 foi retirado da estufa onde permaneceu por 15 horas em temperatura de 45°C, e conduzido ao local de ensaio com temperatura ambiente de 23,8°C e umidade relativa de 71,4%. Para este ensaio o carregamento foi efetuado com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de 30 kN até atingir 216,3 kN o que corresponde a uma tensão final de 9,61 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.

3º Ensaio – Após o encerramento da etapa anterior, o pilarete 1 foi recolocado na câmara úmida e após 5 horas de permanência, foi reconduzido à prensa para a execução desse terceiro ensaio com sua temperatura externa em 25 °C, a temperatura ambiente estava a 24,6°C e a umidade relativa 64,6%. Foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de aproximadamente 30 kN até atingir 297 kN correspondendo a uma tensão final de 13,20 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de aproximadamente 30 kN.

3.6.2 - ENSAIO DO PILARETE 2

Instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, sendo uma instalada na parede do tubo e a outra nos anéis de suporte para passagem das fibras. Foi realizado um ensaio compreendendo carregamento e

descarregamento dentro das características elásticas do concreto e um segundo ensaio de rompimento.

1º Ensaio Carregamento/Descarregamento – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e a temperatura ambiente estava a 24,5°C com umidade relativa de 68,1%, e colocado na prensa para realização dos ensaios. Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de 30 kN até atingir a carga 261,7 kN correspondente a uma tensão final de 11,63 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.

2º Ensaio, Rompimento – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e conduzido à prensa de ensaio estando a temperatura ambiente em 25,5°C e a umidade relativa em 61,3%. Foi realizada a etapa de carregamento até romper o pilarete com aplicação de carga crescente de compressão axial em patamares de aproximadamente 30 kN. A ruptura se deu na carga 459 kN, correspondendo a uma tensão final de 20,4 MPa.

3.6.3 - ENSAIO DO PILARETE 3

Instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação instaladas nos anéis de suporte para a passagem das Fibras sensoras. Uma das fibras foi danificada, não apresentando leitura. Realizou-se ensaio de carregamento e descarregamento dentro das características elásticas do concreto.

Ensaio Carregamento/Descarregamento – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e a temperatura ambiente estava a 27,3°C com umidade relativa 54,8% e colocado na prensa para início dos ensaios. Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de 30 kN até atingir 225,6 kN correspondendo a uma tensão final de 10,03 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.

3.6.4 - ENSAIO DO PILARETE 4

O pilarete 4 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, sem tracionamento, sendo uma instalada na agulha hipodérmica e a

outra nos anéis de suporte. Foi realizado um ensaio de carregamento e descarregamento dentro das características elásticas do concreto e um segundo ensaio de rompimento.

1º Ensaio Carregamento/Descarregamento – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e a temperatura ambiente estava a 25,5°C com umidade relativa 60,7%, e posto na prensa para realização dos ensaios. Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de 30 kN até atingir 270 kN correspondendo a uma tensão final de 12 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.

2º Ensaio, Rompimento – Foi realizada a etapa de carregamento até romper o pilarete com aplicação de carga crescente de compressão axial em patamares de aproximadamente 30 kN. A ruptura ocorreu ao se atingir a carga 494 kN, correspondendo a uma tensão final de 21,96 MPa.

3.6.5 - ENSAIO DO PILARETE 5

O pilarete 5 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, com tracionamento, sendo uma instalada na agulha hipodérmica e a outra nos anéis de suporte de passagem das fibras óticas.

Ensaio Carregamento/Descarregamento – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 24,0°C e a temperatura ambiente estava a 26,1°C com umidade relativa 53,7%, e posto na prensa para realização dos ensaios. Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão axial no pilarete em patamares de 30 kN até atingir 271 kN correspondendo a uma tensão final de 12,04 MPa. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em patamares de 30 kN.

3.7 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA A SER ADOTADO NA INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA

Após a finalização de todos os ensaios e análise dos resultados de cada um dos métodos construtivos da fibra ótica nos tubos de proteção, verificou-se que o método construtivo de instalação das fibras nos anéis do tubo, em alguns casos apresentaram

problemas nos resultados obtidos nas leituras prejudicando a análise dos dados, ou seja, dois tubos funcionaram adequadamente, mas três tubos apresentaram resultados com deformações muito baixas, levando a deduzir que houve problemas na instalação segundo esse método, além de ser ele de difícil execução. De forma similar, a instalação da fibra na agulha hipodérmica também possui um maior grau de dificuldade na execução além de não apresentar resultados de deformações em conformidade com os resultados obtidos do ensaio de módulo do concreto. O método que apresentou a combinação dos resultados mais adequados e que também correspondeu à maneira mais fácil de instalação da fibra, foi o sistema de instalação da fibra ótica toda colada na parede do tubo. Este método apresentou uma alta capacidade de deformação da fibra ótica, boa repetibilidade dos ensaios, e apresentou resultados coerentes e em concordância com os resultados do ensaio de módulo do concreto. Desta forma, este foi o método escolhido para a construção dos tubos sensores a serem instalados na instrumentação das estacas em campo a serem submetidas aos ensaios de prova de carga estáticas do tipo lenta.

3.8 – ENSAIOS COMPLEMENTARES

3.8.1 - ENSAIOS DAS BARRAS DE AÇO E ALUMÍNIO INSTRUMENTADAS

Diante dos resultados obtidos nos ensaios das primeiras provas de carga realizadas nos pilaretes com problemas em parte do sistema de instrumentação implantado, decidiu-se analisar uma técnica alternativa de montagem da fibra ótica sensora colando-a diretamente em uma barra de aço, a exemplo do que é geralmente feito quando se usa *strain gages* no monitoramento de deformações em provas de carga estáticas. Em complemento a esta decisão, montou-se também a fibra ótica sensora colada diretamente na barra de alumínio com os *strain gages* instalados, que foram utilizados neste trabalho para as leituras de deformações a serem comparadas com os resultados oriundos do sistema ótico.

Para a instalação da montagem das fibras óticas sensoras na barra de aço, foi utilizada uma barra de aço de 2 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento já instalada com os sensores resistivos elétricos *strain gages*. Como havia espaço suficiente para instalação das fibras, decidiu-se instalar o sensoriamento ótico colado longitudinalmente assim como transversalmente na barra, de modo a se obter as medidas de deformações nas direções longitudinal e transversal da barra, Figura 3.16.

Já a instalação da fibra ótica sensora na barra de alumínio instrumentada com os sensores resistivos elétricos *strain gages*, só foi possível colar na direção longitudinal devido ao pouco espaço disponível, pois a barra de alumínio possui apenas 14 cm de comprimento por 1,2 cm de diâmetro, Figura 3.17.



Figura 3.16 – Barra de aço instalada com *Strain gages* e Fibras sensoras longitudinal e transversal.



Figura 3.17 – Barra de alumínio instalada com *Strain gages* e Fibra sensora longitudinal.

3.8.1.1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DAS BARRAS DE AÇO INSTRUMENTADAS

Os ensaios nas barras de aço instrumentadas com fibra ótica e *strain gages* foram realizados na Prensa MTS 800 (Material Test System – Sistema de Teste de Materiais) do laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Figura 3.18. Foram realizados ensaios de tração e compressão da barra para obter as leituras de deformação longitudinal e transversal do sistema ótico e as leituras do sistema elétrico convencional. Foram realizadas 4 etapas com carregamento e descarregamento conforme a sequência a seguir:

Ensaio de Tração 1 – Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de tração na barra em estágios de 1 kN até atingir 5 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em estágios de 1 kN com tempo de espera entre os estágios também de 1 minuto.

Ensaio de Tração 2 – Carregamento com aplicação de carga crescente de tração na barra em estágios de 5 kN até 30 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento obedecendo aos mesmos critérios em processo inverso.

Ensaio de Tração 3 – Carregamento com aplicação de carga crescente de tração na barra em estágios de 5 kN até 40 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em processo inverso.

Ensaio de Tração 4 – Carregamento com aplicação de carga crescente de tração na barra em estágios de 5 kN até 50 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em processo inverso.

Ensaio de Compressão – Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão na barra em estágios de 1 kN até 5 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em estágios de 1 kN com tempo de espera entre os estágios também de 1 minuto. Não foram realizados outros ensaios de compressão na barra aumentando a carga por orientação técnica para se evitar a flambagem da mesma.

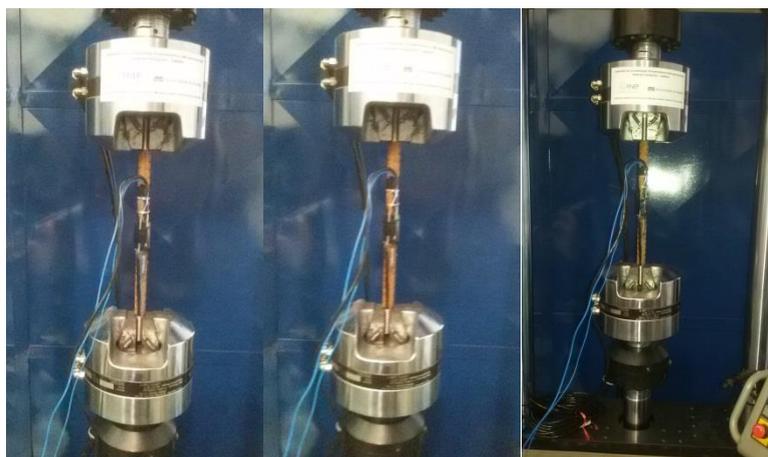


Figura 3.18 – Ensaios na Barra de Aço.

3.8.1.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO DAS BARRAS DE ALUMÍNIO INSTRUMENTADAS

Os ensaios nas barras de alumínio instrumentadas também foram realizados na Prensa MTS 800 (Material Test System – Sistema de Teste de Materiais) do laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Figura 3.19. Foram realizados ensaios de compressão da barra para obter as leituras de deformação longitudinal do sistema ótico e as leituras do sistema elétrico convencional. Nesta etapa não foram realizados ensaios de tração devido à barra de alumínio ser muito pequena com apenas 14 cm ficando inviável a fixação nas garras da referida prensa. Foram realizadas 3 etapas com carregamento e descarregamento conforme a sequência a seguir:

Ensaio de Compressão 1 – Primeiro foi realizada a etapa de carregamento com aplicação de carga crescente de compressão na barra em estágios de 1 kN até 5 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em estágios de 1 kN com tempo de espera entre os estágios também de 1 minuto.

Ensaio de Compressão 2 – Carregamento com aplicação de carga crescente de compressão na barra em estágios de 1 kN até 8 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento obedecendo aos mesmos critérios em processo inverso.

Ensaio de Compressão 3 – Carregamento com aplicação de carga crescente de compressão na barra em estágios de 1 kN até 10 kN com tempo entre os estágios de 1 minuto. Em seguida realizou-se a etapa de descarregamento em processo inverso.



Figura 3.19 – Ensaio da Barra de Alumínio.

3.9 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DAS ESTACAS ESCAVADAS

Para realização das provas de cargas estáticas (PCE) foram construídas duas estacas escavadas. A primeira estaca foi construída em 01/11/2017 e a segunda em 20/03/2018, onde foram retirados do concreto usado em cada estaca 10 corpos de provas cilíndricos 10 x 20 cm para realização dos ensaios de módulo de elasticidade.

3.9.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REAÇÃO

O sistema de reação utilizado nas provas de cargas sobre as estacas instrumentadas é constituído de 4 estacas escavadas de 70 cm de diâmetro e 12 m de profundidade com um tirante de aço de 50 mm de diâmetro por 10 m de comprimento implantados no centro de cada estaca de reação, onde foram montadas as vigas de reação, Figura 3.20.



Figura 3.20 – Sistema de reação para prova de carga da estaca instrumentada.

3.9.2 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA 1

A estaca 1 foi perfurada por um trado acoplado ao caminhão perfuratriz e apresentava 30 cm de diâmetro e 8,60 metros de comprimento (Figura 3.21a), sendo composta por 8 m de concreto armado e um bloco de coroamento com 60 cm de altura, Figura 3.21b.

A armação da estaca era constituída por barras de ferro com 8 m de comprimento e 10.0 mm de diâmetro, com estribos em ferro de 5.0 mm espaçados de 20 cm um do outro. Montou-se também a armação de 50 x 50 x 50 cm do bloco de coroamento toda em ferro 10.0 mm de diâmetro.



Figura 3.21(a) – Execução das estacas com trado mecanizado.



Figura 3.21 (b) – Escavação da cava para o bloco de coroamento.

A proteção da saída das fibras óticas dos tubos sensores foi feita com mangueira corrugada e fita isolante, minimizando as ações que pudessem danificar ou romper as fibras óticas durante a concretagem. Inicialmente os tubos são apresentados com as fibras óticas apenas com sua capa de proteção natural, Figura 3.22 (a). A Figura 3.22 (b) mostra que foram encaixadas nas extremidades dos tubos mangueiras corrugadas com 1 polegada de diâmetro para proteção da saída da fibra ótica. Todas essas proteções das extremidades dos tubos foram cuidadosamente revestidas com várias camadas de fita isolante sem emendas, envolvendo também os suportes de fixação dos semi-tubos, evitando-se assim que o pedaço de mangueira corrugada se desprendesse do tubo, Figura 3.22 (c). Em seguida, os tubos foram afastados um do outro para se estirar as fibras sem pressão e revesti-la em toda a extensão da fibra ótica com mangueira corrugada de ½ polegada aberta ao longo de seu comprimento com uma fenda de 2 mm de espessura apenas para passagem dos cabos de fibras óticas, sendo passado um de cada vez. Uma vez passados os cabos de fibras óticas, as extremidades da mangueira corrugada de ½ polegada é inserida dentro da extremidade da mangueira corrugada de 1polegada já fixada nos tubos, Figuras 3.22 (d) e (e). Após isso, toda

a extensão das mangueiras corrugadas foi coberta com várias camadas de fita isolante, fechando-se assim a fenda aberta e fixando suas extremidades, Figura 3.22 (f).

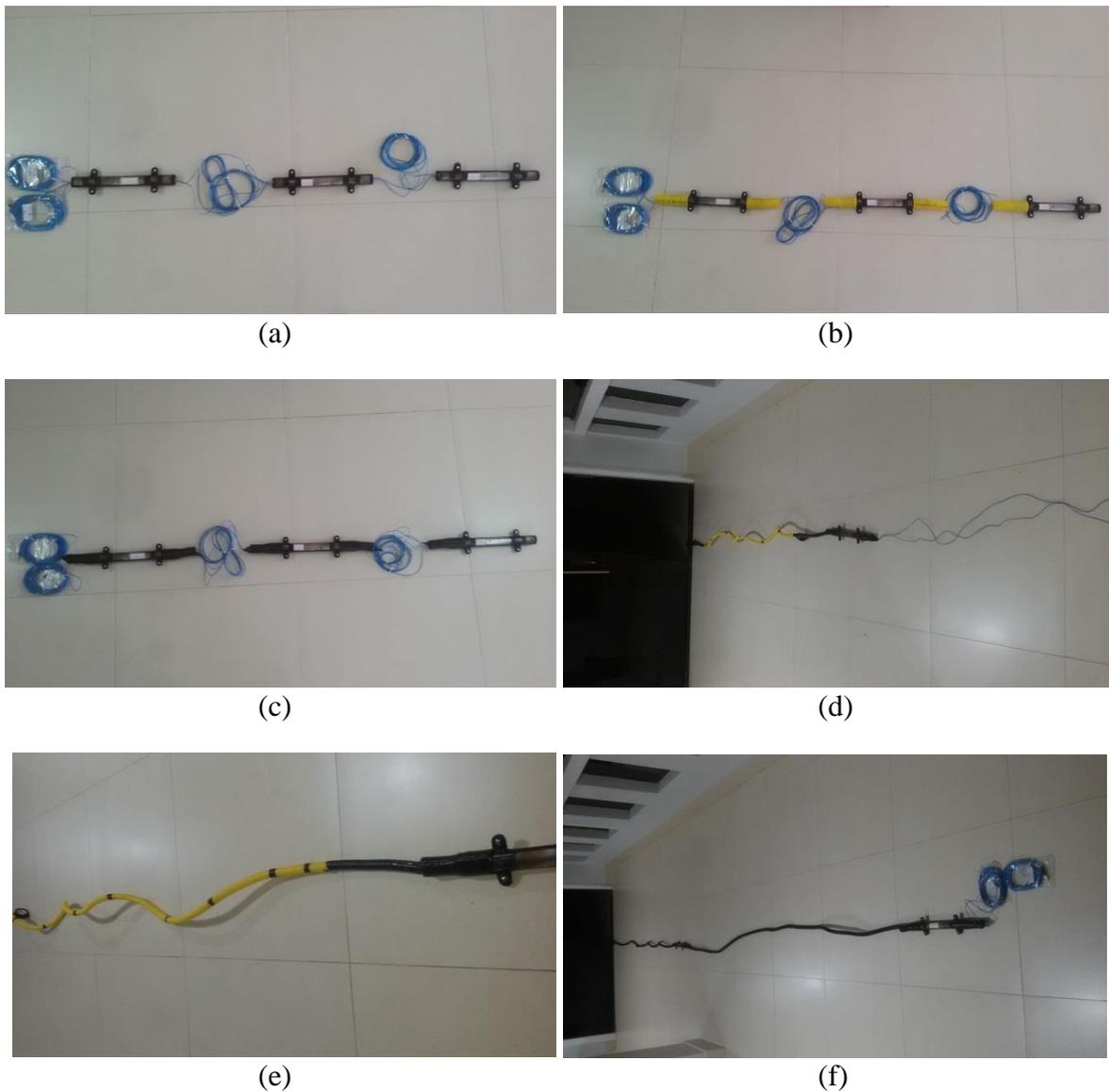


Figura 3.22 – (a) tubos apresentados com as fibras óticas apenas com sua capa de proteção natural; (b) tubos com pedaços de mangueira corrugada de 1 polegada encaixados nas extremidades; (c) revestimento das proteções das extremidades dos tubos com fita isolante; (d) e (e) proteção das fibras óticas com mangueira corrugada de ½ polegada; (f) revestimento de toda a extensão das mangueiras corrugadas com várias camadas de fita isolante.

Montado o sistema de instrumentação procedeu-se à instalação dos tubos com os sensores óticos e também o elemento sensor elétrico resistivo *strain gages* na armação de ferro conforme os esquemas de instalação mostrados nas Figuras 3.23 (a) e (b). Foram instalados 3 tubos com sensores óticos de deformação e temperatura ligados em série, sendo

o primeiro tubo a 1 m, o segundo tubo a 4 m e o terceiro tubo a 7 m do topo da estaca. Como contingência nas leituras, foram instalados tubos independentes com leitura ótica de deformação e temperatura a 1m e 7 m do topo da estaca. Em paralelo a toda esta instalação, foram instaladas as barrinhas de alumínio com os *strain gages* também a 1m, 4m e 7m do topo da estaca. Toda instalação foi realizada de forma que os sensores óticos e elétricos ficassem bem alinhados longitudinalmente na estrutura de ferro, Figura 3.24.

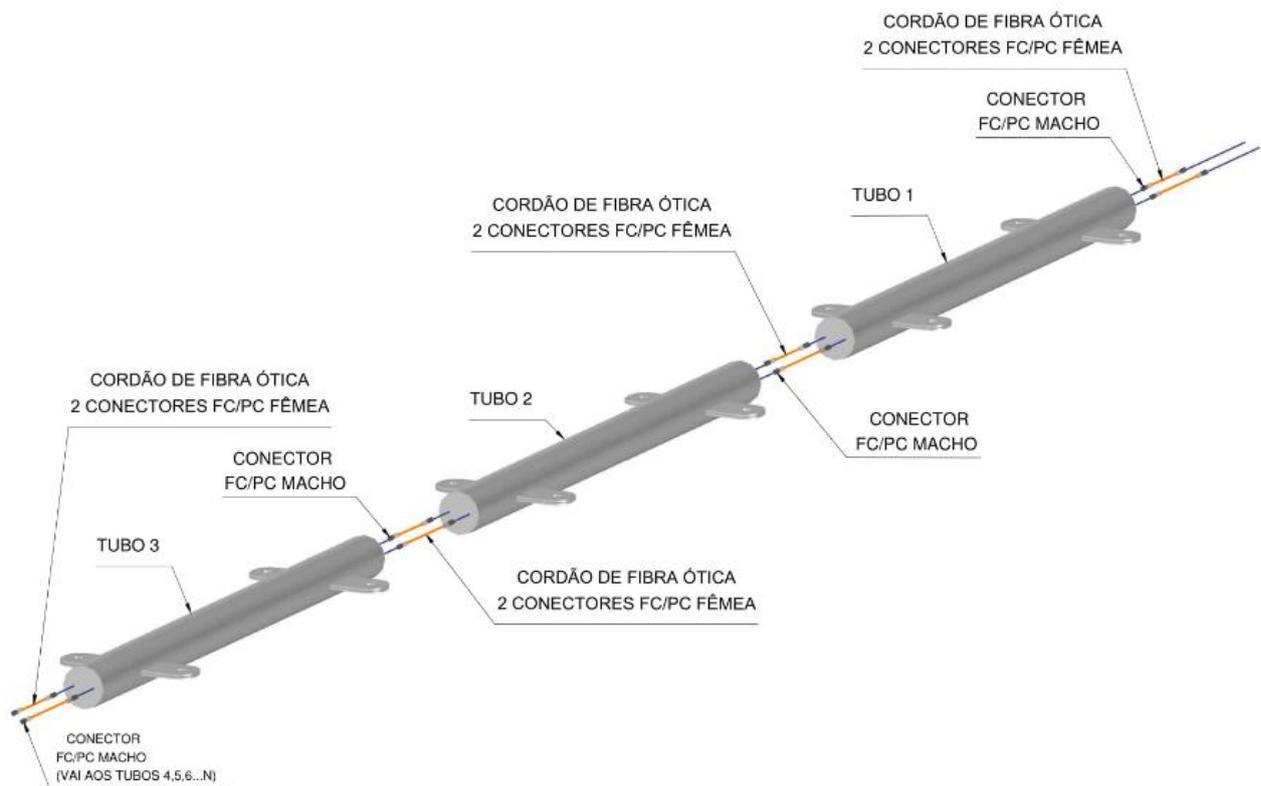
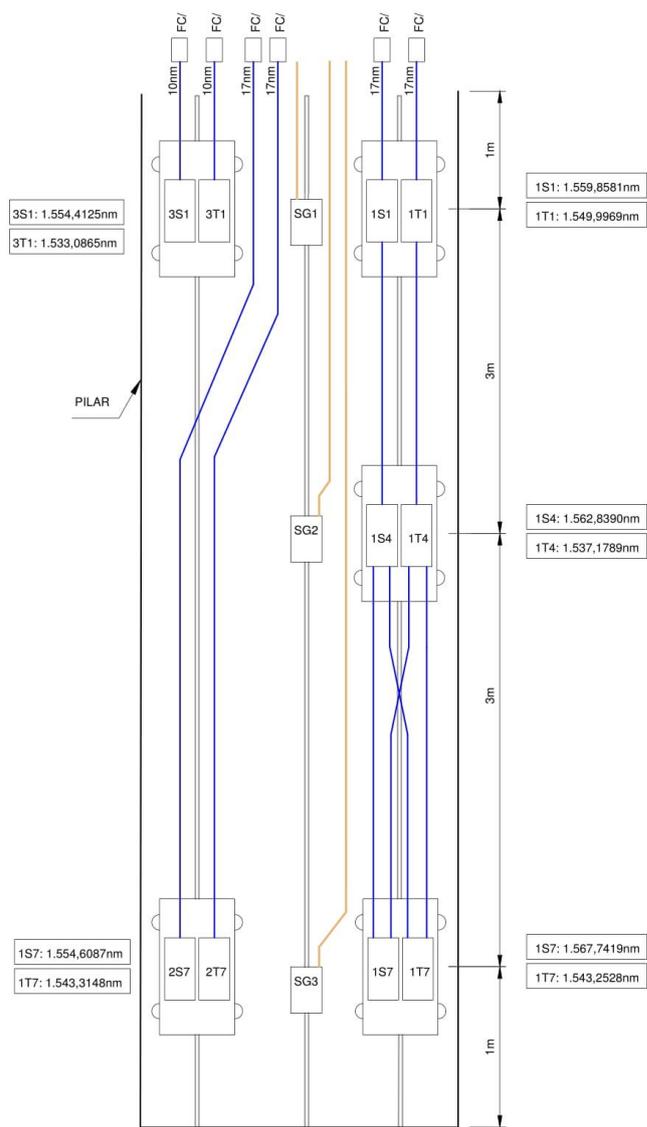
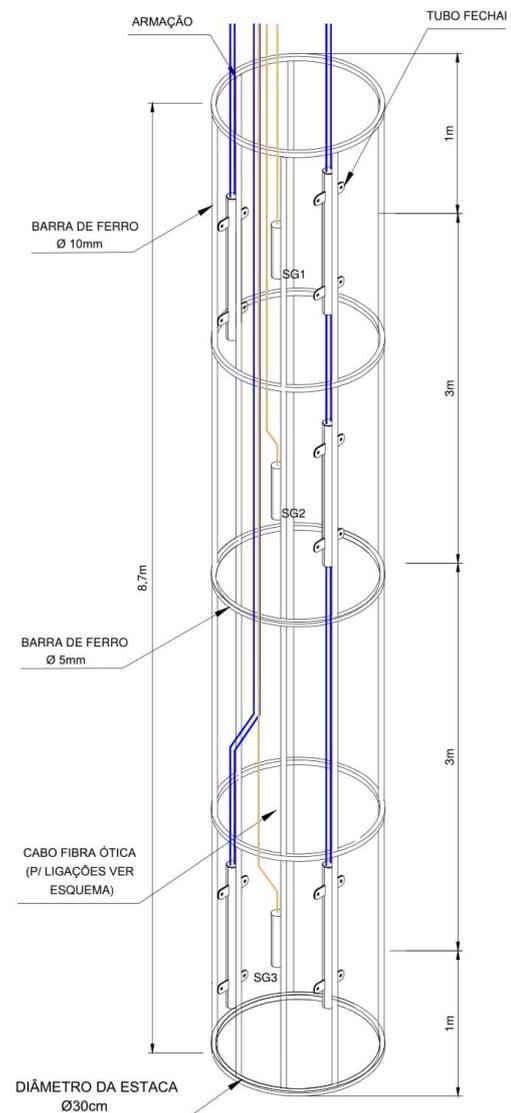


Figura 3.23 (a) – Projeto de instalação dos tubos sensores óticos ligados em série.

A armação da estaca era constituída por barras de ferro com 8 m de comprimento e 10.0 mm de diâmetro, com estribos em ferro de 5.0 mm espaçados de 20 cm um do outro. Montou-se também a armação de 50 x 50 x 50 cm do bloco de coroamento toda em ferro 10.0 mm de diâmetro.



ESQUEMA DE INSTRUMENTAÇÃO (ESTACA 1)
SEM ESCALA



ESQUEMA ISOMÉTRICO
SEM ESCALA

EXTENSÕES ÓTICAS SIMPLEX
SM - FC - PC
10m - 2 UNIDADES
17m - 4 UNIDADES
15m - 1 UNIDADE (PARA CONEXÃO)

INSTRUMENTAÇÃO: VIGA DE 8M, COM FBG DE STRAIN (S) E TEMPERATURA (T) INSTALADAS NOS TUBOS METÁLICOS FBG DE STRAIN COLADA NA PAREDE DO TUBO, FBG DE TEMPERATURA INSTALADA NOS ANÉIS (SEM SENSIBILIDADE CRUZADA AO STRAIN).
SENSOR 1:
3FBG (S) 0- 1,4 D 7M DE PROFUNDIDADE
3FBG (T) 2 1,4 D 7M DE PROFUNDIDADE

SENSOR 2: 1FBG (S) E 1FBG(T) 0_ 7M DE PROFUNDIDADE, MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DOS 2 PARÂMETROS.

SENSOR 3: 1FBG (S) E 1FBG(T) 0_ 1M DE PROFUNDIDADE, MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DOS 2 PARÂMETROS.

Figura 3.23 (b) – Esquema de instalação dos sensores óticos e resistivos elétricos na primeira estaca.

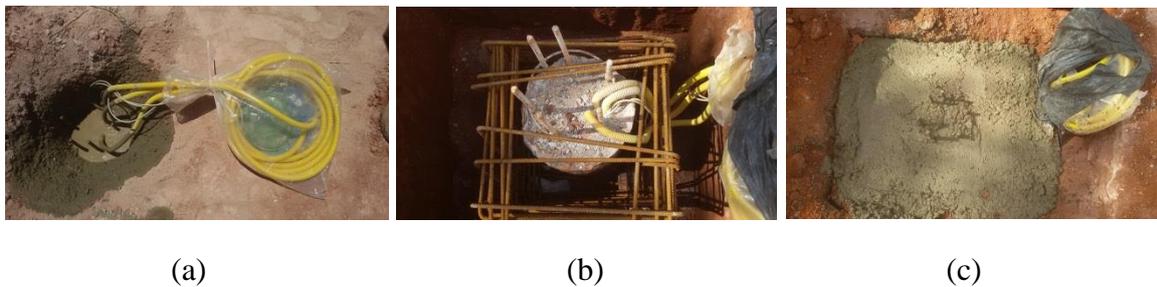


Figura 3.24 – Sensores óticos e resistivos elétricos instalados na armação de ferro.

Em continuidade, colocou-se a armação de ferro com os sensores instalados no furo já escavado, Figura 3.25, e procedeu-se a realização da concretagem da estaca com os devidos cuidados em 06/10/2017, Figura 3.26 (a). Em seguida procedeu-se à execução do bloco de coroamento sobre a cabeça da estaca, Figuras 3.26 (b) e (c), finalizando-se assim a etapa construtiva. Após esta etapa aguardou-se um período de cura do concreto de 53 dias e realizou-se a prova de carga.



Figura 3.25 – Colocação da armação de ferro instrumentada no furo.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.26 – (a) Concretagem da estaca instrumentada; (b) Colocação da armação de ferro do bloco de coroamento na cova; (c) Concretagem do bloco de coroamento.

3.9.3 - CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA 2

Após a realização da prova de carga na primeira estaca, verificada a não funcionalidade de parte do sistema de monitoramento implantado decidiu-se pela realização de uma segunda prova de carga no local. Também motivou a realização de uma segunda prova de carga a manutenção desde a escavação e concretagem das estacas até a realização da prova de carga de um furo com 30 cm de diâmetro e 10,5 m de profundidade a aproximadamente 1,5 m de distância da estaca ensaiada o que poderia intervir não só na capacidade de carga, mas também e principalmente na temperatura monitorada durante o ensaio. Aproveitou-se então esse furo e procedeu-se ao seu reaterro até a cota de 8,6 m de profundidade de modo a se ter uma estaca com o mesmo comprimento da estaca submetida à primeira prova de carga.

A segunda estaca ensaiada foi instrumentada com Fibra ótica instalada nos tubos protetores e instalada em barras de aço e sensores resistivos elétricos *strain gages*. Ao todo foram instalados três sensores com as fibras óticas instaladas nos tubos de proteção, três instaladas diretamente nas barras de aço para nova configuração de medição e leituras independentes e três sensores elétricos resistivos *strain gages* para avaliação paralela e validação dos dados de deformações a serem obtidos do sistema de monitoração por fibra ótica.

A instrumentação foi igualmente montada na armação da estaca conforme descrito para a primeira estaca.

Toda proteção da saída das fibras óticas dos tubos sensores foi executado no mesmo procedimento descrito para a primeira estaca, ou seja, utilizando mangueira corrugada e fita isolante, para minimizar as ações que pudessem danificar ou romper as fibras óticas durante a concretagem. A única diferença nesta etapa é que além dos tubos, também foram instaladas fibras óticas de leitura de deformação coladas diretamente na barra de aço, mas a proteção das fibras foi executada da mesma forma, Figura 3.27.

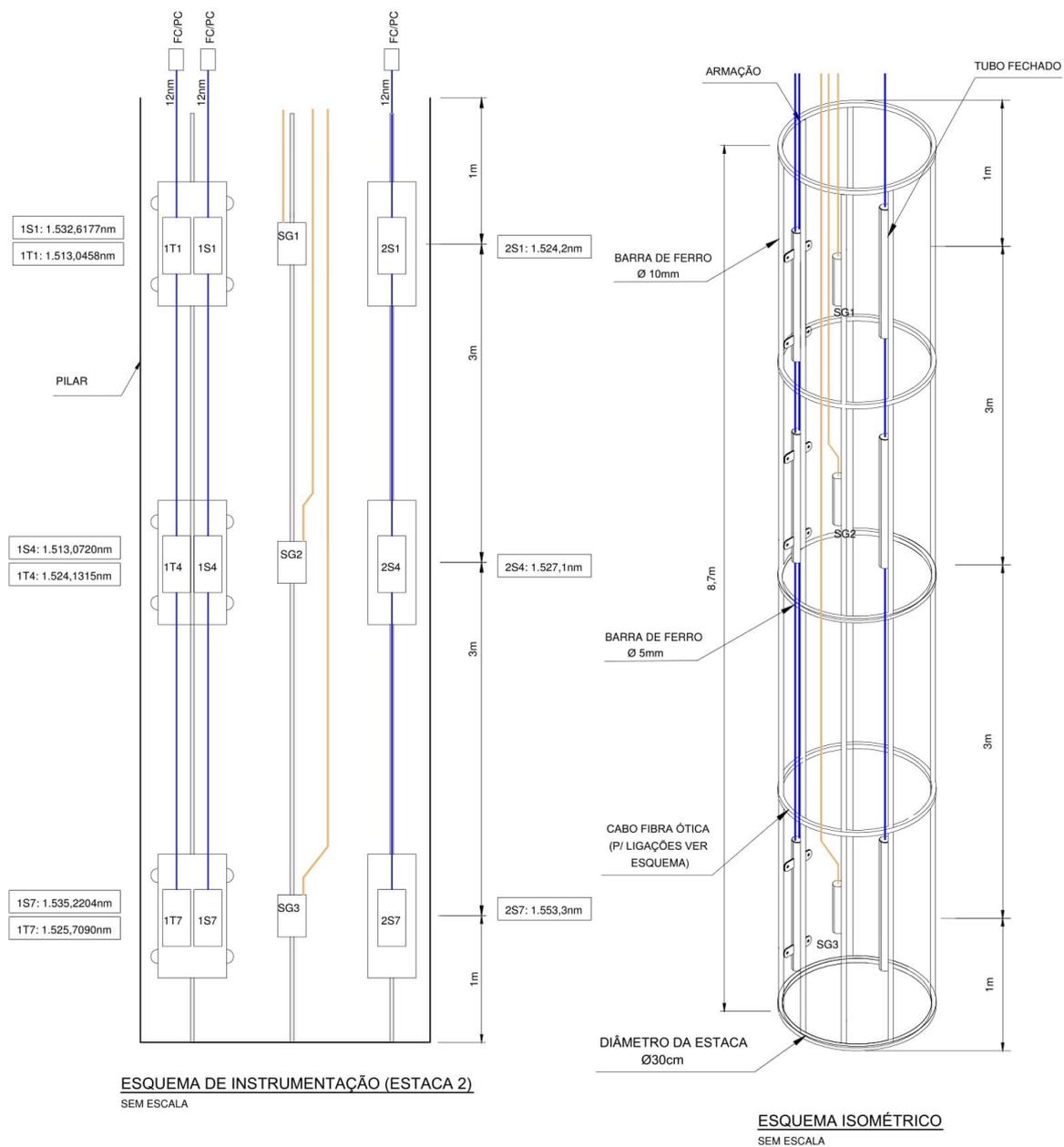


Figura 3.27 – Fibra ótica de leitura de deformação colada diretamente na barra de aço.

Foram instalados os tubos e as barras de aço com os sensores óticos e também o elemento sensor elétrico resistivo *strain gages* na armação de ferro conforme esquemas de instalação mostrados na Figura 3.29. Também foram instalados 3 tubos com sensores óticos de deformação e temperatura ligados em série a 1 m, 4 m e 7 m do topo da estaca. Como contingência nas leituras, foram instaladas as 3 barras de aço com a fibra colada a sua estrutura com leitura ótica de deformação a 1 m, 4 m e 7 m do topo da estaca. Em paralelo também foram instaladas as barrinhas de alumínio com os *strain gages* a 1 m, 4 m e 7 m do topo da estaca. Toda instalação foi realizada de forma que os sensores óticos e elétricos ficassem bem alinhados longitudinalmente na estrutura de ferro, Figura 3.28.



Figura 3.28 – Sensores óticos e resistivos elétricos instalados na armação de ferro.



TUBOS - STRAIN E TEMPERATURA
CONSTRUÍDO DEZ/2017
CARACTERIZADO
(TEMP.) - FEVEREIRO / 2018 (lab. a 22°C)
(STRAIN) - FEVEREIRO / 2018 (lab. a 21°C)

IMPORTANTE: A CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA FOI FEITA COM O LAB. A 22°C.
COMO OS FBGs ESTÃO ISOLADOS (NÃO COLADOS NAS PAREDES DOS TUBOS) A SENSIBILIDADE TÉRMICA É 9,8 μ m/°C, ESTE É O VALOR A SER USADO PARA MEDIR A TEMPERATURA.
PARA DESCONTAR O EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O STRAIN, A SENSIBILIDADE QUE DEVE SER USADO É A DE 22,2 μ m/°C

Figura 3.29 – Esquema de instalação dos sensores óticos e resistivos elétricos na estaca 2.

Em seguida, a armação da estaca com os sensores instalados foi posta no furo já escavado e na sequência executou-se o bloco de coroamento com as mesmas características do executado sobre a primeira estaca ensaiada.



Figura 3.30 – Colocação da armação instrumentada no furo e concretagem da estaca junto com bloco de coroamento.

Após esta etapa aguardou-se a cura do concreto para iniciar o ensaio da prova de carga.

3.9.4 - PROVA DE CARGA DA ESTACA 1

Essa prova de carga foi realizada no dia 29/11/2017 após um período de cura de 53 dias tendo início às 15:00 h e término às 02:50 h do dia 30/11/2017. O destaque ao horário de início e término da prova de carga assume relevância na medida em que foi realizado o controle de temperatura ao longo da estaca.

A prova de carga foi executada aplicando-se inicialmente uma carga de contato de 30 kN em seguida foram aplicados os seguintes estágios de carregamento: 58,8, 88,2, 117,6, 147,0, 176,4, 205,8, 235,2, 264,6, 294,0, 343,0, 392,0, 441,0, 490,0, 539,0 e 578,2 kN. Após a ruptura aguardou-se a estabilização da carga para proceder-se ao descarregamento, o que se deu a 520 kN. O descarregamento foi efetuado nos seguintes estágios de carga: 509,6, 411,6, 313,6, 215,6, 117,6, 0 kN, (Figura 3.31) com duração de 15 minutos cada. Tanto na fase de carregamento como na de descarregamento foram efetuadas as leituras nas instrumentações que se mantiveram ativas após o processo de instalação.



Figura 3.31 – Realização das leituras do sistema ótico e elétrico *strain gages* durante a prova de carga na estaca 2.

3.9.5 - PROVA DE CARGA DA ESTACA 2

A prova de carga 2 foi realizada no dia 26/04/2018 tendo início às 11:40 h e término às 20:40 h do mesmo dia. Como no caso da estaca 1 ela foi realizada segundo as instruções contidas na norma NBR 12131 de 2006 (Estacas – Prova de Carga Estática) para provas de carga do tipo lenta.

O processo de carregamento foi realizado nesse ensaio em estágios de carga de 30 kN por um intervalo de tempo de estabilização mínimo de 30 minutos até a carga de 300 kN. A partir deste estágio, a carga passou a ser incrementada em estágios de 50 kN até 400 kN quando a estaca se rompeu. A etapa de descarregamento foi realizada após a estabilização da carga aplicada na estaca o que ocorreu para a carga de 360 kN. Cada estágio de descarregamento teve duração de 15 minutos e ele foi efetuado em quatro estágios com redução de carga de 90 kN por estágio. Tanto nas fases de carregamento como na fase de descarregamento foram feitas leituras nos sistemas de controle após a estabilização das deformações.

3.10 - ENSAIOS DE SUÇÃO NO PERFIL DE SOLO PESQUISADO

As curvas características de retenção de água foram obtidas por meio da determinação da sucção no solo utilizando-se a técnica do papel filtro. Determinou-se apenas as curvas características correspondentes à sucção mátrica. Foram utilizadas amostras indeformadas coletadas a 2 m, 8 m e 9 m de profundidade. Os ensaios foram realizados sequencialmente nas temperaturas de 10, 24 e 40 °C para avaliação da hipótese da influência da temperatura na sucção. Adotou-se tais valores de temperatura como valores considerados extremos para os perfis de solos regionais.

Cabe destacar que as amostras utilizadas foram coletadas um ano e três meses antes integrando outro projeto de pesquisa. Quando da abertura dos blocos para a realização dos ensaios observou-se que as amostras tinham passado por um processo de desidratação (Figura 3.32). No entanto, esse ressecamento, embora interferindo nos resultados da curva característica do solo, não afeta o estudo do impacto da temperatura nas mesmas, pois o que se pretende é avaliar se esta afeta a sucção atuante no solo.

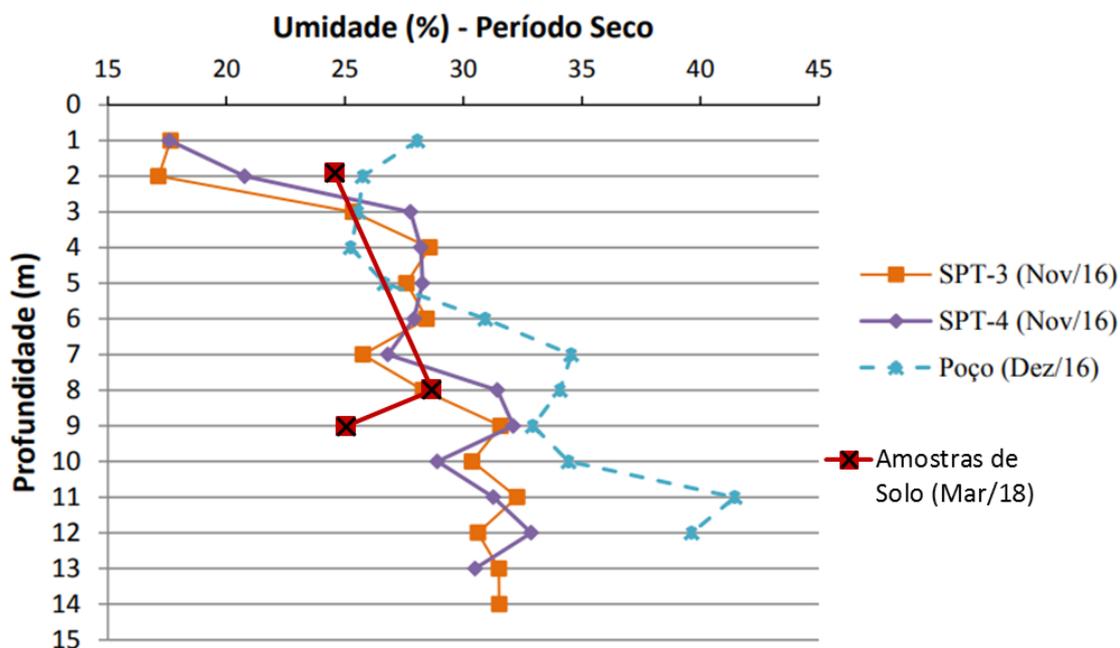


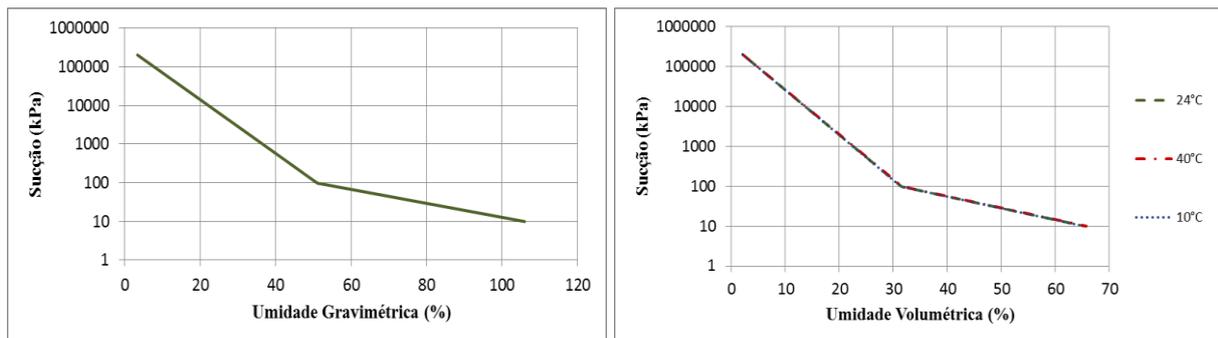
Figura 3.32 – Comparação das umidades dos blocos com as registradas no momento de suas retiradas (modificado, Sousa Júnior, 2017).

Nas determinações das sucções foi utilizado o papel filtro Quanty, conforme especificado no Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, com as seguintes especificações: papel filtro quantitativo JP42, faixa azul, gramatura de 80 g/m², permeabilidade ao ar de 3 l/s.m² e 18,5 cm de diâmetro.

Utilizou-se na determinação das sucções a calibração feita por Borges (2010) para condições de temperatura ambiente, cujas equações são apresentadas na Tabela 3.1 e os resultados na Figura 3.33a. Na Tabela 3.1 são apresentadas também as equações oriundas da calibração de Borges (2010) em termos de umidade volumétricas corrigidas em função das variações de densidade da água para as temperaturas usadas nas definições das curvas características. Observa-se na Figura 3.33b que as correções adotadas em função da temperatura, afetaram pouco as curvas de calibração em termos de umidade volumétrica. Também em função dos ajustes da curva de calibração definida por Borges (2010) considerando-se a temperatura e utilizando-se a equação 9 (ASTM D5298-10, 2016) observa-se na Figura 3.33c que as variações foram pequenas.

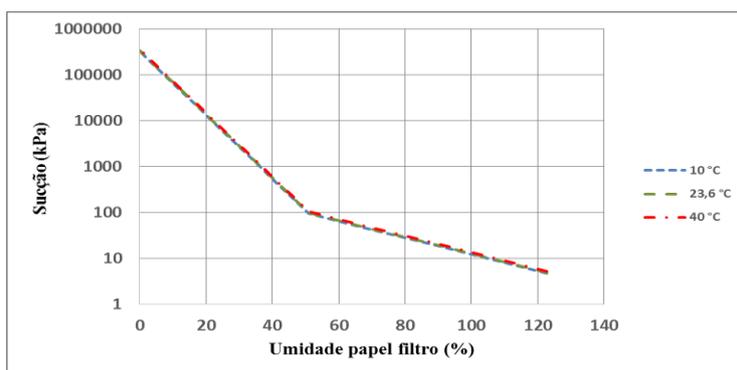
Tabela 3.1 - Equações de calibração fundamentadas em Borges (2010)

| Umidade | Temperatura (°C) | Equações Sucção (kPa) para w < 51 % | Equações Sucção (kPa) para w > 51 % |
|--------------|---------------------|---|--|
| Gravimétrica | 25 | $Sucção = e^{[(79,782-w)/6,26]}$ (3.1) | $Sucção = e^{[(161,44-w)/24,07]}$ (3.2) |
| | Volumétrica | 10 | $Sucção = 342740e^{(-0,26w)}$ (3.3) |
| 24 | | $Sucção = 342740e^{(-0,259w)}$ (3.5) | $Sucção = 818,2e^{(-0,067w)}$ (3.6) |
| 40 | | $Sucção = 342740e^{(-0,258w)}$ (3.7) | $Sucção = 818,2e^{(-0,067w)}$ (3.8) |



(a)

(b)



(c)

Figura 3.33 - Curvas de calibração: a) umidade gravimétrica (Borges (2010)); b) Umidade volumétrica fundamentadas em Borges (2010); c) Umidade gravimétrica considerando-se a temperatura e a equação 3.9 (ASTM D5298-10, 2016).

A Figura 3.34 compara o efeito da temperatura a partir da curva de calibração de Borges (2010) considerando-se os resultados calculados a partir das curvas de calibração mostrados nas Figuras 3.33b e 3.33c. Observa-se que o efeito da temperatura é mais pronunciado quando se faz os ajustes a partir da equação 3.9.

$$S = \frac{RT}{v} \cdot \ln(R_h) \quad (3.9)$$

Onde:

S = sucção, kPa;

R = constante do gás, 8.31432 Joules/mole·K;

T = temperatura absoluta, (°K);

v = volume de 1000 moles de água líquida, 0.018 m³;

R_h = umidade relativa.

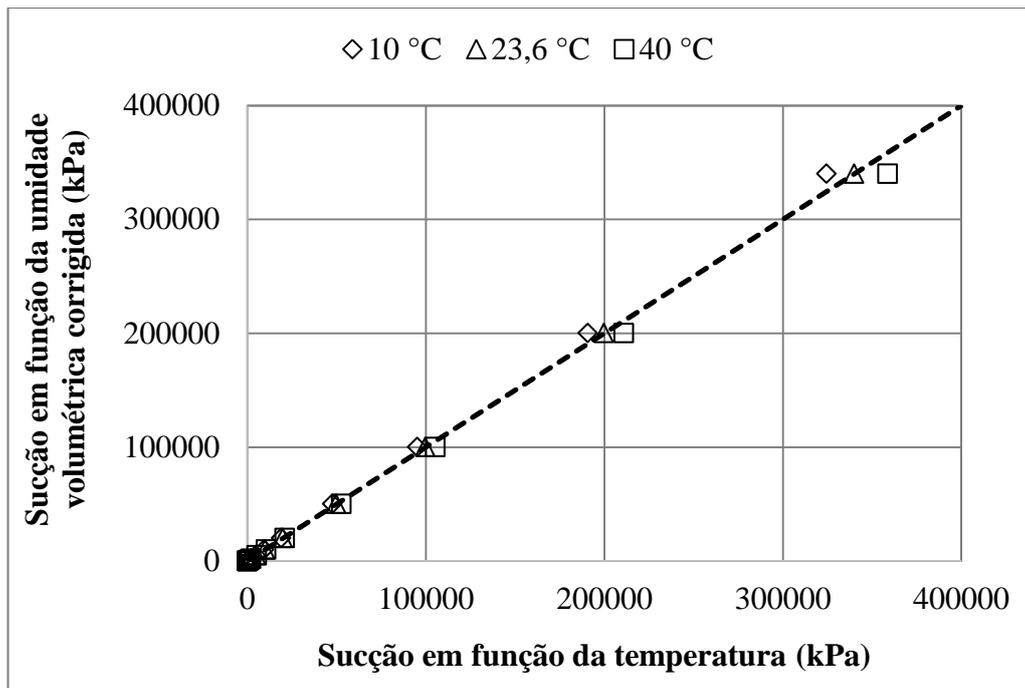


Figura 3.34 - Comparação das sucções fundamentadas em Borges (2010) em função das umidades volumétricas e gravimétrica corrigidas segundo a norma ASTM D5298-10(2016).

Nas análises do efeito térmico na sucção atuante nos perfis de solo utilizou-se para ajustes oriundos das variações térmicas as curvas de calibração mostradas na Figura 3.33c.

É importante destacar a necessidade de em estudos futuros se fazer determinações das curvas de calibração em condições térmicas distintas para verificar se as estimativas realizadas por meio da equação 3.9 são efetivamente satisfatórias.

3.10.1 - ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Com o objetivo de conhecer as propriedades dos solos utilizados na determinação das curvas características de retenção de água foram realizados ensaios de caracterização no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, para a identificação das propriedades físicas massa específica dos grãos, peso específico aparente seco e umidade natural sobre amostras indeformadas coletadas a 2 m, 8 m e 9 m de profundidade. Determinou-se ainda a umidade natural de amostras coletadas em amostradores SPT por ocasião da realização das Provas de Carga.

Outras propriedades físicas como granulometria e limites de Atterberg podem ser encontradas em Guimarães (2002).

A massa específica dos grãos foi determinada utilizando-se o equipamento pentapicnômetro e amostras secas em estufa a 110 °C (Figura 3.35).



Figura 3.35 – Pentapicnômetro.

A umidade natural foi determinada segundo a NBR 6457/2016.

O peso específico aparente seco do solo natural foi determinado a partir de corpos de prova moldados conforme ilustrado na Figura 3.36 após medição e determinação do peso úmido do corpo de prova e da umidade do solo.

A partir das massas específicas dos grãos, dos pesos específicos aparentes secos e dos teores de umidade naturais obtidos para as três profundidades estudadas puderam ser determinados os índices de vazios e graus de saturação dos solos.



Figura 3.36 – Moldagem dos Corpos de Provas de solos.

3.10.2 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Seguindo o procedimento indicado na Figura 3.36 foram moldados corpos de prova a partir das amostras de solo indeformadas retiradas nas profundidades de 2 m, 8 m e 9 m de um poço de amostragem executado no local onde foram construídas as estacas instrumentadas. Foram esculpido manualmente para cada profundidade oito (8) corpos de provas circulares com aproximadamente 5 cm de diâmetro por 2 cm de espessura.

3.10.3 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO PELA TÉCNICA DO PAPEL FILTRO

As curvas características de retenção de água foram determinadas seguindo a trajetória mista de variação de umidade, ou seja, secando-se alguns corpos de prova para umidades inferiores à natural e umedecendo-se outros para umidades superiores a esta. Para definir as quantidades de água a serem acrescentadas ou retiradas dos corpos de prova determinou-se inicialmente os Graus de Saturação dos oito (8) corpos de provas por profundidade buscando-se em seguida acrescentar ou retirar água de modo a se ter uma distribuição de graus de saturação que permitisse a obtenção das curvas características sendo preservada a umidade natural em um corpo de prova por profundidade.

Após a moldagem dos corpos de prova e ajustes das umidades, procedeu-se à colocação dos papéis filtros e ao envelopamento do conjunto corpo de prova – papéis filtro, isolando-os do contato com a atmosfera. Foram utilizados três papéis filtros de tamanhos distintos em cada corpo de prova. O disco maior é colocado em contato direto com o corpo de prova e cobre toda a sua superfície evitando a contaminação com o solo dos demais papéis filtros. O disco menor, usado da determinação da sucção, é colocado no meio, em contato com o papel filtro maior. O disco externo, que tem o tamanho intermediário, é colocado recobrendo o papel filtro do meio de modo a protegê-lo e possibilitar um melhor equilíbrio e homogeneidade da umidade (Figura 3.37).

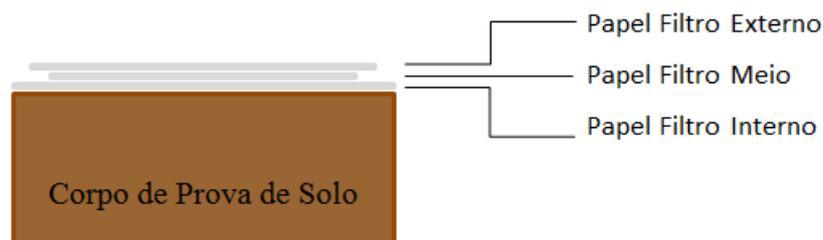


Figura 3.37 – Detalhe da montagem dos papéis filtros no corpo de prova.

Em seguida, para conservação das umidades e dos graus de saturação definidos, cada corpo de prova já com os papéis filtros são envoltos com filme plástico e vedados com fita isolante de modo proteja-los do contato com a atmosfera. Por segurança outra capa é colocada com papel alumínio e também vedada com fita isolante. Por fim, a última proteção é colocada com outra camada de filme plástico, também devidamente vedada com fita isolante e identificada com o número do corpo de prova, a profundidade do solo e a temperatura a que

ele vai ser submetido durante o período do ensaio. Na Figura 3.38 estão ilustrados os corpos de prova preparados nessa etapa.



Figura 3.38 – Corpos de Provas de solo e papéis filtros embalados.

No total foram determinadas nove (9) curvas características de retenção de água, pois elas foram realizadas em três (3) temperaturas para cada uma das três (3) profundidades estudadas. Após a realização dos ensaios e de posse dos resultados, as curvas características de retenção de água foram representadas por cada temperatura em termos de sucção matricial (kPa) x teor de umidade (%), e sucção matricial (kPa) x grau de saturação (%), e em função do produto da sucção em pF pelo índice de vazios x grau de saturação (%) sendo que pF corresponde ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

3.10.4 - EXECUÇÃO DOS ENSAIOS SEGUNDO AS TEMPERATURAS ESPECIFICAS

Para a condição de temperatura ambiente, preparados os conjuntos corpos de prova papéis filtro, os mesmos foram acomodados em uma caixa de isopor e guardados na câmara úmida para evitar grandes variações de temperatura em torno dos 24 °C por um período de 15 dias, que foi o tempo adotado para alcançar o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro em todos os ensaios realizados.

Findo o período de estabilização a 24 °C, 15 dias, determinou-se as umidades dos papéis filtros centrais e pesou-se os corpos de prova úmidos. As umidades dos papéis filtros foram determinadas secando-os em estufa por um período de 4 horas a uma temperatura de 110 °C. Em seguida montou-se novamente os conjuntos de três papéis filtro em contato com cada corpo de prova e os mesmos foram conduzidos à câmara climatizada regulada na temperatura de 40 °C (Figura 3.39), nela permanecendo pelo período de 15 dias.



Figura 3.39 – Ensaio dos Corpos de Provas a Temperatura de 40 °C.

Terminado o período de estabilização na câmara climatizada regulada a 40°C, 15 dias, determinou-se as umidades dos papéis filtros centrais e pesou-se os corpos de prova úmidos. As umidades dos papéis filtros foram, como no caso anterior, determinadas secando-os em estufa por um período de 4 horas a uma temperatura de 110 °C. Em seguida montou-se novamente os conjuntos de três papéis filtro em contato com cada corpo de prova e os mesmos foram conduzidos à câmara climatizada agora regulada na temperatura de 10 °C, nela permanecendo pelo período de 15 dias.

Concluído o período de estabilização na câmara climatizada regulada a 10°C, 15 dias, determinou-se as umidades dos papéis filtros centrais e pesou-se os corpos de prova úmidos. As umidades dos papéis filtros foram, como no caso anterior, determinadas secando-os em estufa por um período de 4 horas a uma temperatura de 110 °C.

Cabe salientar que para evitar perda ou ganho de temperatura, conforme o caso de estabilização à 40 °C ou 10 °C respectivamente, os corpos de prova foram retirados um a um da Câmara Climatizada e imediatamente ao retirar as embalagens foi medido a temperatura com o termômetro digital a laser infravermelho e em seguida iniciou-se o processo de

pesagem dos papéis filtros úmidos, secagem na estufa e nova pesagem dos papéis filtros secos.

As sucções foram determinadas por meio das equações propostas por Borges *et al.* (2010) para o papel filtro Quanty (Equação 2.25 e Equação 2.26).

3.11 - ENSAIOS DE SUCCÃO EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para ter a possibilidade de estimar a influência da sucção na vida útil das estruturas de concreto armado, é fundamental conhecer o fluxo de água ou substâncias solúveis pelos poros do material. Faz-se necessário ter em mente que durante o processo de cura as reações químicas que ocorrem nesse material certamente induzirá uma alteração de porosidade e mesmo distribuição de poros e as análises realizadas no âmbito dessa tese assumem diante da limitação nos estudos realizados caráter estimativo a ser verificado em estudos mais detalhados.

Em estruturas de fundação do tipo estaca a capacidade de carga das mesmas é função do atrito lateral e da resistência de ponta. Nas estacas de concreto concretadas *in locu* tanto a sucção atuante no solo como a sucção atuante no concreto são passíveis de exercer influência uma sobre a outra ao longo do período de cura até entrarem em equilíbrio. Com isso, a interação solo estrutura em perfis de solo não saturados é passível de ser afetada ao longo do tempo e intervir nos resultados de provas de carga, pois estas são realizadas geralmente sem que o equilíbrio de sucção entre o concreto e solo seja atingido. Torna-se então relevante avaliar as variações de sucção que ocorrem com o tempo de cura do concreto para verificar a validade dessa hipótese e o seu grau de importância prática. Logo, o presente estudo teve por objetivo avaliar a variação da sucção atuante no concreto com o tempo de cura.

Nesta pesquisa, a determinação da sucção atuante no concreto foi realizada utilizando-se corpos de prova moldados com o mesmo traço e fator água-cimento usados na concretagem das estacas submetidas à prova de carga. Utilizou-se um concreto com fck previsto de 25 MPa.

Os corpos de prova de concreto para realizar o ensaio de sucção foram devidamente preparados, utilizando o método do papel filtro. Para o concreto as determinações das sucções foram realizados apenas na temperatura ambiente.

3.11.1 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

O concreto para a moldagem dos corpos de prova foi feito utilizando o traço de proporção dos pesos dos materiais cimento, areia, brita (1: 2: 3) e fator água/cimento igual a 0,5.

Para execução dos corpos de provas foram cortados anéis de PVC de 75 mm de diâmetro por 30 mm de espessura. Foram concretados manualmente vinte (20) destes anéis de PVC formando os corpos de prova mostrados na Figura 3.40 utilizados no estudo da sucção.



Figura 3.40 – Moldagem dos Corpos de Provas de concreto.

A cura do concreto foi realizada mantendo-se os corpos de prova isolados da atmosfera em condições de temperatura estáveis. Para isso cada corpo de prova foi colocado em saco plástico hermeticamente fechado, armazenado em caixa de isopor e esta colocada no interior da câmara úmida em condições de temperatura estável.

3.11.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO COM PAPEL FILTRO

Também nesse estudo foi utilizado o papel filtro Quanty, conforme especificado no Capítulo 3 de Fundamentos Teóricos.

Neste ensaio ficou definido que seriam determinadas a sucção matricial e a sucção total. Para isso, iniciou-se o procedimento de colocação dos papéis filtros nos vinte (20)

corpos de provas moldados seguindo o procedimento de prazos de cura do concreto, que será detalhado no próximo subitem. Para determinar a sucção matricial seguiu-se o mesmo procedimento adotado para a determinação da sucção atuante no solo. Para determinar a sucção total um separador de geotêxtil (Figura 3.41) com alguns pequenos furos circulares foi colocado no outro lado do corpo de prova para separar o papel filtro do concreto, sendo usado nesse caso apenas um papel filtro por corpo de prova. A Figura 3.42 ilustra o procedimento de montagem dos ensaios para determinação da sucção total e da sucção matricial nos corpos de prova de concreto.

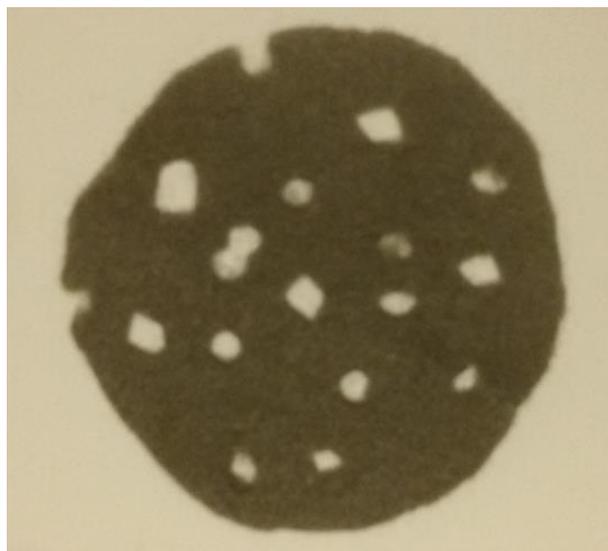


Figura 3.41 – Separador de geotêxtil.

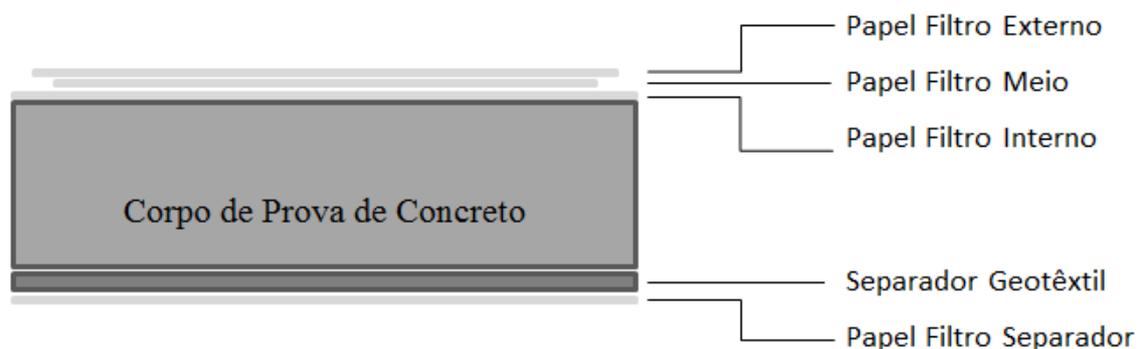


Figura 3.42 – Detalhe da montagem dos papéis filtros no corpo de prova de concreto.

3.11.3 - EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO NA TEMPERATURA AMBIENTE

Após a concretagem dos corpos de prova nos anéis de PVC foi estabelecido um procedimento de preparação dos corpos de provas para determinação das sucções privilegiando o tempo de cura do concreto para identificação da sua influência na sucção.

Dois dias após a concretagem pegou-se dois corpos de provas (CP1 e CP2) e fez-se a montagem dos papéis filtros para determinação das sucções total e matricial. Em seguida retornou-se com os mesmos para a caixa de isopor que foi lacrada e novamente colocada na câmara úmida por mais oito dias, perfazendo um total de 10 dias da concretagem. Após esse período, determinou-se a umidade dos papéis filtro e pesou-se cada um dos dois corpos de prova. Após cada período de cura e determinação das sucções pela técnica do papel filtro os corpos de prova foram pesados, medidos e submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, após os quais determinou-se as umidades de cada corpo de prova.

Utilizou-se na determinação da sucção as equações estabelecidas por Borges *et al.* (2010) para o papel filtro Quanty (Equações 2.25 e 2.26).

Para avaliar a sucção nos demais tempos de cura repetiu-se esse procedimento respeitando-se os prazos indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Cronograma do procedimento de preparação dos corpos de provas de concreto.

| CP | Tempo de Cura (dias) | Concretado | Colocação do Papel Filtro | Pesagem do Papel Filtro | Determinar Umidade |
|---------|----------------------|------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 e 2 | 02 | 29/01/18 | 31/01/18 | 08/02/18 | 08/02/18 |
| 3 e 4 | 05 | 29/01/18 | 03/02/18 | 13/02/18 | 13/02/18 |
| 5 e 6 | 10 | 29/01/18 | 08/02/18 | 18/02/18 | 18/02/18 |
| 7 e 8 | 15 | 29/01/18 | 13/02/18 | 23/02/18 | 23/02/18 |
| 9 e 10 | 20 | 29/01/18 | 18/02/18 | 28/02/18 | 28/02/18 |
| 11 e 12 | 25 | 29/01/18 | 23/02/18 | 05/03/18 | 05/03/18 |
| 13 e 14 | 30 | 29/01/18 | 28/02/18 | 10/03/18 | 10/03/18 |
| 15 e 16 | 35 | 29/01/18 | 05/03/18 | 15/03/18 | 15/03/18 |
| 17 e 18 | 40 | 29/01/18 | 12/03/18 | 20/03/18 | 20/03/18 |
| 19 e 20 | 45 | 29/01/18 | 15/03/18 | 25/03/18 | 25/03/18 |

3.11.4 - EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

No âmbito dessa pesquisa, como se tinha por objetivo principal determinar a sucção atuante no concreto ao longo do tempo de cura, os corpos de prova utilizados no ensaio de tração por compressão diametral passaram por duas situações que fogem ao recomendável. Uma diz respeito às dimensões dos corpos de prova (CP), pois enquanto a norma NBR 7222/2011 recomenda uma relação altura do CP / diâmetro do CP variando entre 1 e 2, no presente estudo adotou-se uma relação, na média igual a 0,46. A outra se relaciona ao processo de cura, pois como se buscava avaliar a sucção atuante no concreto ao longo do tempo de cura utilizando-se a técnica do papel filtro, que requer o equilíbrio entre a sucção atuante no material ensaiado e a sucção atuante no papel filtro, uma vez preparados os corpos de prova os mesmos eram isolados de qualquer contato com a atmosfera não sendo também possível mantê-los em ambiente com fornecimento de umidade, ou seja, a única água disponível era a usada na preparação do concreto.

Tem-se, portanto, o fato de que por um lado as dimensões dos corpos de prova podem intervir na resistência a tração dos corpos de prova e por outro a escassez de água no ambiente de cura pode gerar atrasos ou mesmo dificultar as reações químicas que normalmente ocorrem ao longo do tempo de cura.

Diante do exposto não se pretende com o estudo realizado chegar a valores exatos da resistência a tração do concreto nem dos demais parâmetros estimados a partir dela, mas sim se avaliar em termos pode-se dizer mais qualitativo se a sucção no concreto, mantidas as condições ambientes se alteram com o tempo de cura e como ela se relaciona com a resistência à tração por compressão diametral.

Depois de pesados os papéis filtros e também cada corpo de prova, realizou-se três medidas em diâmetro e espessura com o paquímetro para determinação do seu volume. Em seguida, executou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral na prensa CBR do Laboratório de Geotecnia da UnB (Figura 3.43). Rompidos os corpos de prova determinou-se suas umidades.



Figura 3.43 – Ensaio de resistência à tração por compressão por compressão diametral.

3.11.5 - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO

A massa específica do concreto foi determinada no equipamento Pentapicnômetro utilizando-se cinco amostras oriundas dos corpos de prova após 55 dias de cura. Foram coletadas cinco (5) amostras de concreto seco pesadas e colocadas nos cinco recipientes do equipamento para a realização do cálculo do seu peso específico.

3.11.6 - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO AREIA E BRITA

A massa específica do cimento, areia e brita também foram determinadas no pentapicnômetro.

3.12 - ENSAIOS SPT E SPT-T

Os ensaios de campo SPT e SPT-T tiveram como objetivo avaliar a resistência do solo e efetuar-se a determinação da temperatura e umidade do solo ao longo da profundidade e do tempo. As temperaturas medidas assumem papel relevante por permitirem fazer uma análise comparativa com os resultados oriundos dos sensores óticos instalados nas estacas instrumentadas submetidas às provas de carga.

Os ensaios SPT-T foram realizados apenas quando da realização das provas de carga, nos demais momentos realizou-se apenas os ensaios SPT, pois o objetivo maior era verificar os perfis de temperatura e umidade em diferentes épocas e mesmo locais.

Os ensaios SPT foram realizados segundo as recomendações da NBR 6484/1980 (Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos), incluindo-se adicionalmente as determinações dos perfis de umidade e temperatura em diferentes épocas do ano.

O primeiro ensaio SPT-T foi realizado em 04 de dezembro de 2017 no Campus experimental da UnB ao lado da estaca ensaiada logo após a realização da primeira prova de carga. Após efetuar realizar o ensaio SPT a cada metro submeteu-se o amostrador ao torque acoplado-se o torquímetro no topo da haste de ensaio através de um adaptador e girando-o. O segundo ensaio SPT-T foi realizado no mesmo local em 02 de maio de 2018, logo após a segunda prova de carga. O terceiro ensaio também no mesmo local foi realizado sem a leitura do torque no dia 13 de junho de 2018. O quarto e o quinto ensaio, também sem as leituras de torque, foram realizados no Parque Ecológico Bernardo Sayão nas alturas das QI 27 e 29 do Lago Sul no Distrito Federal, no dia 14 de junho de 2018. Estes dois últimos ensaios tiveram por objetivo maior verificar as variações de umidade e temperatura em uma área não submetida à ocupação humana.

No primeiro ensaio, as leituras de temperatura foram realizadas com um termômetro de baixa resolução, e nos demais ensaios foram realizadas com um termômetro analógico a mercúrio e outro termômetro digital a laser infravermelho, Figura 3.44.



Figura 3.44 – Leitura Digital e Analógica da Temperatura do perfil do solo.

Os ensaios para a leitura dos torques foram realizados utilizando-se três equipamentos torquímetro do Laboratório de Geotecnia, o primeiro com capacidade máxima de 14,0 kgf m e resolução de 0,5 kgf m, o segundo com capacidade máxima de 30,0 kgf m e resolução de 1,0 kgf m, e o terceiro com capacidade máxima de 48 kgf m e resolução de 2,0 kgf m, com faixa de utilização de 10,0 a 48,0 kgf m, utilizado nas camadas mais resistentes.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

A tese teve por objetivo principal estudar o uso de fibras óticas na instrumentação de estacas a serem submetidas a provas de carga com vistas a se monitorar as tensões ao longo do seu comprimento a que se submete durante esses ensaios, tanto na fase de carga como na de descarga.

Complementarmente, como a sucção atuante nos solos não saturados varia com a temperatura (Michel & Kaufmann, 1973), Tang *et al.* (2011), e a interação solo-estrutura de fundação no manto não saturado depende da sucção estudou-se adicionalmente a incorporação de fibras óticas destinadas ao monitoramento da temperatura. Cabe salientar, que embora a finalidade desse estudo em particular tenha sido monitorar a temperatura atuante no meio estaca-solo, a técnica pode ter outras utilidades como monitorar a temperatura nas estruturas das pontes, viadutos, edifícios e nas próprias fundações objetivando o aproveitamento da energia térmica ou o seu impacto sobre a obra.

O estudo envolveu ensaios de laboratório e de campo e a apresentação e análise dos resultados obtidos são apresentados na continuidade desse capítulo.

4.2 - AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Considerando-se que um dos aspectos a serem avaliados em laboratório e no campo é a transferência de cargas por meio da solicitação dos elementos estruturais de concreto, iniciou-se o estudo avaliando-se os módulos do concreto dos modelos físicos submetidos aos ensaios de laboratório e das estacas submetidas às provas de carga.

4.2.1 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA AVALIAÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS CONTENDO FIBRAS ÓTICAS

Os ensaios de módulo de elasticidade do concreto dos pilaretes com f_{ck} 25 MPa foram realizados com o objetivo de comparar com os resultados obtidos dos sistemas de monitoramento ótico e resistivos elétricos. O tempo de cura dos corpos de provas estava em 205 dias em câmara úmida. Também foram feitos ensaios de resistência à compressão e todos

os resultados são mostrados na Tabela 4.1. O tempo de cura do concreto foi ditado pela disponibilidade de equipamento para determiná-lo.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade do concreto dos pilaretes.

| Corpo de Prova | Tensão de ruptura obtida | Deformação $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Deformação média $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Módulo de Elasticidade médio (GPa) |
|----------------|--------------------------|--|--|------------------------------|------------------------------------|
| 030938 | 23,1 | 198,1 | | 36,4 | |
| 030937 | 25,3 | 188,1 | 191,5 | 38,3 | 37,7 |
| 030940 | 25,5 | 188,3 | | 38,3 | |

4.2.2 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA PRIMEIRA ESTACA SUBMETIDA À PROVA DE CARGA

Foi solicitado o concreto com fck de 25 MPa para a concretagem da estaca, sendo na ocasião moldados os corpos de provas para os ensaios de módulo com o objetivo principal de comparar com os resultados obtidos dos sistemas de monitoramento das deformações instalados na estaca. Estes ensaios foram realizados após 192 dias de cura em câmara úmida, sendo esse período ditado pela disponibilidade de equipamento para executar os ensaios. A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade obtidos para os corpos de prova ensaiados.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto da Estaca 1.

| Corpo de Prova | Tensão de ruptura obtida (MPa) | Deformação $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Deformação média $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Módulo de Elasticidade médio (GPa) |
|----------------|--------------------------------|--|--|------------------------------|------------------------------------|
| E1-CP1 | 22,93 | 99,25 | | 34,7 | |
| E1-CP2 | 24,53 | 103,19 | 99,5 | 33,1 | 34,5 |
| E1-CP3 | 21,31 | 96,05 | | 35,9 | |

4.2.3 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO USADO NA SEGUNDA PROVA DE CARGA

Da mesma forma que para a primeira estaca, o concreto foi solicitado com f_{ck} de 25 MPa, fazendo-se na ocasião a moldagem dos corpos de provas para os ensaios de módulo. Os ensaios foram realizados 83 dias após a moldagem onde permaneceram em cura na câmara úmida. Estes resultados também serão comparados com os resultados obtidos dos sistemas instalados na estaca. A Tabela 4.3 mostra os resultados dos módulos de elasticidade dos corpos de provas moldados com o concreto usado da segunda estaca.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto da Estaca 2.

| Corpo de Prova | Tensão de ruptura (MPa) | deformação obtida $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Deformação média $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Módulo de Elasticidade médio (GPa) |
|----------------|-------------------------|---|--|------------------------------|------------------------------------|
| E2-CP1 | 20,4 | 99,8 | | 29,6 | |
| E2-CP2 | 20,5 | 89,4 | 98,7 | 32,5 | 30,1 |
| E2-CP3 | 20,8 | 107,0 | | 28,0 | |

4.2.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS USADOS

Com a conclusão dos três ensaios de módulos, ficou evidenciada a influência do tempo de cura do concreto em sua resistência e em seu módulo de elasticidade. Foi observado que a resistência à compressão do concreto e seu módulo de elasticidade aumentam com o aumento do tempo de cura. A Tabela 4.4 mostra o comparativo das médias das resistências à compressão e dos módulos de elasticidade obtidos para os corpos de prova ensaiados em função do tempo de cura do concreto. A Figura 4.1 permite uma melhor visualização da influência do tempo de cura no módulo do concreto utilizado, respeitada a variabilidade dos resultados.

Tabela 4.4 – Comparativo dos resultados dos ensaios de módulo.

| Ensaio de Módulo | Tempo de cura (Dias) | Tensão de ruptura média (MPa) | Deformação média $\Delta L/L$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | Módulo de Elasticidade médio (GPa) |
|------------------|----------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| Estaca 2 | 83 | 20,6 | 98,7 | 30,1 |
| Estaca 1 | 192 | 22,9 | 99,5 | 34,5 |
| Pilaretes | 205 | 24,6 | 191,5 | 37,7 |

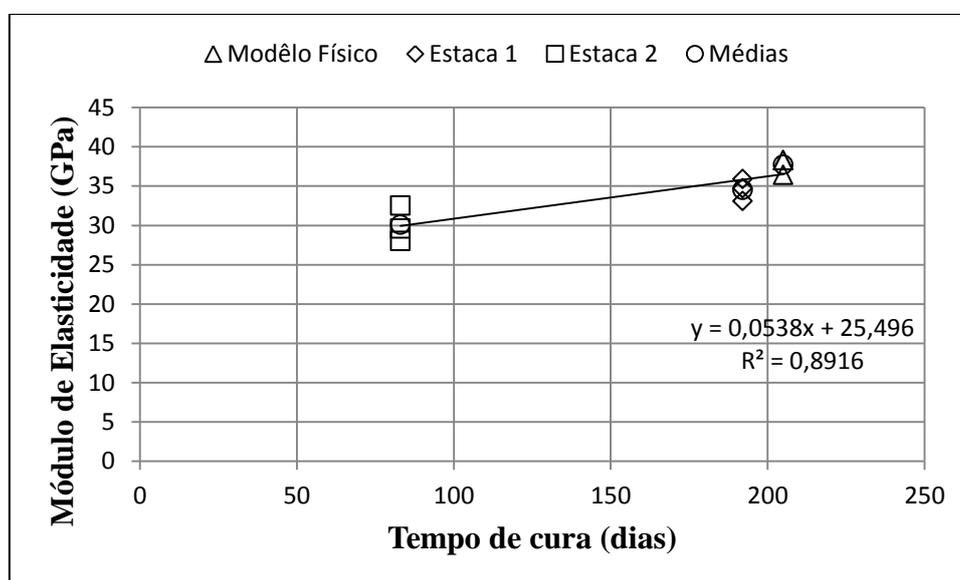


Figura 4.1 - Variação do módulo de elasticidade com o tempo de cura do concreto.

4.3 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA TÉCNICA DE MONITORAMENTO POR FIBRA ÓTICA

Nessa fase testou-se diferentes alternativas de montagem das fibras óticas e como referência implantou-se em um dos modelos físicos a já consolidada técnica de monitoramento das tensões atuantes na estrutura de fundação por meio do uso de *Strain Gages* (Sales, 2000; Albuquerque, 2001; Souza, 2001; Nogueira, 2004; Pacheco, 2004; Garcia, 2006; Mucheti, 2008; Albuquerque *et al.*, 2011a; Medeiros 2012 Garcia, 2015; Cruz

júnior, 2016). Foram ao todo ensaiados cinco pilaretes de concreto conforme especificado no Capítulo 4 referente à metodologia.

4.3.1 - VALIDAÇÃO DA FIBRA ÓTICA COMO TÉCNICA DE MONITORAMENTO DAS TENSÕES

Foram realizados ensaios de compressão nos 5 pilaretes instrumentados seguindo a sequência e os procedimentos conforme sintetizado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Procedimento dos ensaios dos pilaretes.

| | Local Pilarete | Temperatura Pilarete (°C) | Temperatura Ambiente (°C) | Umidade Relativa (%) | Estágios de Carga e Descarga (kN) | Carga total (kN) | Tensão máxima (MPa) |
|-------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------|
| Pilarete 1 1° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 26,0 | 62,3 | 30,0 | 174,4 | 7,8 |
| Pilarete 1 2° Ensaio | Estufa | 45,0 | 23,8 | 71,4 | 30,0 | 163,3 | 7,3 |
| Pilarete 1 3° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 24,6 | 64,6 | 30,0 | 232,5 | 10,3 |
| Pilarete 2 1° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 24,5 | 68,1 | 30,0 | 261,7 | 11,6 |
| Pilarete 2 2° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 25,5 | 61,3 | 30,0 | 457,0 | 20,3 |
| Pilarete 3 | Câmara Úmida | 23,5 | 27,3 | 64,8 | 30,0 | 206,0 | 9,2 |
| Pilarete 4 1° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 25,5 | 60,7 | 30,0 | 270,0 | 12,0 |
| Pilarete 4 2° Ensaio | Câmara Úmida | 23,5 | 25,5 | 60,5 | 30,0 | 494,0 | 22,0 |
| Pilarete 5 | Câmara Úmida | 23,5 | 26,0 | 60,3 | 30,0 | 271,0 | 12,1 |

4.3.1.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 1

O pilarete 1 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica com leitura de deformação e temperatura e também instrumentado com extensômetros elétricos *strain gages*. Foram realizados três ensaios nesse pilarete com os seguintes resultados:

1° Ensaio – Obteve-se os resultados de deformações dentro do regime elástico do concreto com bastante segurança, sem correr risco de danificar a instrumentação e nem o pilarete no

primeiro ensaio. Para os resultados do sistema ótico, observa-se que para este ensaio, a histerese foi mínima e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 44,9 GPa no carregamento, Figura 4.2. A mesma figura mostra também os resultados do sistema *strain gages*, onde observa-se uma histerese significativa entre a etapa de carregamento e descarregamento do pilarete 1, e o seu módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 40,2 GPa no carregamento, valor um pouco inferior ao obtido a partir da fibra ótica.

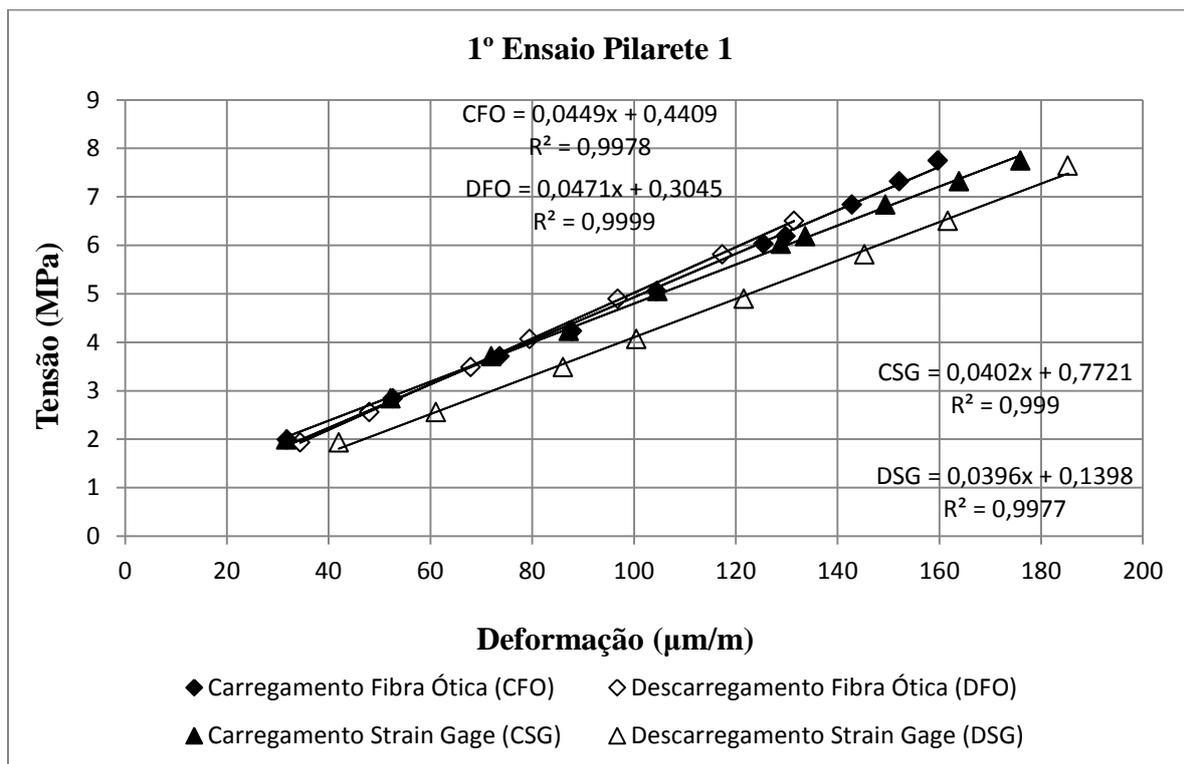


Figura 4.2 – Resultado Tensão x Deformação do 1º ensaio do Pilarete 1.

2º Ensaio – Para este ensaio, se tem as informações apenas do carregamento, pois o software do sistema de leitura ótico não registrou as informações da etapa do descarregamento após um travamento momentâneo. Para os resultados do sistema ótico o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta aumentou um pouco passando a 45,4 GPa no carregamento, Figura 4.3. Essa figura mostra também os resultados do sistema *strain gages*, onde se observa neste ensaio pequena histerese entre a etapa de carregamento e descarregamento do pilarete 1 conforme aconteceu no primeiro ensaio, e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta aumentou para 41,9 GPa no

carregamento. Portanto, observa-se que o aumento do módulo aqui registrado para o *strain gages* foi semelhante ao observado para o controle por meio da fibra ótica.

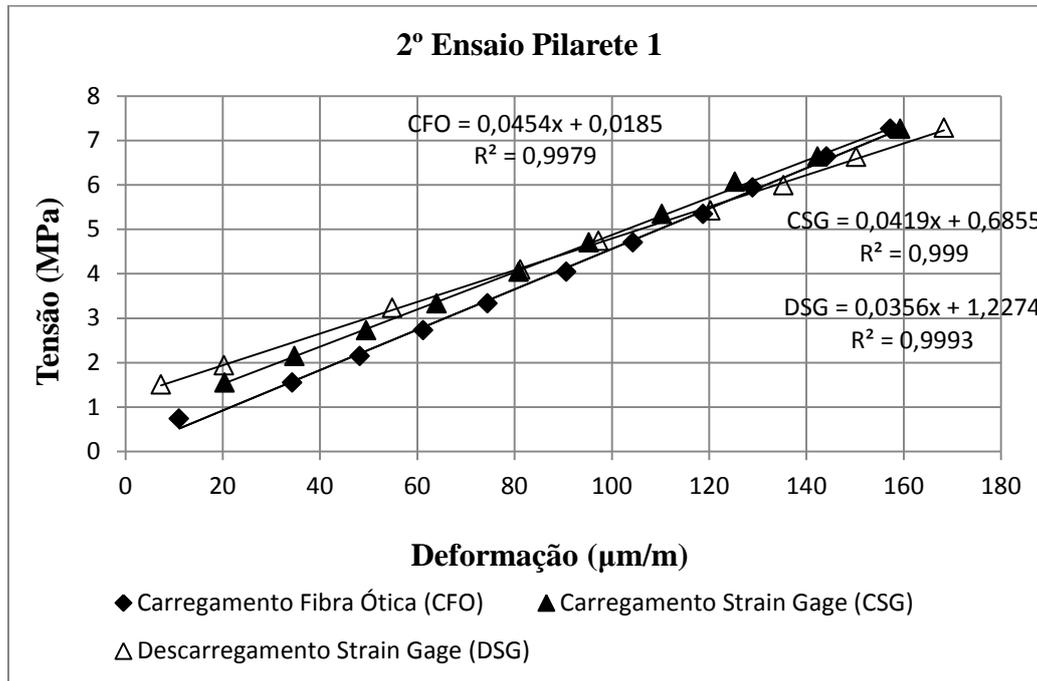


Figura 4.3 – Resultado Tensão x Deformação do 2º ensaio do Pilarete 1.

3º Ensaio – Para os resultados do sistema ótico, observa-se que a histerese foi pequena e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 47,5 GPa no carregamento, Figura 4.4. A Figura 4.4 mostra também os resultados do sistema *strain gages*, onde se observa uma histerese mais elevada entre a etapa de carregamento e descarregamento do pilarete 1, e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 29,8 GPa no carregamento.

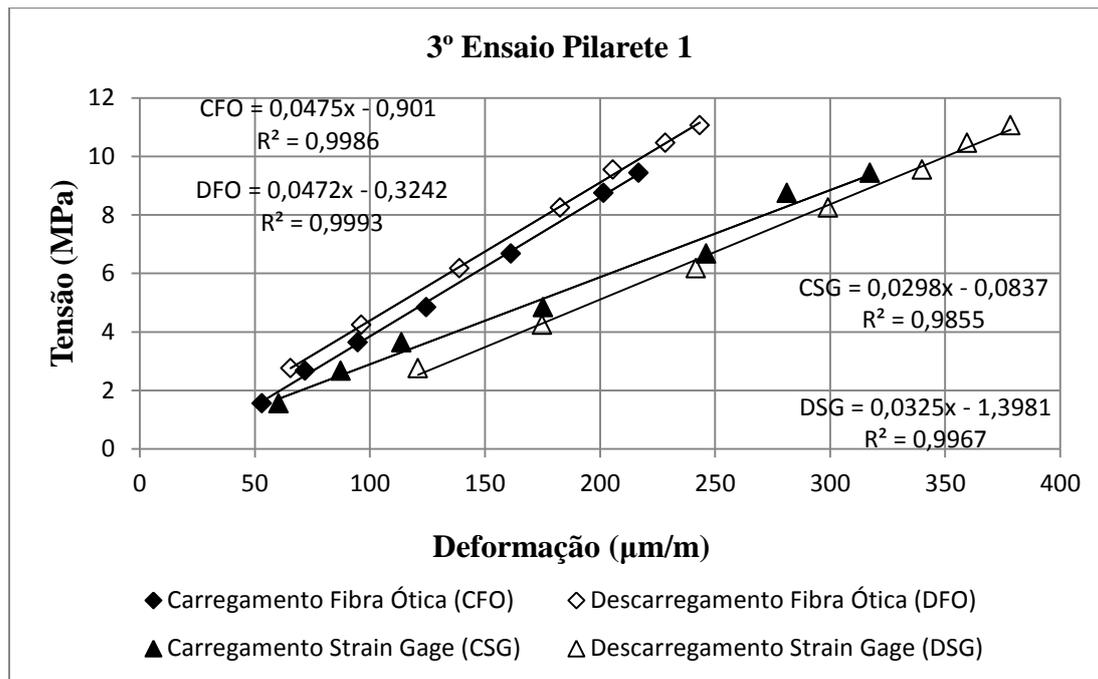


Figura 4.4 – Resultado Tensão x Deformação do 3º ensaio do Pilarete 1.

Nesse terceiro ensaio a resposta do monitoramento ótico seguiu a tendência que vinha acontecendo desde o primeiro ensaio com incremento no módulo de elasticidade do concreto. No primeiro ensaio o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 44,9 GPa, no segundo ensaio foi de 45,4 GPa e no terceiro ensaio foi de 47,5 GPa, apontando para o indicativo de que este no caso do concreto aumenta com a repetibilidade dos ensaios provavelmente devido a diminuição dos espaços vazios com a compressão. Já no sistema *strain gage* o módulo do concreto calculado foi de 40,2 GPa, 41,9 GPa e 29,8 GPa respectivamente no primeiro, segundo e terceiro ensaio. Observa-se que no caso do *strain gage* no terceiro ensaio ocorreu uma importante redução no módulo do concreto, levando a crer que o sistema deixou de funcionar adequadamente nesse ensaio.

A Tabela 4.6 mostra um comparativo dos resultados obtidos nos 3 ensaios realizados no pilarete 1. Verifica-se que os sistemas aumentaram as leituras de deformação no terceiro ensaio, porém, esse aumento foi maior no *strain gage* chegando a quase dobrar seu valor no 3º ensaio em relação ao 1º ensaio. Já o sistema por fibra ótica mostrou mais coerência com a tendência dos resultados de módulo de elasticidade aumentarem com a repetição dos ensaios. Cabe destacar que os módulos de elasticidade medidos pelos sistemas ótico e elétrico apresentaram valores maiores que o obtido nos ensaios de módulo utilizando-se corpos de provas cilíndricos. Tal comportamento pode ser atribuído aos seguintes fatores: os pilaretes instrumentados apresentavam seção quadrada mudando a distribuição das tensões ao longo

do seu comprimento; os pilaretes instrumentados possuíam armação de ferro o que contribuiu para o aumento da rigidez; o tempo de cura dos pilaretes instrumentados foi maior que os corpos de provas cilíndricos submetidos aos ensaios de módulo o que também pode contribuir para o aumento da rigidez conforme mostram as análises realizadas por meio de determinação de resistências a tração do concreto variando-se o tempo de cura (Figuras 4.33 e 4.39).

Tabela 4.6 – Quadro comparativo dos resultados obtidos nos 3 ensaios sobre o pilarete 1.

| Ensaio de Módulo CPs Concreto | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Deformação média = 191,5 ($\mu\text{m/m}$) Módulo de elasticidade médio = 37,7 (GPa) | 1º Ensaio, Carga máxima 174 kN | 2º Ensaio, Carga máxima 163 kN | 3º Ensaio, Carga máxima 232 kN |
| Deformação <i>Strain Gages</i> ($\mu\text{m/m}$) | 176,0 | 159,3 | 317,3 |
| Módulo Concreto <i>Strain Gages</i> (GPa) | 40,2 | 41,9 | 29,8 |
| Deformação Fibra Ótica ($\mu\text{m/m}$) | 159,7 | 157,3 | 216,8 |
| Módulo Concreto Fibra Ótica (GPa) | 44,9 | 45,4 | 47,5 |

A Figura 4.5 mostra uma análise comparativa para a fase de carregamento entre os resultados obtidos nos três ensaios. Observa-se dessa análise conjunta dos resultados que nos dois primeiros ensaios, embora com valores distintos, a fibra ótica e o *strain gage* apresentaram resultados similares quanto às variações de módulo registradas. No entanto, no terceiro ensaio os resultados apresentaram variações significativas, sendo que o *strain gage* em ordem muito elevada, apontando para problemas em um dos sistemas ou nos dois sistemas de monitoramento, embora sejam recomendados estudos específicos mais amplos quanto ao impacto do aquecimento/resfriamento e da secagem/molhagem adotados respectivamente no 2º ensaio e no 3º ensaio sobre o comportamento observado.

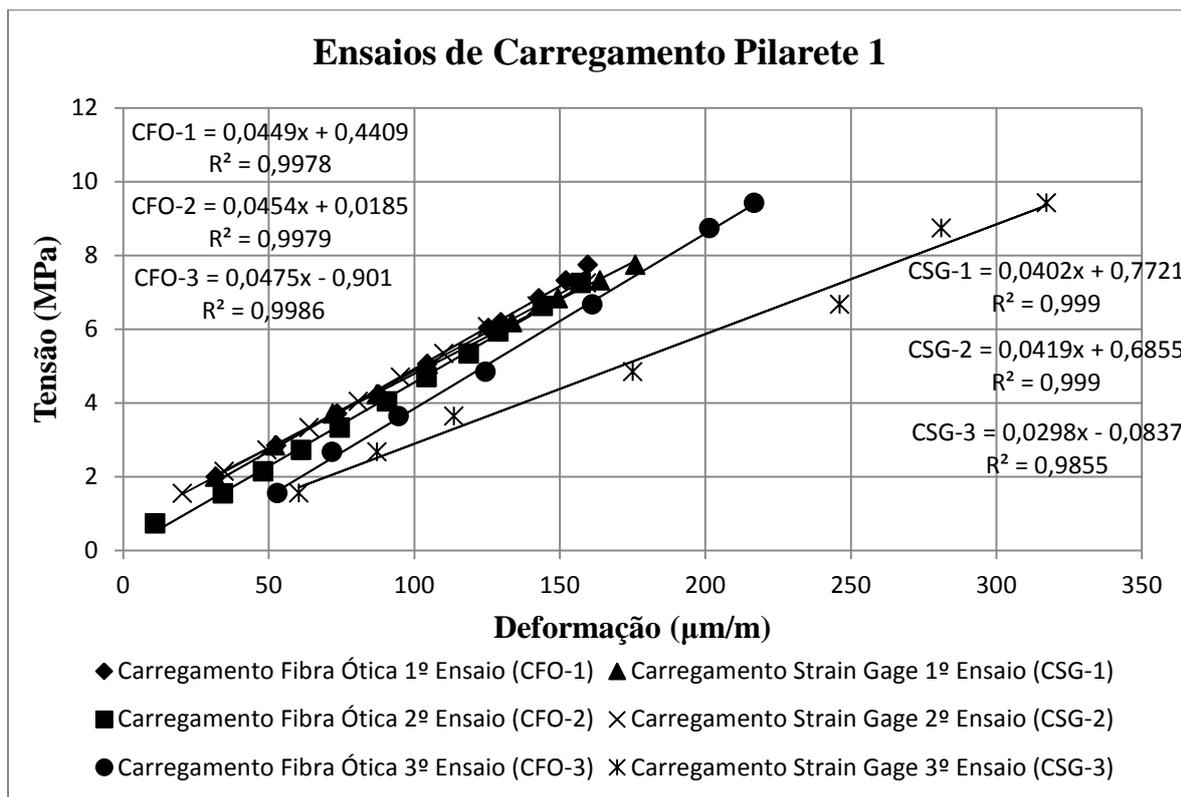


Figura 4.5 – Resultado dos ensaios de carregamento sobre o Pilarete 1.

4.3.1.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 2

O pilarete 2 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, sendo uma instalada na parede do tubo e a outra nos anéis. Foi realizado um ensaio de carregamento e descarregamento dentro das características elásticas do concreto e um segundo ensaio indo até o rompimento estrutural do pilarete.

1º Ensaio de Carregamento/Descarregamento – Para os resultados do sistema ótico com a fibra instalada na parede do tubo, a histerese foi bem pequena e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 42,9 GPa no carregamento. Já os resultados da fibra instalada nos anéis do tubo, apresentou uma deformação não linear, deformando muito pouco ao longo de todo o ensaio prejudicando consideravelmente a obtenção de resultado satisfatório para o módulo do concreto. Isto permite deduzir que houve algum problema na instalação da fibra nos anéis deste tubo, como por exemplo, a colagem pode não ter sido suficiente e a fibra ter se soltado. A Figura 4.6 mostra os resultados obtidos para estes métodos de instalação da fibra ótica no Tubo 2.

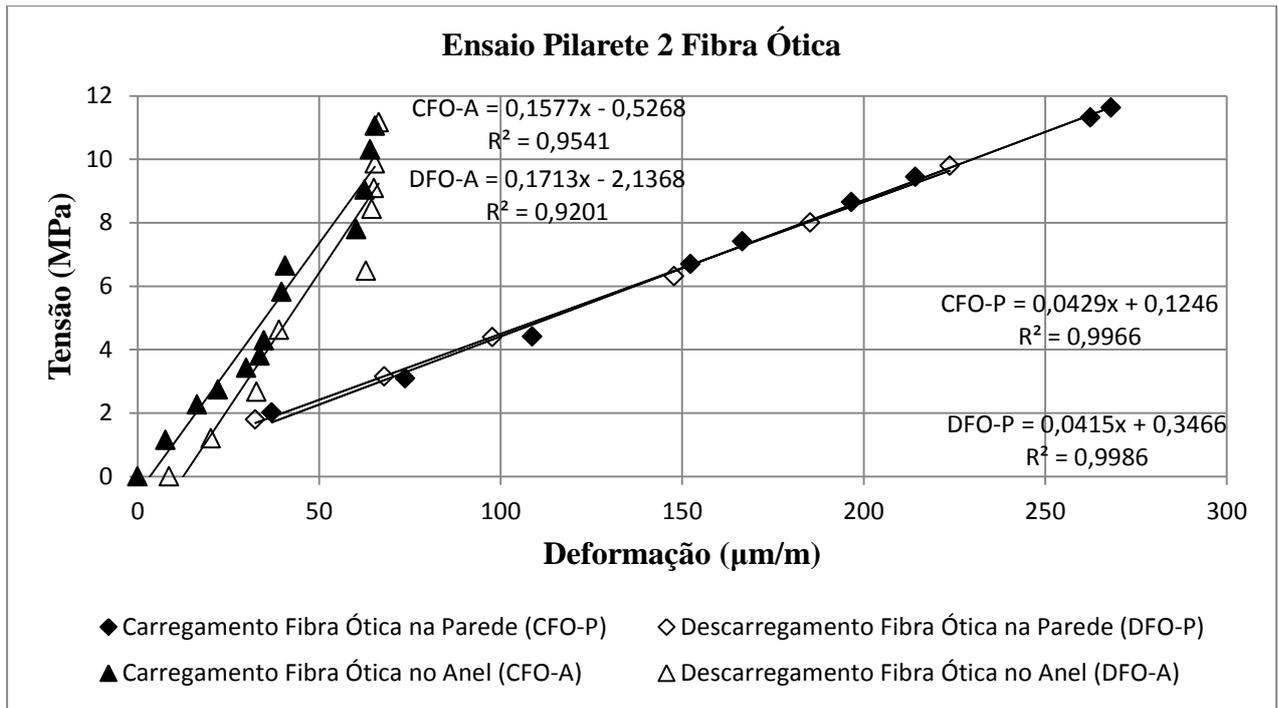


Figura 4.6 – Resultado do sensor ótico tensão x deformação do ensaio do Pilarete 2 com a Fibra ótica instalada na parede e nos anéis do tubo.

2º Ensaio até o Rompimento – Este ensaio foi monitorado só com a fibra instalada na parede do tubo, pois o equipamento de leitura apresentou uma interferência entre as portas de entradas das fibras óticas, e neste caso foi eliminada a fibra com maior interferência. O resultado do módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta, excluído o último ponto por já se encontrar em fase de ruptura, deu 47,9 GPa, Figura 4.7. A Figura 4.8 mostra comparativamente a análise dos dados de carregamento e dos dados do ensaio de rompimento, mostrando o alinhamento e a coerência com a repetibilidade do ensaio.

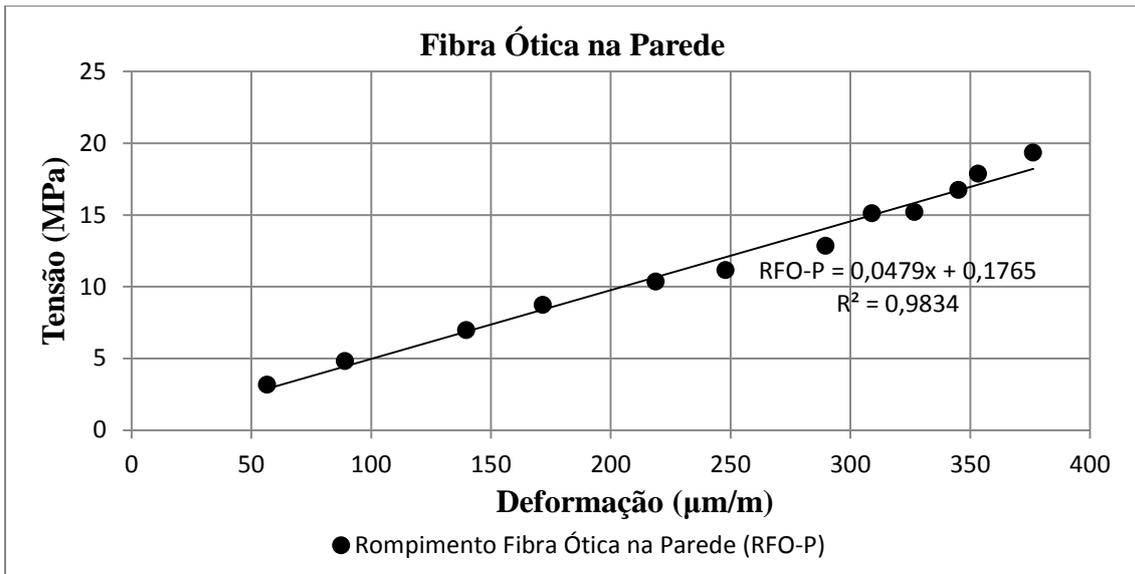


Figura 4.7 – Resultado sensor ótico Tensão x Deformação do ensaio de rompimento do Pilarete 2 com a Fibra ótica instalada na parede do tubo.

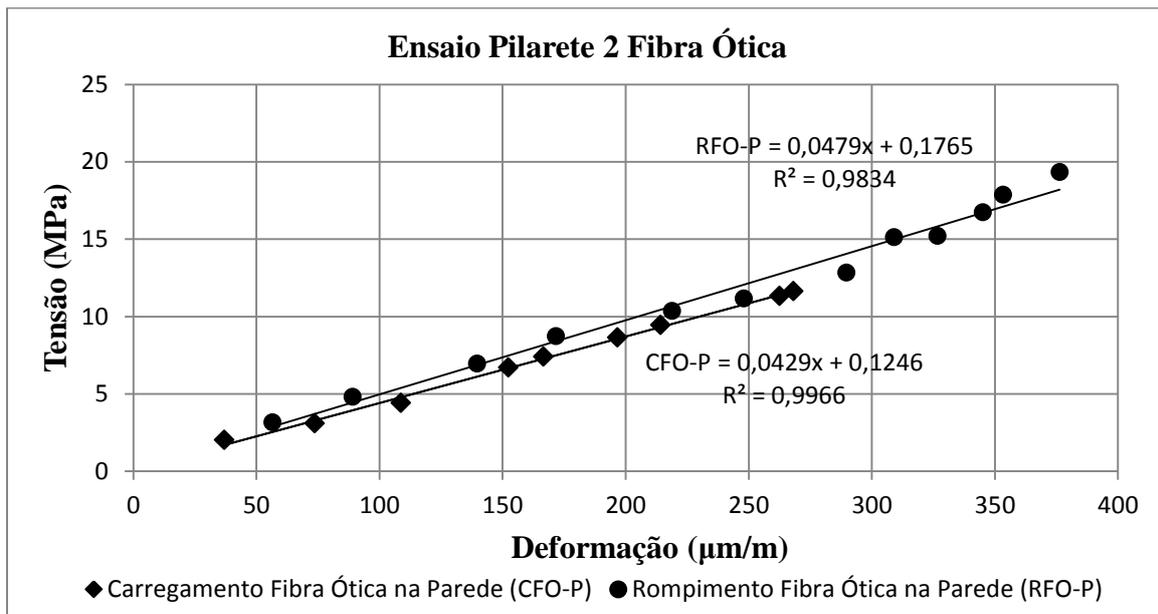


Figura 4.8– Análise de dados Tensão x Deformação do ensaio de carregamento e rompimento do Pilarete 2 com a fibra ótica instalada na parede do tubo.

4.3.1.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 3

O pilarete 3 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação instaladas nos anéis. Uma das fibras foi danificada, não apresentando

leitura. Realizou-se o ensaio de carregamento e descarregamento dentro das características elásticas do concreto considerando a fibra ótica não danificada.

Ensaio Carregamento/Descarregamento – Neste caso, a histerese foi bem pequena mostrando a linha de descarregamento quase alinhada com a linha do carregamento e o módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 44,0 GPa no carregamento, Figura 4.9.

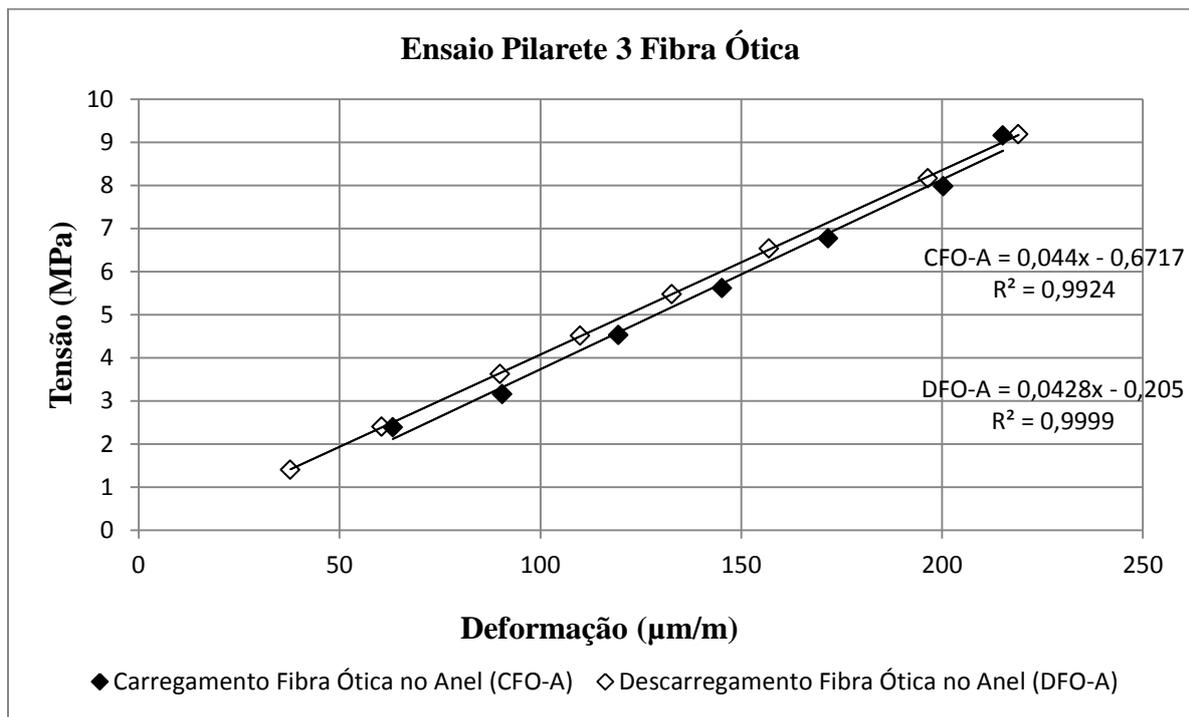


Figura 4.9 – Resultado do sensor ótico para o ensaio do Pilarete 3 com a Fibra ótica instalada nos anéis do tubo.

4.3.1.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 4

O pilarete 4 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, sem tracionamento, sendo uma instalada na agulha hipodérmica e outra nos anéis. Foi realizado um ensaio de carregamento e descarregamento dentro das características elásticas do concreto e um segundo ensaio conduzindo o pilarete à ruptura.

1º Ensaio, Carregamento/Descarregamento – Para os resultados do sistema ótico com a fibra instalada na agulha hipodérmica, a histerese foi alta e a deformação foi baixa, com isso o

módulo do concreto calculado pelo coeficiente angular da reta deu 70,0 GPa no carregamento, Figura 4.10. Essa situação leva a concluir que este método de instalação da fibra diminuiu bastante sua sensibilidade à deformação, pois ela ficou presa a agulha em suas extremidades. Já os resultados da fibra instalada nos anéis do tubo, apresentou uma deformação não linear, deformando muito pouco principalmente a partir de 8.0 MPa de tensão prejudicando o resultado do módulo do concreto, Figura 4.10. Com isto deduz-se que houve algum problema na instalação da fibra, sendo que provavelmente ela deve estar escorregando dentro dos anéis.

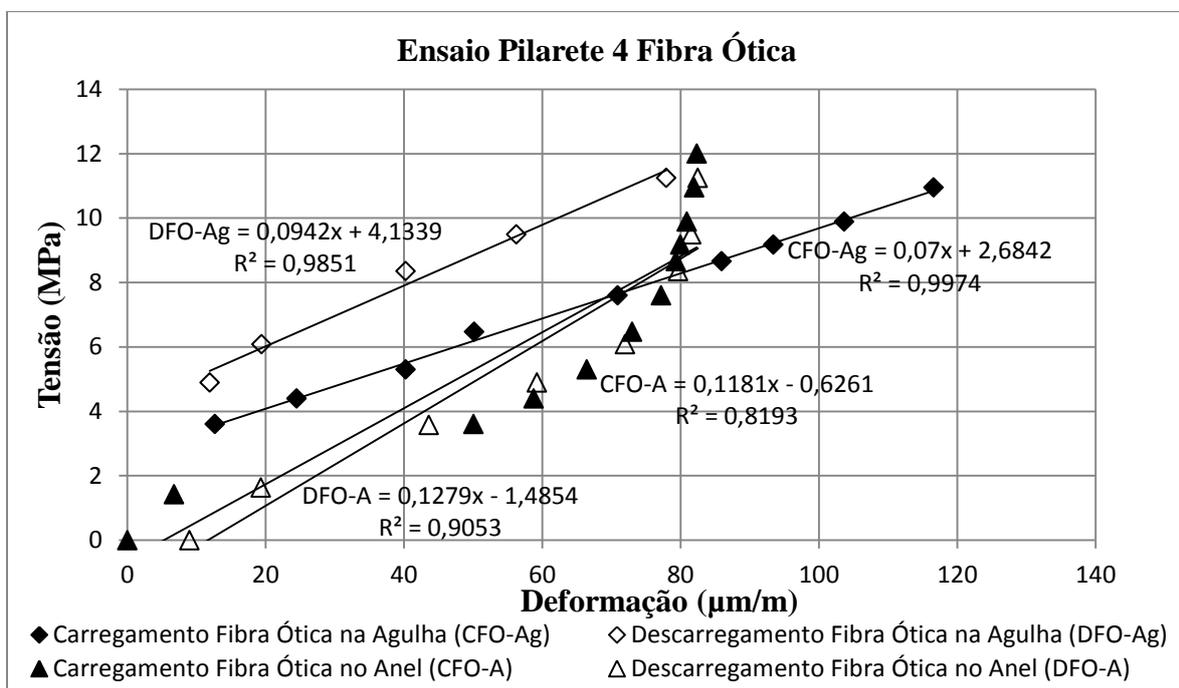


Figura 4.10 – Resultados dos sensores óticos no ensaio do Pilarete 4 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo.

2º Ensaio, Rompimento – Para os resultados do sistema ótico com a fibra instalada na agulha hipodérmica, confirmou-se que a deformação foi baixa, inviabilizando a determinação do módulo do concreto e confirmando a suspeita que este método de instalação da fibra diminuiu bastante sua sensibilidade à deformação, pois ela ficou presa à agulha em suas extremidades, Figura 4.11. Da mesma forma, os resultados da fibra instalada nos anéis do tubo, repetiu o ensaio anterior, deformando muito pouco principalmente a partir de 10.0 MPa de tensão prejudicando a determinação do módulo do concreto, Figura 4.11. Isto confirma que a fibra, deve estar escorregando dentro dos anéis.

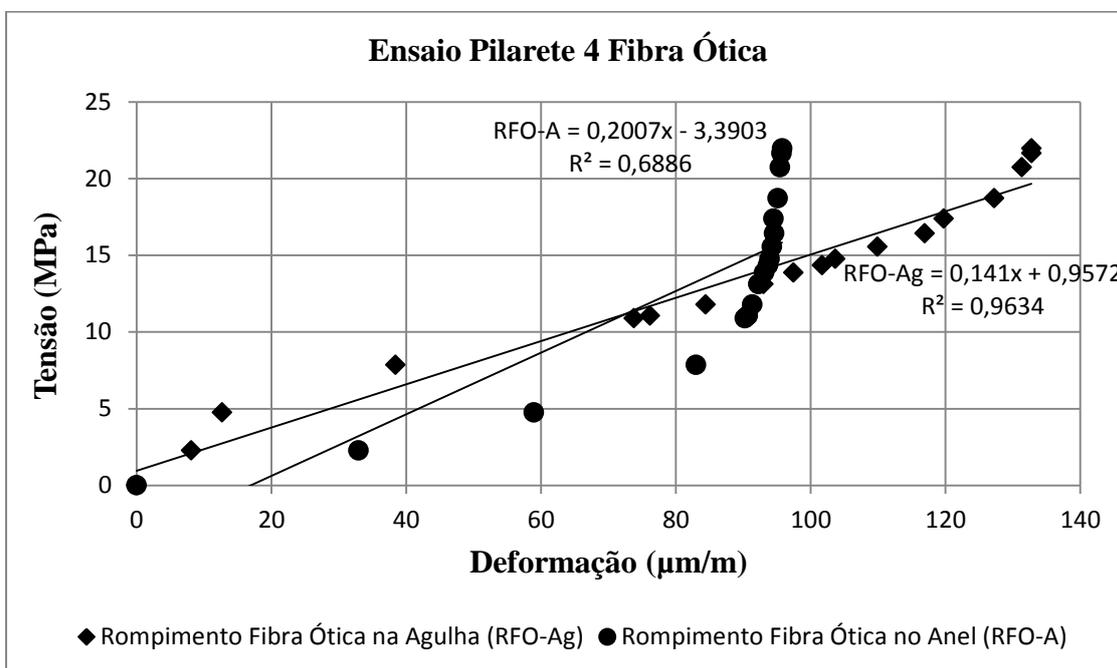


Figura 4.11 – Resultado sensor ótico Tensão x Deformação do ensaio de rompimento do Pilarete 4 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo.

4.3.1.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE O PILARETE 5

O pilarete 5 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica composta de duas fibras de leitura de deformação, com tracionamento, sendo uma instalada na agulha hipodérmica e a outra nos anéis.

Ensaio de Carregamento/Descarregamento – Para os resultados do sistema ótico com a fibra instalada na agulha hipodérmica, a histerese foi alta e a deformação foi muito baixa e pouco linear, menos ainda que o pilarete 4, inviabilizando a análise dos resultados, Figura 4.12. Essa situação confirma que este método de instalação da fibra diminuiu bastante sua sensibilidade à deformação, pois ela fica presa à agulha em suas extremidades, e como ela foi pré-tensionada diminuiu mais ainda sua deformação. Já os resultados da fibra instalada nos anéis do tubo, praticamente não deformaram inviabilizando as leituras apropriadas durante o ensaio, Figura 4.12. Com isto deduz-se que com o pré-tensionamento o problema que houve com este método no pilarete 4 se intensificou bastante no pilarete 5.

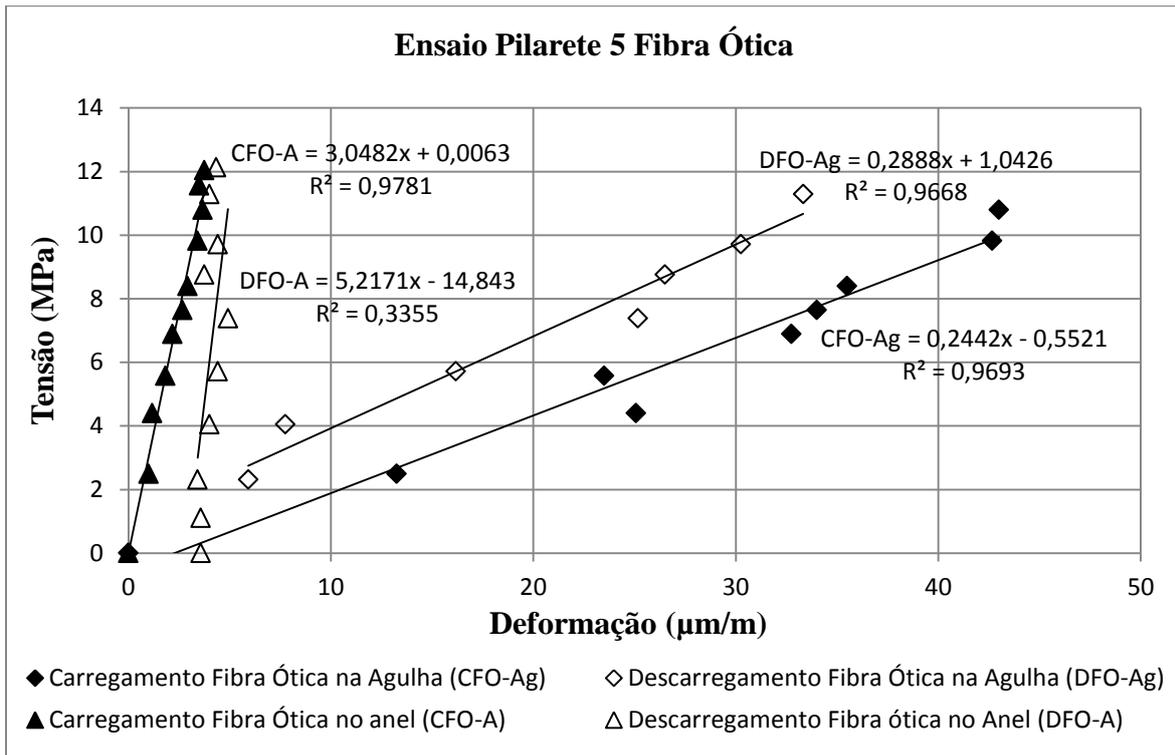


Figura 4.12 – Resultados dos sensores óticos do ensaio do Pilarete 5 com a Fibra ótica instalada na agulha hipodérmica e nos anéis do tubo.

4.3.2 - ANÁLISE DE TRASFERÊNCIA DE CARGA NOS PILARETES

Para verificar a transferência de carga nos pilaretes, apresenta-se a seguir análises das cargas calculadas em função da deformação obtida nos ensaios de carregamento em cada estágio de carga aplicada considerando-se o módulo do concreto ensaiado em laboratório. Com os valores das deformações medidos pelos sensores multiplicados pelo módulo de deformação do concreto e pela área da seção transversal do pilarete, determinou-se os valores das cargas transferidas para o local do respectivo sensor e comparou-se essas cargas às cargas aplicadas nos respectivos pilaretes.

4.3.2.1 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 1

Esse pilarete foi instrumentado com sensores óticos e elétricos. Foram realizados 3 ensaios de carga para análise do comportamento dos sistemas em relação à repetibilidade frente a diferentes condições térmicas. Então, para cada ensaio e cada estágio de carga se tem uma deformação medida pelo sistema ótico e outra medida pelo sistema *strain gage*.

A Figura 4.13 apresenta a correlação das cargas transferidas pelo sistema ótico e pelo sistema *strain gage*. O primeiro e o segundo ensaio apresentaram boa linearidade e proporção dos resultados entre os sistemas. No terceiro estágio a partir do carregamento de 100 kN o sistema *strain gage* começou a medir uma deformação muito elevada, bem mais que o sistema ótico, resultando assim em um cálculo da carga transferida mais elevada que o sistema ótico. As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram as cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada nos respectivos ensaios. Observa-se desses resultados que com o processo de repetição ao se passar do ensaio 1 para o dois e do dois para o três ocorreu uma perda de eficiência na fibra ótica. É possível ainda verificar que no terceiro ensaio realizado após o aquecimento e resfriamento em câmara úmida, que o sistema *strain gage* passa a apresentar no início do ensaio valores inferiores às cargas aplicadas e ao final valores superiores, o que representa uma anomalia a ser melhor averiguada.

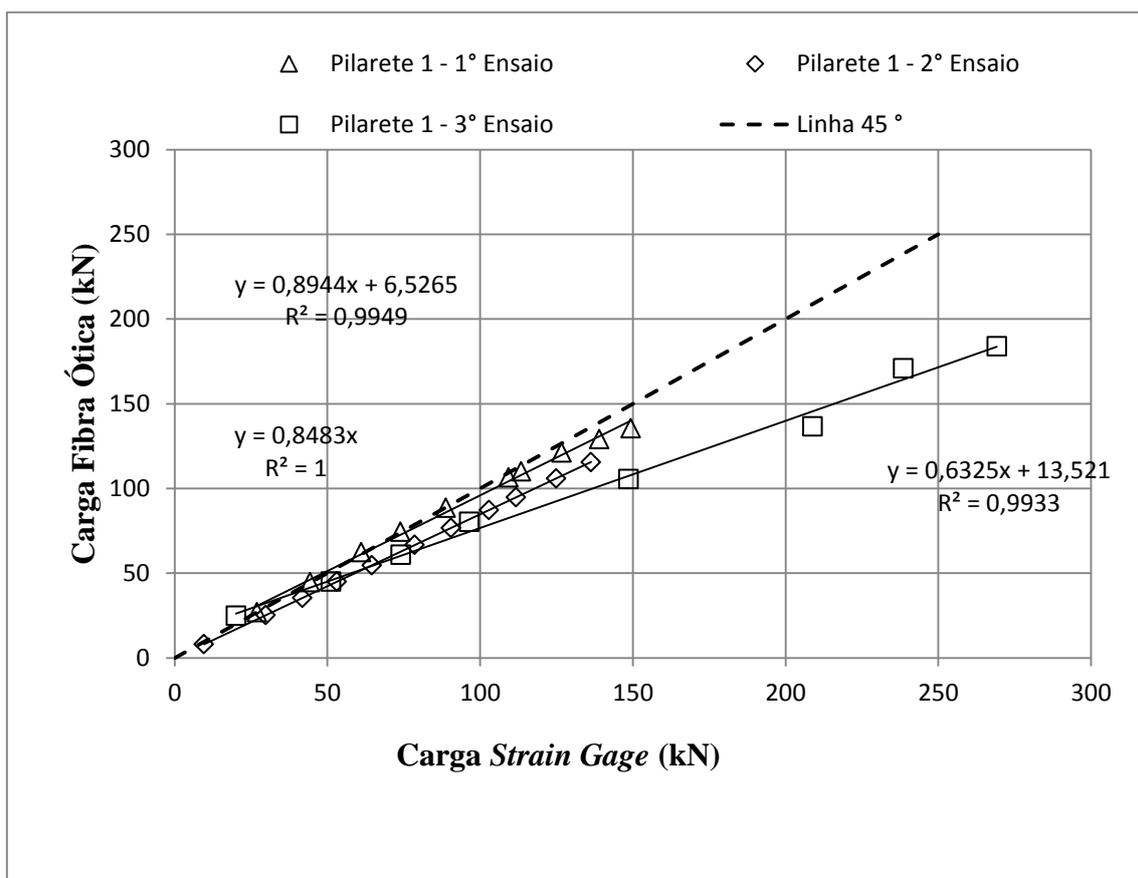


Figura 4.13 - Correlação das cargas transferidas pelo sistema ótico e pelo sistema *strain gage*.

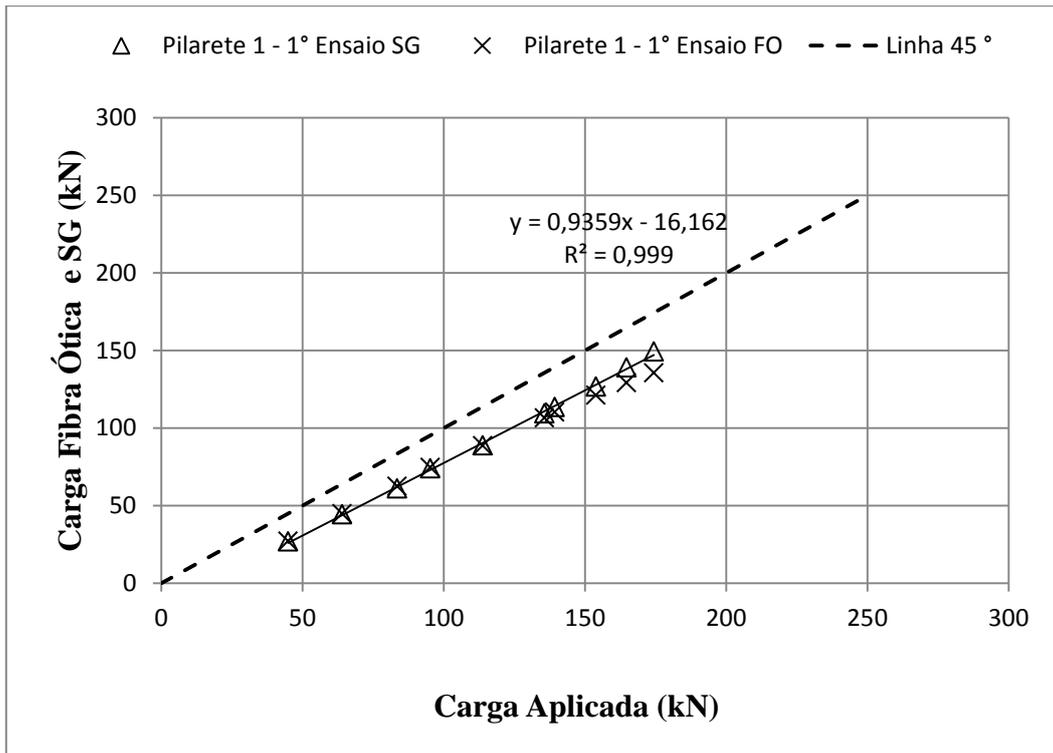


Figura 4.14 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 1º ensaio.

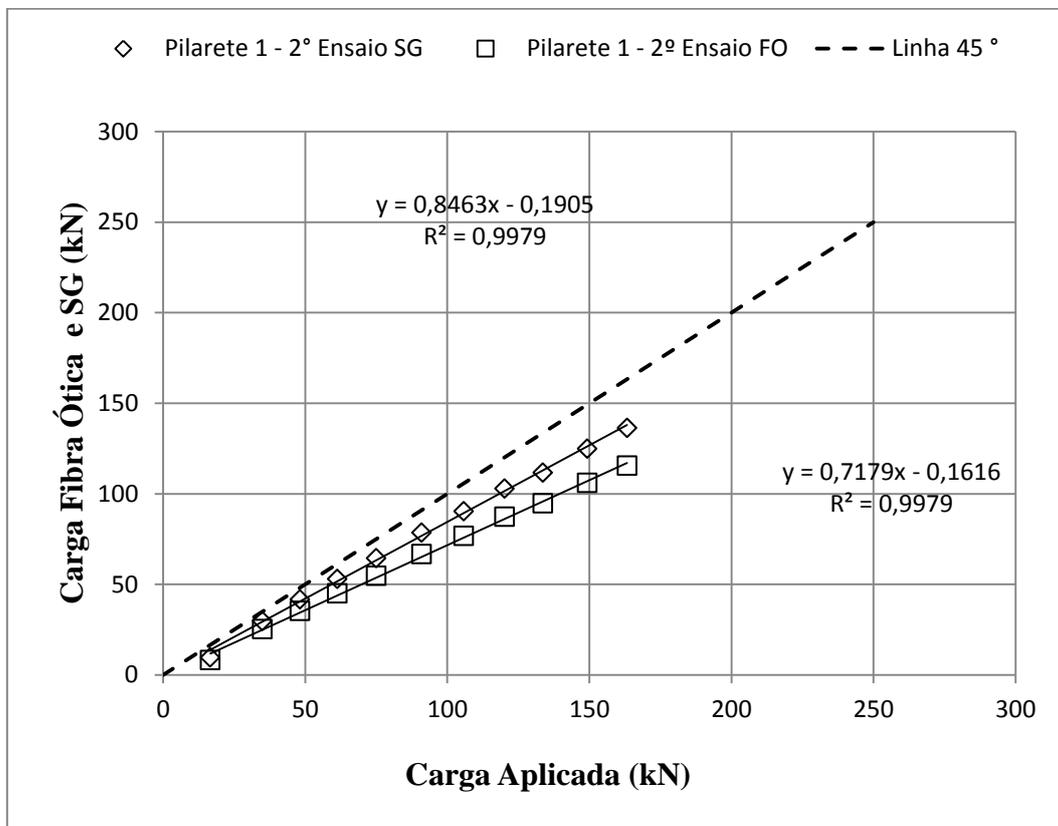


Figura 4.15 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 2º ensaio.

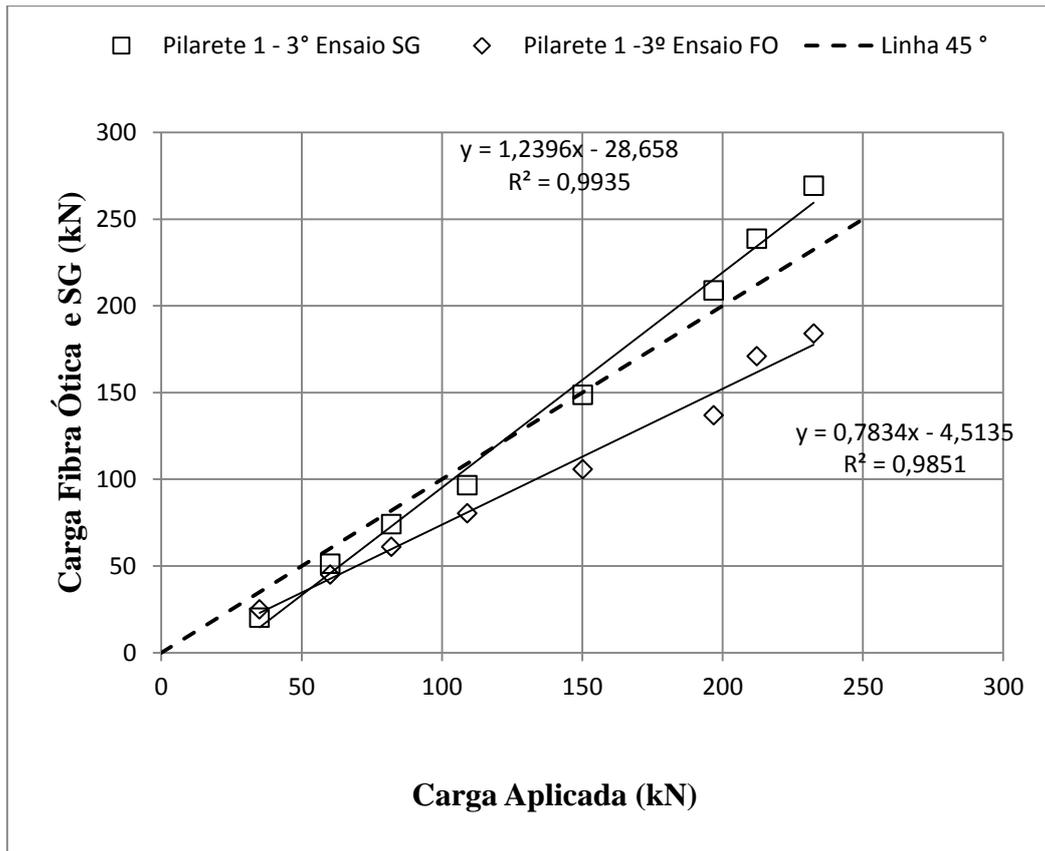


Figura 4.16 - Cargas transferidas oriundas dos sistemas versus a carga aplicada no 3º ensaio.

4.3.2.2 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 2

O pilarete 2 possui duas formas de instalação da fibra ótica, uma com a fibra colada na parede do tubo e a outra passando pelos anéis de suporte sendo os resultados dos ensaios relativos as duas formas de instalação da fibra mostrados na Figura 4.17. Essa figura mostra que os resultados oriundos da fibra ótica instalada na parede do tubo apresentam uma boa linearidade e valores próximos aos das cargas aplicadas. Quando da repetição do ensaio levando o pilarete até a ruptura se observa, no entanto, como verificado para o pilarete 1 que a fibra ótica tende a registrar valores um pouco inferiores aos registrados no primeiro ciclo de carga gerando uma diferença de aproximadamente 8 %.

Já a fibra ótica instalada no anel deformou pouco resultando em um cálculo da carga transferida muito inferior à carga aplicada. Ela também não apresentou uma boa proporção com a carga aplicada, indicando que provavelmente houve um escorregamento da fibra nos anéis.

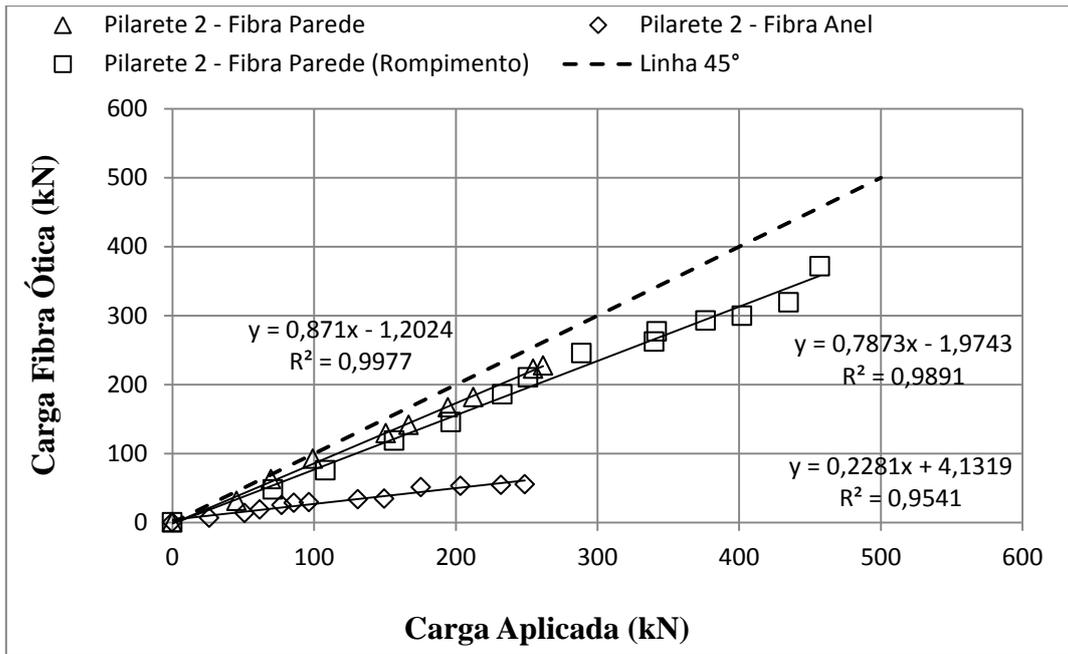


Figura 4.17 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 2.

4.3.2.3 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 3

Os resultados obtidos para o pilarete 3 estão apresentados na Figura 4.18. Nesse caso a fibra ótica foi instalada nos anéis de suporte. Os resultados apresentaram uma boa linearidade e sobreposição com a linha de tendência 45° para a qual os resultados da carga aplicada seriam iguais ao medidos pela fibra ótica, ou seja, neste caso a fibra instalada nos anéis apresentou um bom funcionamento.

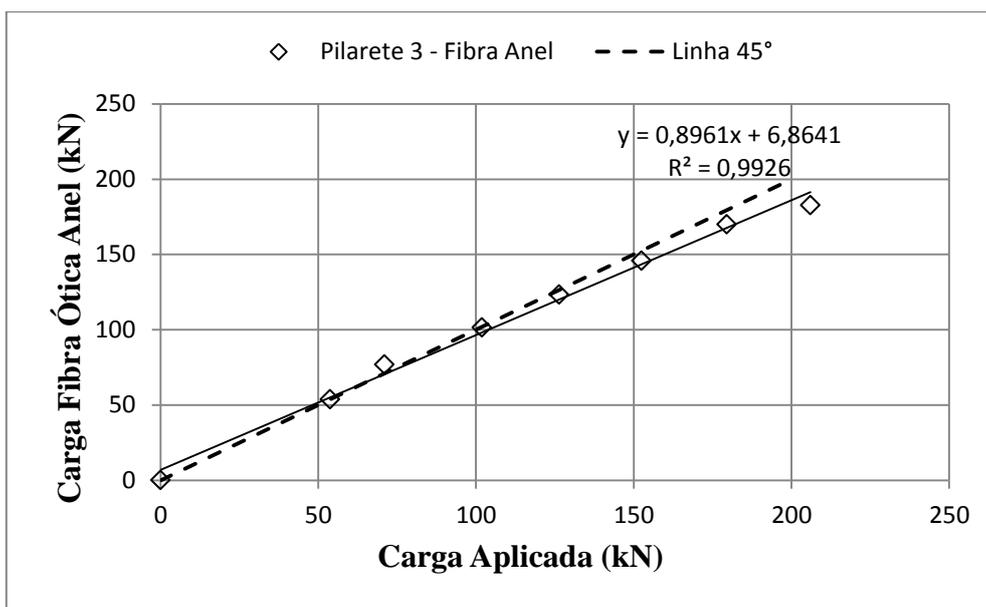


Figura 4.18 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 3.

4.3.2.4 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 4

O pilarete 4 também possui duas formas de instalação da fibra ótica, uma com a fibra instalada na agulha hipodérmica e a outra passando pelos anéis de suporte. Nenhum dos métodos neste ensaio apresentou bons resultados entre a carga transferida e a carga aplicada, levando-se a deduzir que ocorreram problemas de instalação da fibra dentro do tubo, pois as deformações foram muito baixas (Figura 4.19).

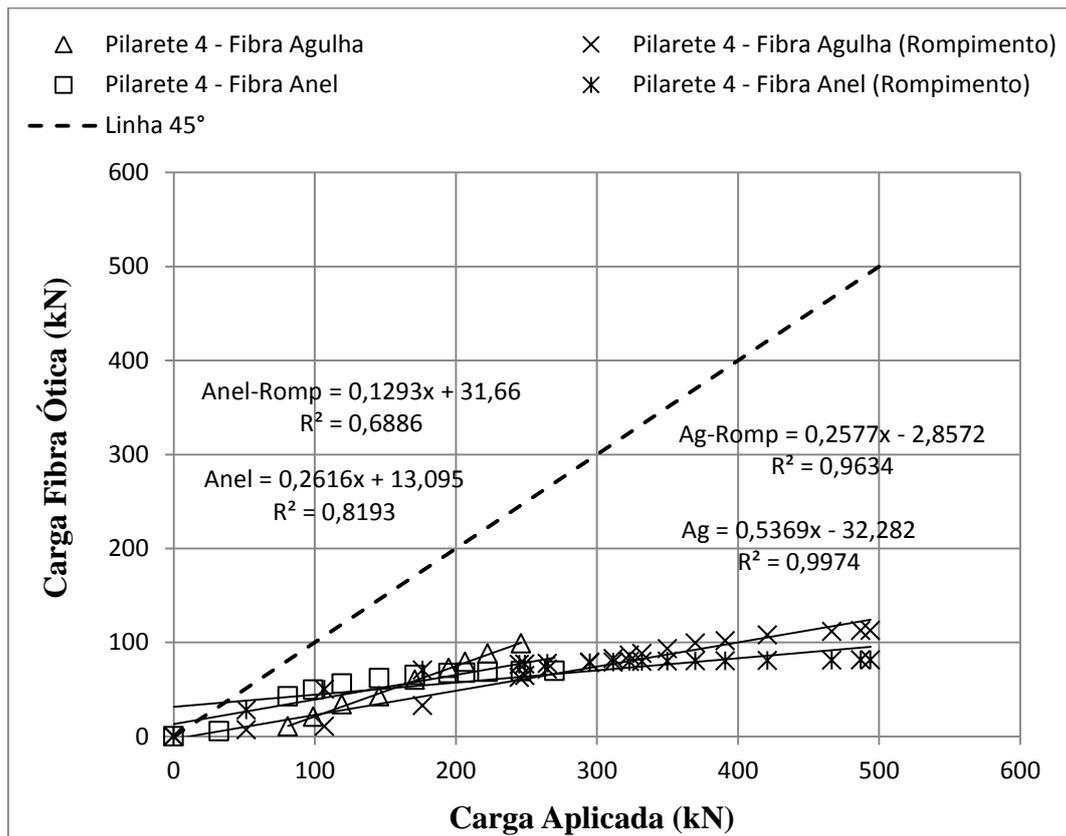


Figura 4.19 - Cargas transferidas oriundas do sistema ótico versus carga aplicada no Pilarete 4.

4.3.2.5 - TRASFERÊNCIA DE CARGA NO PILARETE 5

Da mesma forma que no anterior, esse pilarete também possui duas formas de instalação da fibra ótica, uma com a fibra instalada na agulha hipodérmica e a outra passando pelos anéis de suporte. Os resultados não foram bons, não apresentando boas proporções entre as cargas aplicadas e medidas, confirmando as suspeitas de problemas de instalação das fibras nesses métodos de instalação (Figura 4.20).

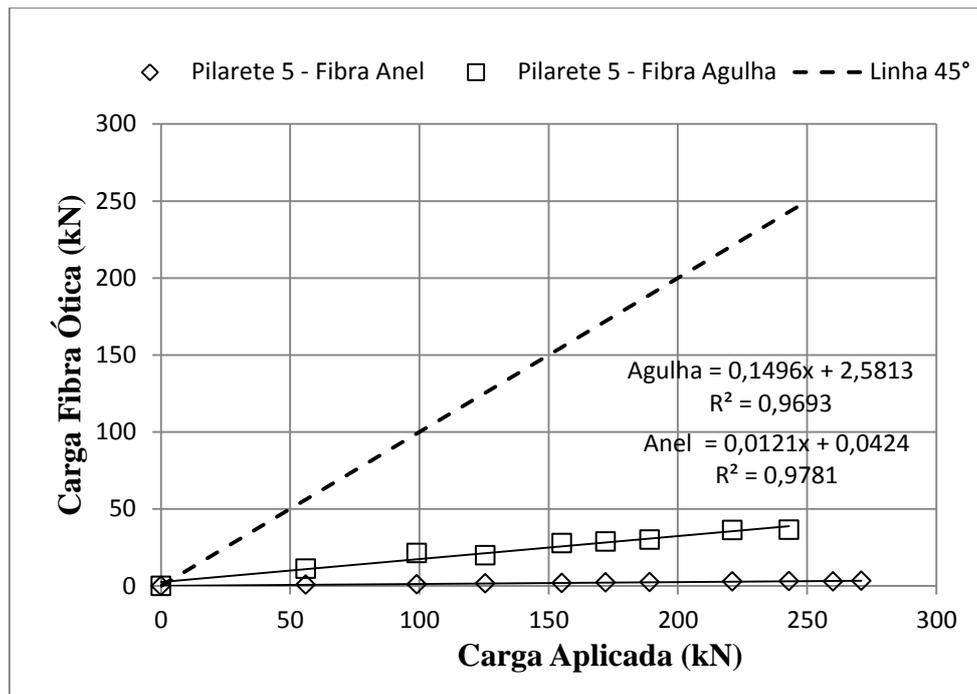


Figura 4.20 - Cargas transferidas oriundas do sistema óptico versus carga aplicada no Pilarete 5.

4.3.3 - AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DAS FIBRAS

Analisando-se o conjunto de resultados obtidos nos ensaios realizados sobre os pilaretes considerando-se as diversas formas de instalação da fibra ótica, o método da agulha não funcionou adequadamente em nenhum dos dois pilaretes onde foram instaladas as fibras, sendo a técnica considerada inapropriada para instalação em estacas a serem submetidas a provas de carga até que os problemas sejam sanados.

As Fibras óticas instaladas nos anéis do tubo apresentaram bons resultados no pilarete 1 e pilarete 3, porém não funcionou adequadamente nos pilaretes 4 e 5, levando a algumas dúvidas na sua aplicação imediata nas estacas a serem ensaiadas em campo. Apesar de ser um método que chegou a apresentar bons resultados necessita de aprimoramento de modo a evitar problemas como os ocorridos.

Já o método com a fibra ótica colada na parede do tubo apresenta uma ótima sobreposição dos resultados comparando os ensaios realizados nas etapas de carregamento e descarregamento até a ruptura, além de ser um método de fácil instalação. Com base nesses resultados conclui-se que a melhor técnica de montagem da fibra sensora neste momento para as provas de carga a serem executadas é a instalada na parede do tubo conforme feito para o pilarete 2.

4.3.4 - AVALIAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DAS FIBRAS ÓTICAS EM MODELOS FÍSICOS DE CONCRETO PARA FINS DE AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam um resumo comparativo dos resultados obtidos para os métodos construtivos de montagem das fibras óticas nos tubos e instaladas nos pilaretes, e com o mesmo concreto foram moldados os corpos de provas que apresentaram módulo de elasticidade do concreto de 37,7 (GPa) e uma deformação média $\epsilon = 191,5$ ($\mu\text{m}/\text{m}$). Cabe destacar que os ensaios de módulo foram realizados sobre corpos de prova não armados enquanto os pilaretes para avaliação da funcionalidade da fibra ótica eram armados o que contribui para a elevação do módulo de elasticidade. Outro aspecto relevante é o fato dos corpos de prova destinados aos ensaios de módulo serem cilíndricos os pilaretes que abrigavam as fibras óticas possuíam seção quadrada.

Tabela 4.7 - Comparação dos métodos construtivos de instalação das Fibras Óticas.

| | Pilarete 1 | | Pilarete 2 | | Pilarete 3 | | Pilarete 4 | | Pilarete 5 | |
|---------------------------------------|------------|--------|------------|-------|------------|--------|------------|--------|------------|--|
| | 1° Ensaio | | 1° Ensaio | | 1° Ensaio | | 1° Ensaio | | 1° Ensaio | |
| Carga (kN) | 174 | 262 | 249 | 206 | 225 | 246 | 270 | 243 | 271 | |
| Método construtivo | Anel | Parede | Anel | Anel | Erro | Agulha | Anel | Agulha | Anel | |
| ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 159,7 | 268,2 | 65,3 | 215,2 | X | 116,6 | 82,3 | 43,2 | 3,75 | |
| Módulo (GPa) | 44,9 | 42,9 | 157,7 | 44,0 | X | 70,0 | 118,1 | 244,2 | 3,04 | |

Tabela 4.8 - Comparação dos métodos construtivos de instalação das Fibras Óticas simulando o 2° ensaio usando os dados do ensaio de rompimento para os tubos 2 e 4, antes de romper até o mais próximo do limite de carga aplicada no 1° ensaio.

| | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 4 | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | 2° Ensaio | 2° Ensaio | 2° Ensaio | |
| Carga (kN) | 163,3 kN | 289 kN | 265 kN | 265 kN |
| Método construtivo | Anel | Parede | Agulha | Anel |
| ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 157,3 | 289 | 84,42 | 91,35 |
| Módulo (GPa) | 45,4 | 43,7 | 112,4 | 126,8 |

A Figura 4.21 apresenta comparativamente os resultados obtidos nos 5 modelos de montagem da fibra ótica considerando-se apenas o primeiro ensaio realizado para cada técnica de montagem. Incluiu-se nessa figura os resultados obtidos para o *strain gage*. Essa Figura mostra uma ótima sobreposição dos resultados obtidos com a fibra ótica e com o sistema *strain gage* oriundo do primeiro ensaio realizado no pilarete 1 no qual a fibra ótica foi montada nos anéis do tubo, porém não funcionou adequadamente no pilarete 4 e 5, levando a algumas dúvidas na sua aplicação imediata nas estacas a serem ensaiadas em campo. Com base nesses resultados conclui-se, portanto, que a melhor técnica de montagem da fibra sensora é a sua instalação na parede do tubo (pilarete 2). Observa-se que para essa técnica, Figura 4.8, ocorreu uma boa repetibilidade dos ensaios realizados nas etapas de carregamento e descarregamento até a ruptura.

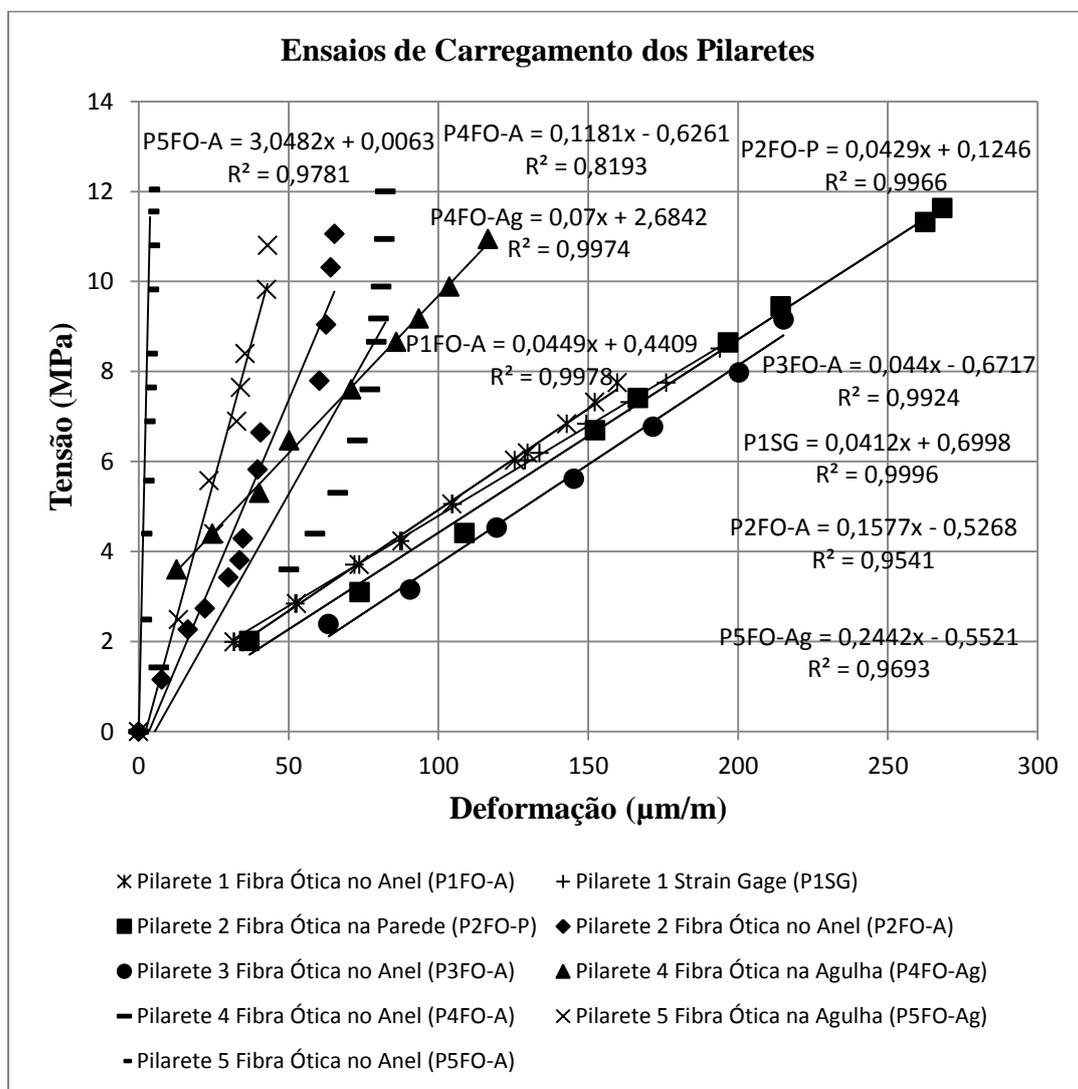


Figura 4.21 – Resultados Tensão x Deformação dos primeiros ensaios de carregamento dos Pilaretes.

4.3.5 - AVALIAÇÃO DA FIBRA ÓTICA COMO TÉCNICA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

Conforme já informado, o pilarete 1 foi instrumentado com a cabeça sensora ótica com leitura de deformação e temperatura. Durante os três ensaios de carga e descarga realizados nesse pilarete se obtiveram também as leituras de temperatura do sensor ótico com os seguintes resultados:

1º Ensaio de Temperatura – O pilarete foi retirado da câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C e a temperatura ambiente estava a 26°C com umidade relativa 62,3%. O ensaio foi realizado no período da tarde das 14 às 16hs com duração total de 2 horas. A temperatura interna do pilarete permaneceu praticamente constante durante todas as medições variando de 21,44 a 21,74 °C durante todo o ensaio realizado (Figura 4.22), o que corresponde a uma diferença em relação à temperatura da câmara úmida de aproximadamente 2°C.

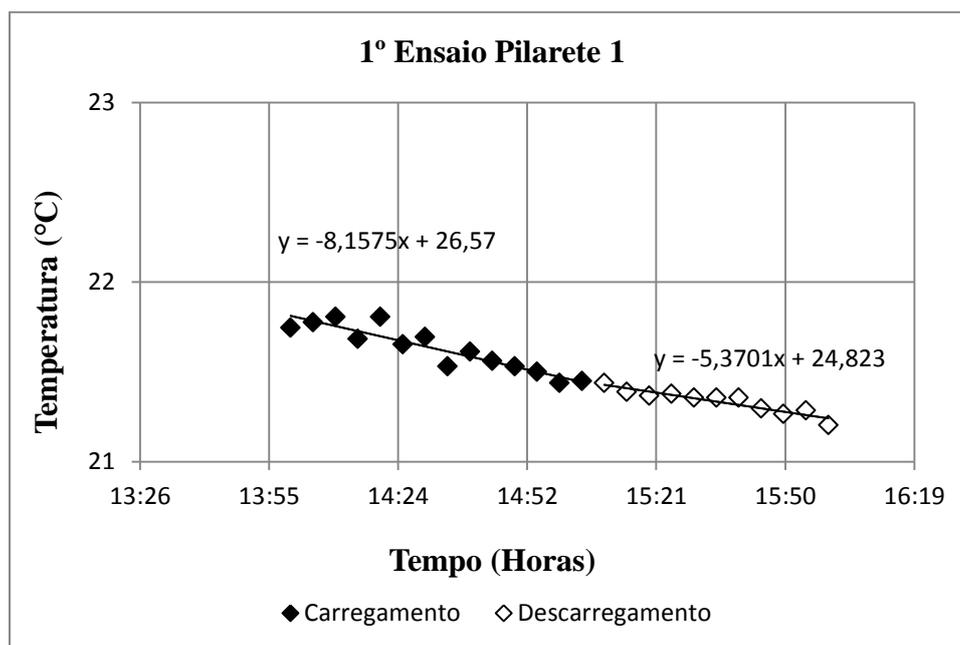


Figura 4.22 – Resultado do sensor ótico Temperatura x Horário do ensaio.

2º Ensaio de Temperatura – Com a necessidade de avaliar a eficiência do sensor ótico térmico na detecção de variações significativas de temperatura, o pilarete 1 foi colocado na estufa onde permaneceu por 15 horas com temperatura de 45°C, e no início do ensaio a temperatura ambiente estava em 23,8°C e a umidade relativa era de 71,43%. Após este período, ele foi retirado rapidamente e colocado na prensa para início do ensaio. A

temperatura interna do pilarete decresceu significativamente devido ao seu resfriamento com a temperatura ambiente durante as medições, variando de 41,60 a 37,31 °C durante o ensaio de carregamento com duração de 01:20 h, Figura 4.23, o que aponta para o relativamente rápido equilíbrio da temperatura do concreto com o meio ambiente indicando assim que o monitoramento da temperatura ao longo de uma estaca estará a refletir a temperatura do meio. Cabe ainda observar que no ensaio de carga 1 a diferença de temperatura registrada no monitoramento do ensaio para a temperatura do ambiente de cura do pilarete foi de aproximadamente 2 °C e nesse ensaio ela foi em relação ao início do ensaio de aproximadamente 3,4 °C, o que, considerado o tempo de montagem do experimento, está a indicar que a leitura no monitoramento manteve-se com o mesmo grau de precisão.

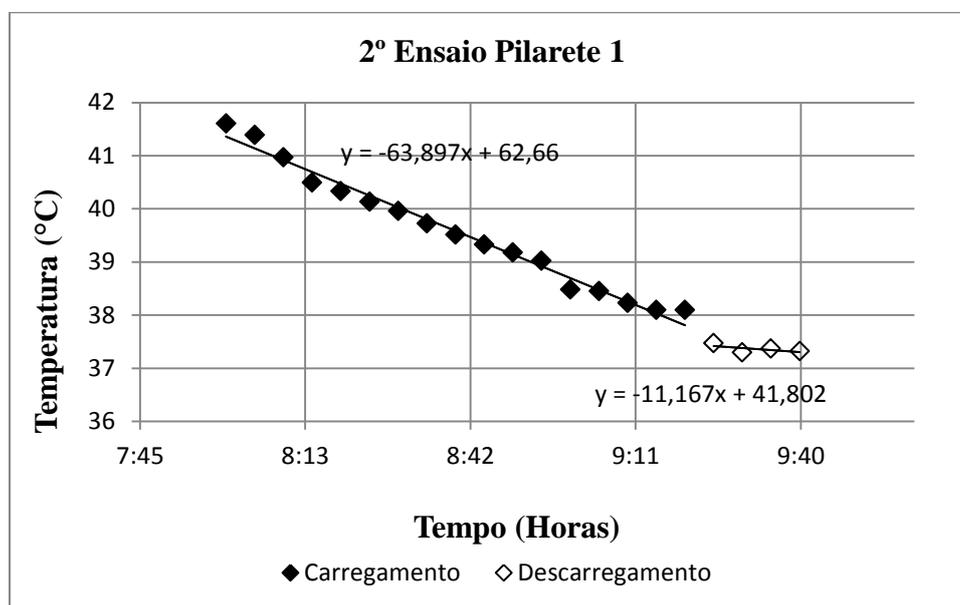


Figura 4.23 – Resultado sensor óptico Temperatura x Horário do ensaio.

Em termos dos fenômenos físicos envolvidos no processo de aquecimento do pilarete três fenômenos podem ter ocorrido: a tendência à dilatação devido ao aumento da temperatura, o que contribuiria para a redução do módulo; a tendência de contração devido ao aumento da sucção/capilaridade com a desidratação do concreto o que implicaria em um aumento do módulo; finalmente a dilatação térmica pode ainda induzir microfissuras no concreto contribuindo para a diminuição do módulo. Diante dos resultados obtidos nesse ensaio em relação aos anteriores aparentemente ocorreu um pequeno aumento devido certamente à predominância do efeito da sucção capilaridade. Esses efeitos motivaram análises complementares considerando variações da sucção com o tempo de cura que

necessitam, no entanto, serem complementados com estudos específicos sobre a influência térmica no comportamento do concreto conforme ensaiado.

3º Ensaio de Temperatura – Ao terminar a etapa anterior, o pilarete foi conduzido câmara úmida a uma temperatura de 23,5°C onde permaneceu por 5 horas com o objetivo de equilibrar novamente sua temperatura interna para poder verificar a eficiência do sensor ótico térmico. Finalizado esse período o pilarete foi levado ao terceiro ensaio com a temperatura ambiente em 24,6°C e a umidade relativa em 64,6%. Como resultado foi verificado que a temperatura interna do pilarete equilibrou-se com a temperatura da câmara úmida e permaneceu praticamente constante durante todas as medições variando de 23,58 a 23,10 °C durante todo o ensaio realizado, confirmando a eficiência e precisão do sensor ótico térmico Figura 4.24.

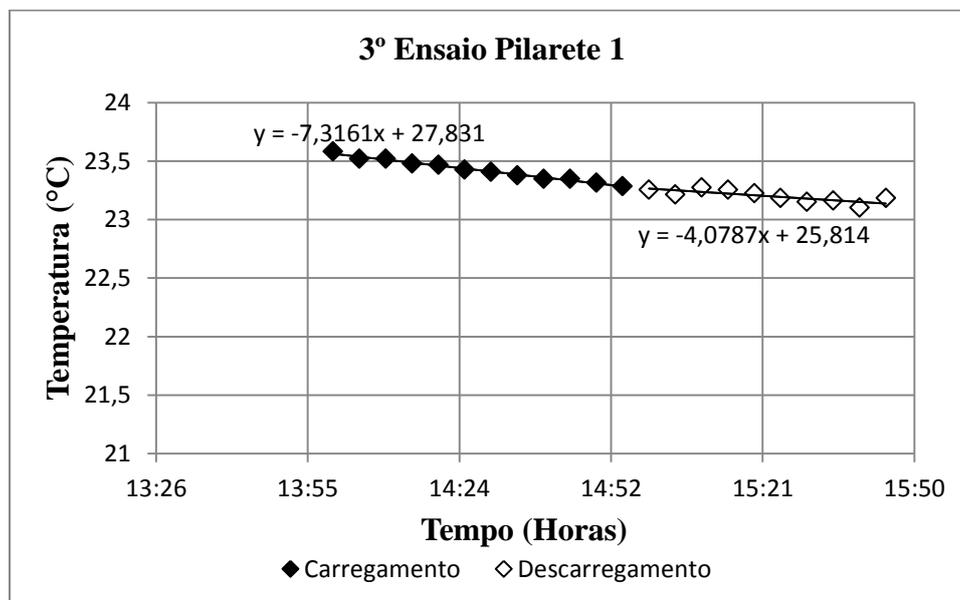


Figura 4.24 – Resultado sensor ótico Temperatura x Horário do ensaio.

É importante observar, que tanto no primeiro ensaio onde a temperatura externa era um pouco maior que a do ambiente de onde o pilarete foi retirado, como no segundo ensaio onde ocorria o inverso e no terceiro ensaio onde as duas temperaturas eram próximas ocorreram diminuições das temperaturas durante as fases de carregamento. Ao se comparar o coeficiente angular da fase de carregamento com a de descarregamento, embora nessa última também ocorra diminuição da temperatura durante o ensaio verifica-se um coeficiente menor. Conclui-se então, que as deformações impostas ao pilarete pelas cargas aplicadas terminam

gerando alguma influência nas leituras do sensor térmico, o que requer ser esse efeito ponderado e se necessário considerado.

4.3.6 - ENSAIOS COMPLEMENTARES

Diante dos resultados obtidos para a primeira prova de carga decidiu-se analisar uma técnica alternativa de montagem da fibra ótica colando-a diretamente em uma barra de aço, a exemplo do que é geralmente feito quando se usa *strain gages*.

4.3.6.1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO DA BARRA DE AÇO INSTRUMENTADA

Com a barra instrumentada fixada na prensa, iniciou-se o ensaio de tração em 4 etapas. A primeira aplicando carga até 5 kN e retornando a 0 kN, depois 30 kN, 40 kN e a última até 50 kN com todas retornando a 0 kN. É importante lembrar que esta barra foi instrumentada com uma fibra sensora longitudinal a barra e outra transversal a barra além do sistema em *strain gages* (SG). Nesta configuração, ao se aplicar a carga de tração a fibra longitudinal tende a esticar aumentando sua deformação e ao mesmo tempo a fibra transversal tende a comprimir pelo estreitamento do centro da barra devido a ação de tração.

A Figura 4.25 mostra que os resultados apresentados pela fibra longitudinal aumenta a deformação com o aumento da carga e no descarregamento a deformação diminuiu apresentando um alinhamento constante sem variações significativas como resultado dos carregamentos. É de se observar também nessa figura que os resultados oriundos do sensor ótico estão bem alinhados com os resultados provenientes do sistema strain gage. Tanto o sistema ótico como o sistema elétrico strain gage apresentaram os resultados de módulo de elasticidade do aço pelo coeficiente angular das retas bem próximo de 210 GPa que é o valor de referência para o aço.

A Figura 4.26 apresenta os resultados da fibra transversal, que como foi dito, ao se tracionar a barra comprime-se o seu centro fazendo com que a fibra ótica apresente deformações negativas devido ao seu encurtamento. É observado também o alinhamento entre as curvas provenientes do carregamento e descarregamento nos resultados da fibra

transversal. O sistema *strain gage* na configuração instalada não permite a medição das tensões em mais de uma direção ao mesmo tempo.

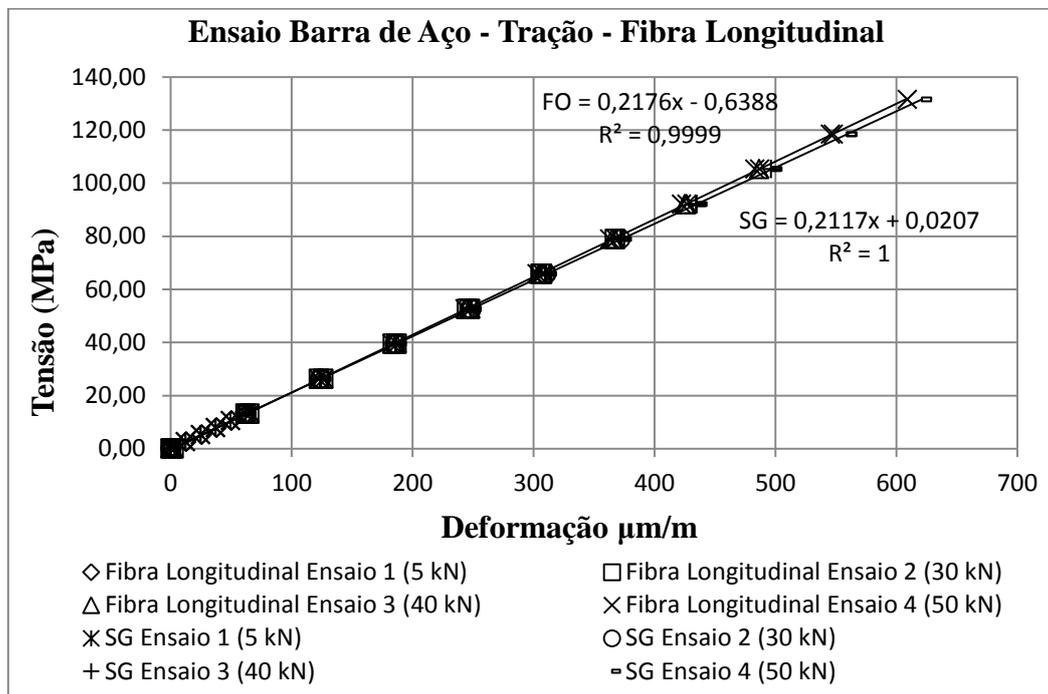


Figura 4.25 – Resultado ensaio de tração com a fibra sensora longitudinal à barra de aço.

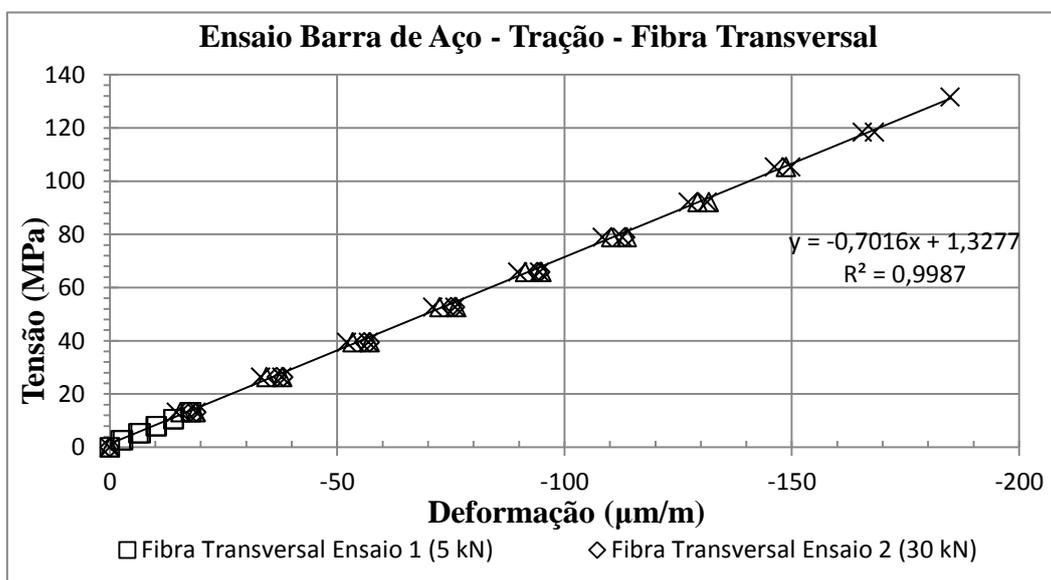


Figura 4.26 – Resultado ensaio de tração com a fibra sensora transversal à barra de aço.

Em seguida, iniciou-se o ensaio de compressão na mesma barra. Para esta etapa foram realizados 3 ensaios sendo o primeiro até 5 kN e retornando a 0 kN, depois 8 kN e finalmente 10 kN com todos descarregando totalmente. Por orientação dos responsáveis pelo laboratório

e grande experiência neste tipo de ensaio, não realizou este ensaio com cargas maiores devido à ação de flambagem da barra e possível danificação dos sensores. Para este ensaio, a fibra longitudinal tende a comprimir apresentando deformações negativas, Figura 4.27, e ao mesmo tempo a fibra transversal tende a estender devido à ação de alargamento do seu centro, apresentando resultados de deformação positiva, Figura 4.28. Em ambos os casos, os resultados de carregamento e descarregamento também foram coincidentes em suas curvas. Para a fibra longitudinal a comparação com o sistema *strain gage* apresentou coerência entre os resultados dos dois sistemas.

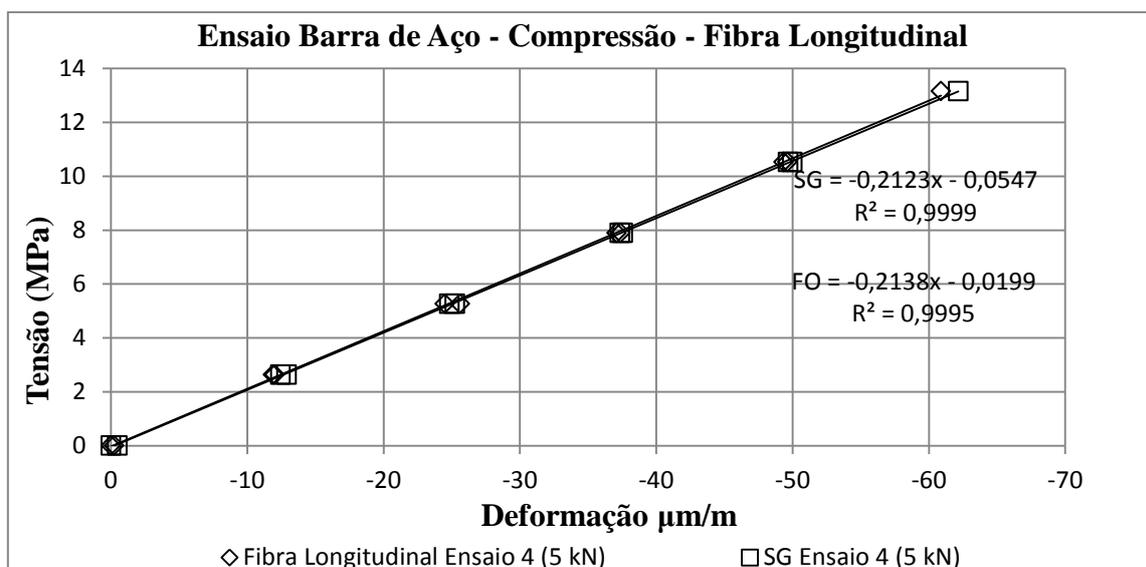


Figura 4.27 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora longitudinal à barra.

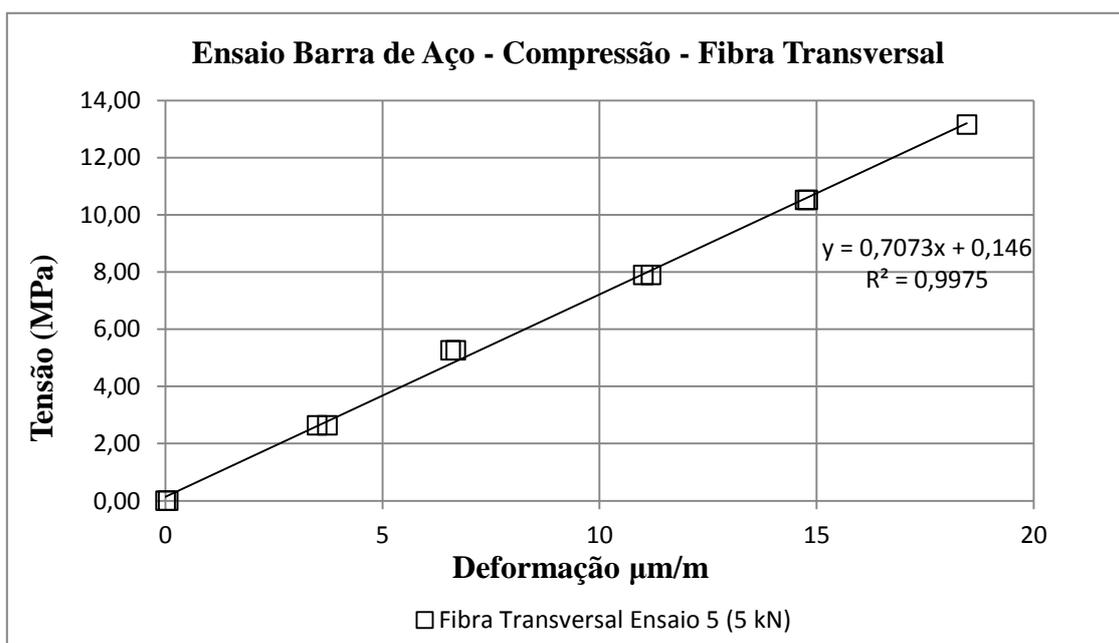


Figura 4.28 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora transversal à barra.

4.3.6.2 - ENSAIOS DE COMPRESSÃO DA BARRA DE ALUMÍNIO INSTRUMENTADA

A barra de alumínio por ser de dimensões reduzidas, apenas 14 cm, não possibilitou a realização do ensaio de tração, pois não foi possível fixá-la nas garras superior e inferior da prensa. Pelo mesmo motivo de suas dimensões reduzidas, esta barra foi instrumentada apenas com a fibra sensora longitudinal. Com a barra instalada na prensa, iniciou-se o ensaio de compressão em 3 etapas. A primeira aplicando carga até 5 kN e retornando a 0 kN, depois a segunda e terceira respectivamente indo até 8 kN e 10 kN com todas retornando a 0 kN. Com a aplicação da carga a fibra longitudinal tende a comprimir apresentando deformação negativa.

A Figura 4.29 mostra que os resultados apresentados pela fibra longitudinal vão aumentando a deformação negativa com o aumento da carga e no descarregamento a deformação retorna ao estado inicial, sempre apresentando um alinhamento constante como resultado do carregamento e com os resultados do sistema strain gage. Ambos os sistemas apresentaram o módulo de elasticidade pelo coeficiente angular da reta de 70 GPa, que é o valor do módulo de elasticidade do alumínio.

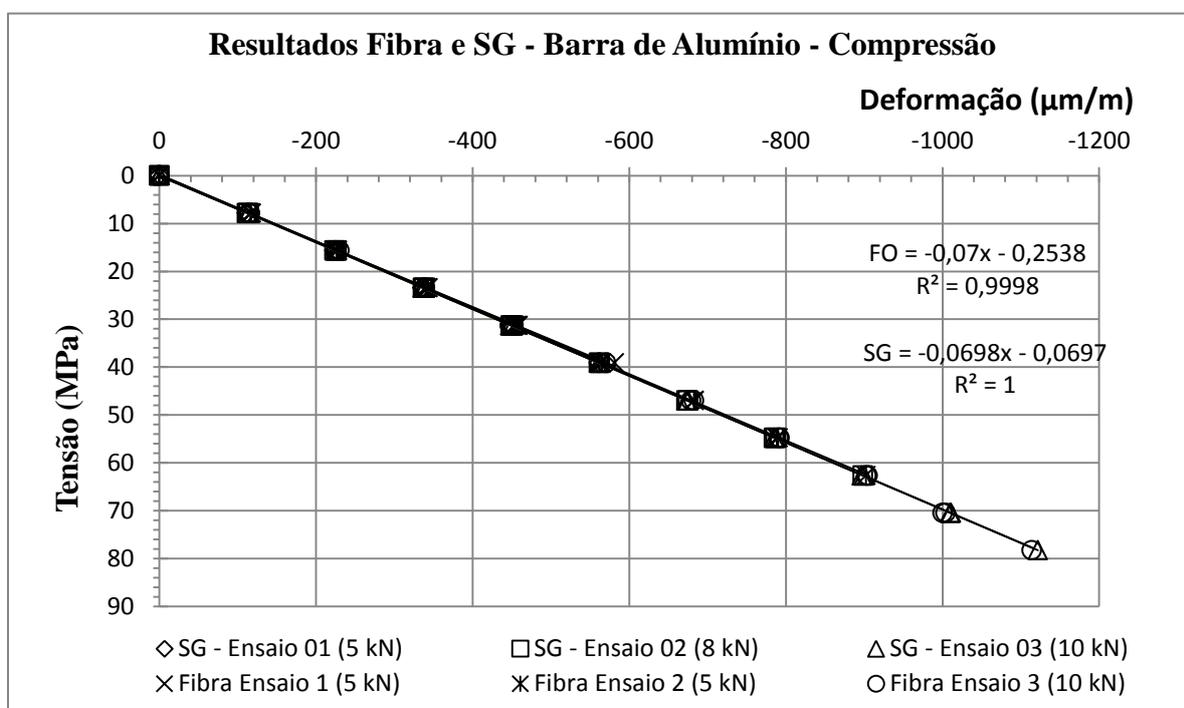


Figura 4.29 – Resultado ensaio de compressão com a fibra sensora longitudinal à barra.

4.4 - AVALIAÇÃO DA SUCCÃO ATUANTE NO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Como ocorrem reações químicas e variações de umidade e porosidade ao longo do período de cura do concreto e em campo esse vai buscar entrar em equilíbrio de sucção com o solo circundante decidiu-se estudar as variações de sucção no concreto com o tempo de cura.

A massa específica do concreto, do cimento, da areia e brita foram determinadas no equipamento Pentapicnômetro, apresentando os seguintes resultados por recipiente: para o concreto de 2,5678 g/cm³, 2,6071 g/cm³, 2,5696 g/cm³, 2,6042 g/cm³ e 2,6045 g/cm³; cimento de 3,0126 g/cm³ e 3,0257 g/cm³; areia 2,6608 g/cm³ e 2,6649 g/cm³ e brita com 2,7425 g/cm³, 2,7406 g/cm³.

Foram determinadas as sucções totais e matriciais do concreto. No entanto, como os valores obtidos para as sucções matriciais e totais foram semelhantes (Figura 4.30), serão apresentados e discutidos ao longo dessa tese apenas os resultados concernentes à sucção matricial. A semelhança de resultados entre sucções totais e matriciais geralmente se dão quando essas estão a atuar em nível de microporos onde a influência das forças de adsorção é significativa fazendo com que os resultados se aproximem, e esse é aparentemente o caso. Deve-se, no entanto, avaliar melhor o disco espaçador de geotêxtil utilizado a fim de verificar se ele não atuou como um condutor de umidade estabelecendo o equilíbrio de sucção entre o papel filtro e o corpo de prova de concreto em termos de sucção mátrica.

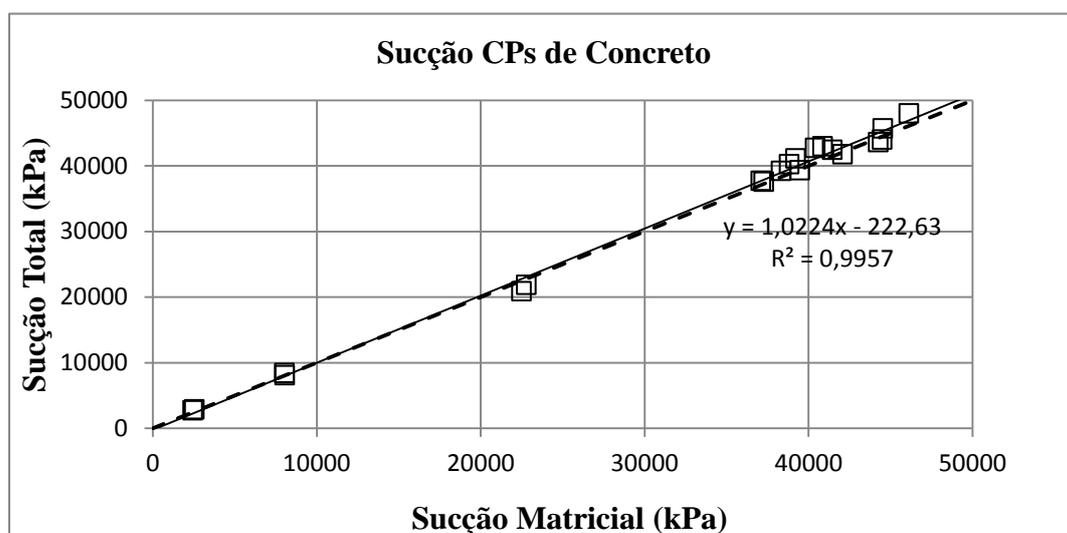


Figura 4.30 - Sucção matricial versus sucção total.

Complementarmente, como o comportamento do concreto depende da sucção optou-se por também analisar a variação da resistência à tração por compressão diametral do concreto com o tempo de cura tirando proveito dos corpos de prova confeccionados para a determinação das sucções. A partir das resistências a tração por compressão diametral torna-se possível estimar as variações do módulo em função do tempo de cura e em função da sucção.

O fato das provas de carga na prática da engenharia serem realizadas sobre estacas submetidas a diferentes tempos de cura, segundo o planejamento de projeto e/ou de obra, amplia a importância desse estudo.

4.4.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NA SUCÇÃO ATUANTE NO CONCRETO

Com a finalização de todo procedimento realizado nos 20 corpos de provas de concreto, conforme descrito no item 4.3 do Capítulo Materiais e Métodos, obteve-se a Figura 4.31 que mostra que a sucção matricial aumenta com o aumento do tempo de cura do concreto até o trigésimo dia tendendo a um valor constante a partir desse período. Essa constatação indica que com o aumento do tempo de cura do concreto diminuiu a umidade e consequentemente aumentando a Sucção. Cabe salientar que o tempo mínimo de cura adotado se deve a técnica utilizada para a determinação da sucção, técnica do papel filtro, que exige um período de tempo mínimo para estabilização da sucção.

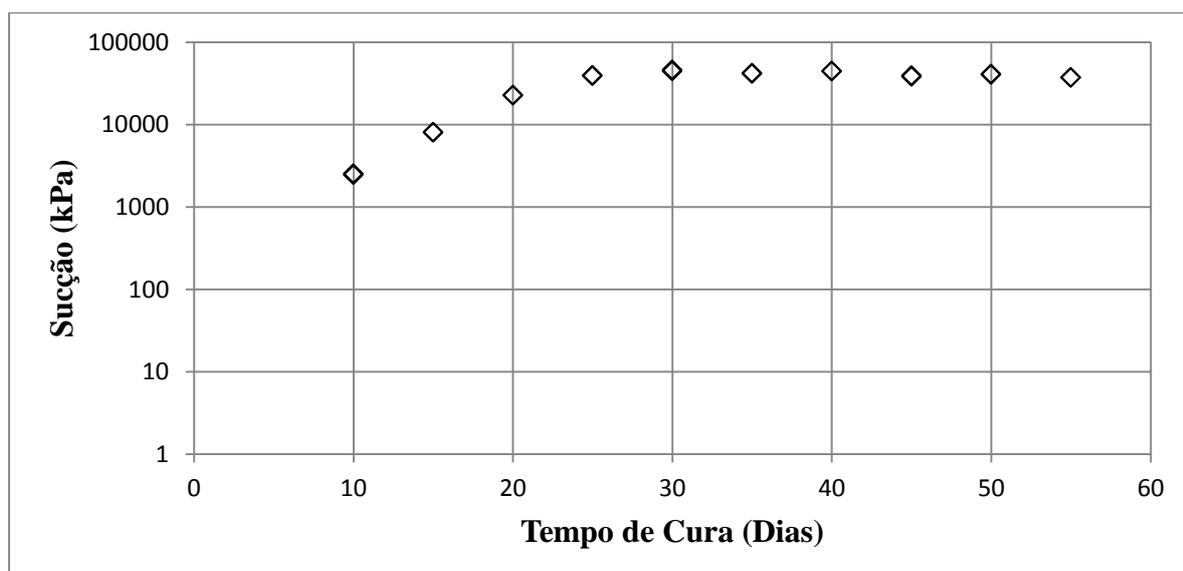


Figura 4.31 – Influência do tempo de cura do concreto na sucção mátrica nele atuante.

A sucção atuante no concreto será, a exemplo do que ocorre nos solos, função da umidade e da porosidade. No caso específico do concreto um outro fator interveniente na sucção diz respeito à sua composição químico-mineralógica, que no presente estudo deve evoluir com o tempo de cura.

Usando a proposta de Camapum de Carvalho & Leroueil (2004) segundo a qual ao se transformar a sucção em pF (logarítmico da sucção em centímetros de coluna de água) pelo índice de vazios (e), e.pF, e plotá-la versus o grau de saturação (Sr), se obtém uma tendência única para solos com uma mesma distribuição de poros, analisou-se os resultados obtidos para o concreto segundo essa proposta (Figura 4.32). Nessa figura, os símbolos vazios pertencem às famílias de ponto do mesmo formato cheio, mas não foram incluídos na definição da correlação entre o “e.pF” e o “Sr” e o símbolo em X pertence à família dos símbolos quadrados e também não foram incluídos na correlação, cabendo nesse caso destacar o significativo deslocamento para a direita desses pontos em relação à tendência registrado para os pontos com um período de cura inferior menor ou igual a 30 dias. Tal deslocamento pode ser atribuído ao fato de que aos 10 dias ainda existe água livre atuando no domínio dos poros de maior tamanho tal como é verificado para o caso dos solos agregados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2002).

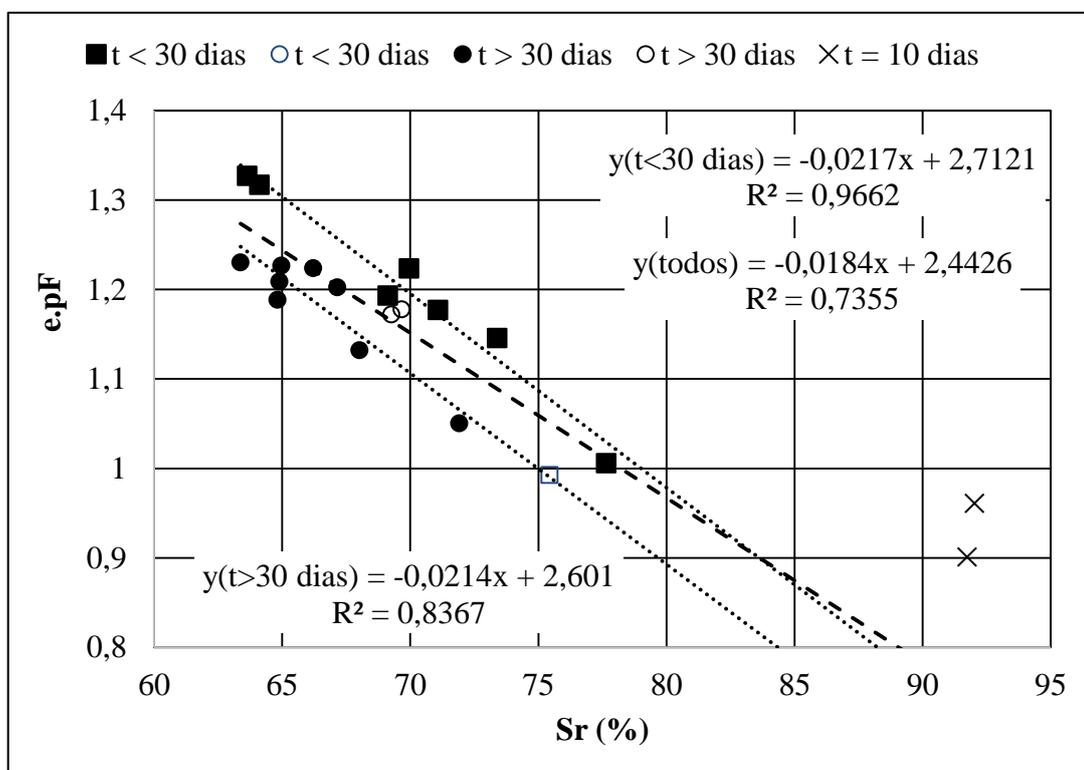


Figura 4.32 - Resultados de e.pF x Sr.

A Figura 4.32 mostra que, considerando-se uma mesma porosidade a sucção atuante no concreto para um mesmo grau de saturação tende a diminuir ao se aumentar o tempo de cura, embora, cabe destacar, que os dois pontos excluídos da correlação para um tempo de cura maior que 30 dias corresponde exatamente aos corpos de prova com maior tempo de cura, 55 dias. Deduz-se dessas análises, embora mais estudos sejam necessários para uma conclusão definitiva, que os cimentos formados no processo de cura tendem a reduzir o efeito ou as próprias forças de adsorção entre as partículas que compõem o concreto.

4.4.2 - INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO DO CONCRETO

Neste caso, apresenta-se primeiro a influência do tempo de cura do concreto na Resistência à Tração por Compressão Diametral do mesmo. Observa-se na Figura 4.33 que a resistência à tração do concreto está diretamente relacionada com o tempo de cura tendendo a se estabilizar a partir de certo período, ou seja, quanto maior o tempo de cura do concreto maior tende a ser sua resistência a tração por compressão diametral até atingir um determinado período de cura (Regressão linear pela equação de terceira ordem, linha tracejada). Na figura são apresentadas duas equações sendo que por uma questão de simplificação será utilizada a equação de primeira ordem em análises posteriores.

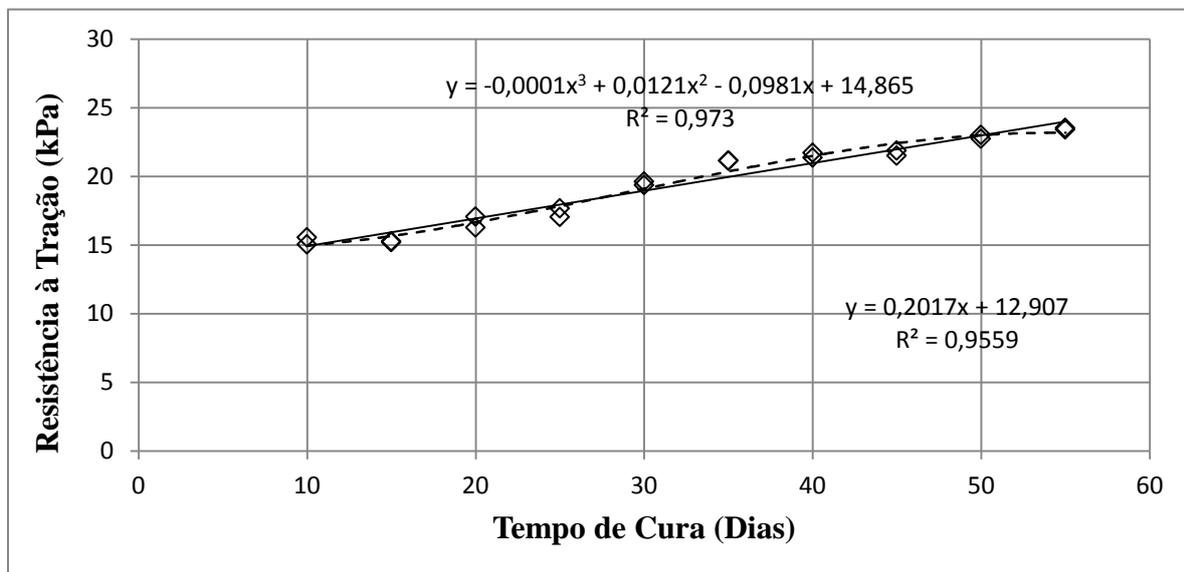


Figura 4.33 – Influência do tempo de cura do concreto na Resistência à Tração.

A Figura 4.34 mostra que Resistência à tração por compressão diametral também aumenta com o aumento da Sucção, pois todas essas grandezas estão relacionadas diretamente com a umidade e conseqüentemente com o tempo de cura do concreto e com o meio onde ele se encontra, que no caso das fundações o meio é o solo ou rocha.

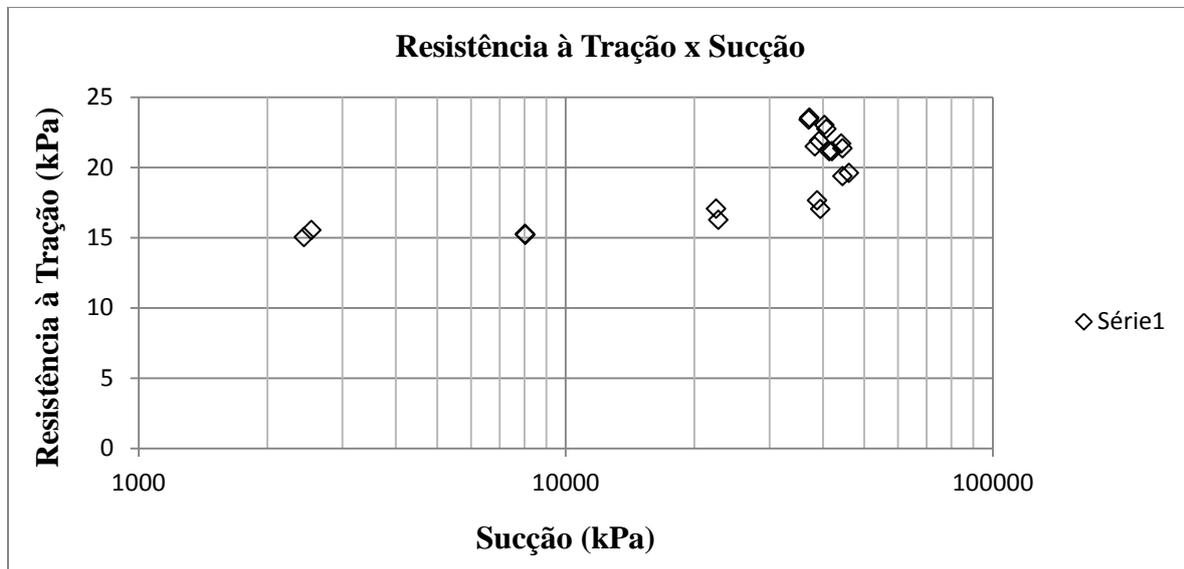


Figura 4.34 – Influência da Sucção na Resistência à Tração.

Na Figura 4.35 avalia-se a influência do Índice de vazios na resistência à tração por compressão diametral. Verifica-se que para os resultados obtidos não é possível estabelecer uma tendência de variação da resistência à tração por compressão diametral como uma função do índice de vazios, embora se saiba que a resistência à tração deva diminuir com o aumento da porosidade do concreto.

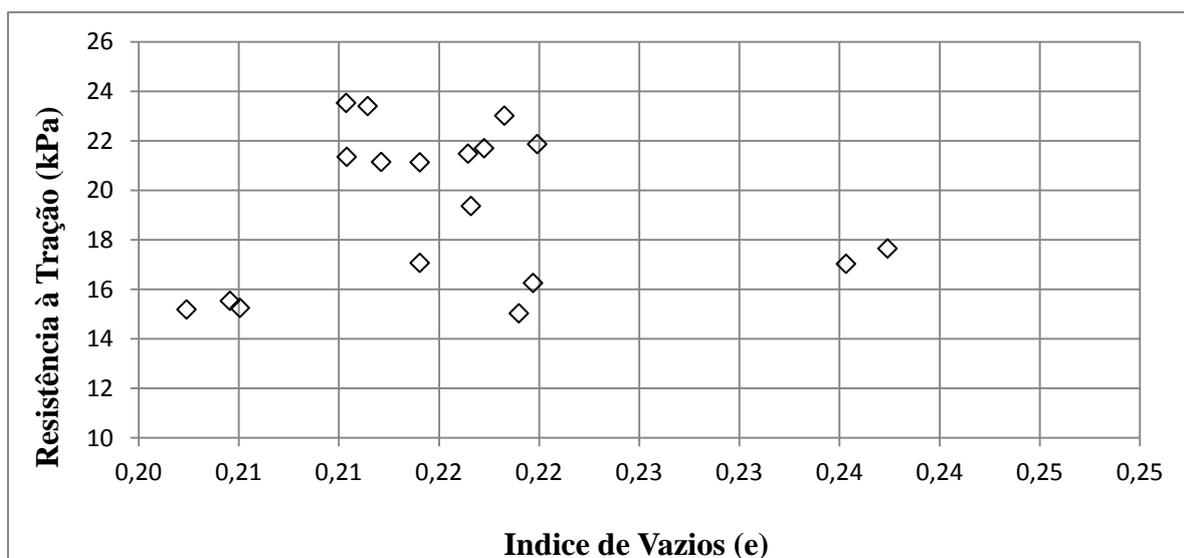


Figura 4.35 – Influência do índice de vazios na resistência à tração por compressão diametral do concreto.

A Figura 4.36 mostra que a resistência à tração tende a diminuir com o aumento da relação entre o logaritmo da sucção em centímetro de coluna de água (pF) dividido pelo índice de vazios. Nessa análise se observa que ao se englobar a influência da sucção (Figura 4.34) e do índice de vazios (Figura 4.35) se obtém uma maior clareza sobre a influência desses dois parâmetros na resistência à tração por compressão diametral do concreto.

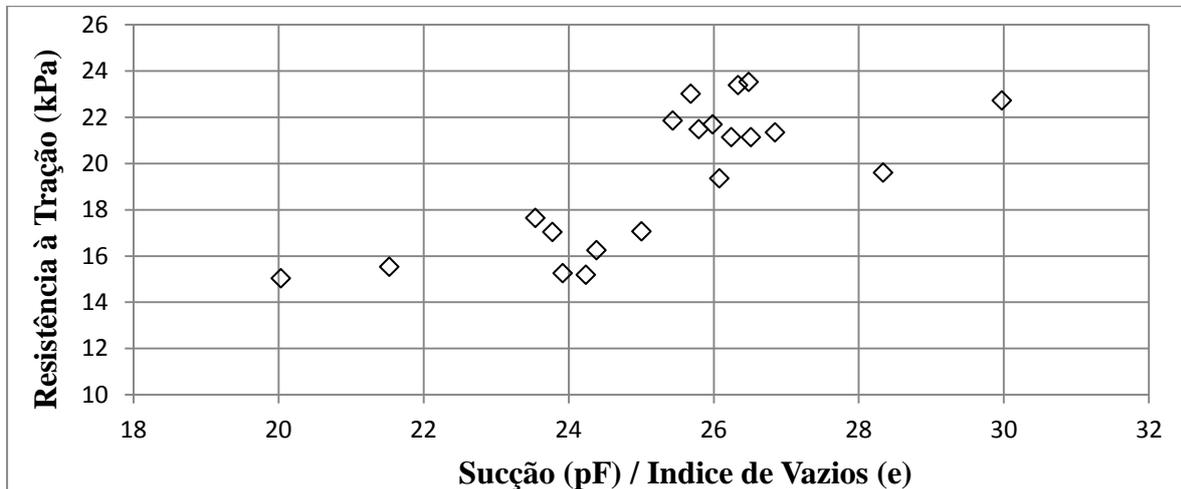


Figura 4.36 – Influência da Sucção (pF)/ Índice de vazios na Resistência à Tração.

Na Figura 4.37 incorporou-se a influência do tempo de cura na resistência à tração por compressão diametral considerando-se o coeficiente estabelecidos na Figura 4.33. Tem-se então no eixo das abscissas nessa figura o pF/e somado à influência do tempo de cura na resistência à tração por compressão diametral. Essa Figura mostra que ao se considerar o conjunto dos fatores intervenientes na resistência à tração por compressão diametral se obtém uma boa relação no gráfico.

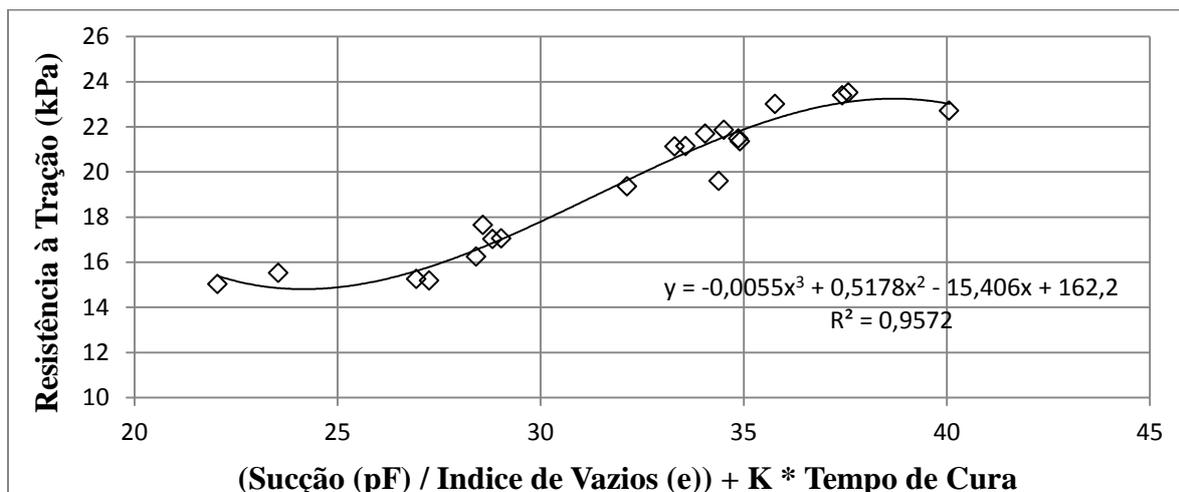


Figura 4.37 – Influência da Sucção (pF)/ Índice de vazios (e) na Resistência à Tração por Compressão Diametral.

4.4.3 - INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO, DO TEMPO DE CURA E DO ÍNDICE DE VAZIOS NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Com fundamento na equação oriunda da correlação definida na Figura 4.37, equação 4.1, calculou-se as resistências à tração por compressão diametral fazendo-se variar separadamente a sucção, o tempo de cura e o índice de vazios sendo que quando um desses parâmetros variava os demais eram mantidos constantes. Calculadas as resistências a tração (RT) por compressão diametral estimou-se os módulos de elasticidade (E) do concreto em função de cada um desses parâmetros usando-se a equação 4.2 proposta por Quadros (2014).

$$RT = -0,0055x^3 + 0,5178x^2 - 15,406x + 162,2 \quad (4.1)$$

$$E = 4760 \sqrt[2]{RT} \quad (4.2)$$

Ao se avaliar o efeito da sucção no módulo de elasticidade fixou-se o índice de vazios adotando-se o valor médio obtido nos ensaios, e definiu-se o tempo de cura como sendo igual a 30 dias e fez-se variar a sucção. Ao se avaliar o efeito do tempo de cura no módulo de elasticidade fixou-se a sucção em 20000 kPa e adotou-se o índice de vazios médio obtido nos ensaios, fazendo-se variar o tempo de cura. Finalmente, ao se analisar a influência do índice de vazios no módulo de elasticidade, fixou-se o tempo de cura em 30 dias e a sucção em 20000 kPa, fazendo-se variar o índice de vazios.

A Figura 4.38 apresenta os resultados obtidos na análise da influência da sucção no módulo de elasticidade do concreto. Segundo esse gráfico a sensibilidade do módulo de elasticidade às variações de sucção depende do índice de vazios do concreto sendo também afetado pelo tempo de cura (TC). Com menores índices de vazios se tem um aumento inicial mais significativo do módulo com o aumento da sucção mátrica enquanto com índices de vazios maiores esse aumento se torna progressivo. Observa-se ainda certo paralelismo entre as curvas quando a sucção se torna mais elevada. Ao se comparar os tempos de cura 30 e 40 dias se observa também que com o aumento da sucção as curvas se aproximam. Nessas situações analisadas a influência da sucção no comportamento do solo deixa de aumentar quando ela passa a atuar em nível de microporos. Portanto, por analogia com o comportamento dos solos, o comportamento obtido para o módulo de elasticidade do concreto, calculado a partir das resistências a tração, guarda coerência com o comportamento esperado.

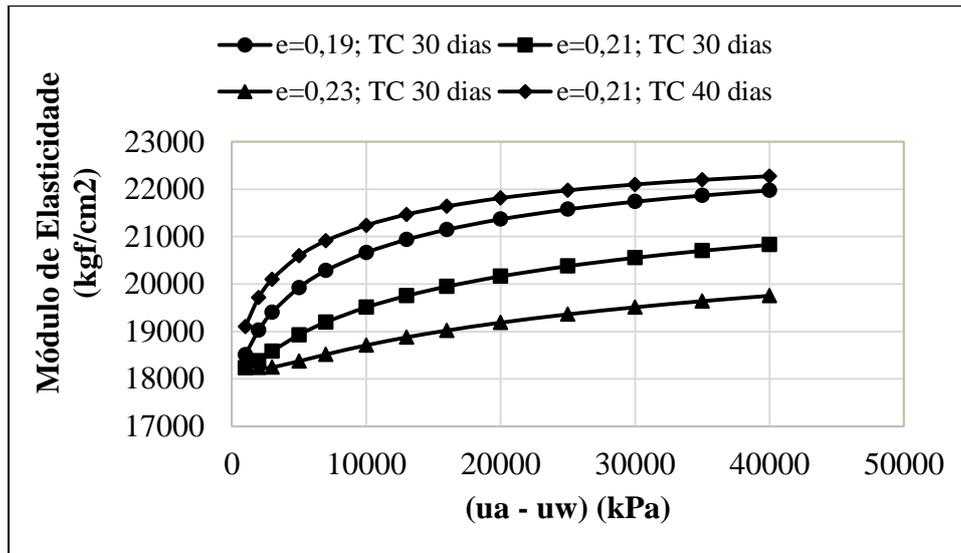


Figura 4.38 – Influência da Sucção (KPa) no Módulo de Elasticidade do concreto.

A Figura 4.39 mostra que os valores estimados do módulo de elasticidade para sucções mátricas menores (2000 kPa e 5000 kPa) não correspondem ao esperado, até atingirem respectivamente 25 e 20 dias de tempo de cura. Isso é devido a equação utilizada, para a qual se deve fixar domínios de validade em função do tempo de cura, sucção atuante e mesmo índice de vazios, pois a curva obtida para a sucção de 10000 kPa e índice de vazios igual a 0,23 passa a ter um comportamento similar ao obtido para a sucção mátrica de 5000 kPa e índice de vazios igual a 0,21. Mesmo com essas limitações os resultados obtidos mostram que o módulo aumenta com o tempo de cura tendendo a se tornarem constantes a partir de certo tempo de cura, sendo este dependente da sucção e do índice de vazios.

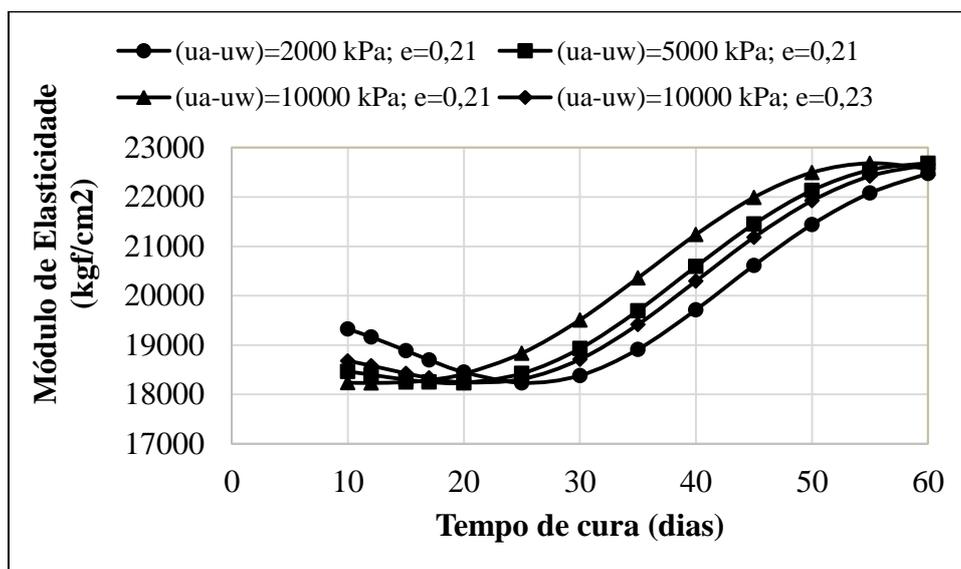


Figura 4.39 – Influência do tempo de cura no Módulo de Elasticidade do concreto.

A Figura 4.40 apresenta a influência do índice de vazios no módulo de elasticidade do concreto para condições fixas de sucção e tempo de cura. Optou-se nesse caso por analisar valores de sucção compreendidos na zona de influência no módulo de elasticidade (Figura 4.38) e o tempo de cura na zona de influência na resistência a tração (Figura 4.33). Dentro desses limites se observa para a menor sucção mátrica (2000 kPa) e 30 dias de cura que para “e” maior que 0,22 o módulo tenderia a aumentar, sendo que esse limite passa a 0,25 para a sucção mátrica de 5000 kPa e deixa de ocorrer para o limites de índice de vazios analisados para a sucção mátrica de 10000 kPa e tempos de cura de 30 e 40 dias. Observa-se ainda nessa figura que para a sucção de 10000 kPa e tempo de cura 40 dias quando o índice de vazios diminui a partir de 0,17 o módulo de elasticidade diminui. Chama-se a atenção para esses comportamentos para indicar que como os estudos foram limitados em termos de aspectos analisados é evidente que as equações obtidas só serão de maior validade para os domínios paramétricos estudados. Mesmo diante dessas limitações, é possível concluir, como esperado, que o módulo de elasticidade diminui com o índice de vazios presente no concreto.

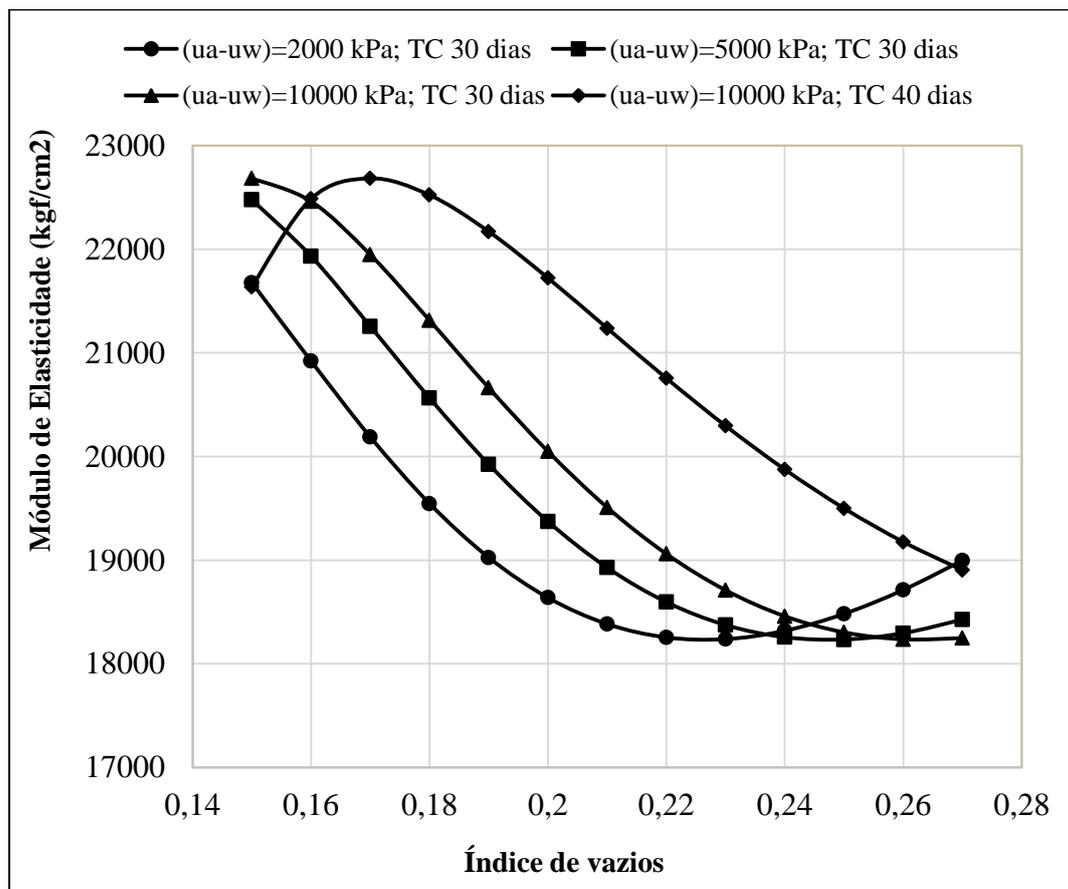


Figura 4.40 – Influência do Índice de vazios no Módulo de Elasticidade do concreto.

4.5 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Esse estudo foi realizado sobre amostras coletadas a 2 m, 8 m e 9 m de profundidade por corresponderem a profundidades representativas do perfil de solo no qual se implantou as estacas para realização das provas de carga, sendo que a amostra proveniente da profundidade 2 m é representativa do manto de solo profundamente intemperizado e as amostras coletadas a 8 m e 9 m se situam na camada de transição/início do solo saprolítico.

A massa específica dos grãos foi determinada utilizando-se o equipamento pentapicnômetro e amostras secas em estufa à 110 °C. Na profundidade de 2m apresentou uma média dos resultados em 2,6810 g/cm³, de 8m deu uma média de 2,6652 g/cm³ e na profundidade de 9 m resultou em uma média 2,6968 g/cm³.

Determinou-se as curvas características para a temperatura ambiente, aproximadamente 24 °C, e para as temperaturas de 10 °C e 40 °C usando-se uma câmara climatizada. Adotou-se essas temperaturas por considera-las regionalmente extremas para o perfil de solo estudado.

Foram determinadas as curvas características correspondentes às sucções totais e matriciais do solo em umidade gravimétrica e volumétrica. Na determinação das curvas características pela técnica do papel filtro foi usada as equações de calibração propostas por Borges (2010) para condições ambientes de temperatura.

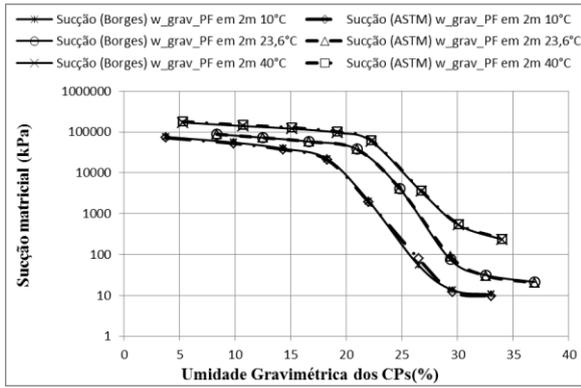
4.5.1 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Os resultados dos ensaios de laboratórios realizados para determinar a influência da temperatura na curva característica de retenção de água determinada pela técnica do papel filtro utilizando-se amostras de solo coletadas nas profundidades de 2, 8 e 9 metros, mostram que acontece um significativo aumento nos valores da sucção calculados considerando-se as umidades gravimétricas dos corpos de provas (CPs) quando se aumenta a temperatura de ensaio nas proporções consideradas (Figuras 4.41a, 4.42a e 4.43a). Nessas figuras foram acrescentados os resultados obtidos corrigindo-se as curvas de calibração do papel filtro em função da temperatura com base na equação 3.9 (ASTM D5298-10, 2016) apresentada no Capítulo 3.

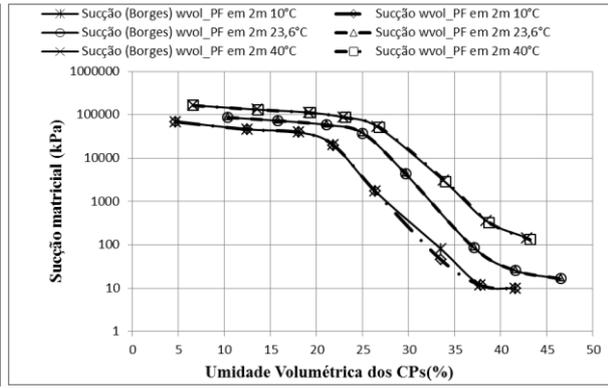
Uma das razões que poderiam estar levando à significativa influência da temperatura na sucção atuante no solo seria a influência da temperatura na densidade e viscosidade da água sendo a influência da densidade de mais fácil verificação, motivo pelo qual foi analisada nessa tese. O aumento da densidade da água resulta na aproximação das moléculas de água das partículas de argila aumentando a força de adsorção e por consequência aumentando a sucção. O aumento da densidade da água poderia ainda propiciar uma diminuição dos raios dos meniscos capilares presentes no solo o que também geraria o aumento da sucção.

Outro fator que merece ser melhor avaliado em estudos futuros diz respeito à influência da temperatura na sucção atuante no papel filtro, pois a passagem das curvas de calibração de uma função da umidade gravimétrica para funções da umidade volumétrica considerando-se apenas o efeito da temperatura na densidade da água, conforme indicado na metodologia, não gerou diferenças significativas entre as curvas de calibração, mas as significativas variações das curvas características do solo com a variação da temperatura apontam para a necessidade de estudos mais amplos.

Para avaliação da influência da temperatura por meio da alteração da densidade da água nas curvas características estas foram determinadas em função das umidades volumétricas dos corpos de provas e do papel filtro. As Figuras 4.41b, 4.42b e 4.43b apresentam os resultados obtidos respectivamente para as profundidades de 2 m, 8 m, e 9 m, com e sem a correção das umidades volumétricas dos corpos de prova e dos papéis filtro em função das alterações da densidade da água com a temperatura. Essas figuras mostram que a correção das curvas em função do efeito da temperatura na densidade da água conduz apenas a pequenas variações na sucção gerando assim um deslocamento das curvas características quase que imperceptível o que coloca em evidência a necessidade de se estudar a influência da temperatura sobre as propriedades da água e na interação água-argila.

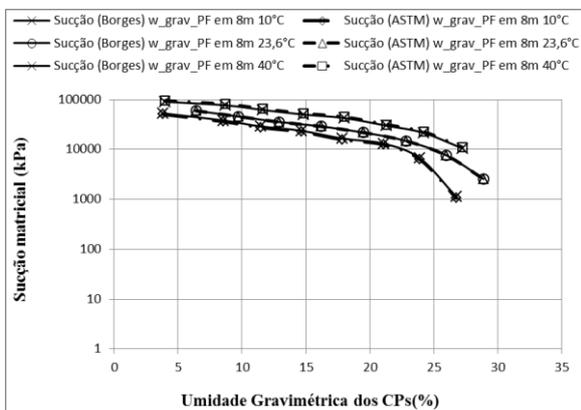


(a)

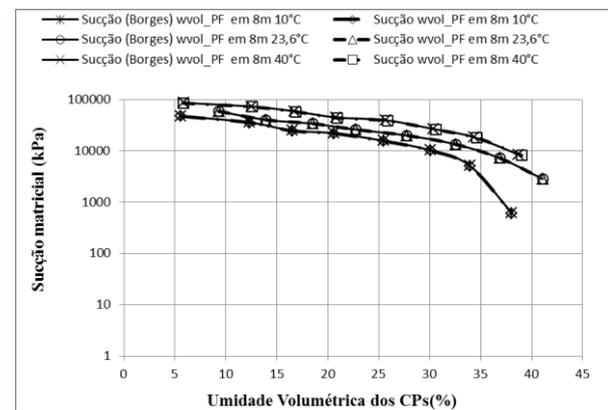


(b)

Figura 4.41 – Amostra oriunda de 2 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.

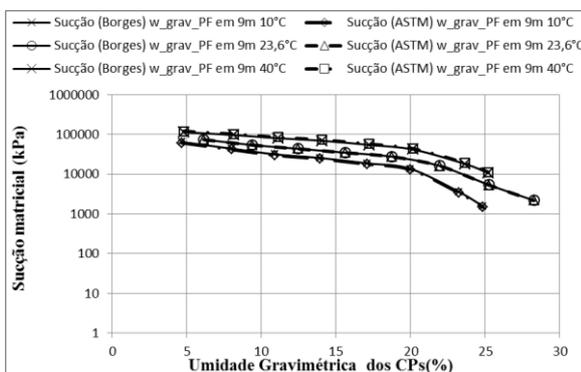


(a)

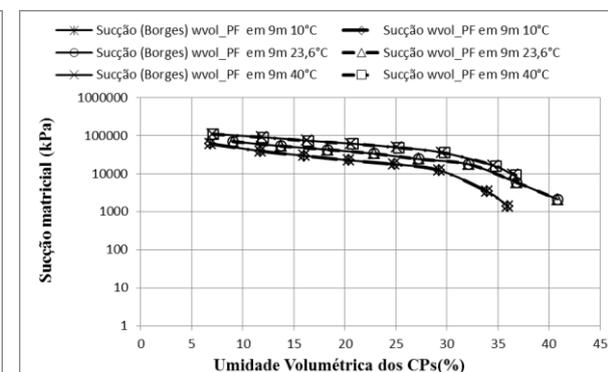


(b)

Figura 4.42 – Amostra oriunda de 8 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.



(a)



(b)

Figura 4.43 – Amostra oriunda de 9 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.

4.6 - SONDAGENS SPT E SPT-T PARA AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE SOLO

Foram realizadas cinco sondagens SPT sendo duas delas incluindo-se as medidas de Torque (SPT-T). Dessas cinco sondagens 3 foram realizadas no campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) situado nas coordenadas -15.7659738 de Latitude e -47.8732728 de Longitude e 2 no Parque Ecológico Bernardo Sayão, entre a rodovia DF 001 e o Lago Sul DF. Dessas duas últimas sondagens uma foi realizada na altura da QI 27 em Latitude -15.839286 e Longitude -47 e a outra na altura da QI 29 do Lago Sul – DF nas coordenadas -15.827808 de Latitude e -47.801792 de Longitude. O objetivo maior desse conjunto de sondagens era averiguar as variações térmicas e de umidade ao longo do perfil e se o comportamento mecânico mudava em função dessas características. Cabe destacar que a primeira sondagem realizada no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia foi executada por uma equipe e distinta da responsável pela realização das demais sondagens.

Das três sondagens realizadas no campo experimental, duas delas foram realizadas em datas próximas as de execução das provas de carga e incluíram as medidas de Torque ao longo do perfil, sendo, no entanto realizadas por equipes distintas.

As duas sondagens realizadas no Parque Ecológico Bernardo Sayão tiveram por objetivo apenas avaliar as variações de temperatura e umidade de perfis de solo típicos do Distrito Federal.

4.6.1 - ENSAIOS SPT-T

Os perfis de resistência à penetração do solo (N-SPT) obtidos nos ensaios são mostrados na Figura 4.44. Nota-se que no campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB o solo apresenta baixa resistência com valores praticamente constantes até a profundidade de 3,45 m, parte do perfil correspondente à zona ativa, passando a aumentar linearmente a partir dessa profundidade até atingir a cota 9,45 m, profundidade a partir da qual sofre significativo aumento atingindo o impenetrável na cota 10,45 m. A resistência à penetração do solo próximo à QI 29 no parque Bernardo Sayão apresenta uma zona ativa menos espessa indo até a profundidade de 2,45 m e a partir daí o N-SPT aumenta progressivamente até a profundidade de 11,45 m, profundidade a partir da qual apresenta substancial aumento atingindo o impenetrável na profundidade de 12,45 m. Já o

perfil de N-SPT para o solo próximo à QI 27 aumenta progressivamente desde o primeiro metro até a profundidade 5,45 m e atinge o impenetrável a partir da profundidade 6,45 m.

Esses perfis de N-SPT mostrados na Figura 4.47 colocam em evidência zonas de comportamentos distintos assim como comportamentos diferenciados entre as localidades estudadas permitindo colocar em evidência algumas particularidades locais. Ao se comparar os perfis de N-SPT obtidos para o Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB com o perfil obtido para a QI 29 se percebe uma zona ativa um pouco menos espessa na QI 29 com um aumento progressivo menos intenso a partir dessa zona ao longo da camada mais intemperizada limitada a 11,45 m de profundidade. Além de outras possíveis diferenças, cabe destacar que o perfil de solo da QI 29 encontra-se dentro de uma zona ambientalmente preservada enquanto o perfil de solo da UnB passa por processos antrópicos desde o início de Brasília.

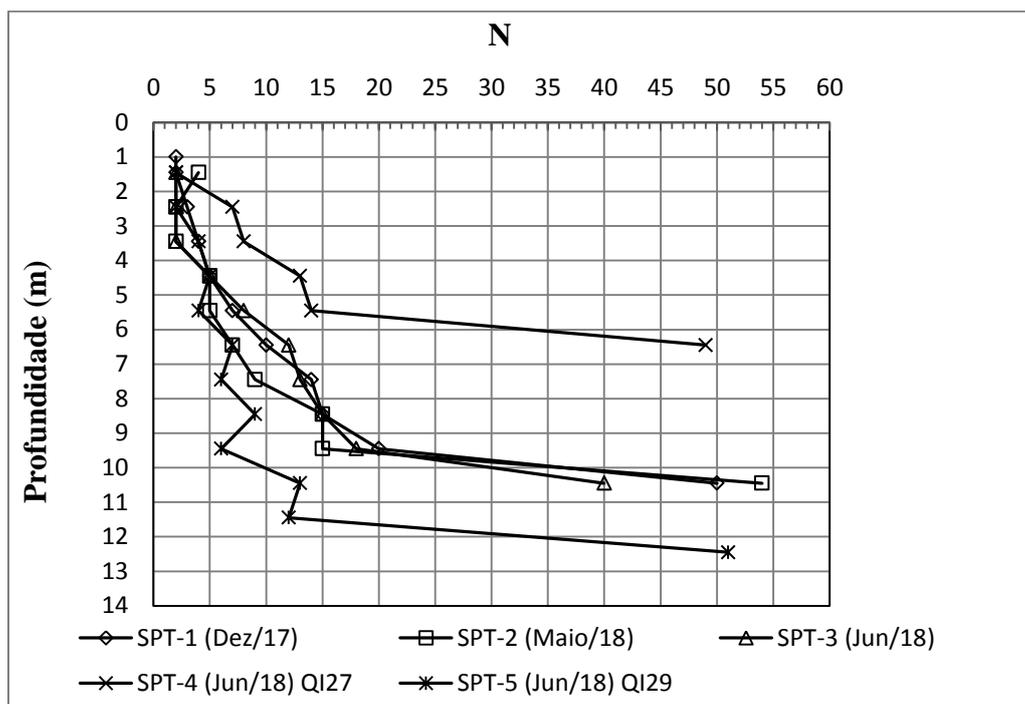


Figura 4.44 – Perfis de Resistência a Penetração dos solos estudados.

Outra distinção interessante diz respeito às diferenças entre os perfis de N-SPT dos solos da QI 29 e QI 27. Apesar de relativamente próximos o solo da QI 27 é menos intemperizado e se encontra, contrariamente ao da QI 29, próximo ao bordo de chapada.

Essas particularidades são importantes, pois permitirão avaliar melhor o impacto das diferenças entre esses perfis tanto no perfil de umidade como no perfil de temperatura.

As medidas de torque nas sondagens SPT foram realizadas apenas no campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB sendo executadas nos meses de dezembro de 2017 e maio de 2018, Figura 4.45. Comparando-se os resultados de N-SPT (Figura 4.44) com os de torque (Figura 4.45) observa-se as seguintes distinções: Os resultados de N-SPT se mostraram menos sensíveis ao período de execução que os resultados de torque indicando assim que este é aparentemente mais sensível a variações no perfil de umidade. Observa-se também que os perfis de torque apresentam uma mudança de comportamento entre 4,45 m e 5,45 m a depender da época em que foi realizada a sondagem, mudança essa que não se faz presente nos perfis de N-SPT. Esse comportamento distinto entre os resultados de N-SPT e torque podem também ser observados em Guimarães (2002) que estudou solos do mesmo local. Apesar desse comportamento diferenciado entre os resultados dos dois ensaios existe uma relação entre eles como mostra a Figura 4.46, ficando claro, no entanto, a importância do período em que foram executados os ensaios, conforme já havia mostrado Guimarães (2002). Nessa figura se observa que com o aumento da resistência do solo (maiores N-SPT), os valores de torque tendem a se estabilizarem. Esse comportamento certamente está relacionado à rigidez do solo que ao aumentar torna o efeito de arco mais acentuado reduzindo o efeito das tensões verticais nas tensões horizontais e, portanto, no torque.

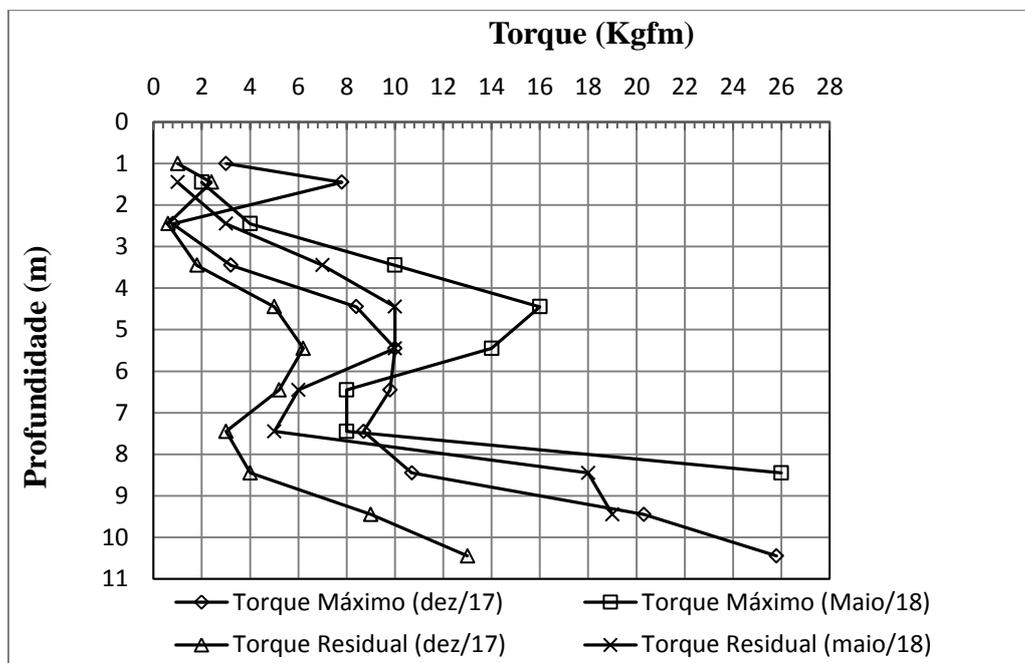


Figura 4.45 – Perfil de torque ao longo da profundidade dos ensaios SPT-T.

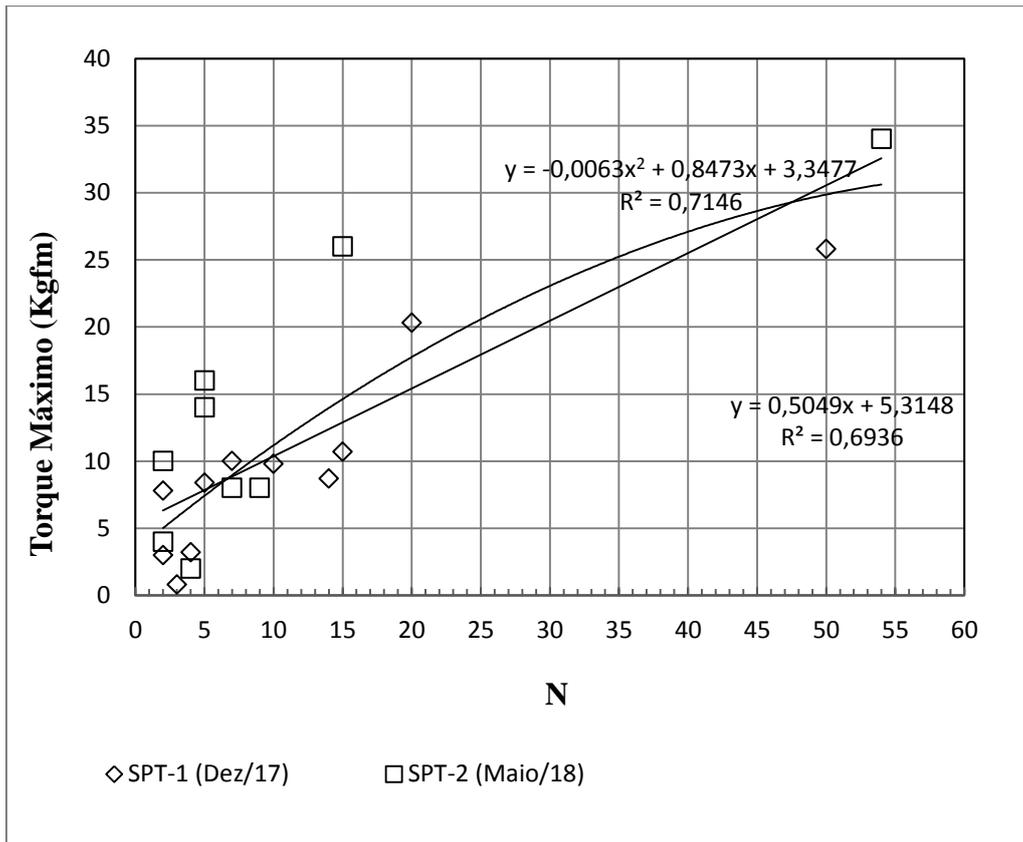


Figura 4.46 – Tendência de crescimento do torque em relação à resistência à penetração.

4.6.2 - AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE UMIDADE

Os valores da umidade ao longo da profundidade em todos os ensaios realizados são mostrados na Figura 4.47. Observa-se que eles foram realizados em diferentes meses do ano e eles apresentam uma tendência de crescimento com a profundidade. Com relação ao teor de umidade mais próximo da superfície é fácil visualizar, observando-se os resultados oriundo do campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, que a umidade ao longo do perfil varia com o período do ano em que foram determinadas, cabendo destacar que essa influência é função da profundidade analisada, pois o fluxo se distribui ao longo do ano.

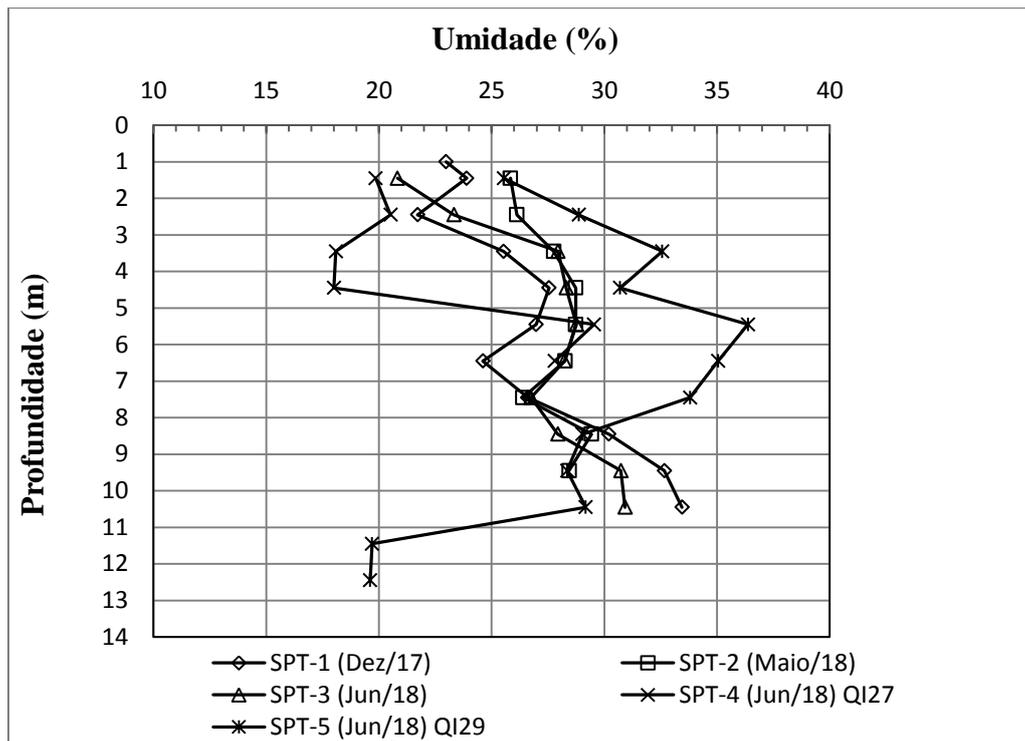


Figura 4.47 – Perfil de umidade em estações do ano diferentes.

As Figuras 4.48 e 4.49 a exemplo do apresentado por Guimarães (2002) mostram respectivamente a variação crescente das medidas de torque máximo e residual com a umidade natural. Este fato pode estar relacionado com a constatação que a umidade determinada foi crescente ao longo da profundidade ao mesmo tempo em que o solo se torna mais denso e as tensões geostáticas aumentam. Estudos realizados por Guimarães (2002) mostraram que a sucção não interfere a interação solo-metal como é o caso do ensaio de torque e sendo assim a influência da umidade torna-se irrelevante em relação às influências das variações de densidade do solo e tensão atuante. Comportamento similar ao do torque em função da umidade foi obtido para o N-SPT, nesse caso também, embora se esperasse uma diminuição do N com o aumento do teor de umidade o comportamento também depende da porosidade do solo e das tensões atuantes em cada profundidade sobressaindo serem esses efeitos preponderantes nos ensaios realizados, Figura 4.50.

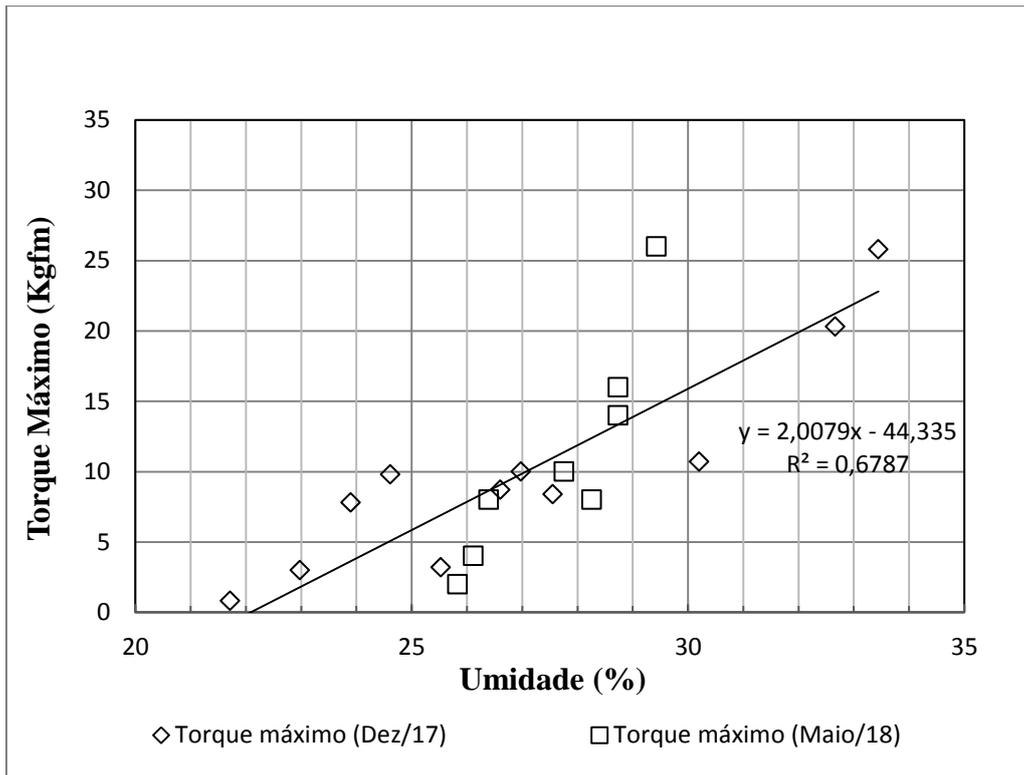


Figura 4.48 – Perfil do torque máximo em relação à umidade natural.

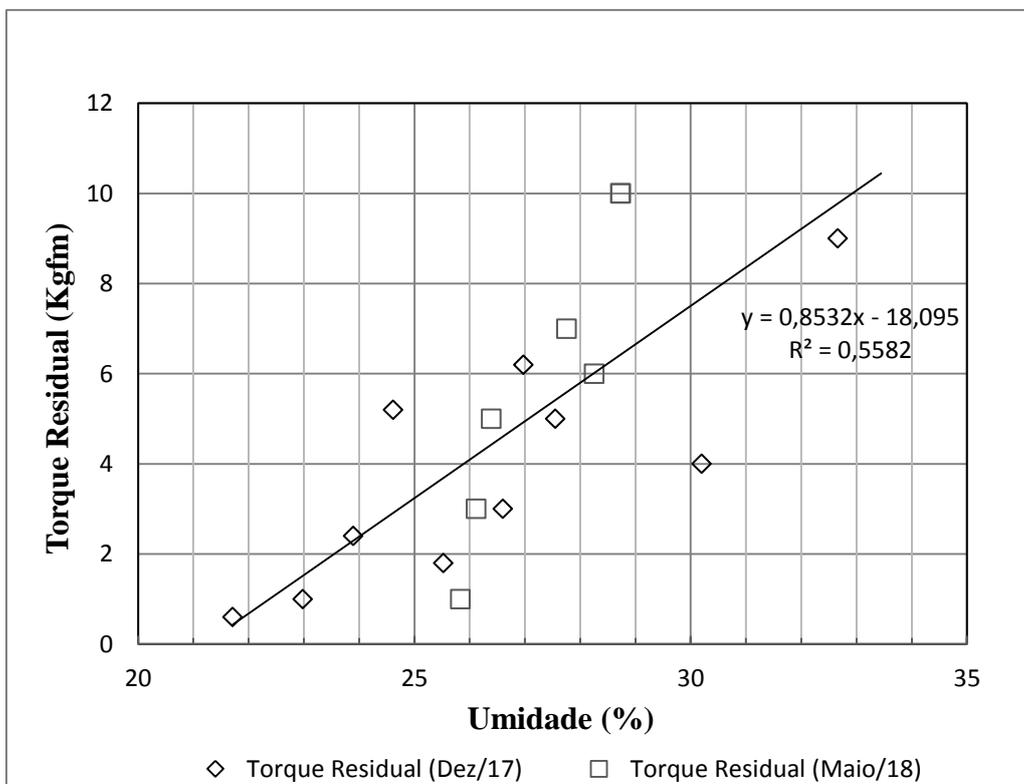


Figura 4.49 – Perfil do torque residual em relação à umidade natural.

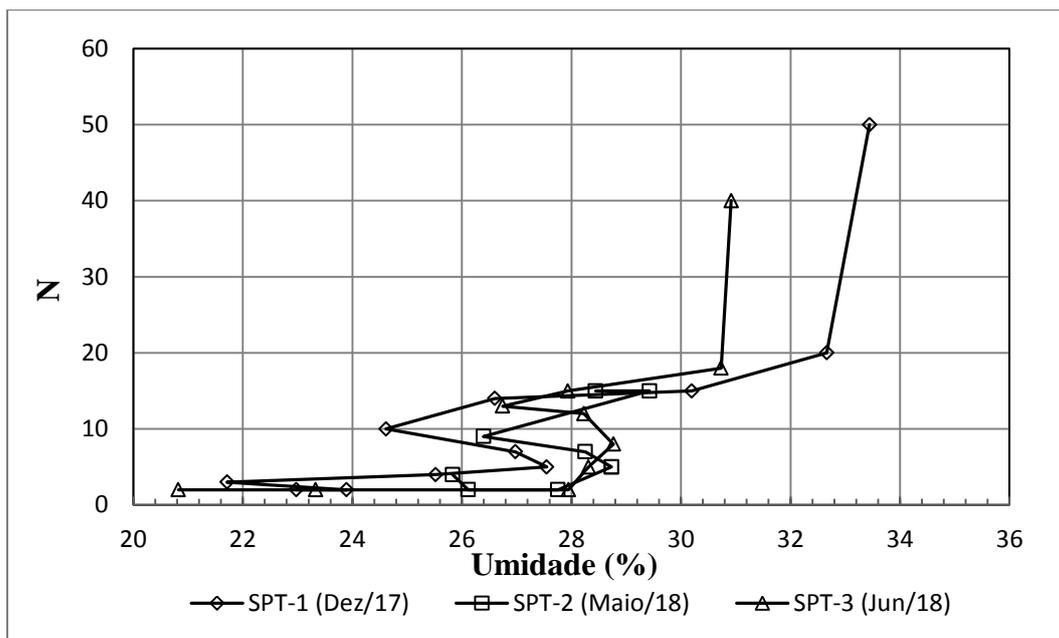


Figura 4.50 – Perfil da Resistência à penetração em relação à umidade natural.

4.6.3 - AVALIAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA

Durante os ensaios de sondagens SPT e SPT-T realizados, foram colhidas as leituras da temperatura ao longo da profundidade. A Figura 4.51 mostra estes perfis de temperatura em meses de estações climáticas diferentes.

No campo experimental da UnB, se observa que o primeiro perfil de temperatura foi realizado em dezembro de 2017 no início do verão com temperatura a 1 metro da superfície em quase 26 °C e variando muito pouco ao longo da profundidade chegando à última profundidade a 27 °C. Deduz-se neste caso que devido a um furo de estaca mantido aberto sem concretagem ao longo de todo o período de cura do concreto da primeira estaca ensaiada até a data de realização da sondagem e situado na proximidade de ambos, estaca ensaiada e sondagem, tenha gerado um equilíbrio da temperatura externa com a temperatura do solo e da estaca ao longo do perfil. Em maio de 2018 a temperatura inicial abaixou para 24,3 °C devido ao início da estação fria e teve uma tendência crescente com a profundidade chegando até 26,6 °C. Em plena estação do inverno, em junho de 2018 a temperatura inicial estava a 20,9 °C e também tendo uma tendência crescente ao longo da profundidade, chegando a 26,2 °C. Observa-se também que nas maiores profundidades a variação de temperatura de uma época para outra é pequena devido a não sofrer muita influência da temperatura do ambiente externo.

No parque Bernardo Sayão, as duas sondagens foram feitas no mesmo dia do mês de junho de 2018, no entanto, em perfis de solo com características diferentes como ficou evidenciado nos perfis de sondagem SPT (Figura 4.47). O da QI 27 apresentou a temperatura superficial de 21 °C bem próximo ao valor obtido na UnB no mês de junho, pois começaram na mesma hora as 08:00 h da manhã. Verificou-se também de modo similar uma tendência de crescimento da temperatura ao longo da profundidade.

No perfil de solo da QI 29 a temperatura superficial foi um pouco maior que o verificado para a QI 27, 21,5 °C, pois começou às 09:45 h, ou seja, um pouco mais tarde. A temperatura do perfil de solo nesta sondagem teve um crescimento constante com a profundidade até atingir 4,45 metros. Nessa profundidade atingiu-se o nível d'água e a temperatura diminuiu de modo significativo decrescendo para 20,2 °C e voltando a elevar-se com o aumento da profundidade chegando aos 12,45 metros de profundidade à temperatura de 28,1 °C.

O conjunto de perfis de temperatura levantados a partir das sondagens (Figura 4.51) mostra que elas variam não só ao longo do perfil como também em função da estação climática, colocando em evidência a importância de se medir a temperatura ao longo das estacas submetidas a provas de carga quando estas estão assentes no manto não saturado uma vez que, conforme mostrado, ela afeta a sucção atuante no solo.

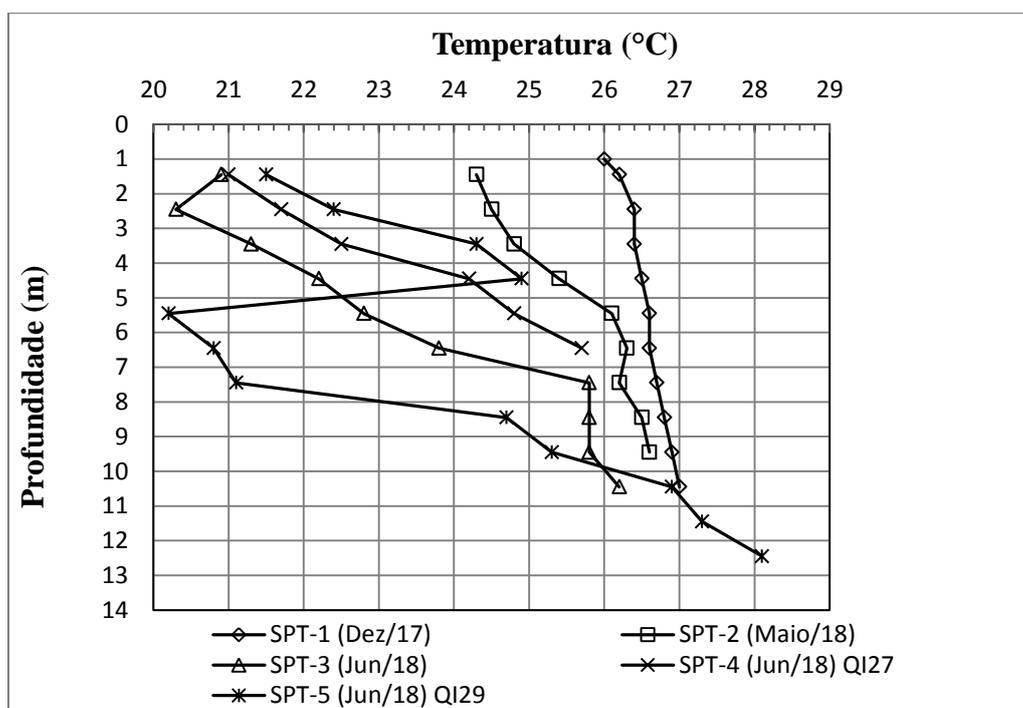


Figura 4.51 – Perfil de temperatura em relação à profundidade.

A Figura 4.52 relaciona a temperatura com a umidade natural mostrando não haver uma relação direta entre elas, pois outros fatores como cobertura do solo, profundidade e porosidade intervêm em ambos.

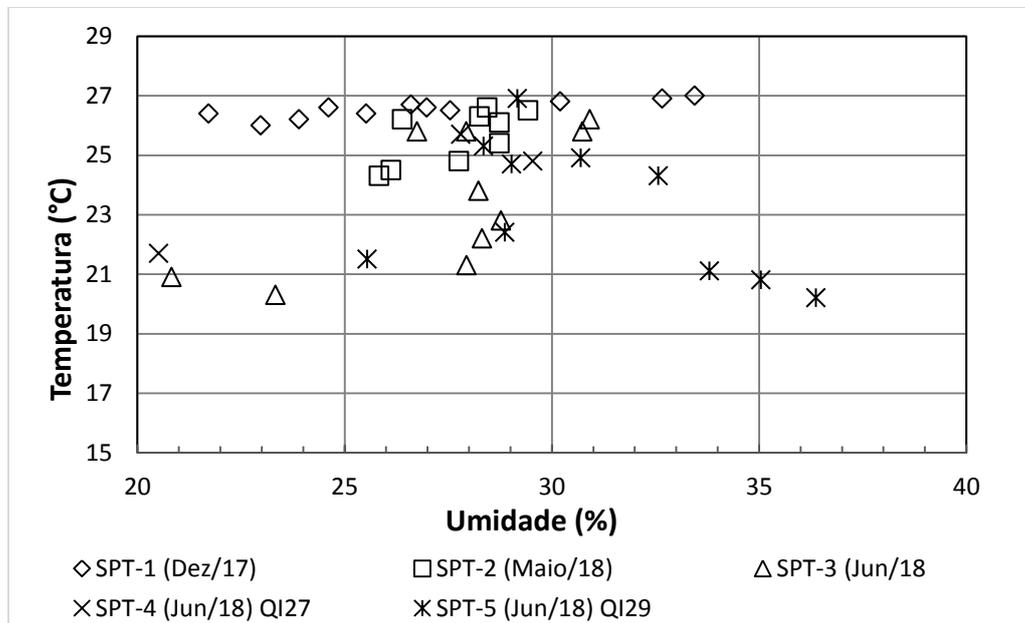


Figura 4.52 – Relação entre a temperatura e a umidade nos perfis de solo estudados.

4.7 – INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE NA SUCCÃO ATUANTE NO SOLO

A Figura 4.53 mostra que a sazonalidade influencia na sucção atuante em um perfil de solo por meio das alterações de umidade e temperatura. Os perfis mostrados nessa figura foram obtidos considerando-se as umidades e temperaturas dos perfis de solo levantadas por meio de amostras oriundas dos ensaios SPT quando da realização das duas provas de cargas sendo as sucções determinadas desconsiderando-se o efeito térmico e considerando-se as curvas características obtidas para as diferentes temperaturas. Na determinação das sucções considerou-se as curvas características obtidas para a profundidade de 2 m como representativas das profundidades 0 a 7m por se tratar do manto profundamente intemperizado e a obtida para a profundidade 9 m como representativa das profundidades 9 m e 10 m correspondentes ao solo pouco intemperizado. Essa figura mostra ser relevante considerar o efeito térmico sobre a sucção.

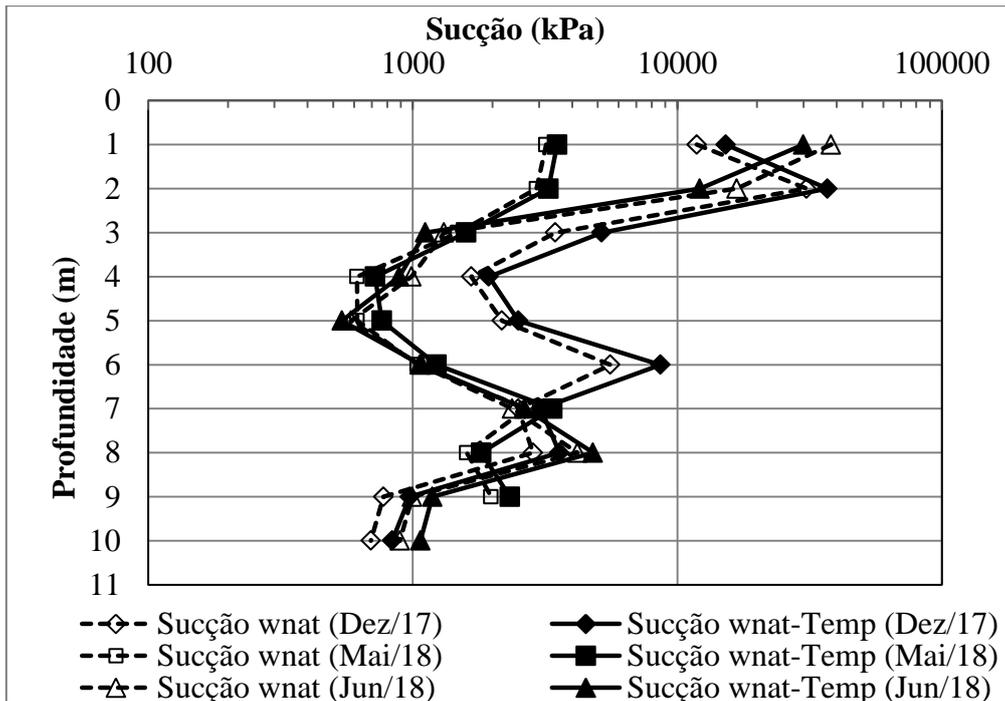


Figura 4.53 – Influência da sazonalidade na sucção atuante no solo.

4.8 – INTERAÇÃO SOLO-CONCRETO E AS SUCCÕES CARACTERÍSTICAS DOS DOIS MATERIAIS

A Figura 4.54 mostra que as sucções características do concreto determinadas considerando-se os resultados de laboratório obtidos nessa tese e mostrados na Figura 4.31, são distintos dos perfis de sucção obtidos para o solo ao longo do tempo. Com isso, para se atingir o equilíbrio entre as sucções dos dois materiais ocorrerão alterações das mesmas ao longo do tempo, pois enquanto a sucção do concreto sofrerá alterações com o tempo de cura o solo sofre a influência das condições climáticas que variam com a sazonalidade. Essas alterações de sucção em busca do equilíbrio vão intervir na interação solo-estrutura só cessando após certo tempo da concretagem.

Nesse caso específico estudado, diante da diferença de sucção entre os dois materiais e para que ocorra o equilíbrio, terá que ser ampliada a sucção no solo e diminuída a sucção no concreto o que implicará em uma alteração mesmo que temporária na interação solo-estrutura e, portanto, na capacidade de carga da estaca. Essa alteração se dará em curto e médio prazo tendo em vista que a sucção entre o concreto e o maciço de solo terminará entrando em equilíbrio com o restante do maciço fazendo cessar a influência inicial da diferença de sucção entre os dois materiais. Cabe destacar que embora a médio ou longo

prazo o perfil de sucção varie apenas com a sazonalidade, a curto prazo ele dependerá nas proximidades da estaca sobretudo da evolução da sucção no concreto com o tempo.

Essas constatações são de grande relevância, pois mostra a necessidade de se levar em consideração o tempo de cura do concreto quando se analisa os resultados obtidos nas provas de carga.

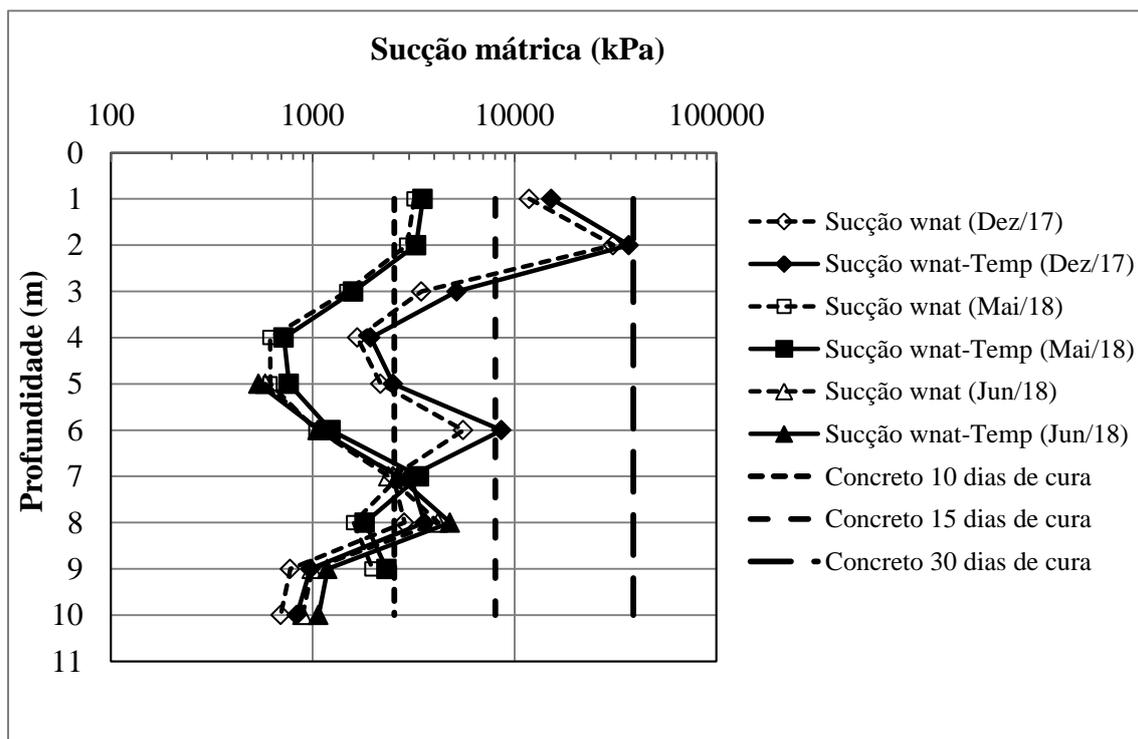


Figura 4.54 – Influência da sazonalidade na sucção atuante no solo e no concreto.

Portanto, o tempo de cura do concreto até a realização da prova de carga impactará na interação solo-estrutura e conseqüentemente na capacidade de carga da estaca, tendo em vista que no intervalo de tempo entre a concretagem e a realização da prova de carga, o maciço ainda não entrou em equilíbrio com o concreto da estaca.

4.9 - RESULTADOS DAS PROVAS DE CARGA

Foram feitas duas provas de carga estática de carregamento lento conforme descrito no Capítulo 4 de Materiais e Métodos, de acordo os critérios da NBR 12131 (ABNT, 2006). As cargas foram aplicadas através de um macaco hidráulico e os deslocamentos da estaca ensaiada foram medidos em 4 relógios digitais micro comparadores instalados no topo do

bloco de coroamento. O sistema de reação foi executado por empresa especializada, sendo garantido o perfeito funcionamento e segurança operacional durante o ensaio.

4.9.1 - PROVA DE CARGA 1

Conforme apresentado na Figura 3.23 (b) no capítulo Materiais e Métodos, a estaca foi instrumentada em 3 níveis de profundidade, 1 m, 4 m e 7 m com os sistemas de monitoramento ótico e elétrico. O sistema ótico foi composto de 5 tubos transdutores, sendo que 3 tubos estavam ligados em série, instalados um em cada profundidade. Os outros 2 tubos eram independentes em fibras separadas, sendo um instalado a 1 m e outro a 7 m de profundidade. Cada tubo foi preparado com dois sensores óticos sendo um de deformação e o outro de temperatura, com as seguintes nomenclaturas:

- Sistema 1 com os sensores ligados em série: 1S1 (sensor de deformação instalado a 1m); 1T1 (sensor de temperatura instalado a 1m); 1S4 (sensor de deformação instalado a 4m); 1T4 (sensor de temperatura instalado a 4m); 1S7 (sensor de deformação instalado a 7m); 1T7 (sensor de temperatura instalado a 7m);

- Sistema 2 com os sensores ligados de modo independente: 2S7 (sensor de deformação instalado a 7m); 2T7 (sensor de temperatura instalado a 7m);

- Sistema 3 com os sensores ligados de modo independente: 3S1 (sensor de deformação instalado a 1m); 3T1 (sensor de temperatura instalado a 1m).

Os sistemas *Strain Gage* foram instalados de modo independente nas respectivas profundidades estudadas em paralelo com os sistemas óticos.

A prova de carga 1 teve início às 15:00 h do dia 29/11/2017 e foi concluída às 02:50 h do dia 30/11/2017. Durante todos os estágios de carga do ensaio, foram realizadas as leituras dos deslocamentos no topo da estaca, dos sistemas ótico e elétrico, e da temperatura ambiente, esta para comparação e análise com as leituras realizadas nas sondagens e com os sensores óticos de temperatura. A leitura do deslocamento de cada estágio foi considerada como a média dos deslocamentos dos quatro deflômetros instalados no topo da estaca.

Com os resultados obtidos ao longo da prova de carga foi possível traçar a curva carga x recalque mostrada na Figura 4.55, da qual consta a carga de ruptura da estaca pelo critério da NBR 6122 (2010).

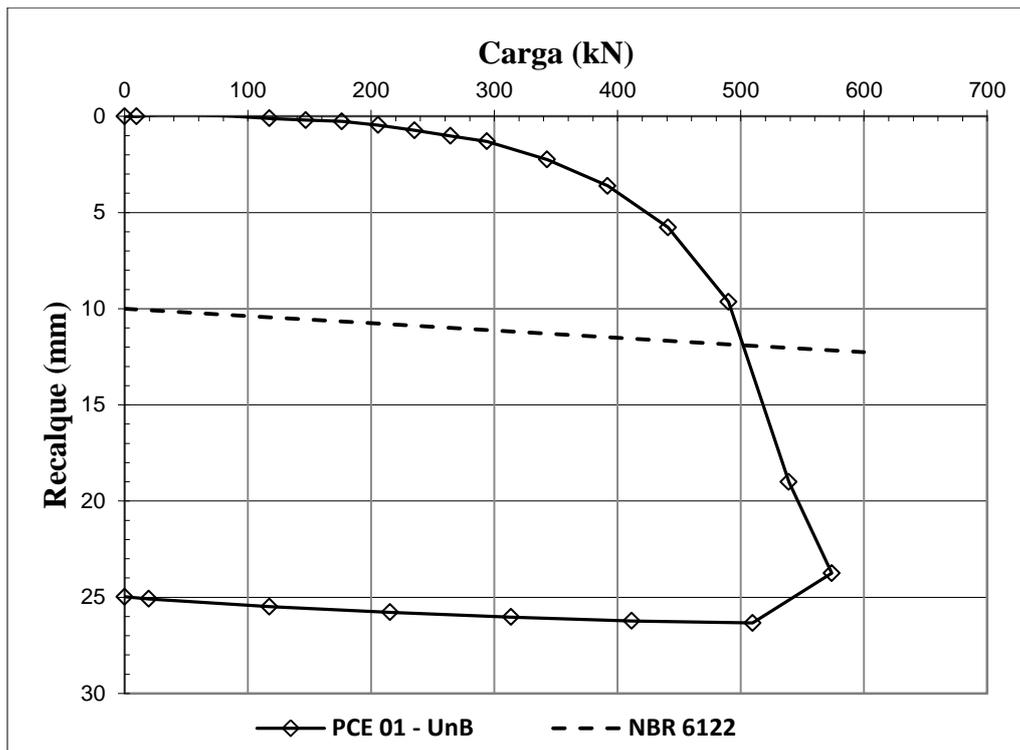


Figura 4.55 – Curva carga recalque da prova de carga da estaca 1.

O critério de recalque de ruptura apontado pela NBR 6122 (2010) é o ponto de intersecção da reta $((P.L)/(E.A)+D/30)$ com a curva carga x recalque, como mostrado no gráfico da Figura 4.55, correspondendo na prova de carga analisada ao valor 500,78 kN, onde, P é a carga de ruptura convencional, L é o comprimento da estaca em cm, A é a área da seção transversal da estaca em cm^2 , E é o módulo de elasticidade da estaca e D é o diâmetro da estaca em cm.

Os resultados das leituras dos sistemas ótico e elétrico são exibidos a seguir. Para o sistema ótico, dois conjuntos de sensores foram perdidos durante a execução da estaca, os sensores do sistema em série instalados a 4 e 7 m de profundidade. Este sensor instalado a 1 m de profundidade também deve ter sofrido algum dano, pois ele funcionou até o 8º estágio de carga em 235,2 kN.

Já os sensores independentes de deformação e temperatura instalados a 1 m e a 7 m de profundidade tiveram funcionamento normal.

Utilizando o critério de eliminar os primeiros e os últimos pontos da curva, evitando assim a instabilidade ou acomodação do sistema, e utilizando os trechos mais lineares para

calcular o módulo de elasticidade da estaca, o sistema *strain gage* apresentou um módulo de elasticidade de 45.6 GPa, e o sistema ótico 43,4 GPa, Figura 4.56.

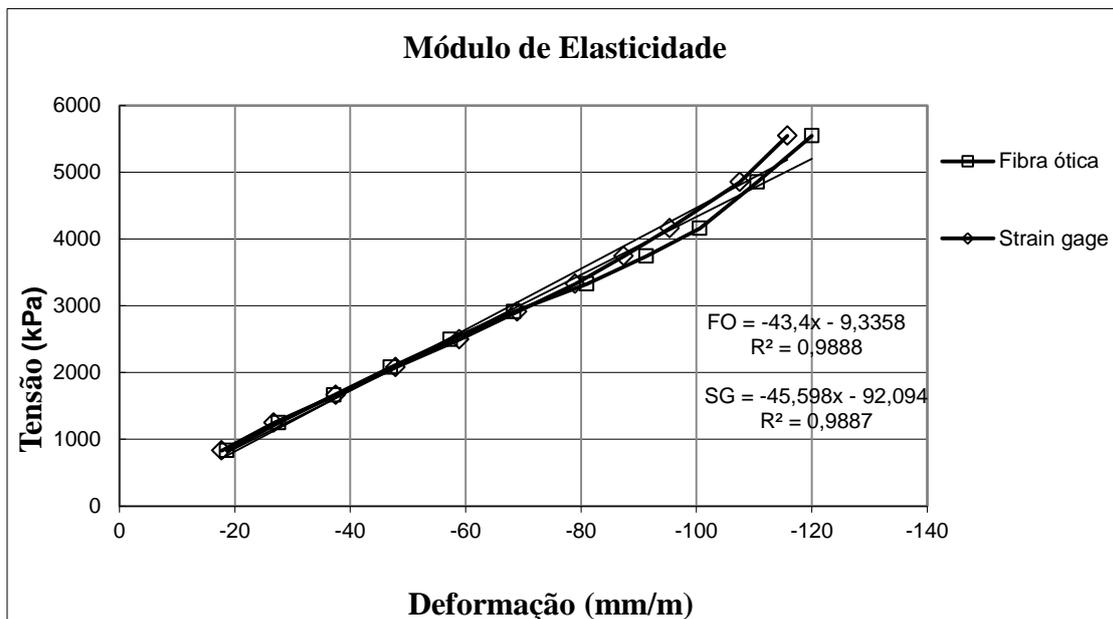


Figura 4.56 – Cálculo do módulo de elasticidade da estaca 1 pelos sistemas elétrico e ótico.

Assumindo a hipótese que os módulos de elasticidade calculados com os valores de deformações medidos pelos sensores de referência instalados a 1m do topo da estaca nos dois sistemas é válido ao longo de toda a estaca, foram calculados os valores de força em cada nível de profundidade instrumentado a partir das deformações medidas, para cada estágio de força aplicada no topo da estaca. O resultado da transferência de carga referente aos sistemas *strain gage* e ótico são mostrados na Figura 4.57 e Figura 4.58 respectivamente. Observa-se pelos gráficos obtidos para os dois sistemas que uma pequena parcela de carga já foi dissipada entre o topo da estaca, bloco de coroamento, e a profundidade de 1 m onde estão instalados os sensores de referência. Outra informação interessante que pode ser vista nos dois gráficos é que grande parte da carga foi mobilizada ao longo da estaca pela ação do atrito lateral, ou seja, a carga diminui constantemente com o aumento da profundidade nos dois sistemas. No entanto, considerando-se que a estaca tinha ao todo 8,60 m, conclui-se que boa parcela da carga na ruptura, aproximadamente 298,58 kN, estava sendo suportada pela ponta.

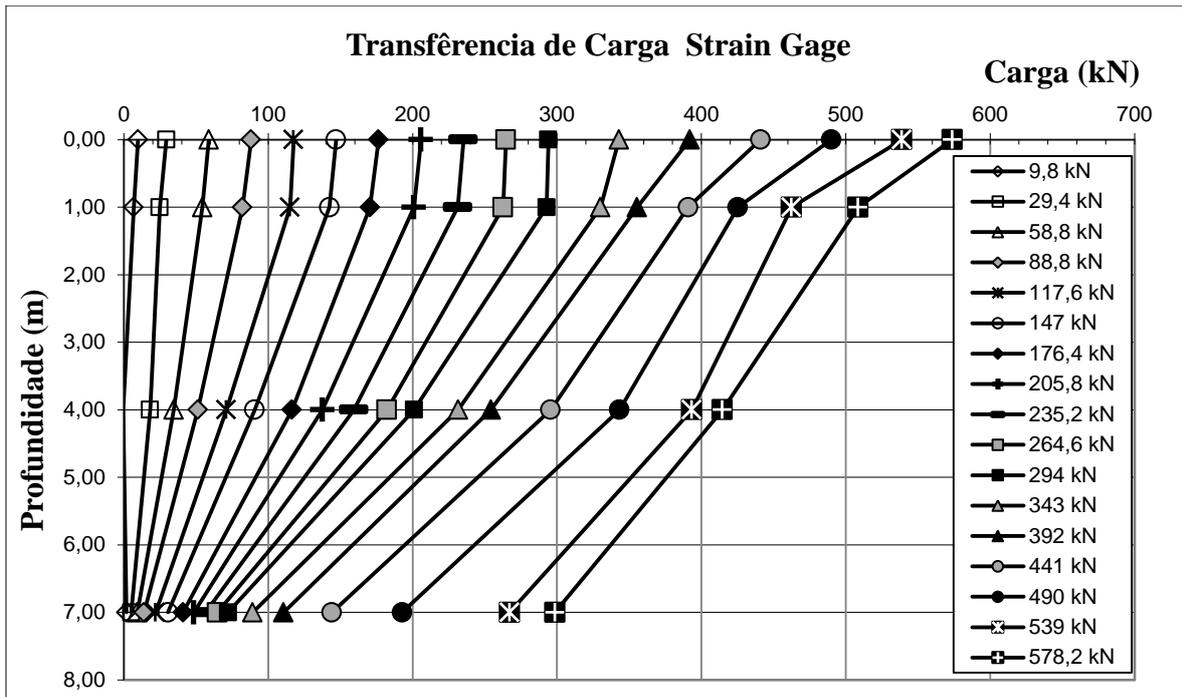


Figura 4.57 – Transferência de carga medido pelo strain gage da prova de carga da estaca 1.

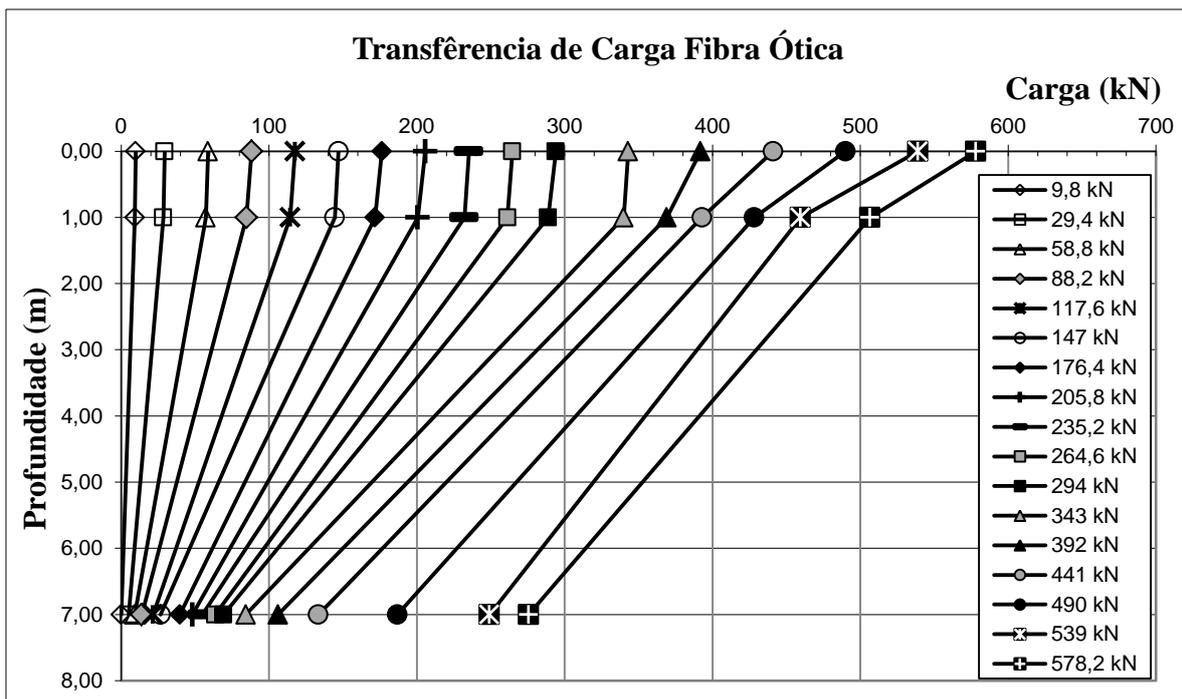


Figura 4.58 – Transferência de carga medido pela fibra ótica da prova de carga da estaca 1.

A Figura 4.59 apresenta a comparação entre as cargas medidas pelos dois sistemas nas profundidades de 1 m e 7 m, profundidades em que ambos os sistemas funcionaram. Para efeito de comparação inseriu-se nessa figura os resultados obtidos para o sensor ótico instalado em paralelo na profundidade de 1 m e que funcionou apenas até a carga de 264,6

kN. A comparação dos resultados mostra que as duas técnicas de monitoramento forneceram resultados similares, validando assim a funcionalidade da fibra ótica para controle de tensões durante as provas de carga.

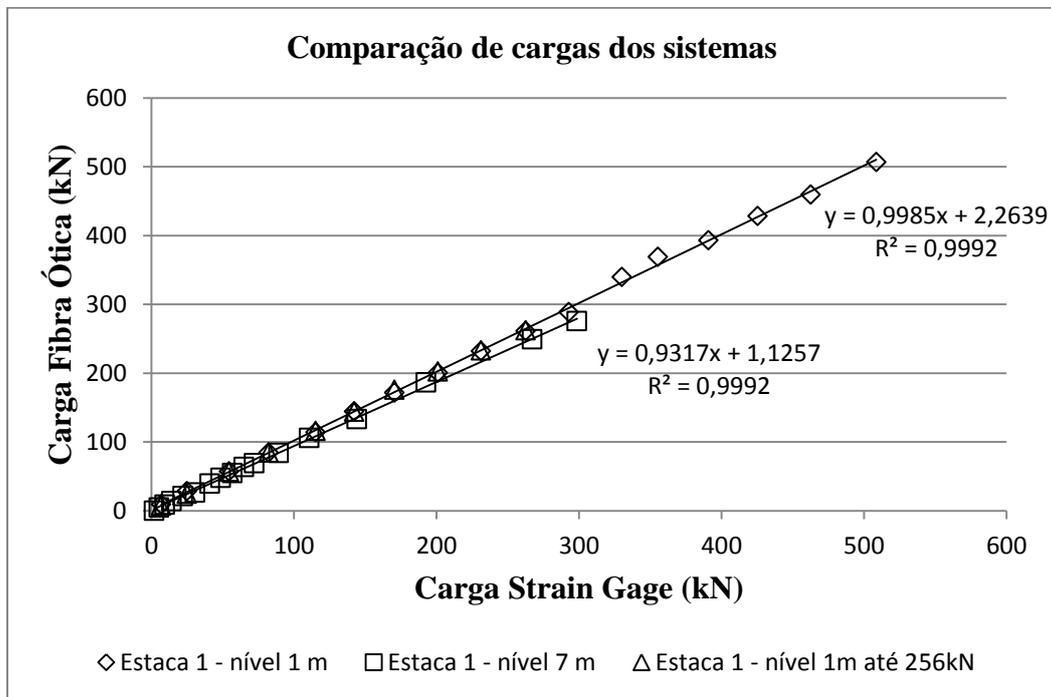


Figura 4.59 – Comparação de cargas medidas pelos dois sistemas.

Os resultados das leituras de temperatura ao longo da prova de carga também só foram obtidas na profundidade de 1 m e 7 m pelos motivos já expostos, Figura 4.60. Na profundidade de 1 m a primeira leitura da temperatura foi 25,36 °C para o sensor 3 e de 25,56 °C para o sensor 1, se situaram bem próximos da leitura da temperatura na sondagem SPT-1, 26 °C (Figura 4.54), realizada dois dias após o término da prova de carga, em 02 de dezembro de 2017. A Figura 4.60 apresenta valores próximos para os dois sensores ao longo da prova de carga. Outro ponto a destacar é que a temperatura ambiente estava a 25,9 °C no início do ensaio corroborando para a fidelidade das leituras óticas, no entanto, ao longo do ensaio, enquanto a temperatura externa tendeu a diminuir a temperatura interna tendeu a sofrer um ligeiro acréscimo, o que leva a supor que mesmo localizado a 1 m de profundidade faz-se necessário certo tempo para que a temperatura externa exerça influência na interna ao perfil de solo. Outro aspecto relevante é que todo o sistema de iluminação e presença humana no local pode ter contribuído para a preservação da temperatura do sol no local.

Na profundidade de 7m a temperatura ótica mediu 26,82 °C e a sondagem na profundidade de 7 a 7,45 m apresentou uma temperatura de 26,7 °C, resultados muito

próximos um do outro. Cabe lembrar que as temperaturas dessa sondagem deram resultados muito constantes ao longo da profundidade, com pouquíssima variação, devido provavelmente à presença de um furo de 30 cm de diâmetro e 10,5 m de profundidade muito próximo da estaca ensaiada (distante 2 m) e do furo de sondagem (distante 1,5m) que ficou aberto desde antes da concretagem da estaca até data posterior a execução da sondagem. A Tabela 4.9 e a Figura 4.61 mostram o comparativo das temperaturas do sistema ótico com as medidas realizadas com o termômetro digital a laser nas amostras oriundas da sondagem SPT-1.

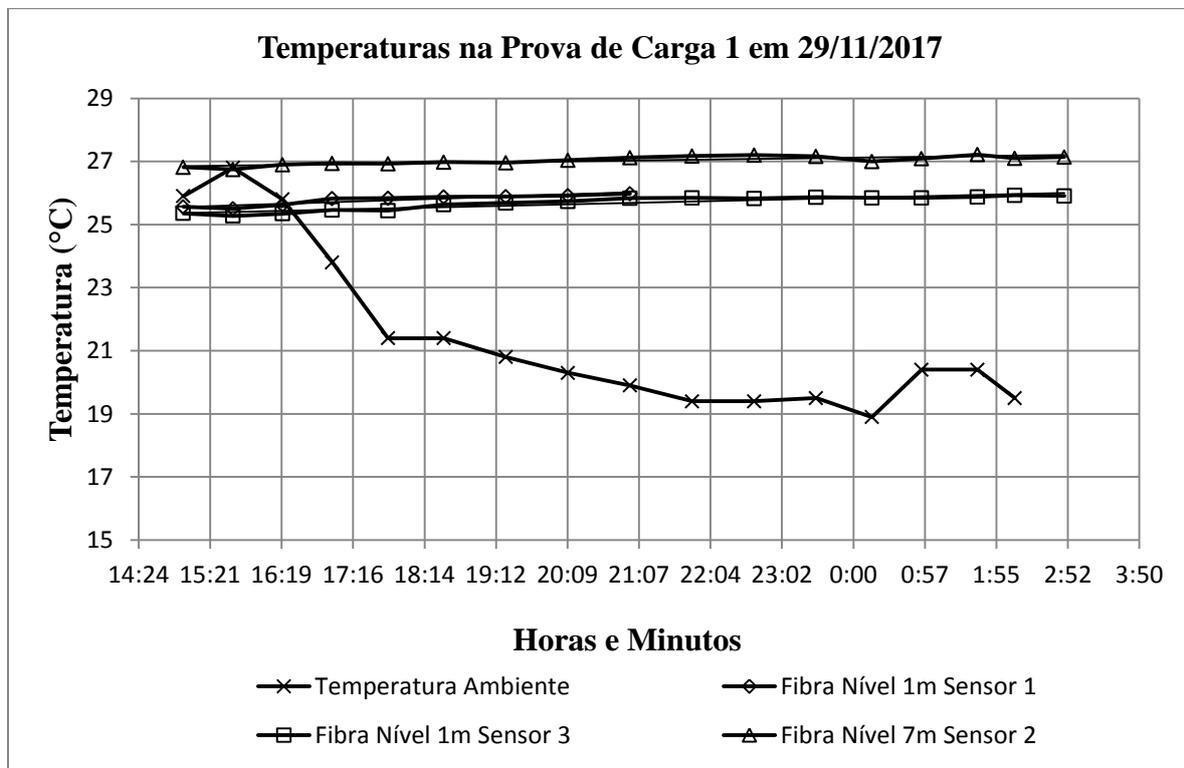


Figura 4.60 – Medidas de temperaturas durante a prova de carga da estaca 1.

Tabela 4.9 – Comparativo das temperaturas da Fibra Ótica na estaca 1 com as da sondagem.

| | Nível 1 m | Nível 4 m | Nível 7 m | Varição 1 a 4 m | Varição 4 a 7 m | Varição 1 a 7 m |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura SPT-1 (°C) | 26,1 | 26,5 | 26,7 | 0,4 | 0,2 | 0,6 |
| Temperatura Fibra (°C) | 25,6 | - | 26,8 | - | - | 1,2 |

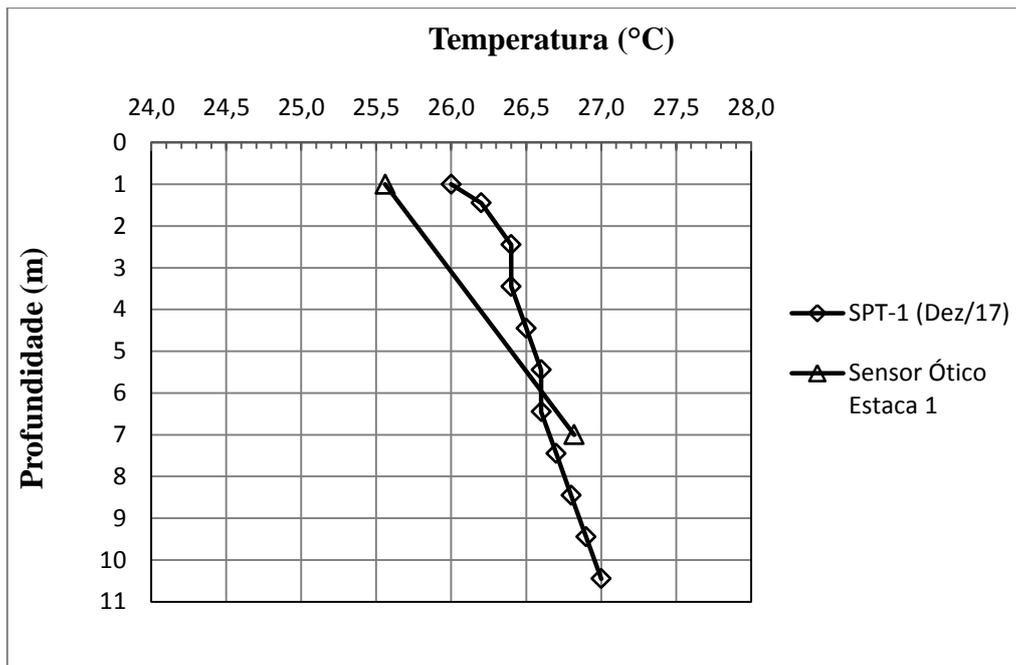


Figura 4.61 – Medidas de temperaturas do Sensor ótico e a sondagem SPT na da estaca 1.

4.9.2 - PROVA DE CARGA 2

A segunda estaca foi instrumentada nos mesmos níveis de profundidade da anterior, 1 m, 4 m e 7 m com os dois sistemas de monitoramento. O sistema ótico possuía 3 tubos transdutores ligados em série com sensores de deformação e temperatura e em paralelo outra configuração com 3 barras de aço ligadas em série sendo nesse caso as fibra sensoras coladas diretamente nas barras para medida de deformação. A nomenclatura dos sistemas ficou assim definida:

Sistema 1- tubos com os sensores ligados em série: 1S1 (sensor de deformação instalado a 1m); 1T1 (sensor de temperatura instalado a 1m); 1S4 (sensor de deformação instalado a 4m); 1T4 (sensor de temperatura instalado a 4m); 1S7 (sensor de deformação instalado a 7m); 1T7 (sensor de temperatura instalado a 7m);

Sistema 2 - barras com os sensores ligados em série: 2S1 (sensor de deformação instalado a 1m); 2S4 (sensor de deformação instalado a 4m); 2S7 (sensor de deformação instalado a 7m);

No sistema *strain gage*, da mesma forma que na estaca anterior, foi instalado um sensor em cada nível de profundidade em paralelo com cada sistema ótico.

Essa prova de carga foi realizada em 26/04/2018 com início às 11:40 h e concluída às 19:04 h do mesmo dia. Definiu-se que seriam aplicados os mesmos estágios de carga do ensaio sobre a estaca 1 para efeito de comparação dos resultados.

As leituras dos deslocamentos, dos sistemas e da temperatura ambiente foram feitas em todos os estágios do ensaio, para análise e comparação dos resultados. Os dados das leituras dos deslocamentos foram tratados da mesma forma que no ensaio realizado sobre a estaca 1.

A Figura 4.62 mostra a curva carga recalque obtida, da qual se fez constar a carga de ruptura da estaca pelo critério da NBR 6122 (2010), que é o ponto de intersecção da reta $((P.L)/(E.A)+D/30)$ com a curva carga deslocamento conforme já definido.

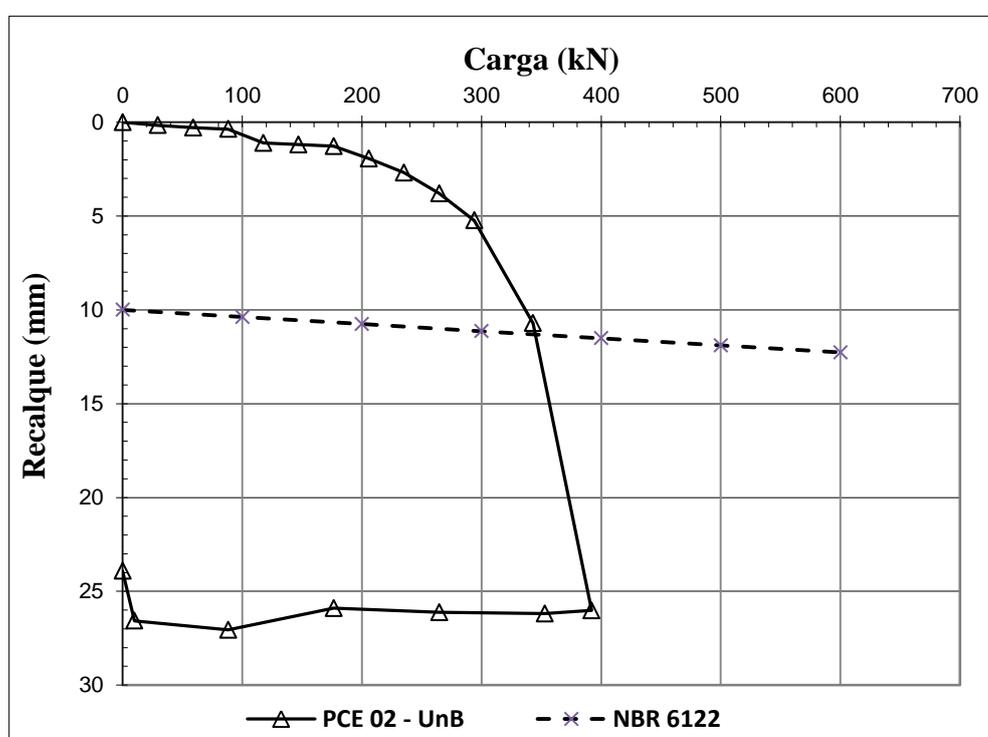


Figura 4.62 – Curva carga recalque da prova de carga da estaca 2.

A ruptura ocorreu quando se tentava alcançar a carga de 441 kN, sendo então admitida como carga máxima o valor de 392 kN.

A seguir serão apresentados os resultados das leituras dos sistemas ótico e elétrico para a prova de carga realizada.

O sistema *strain gages* mostrou um comportamento atípico para o sensor de referência instalado a 1 m de profundidade, indicando que a partir do terceiro estágio de carga, 88,3 kN, sua deformação começou a não acompanhar mais o carregamento, indicando que houve um problema de funcionamento. Seu módulo de elasticidade foi calculado apenas com os 3 primeiros estágios de carga devido ser esse o trecho mais linear, dando o valor de 29,9 GPa, Figura 4.63.

A execução da estaca trouxe novamente problemas com os sensores óticos, conduzindo ao desenvolvimento de novas alternativas e mudanças nas montagens do sistema ótico na fase de concretagem da estaca. Nesse ensaio dois sensores de deformação nos tubos de 4 e 7m, e os três sensores de deformação das barras foram perdidos. Todos os sensores de temperatura instalados nos tubos nas profundidades de 1, 4 e 7 m, mais o sensor de deformação a 1m funcionaram perfeitamente. O funcionamento do sensor de deformação localizado a 1 m de profundidade e de todos os sensores de temperatura instalados nos tubos indicam que o problema não está na instalação em série, mas sim na manipulação do sistema durante as fases de instalação e concretagem das estacas.

Para os resultados dos sensores óticos, adotando-se o critério de se eliminar os primeiros e os últimos pontos da curva para utilizar o trecho linear, o módulo de elasticidade da estaca apresentou um resultado de 27,8 GPa, valor este próximo ao oriundo do sistema *strain gage*, Figura 4.63.

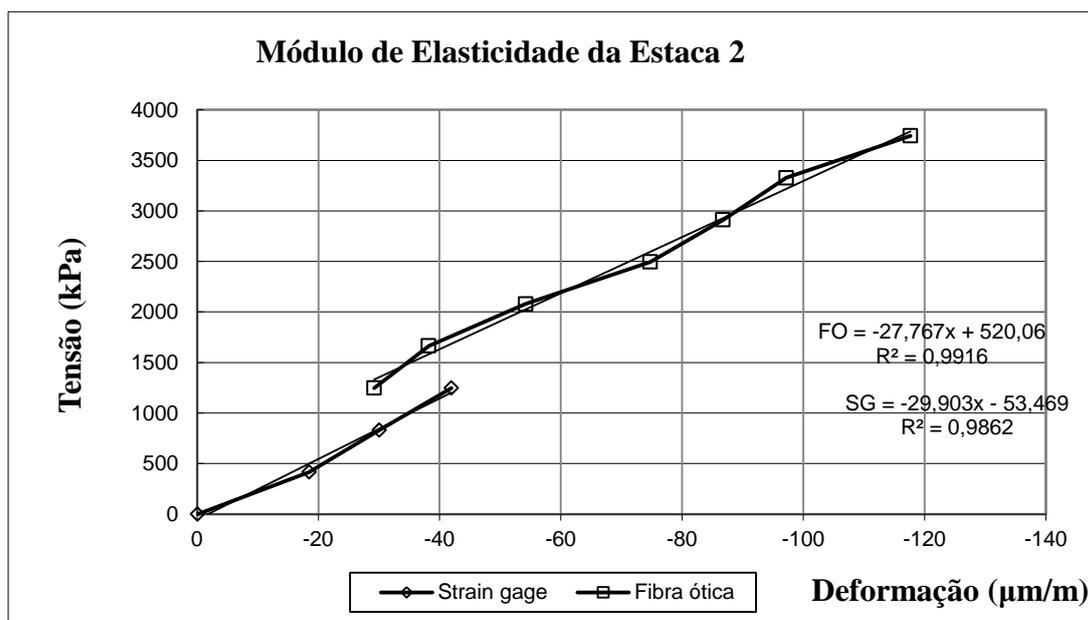


Figura 4.63 – Cálculo do módulo de elasticidade da estaca 2.

Da mesma forma, adotando que os módulos de elasticidade são válidos ao longo de toda a estaca, também foram calculados os valores de força em cada nível de profundidade. O resultado da transferência de carga referentes aos sistemas strain gage e ótico são mostrados na Figura 4.64 e Figura 4.65 respectivamente. Ao se comparar os resultados oriundos dessas figuras conclui-se que o sistema strain gage instalado a 1 m de profundidade só funcionou bem até o terceiro estágio de carga (Figura 4.64). Substituindo-se os resultados de strain gage obtido para a profundidade 1 m pelos oriundos dos sensores óticos, Figura 4.66, infere-se que estes funcionaram bem nessa profundidade. Cabe aqui destacar que os valores de carga pequenos medidos pelo sistema strain gage são compatíveis com a ponta da estaca que teve um preenchimento de aproximadamente 2,0 m com solo solto, o que implica na quase ausência de ponta.

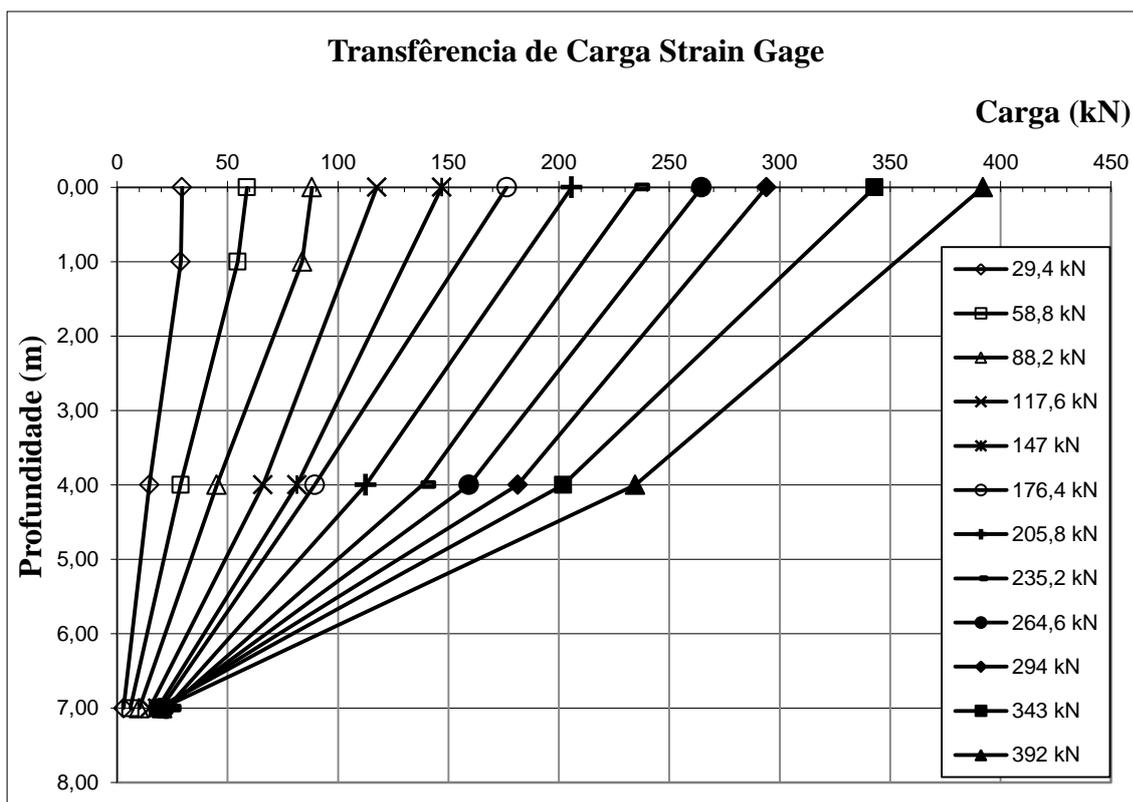


Figura 4.64 – Transferência de carga medido pelo strain gage da prova de carga da estaca 2.

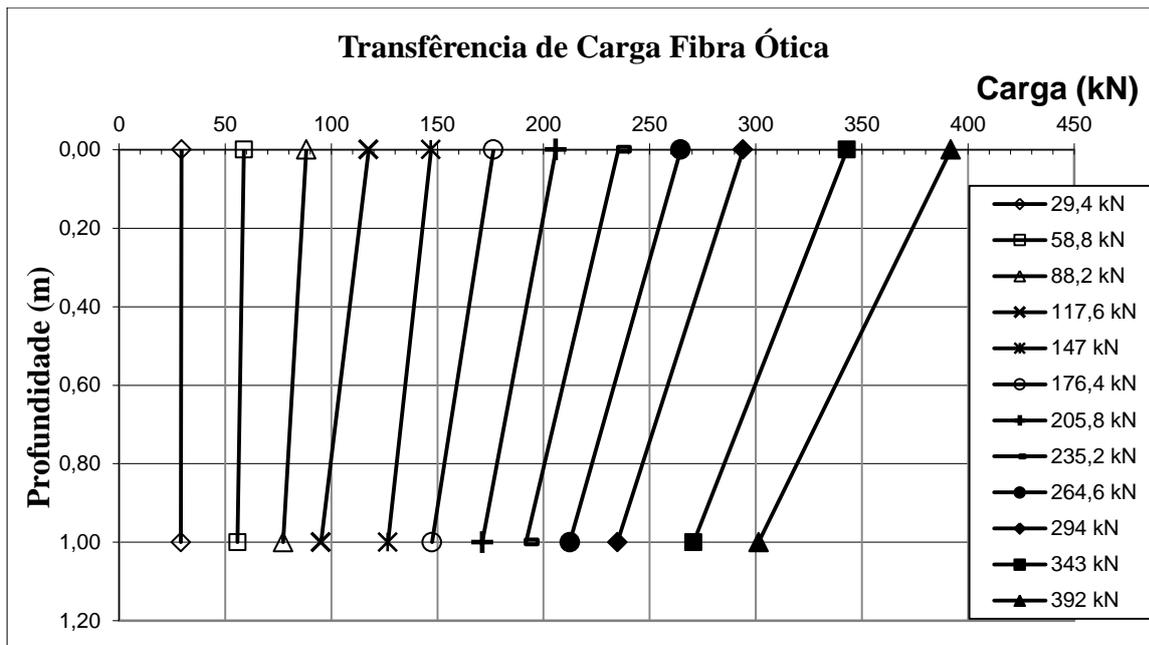


Figura 4.65 – Transferência de carga medido pela fibra ótica da prova de carga da estaca 2.

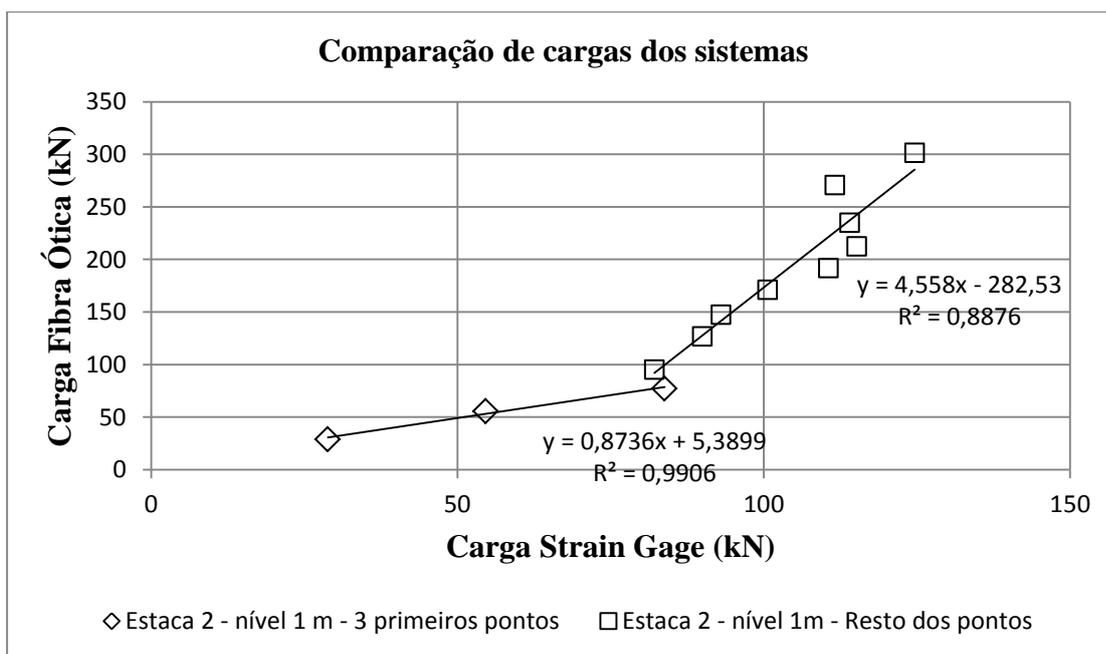


Figura 4.66 – Comparação de cargas medidas pelos dois sistemas.

Quanto ao controle térmico foram medidas as temperaturas nos três níveis de profundidade em todos os estágios de carga, Figura 4.67. A temperatura a 1 m de profundidade foi de 24,6 °C, bem próximo da leitura da temperatura na sondagem SPT-2 realizada em 02 de maio de 2018 que foi de 24,3 °C na profundidade de 1,45m conforme

pode ser verificado na Figura 4.54. A temperatura ambiente no início do ensaio estava a 24,1 °C indicando coerência com as leituras óticas, Figura 4.67.

Em 4 m de profundidade a temperatura ótica deu 25,6 °C e na profundidade de 7m ela mediu 25,9 °C. Nota-se que a temperatura reduziu significativamente seu incremento em profundidades mais elevadas, ou seja, de 1 para 4 m a temperatura aumentou em 1 °C, e de 4 para 7 m incrementou apenas 0,32 °C. O solo oriundo da sondagem SPT apresentou na profundidade de 4 a 4,45m a temperatura de 25,4°C e 26,2 °C entre 7 e 7,45 m, ou seja os resultados oriundo dos sensores óticos forma próximos dos obtidos para o solo oriundo da sondagem SPT. A Tabela 4.10 e a Figura 4.68 apresentam o comparativo das temperaturas do sistema ótico com a sondagem.

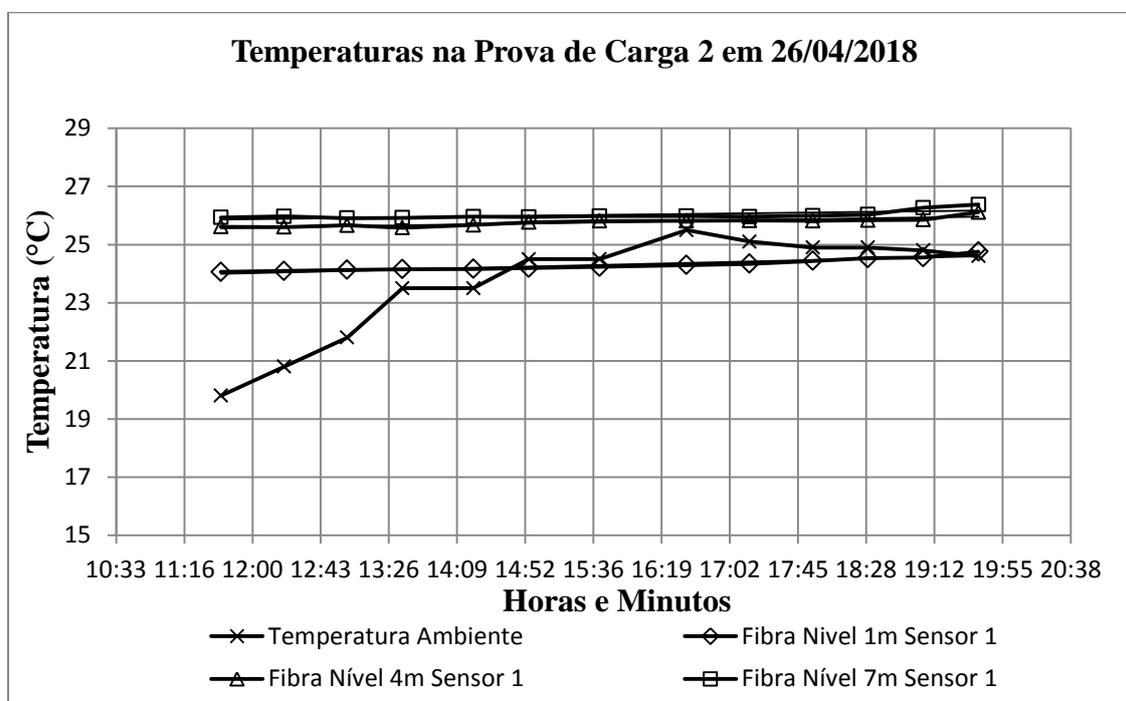


Figura 4.67 – Medidas de temperaturas durante a prova de carga da estaca 2.

Tabela 4.10 – Comparativo das temperaturas da Fibra Ótica na estaca 2 com as da sondagem.

| | Nível 1 m | Nível 4 m | Nível 7 m | Variação 1 a 4 m | Variação 4 a 7 m | Variação 1 a 7 m |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| Temperatura SPT-2 (°C) | 24,3 | 25,4 | 26,2 | 1,1 | 0,8 | 1,9 |
| Temperatura Fibra (°C) | 24,6 | 25,6 | 25,9 | 1,0 | 0,3 | 1,3 |

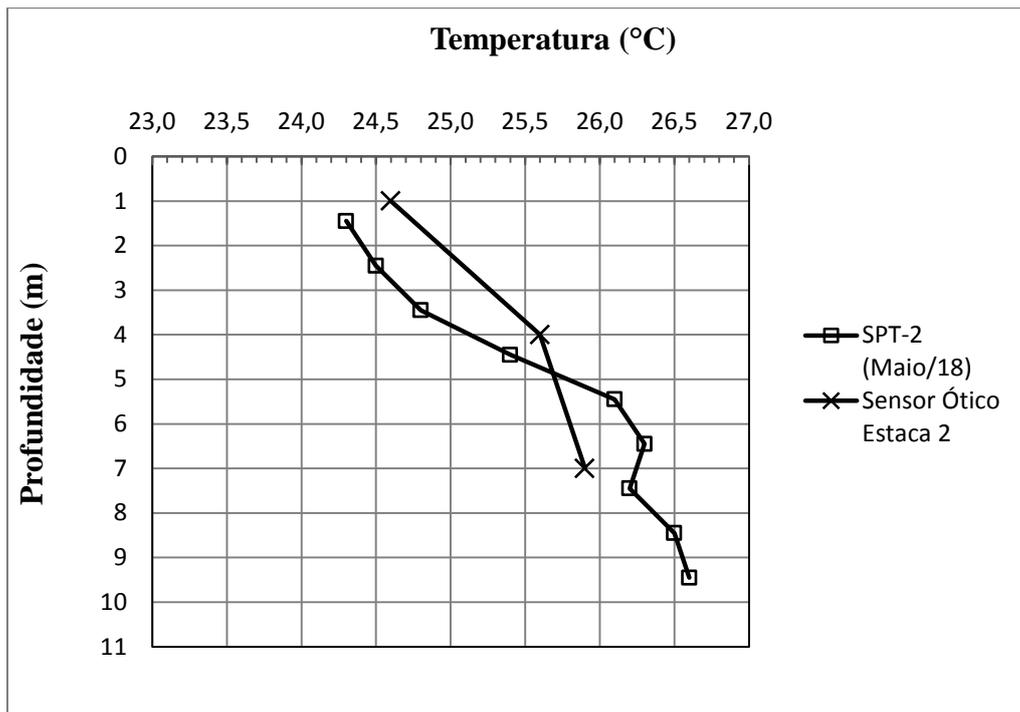


Figura 4.68 – Medidas de temperaturas do Sensor ótico e a sondagem SPT na da estaca 2.

4.10 - AVALIAÇÃO DAS PROVAS DE CARGA FRENTE AOS DEMAIS RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 4.69 apresenta para efeito de comparação as curvas carga x recalque das duas estacas ensaiadas.

É importante fazer-se aqui um paralelo entre os resultados das provas de carga e aqueles oriundos de outras determinações. Verifica-se na figura 4.69 um melhor desempenho da estaca 1 em relação à estaca 2 e com base nessa constatação verifica-se coerência desses resultados com outros resultados obtidos por ocasião das provas de carga conforme segue:

- Os resultados comparativos das provas de carga são coerentes com os resultados de SPT, pois estes também são maiores quando da prova de carga sobre a estaca 1 que quando da prova de carga sobre a estaca 2;

- Os resultados comparativos das provas de carga são coerentes com os resultados de teor de umidade, pois quando da realização da prova de carga 1 as umidades ao longo do perfil são de um modo geral inferiores as obtidas para quando foi realizada a prova de carga 2 e como é sabido, menor a umidade maior a sucção e geralmente melhor o comportamento do solo;

- Os resultados comparativos das provas de carga são coerentes com os resultados de temperatura, pois quando da realização da prova de carga 1 o perfil de temperatura apresentava valores superiores aos registrados quando se efetuou a prova de carga 2 e a análise do efeito da temperatura na sucção mostrou que quanto maior a temperatura maior a sucção atuante no solo.

Cabe destacar que só não se verificou coerência com os ensaios de torque, mas estes também não se mostraram coerentes com a umidade no sentido esperado de maior umidade menor torque.

Ou seja, o conjunto de resultados mostra-se coerentes e realça a importância de estudos complementares sobre a importância da temperatura sobre o comportamento mecânico dos solos em relação a relevância da contribuição no que tange ao monitoramento da temperatura quando da realização de provas de carga.

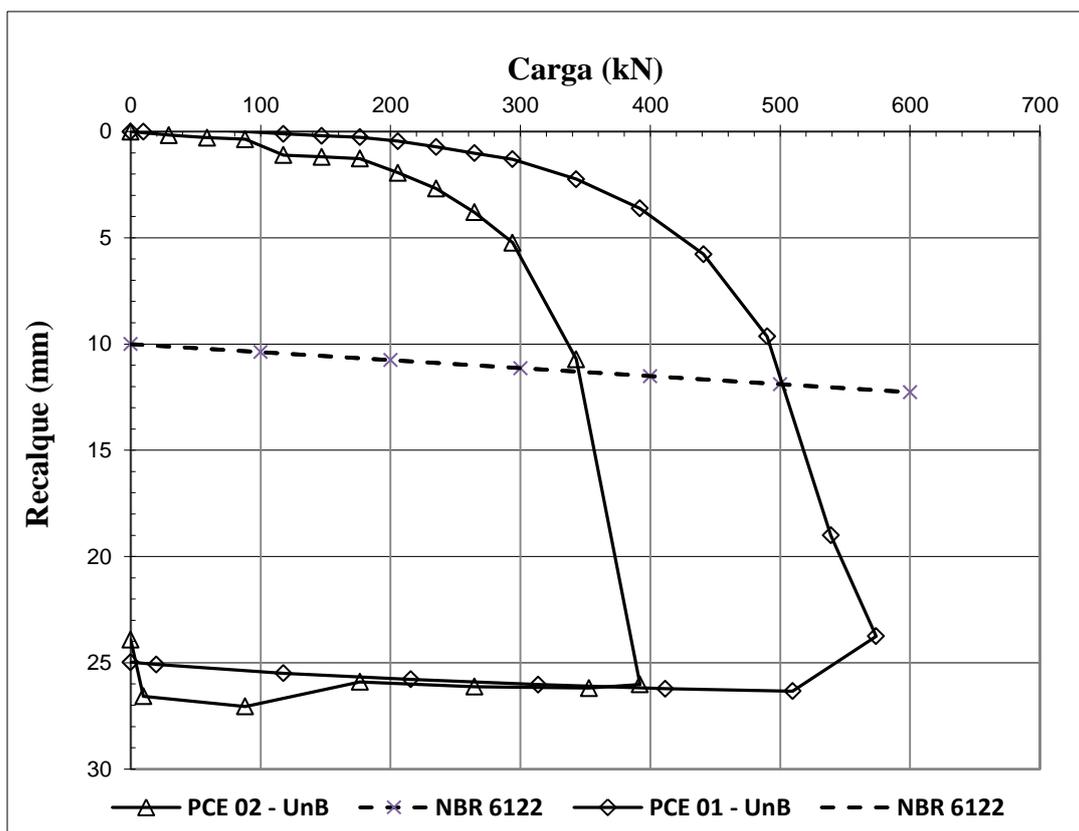


Figura 4.69 – Comparação das curvas carga recalque das duas provas de carga.

5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1- CONCLUSÕES

Esta tese desenvolveu e apresentou uma proposta alternativa de monitoramento térmico e estrutural de fundações submetidas a provas de carga usando sensores óticos com a técnica de redes de Bragg – FBG (Fiber Bragg Grating) instalados tubos de proteção.

Após a finalização de todos os ensaios e análise dos resultados de cada um dos métodos construtivos e de instalação da fibra ótica nos tubos de proteção, verificou-se que o método construtivo de instalação das fibras com maior eficiência e facilidade de montagem correspondia ao sistema de instalação da fibra ótica toda ela colada na parede do tubo. Este método apresentou uma alta capacidade de deformação da fibra ótica, boa repetibilidade dos ensaios, apresentando resultados coerentes e em concordância com os resultados do ensaio de módulo do concreto. Desta forma, este foi o método escolhido para desenvolvimento dos tubos sensores a serem instalados nas estacas destinadas aos ensaios de capacidade de carga.

No pilarete contendo os sensores óticos em redes de Bragg - FBG e o sistema convencional *strain gage* verificou-se nos ensaios uma excelente concordância entre os dois sistemas e o sensor térmico em fibra ótica instalado no mesmo pilarete respondeu de modo eficiente às mudanças de temperatura impostas entre os três ensaios realizados.

Os resultados oriundos dos sensores óticos destinados à avaliação das tensões nas provas de carga, apesar dos problemas atribuídos ao processo de instalação nas estacas que levaram a perda de alguns dos sistemas óticos, apresentaram resultados em concordância com o sistema *strain gage* instalado em paralelo. A avaliação do módulo do concreto e da transferência de carga durante os ensaios foram bem próximos, apontando para a eficiência do sistema ótico. Como contribuição do novo sistema alternativo de sensoriamento, o sistema ótico desenvolvido possibilita medições de temperatura no mesmo nível de profundidade das medições de tensões, pois os sensores óticos de temperatura estão instalados no mesmo dispositivo transdutor, contribuindo assim para análises sobre a influência da temperatura na interação solo-estrutura da estaca. Apesar da finalidade desses sensores térmicos no âmbito dessa tese ser esta, eles podem ser utilizados de modo continuado não só nas fundações como na superestrutura objetivando o monitoramento da temperatura e o aproveitamento da energia térmica. Os resultados de temperatura obtidos nos três níveis de profundidade de instalação

dos sensores nas estacas ensaiadas apresentaram resultados bem próximos dos valores medidos com termômetro digital em amostras de solo oriundas de sondagens SPT, indicando que o sistema de leitura térmica por meio dos sensores óticos funcionou adequadamente.

As curvas de retenção de água determinadas para amostras de solo indeformadas coletadas a 2 m, 8 m e 9 m de profundidade e submetidas às temperaturas de 10 °C, 24 °C e 40 °C indicaram um aumento da sucção com o aumento da temperatura. Considerando-se que ocorreram variações térmicas entre as estacas quando da realização das provas de carga em datas distintas assim como entre as amostras de solo coletadas ao longo do perfil por meio das sondagens SPT realizadas em datas próximas às das provas de carga, torna-se provável a interferência térmica nas interações solo-estrutura de fundação, sendo este um aspecto a ser melhor estudado em análises complementares. A hipótese do momento é a de que a variação térmica ao alterar a densidade e viscosidade da água exerce influência na sucção atuante no solo. O aumento da densidade da água resulta na aproximação das moléculas de água das partículas de argila aumentando a força de adsorção e por consequência aumentando a sucção. No entanto, os resultados mostraram que o impacto isolado da densidade da água na sucção atuante no solo e na própria curva de calibração do papel filtro é pequena apesar das significativas variações das curvas características do solo com a variação da temperatura, apontando assim para a necessidade de estudos mais amplos.

Com base nessas informações admite-se que a temperatura influencia de modo significativo na curva característica dos solos o que realça, embora estudos complementares se façam necessários, a importância do conhecimento da temperatura do solo no momento da realização das provas de carga e ao longo da vida útil da obra.

As sucções matriciais determinadas para o concreto submetido a diferentes tempos de cura em condições isoladas do meio ambiente mostraram que a sucção matricial aumenta com o aumento do tempo de cura do concreto até o trigésimo dia tendendo a um valor constante a partir desse período. Essa constatação indica que com o aumento do tempo de cura do concreto a diminuição da umidade e provavelmente também da porosidade devido a formação de cimentos termina tendo por consequência o aumento da sucção.

Outra constatação importante é que resistência à tração do concreto variou por mais longo período de cura com o tempo de cura que a própria sucção, o que indica que apesar da

sucção ter cessado o seu aumento aos 30 dias as reações cimentícias continuam contribuindo para a resistência do solo por mais longo período.

As análises dos módulos de elasticidade do concreto estimados a partir dos resultados de resistência à tração, apesar de apresentarem valores inferiores ao esperado, indicaram aumento não linear com a sucção sendo, no entanto, função do índice de vazios e do tempo de cura.

As análises do módulo de elasticidade do concreto estimado em função do tempo de cura indicaram, que apesar de dependerem da sucção atuante e da porosidade ele tende a constante nos primeiros dias de cura e também com tempos de cura superiores a 50 dias.

Finalmente, como esperado, apesar do módulo de elasticidade estimado para o concreto depender da sucção e do tempo de cura ele diminui com o aumento do índice de vazios.

Faz-se aqui a ressalva de que as análises realizadas quanto ao módulo de elasticidade estimado em função da sucção, do tempo de cura e do índice de vazios, devem ser consideradas nos limites desses parâmetros presentes no concreto estudado, pois também vai afetar essas relações o próprio tipo de concreto, ou seja, as análises realizadas, antes de ampliados os estudos para outros tipo e características de concreto, devem ser vistas com simples indicadores de comportamento.

5.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa desenvolveu uma instrumentação com sensores e fibras óticas capaz de ser instalada em fundações com monitoramento de tensões, deformações e temperatura, oferecendo importante diferencial ao sistema convencional *strain gage* que monitora apenas tensões e deformações. Faz-se, no entanto necessário em pesquisas futuras:

- Melhorar os procedimentos de instalação do sistema ótico nas estacas, pois nas duas estacas ensaiadas, apesar dos sistemas que permaneceram ativos apresentarem bom desempenho, uma parte deles não apresentou resposta durante os ensaios, o que aponta para o fato do sistema como um todo ter sido danificado durante as fases de instalação e/ou concretagem das estacas;

- Desenvolver a possibilidade de monitoramento da umidade em conjunto com as tensões, deformações e temperatura ao longo da estaca utilizando o mesmo transdutor já desenvolvido;
- Dar continuidade aos estudos da influência da temperatura na sucção atuante no solo incluindo a avaliação desta na curva de calibração do papel filtro;
- Dar continuidade ao estudo da influência do tempo de cura, da porosidade e da sucção no comportamento do concreto, buscando-se trabalhar com diferentes relações altura/diâmetro na avaliação da resistência a tração para fins de estimativa do módulo do concreto, pois partindo-se do estudo proposto e realizado nessa tese esse tipo de estudo fornece informações mais amplas sobre o comportamento do concreto, informações estas certamente relevantes para a interação solo-estrutura de fundação.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6457. (2016). Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, que revisa a norma ABNT NBR 6457:1986, elaborada pela Comissão de Estudo Especial de Solos (ABNT/CEE-221). Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 6484. (2001). Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento. Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 13208. (2007). Estacas – Prova de Carga Dinâmica. Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 12131. (2006). Estacas – Prova de Carga Estática. Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 6122. (2010). Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 91 p.

ABNT. NBR 7222. (2011). Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASTM D5298-10. (2016). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

ADHAMI, R. (2012). Autonomous structural monitoring using fiber bragg grating. In: Computer Systems and Industrial Informatics (ICCSII), 2012 International Conference on., p. 1–4.

AGRAWAL, G. P. (1997). Fiber-Optic Communication Systems. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons.

AKTAN, A. E., CATBA, F. N., GRIMMELSMAN, K. A., PERVIZPOUR, M. (2002). Development of a model health monitoring guide for major bridges. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Intitute.

ALBUQUERQUE, P. J. R. (2001). Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: Estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. 2001. 263f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MASSAD, F.; FONSECA, A. V.; CARVALHO, D.; SANTOS, J.; ESTEVES, E. C. (2011a). Effects of the Construction Method on Pile Performance: Evaluation by Instrumentation. Part 1: Experimental Site at the State University of Campinas. Soil and Rocks, v. 34, n. 1, p 35-50.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MASSAD, F.; FONSECA, A. V.; CARVALHO, D.; SANTOS, J.; ESTEVES, E. C. (2011b). Effects of the Construction Method on Pile Performance: Evaluation by Instrumentation. Part 2: Experimental Site at the Faculty of Engineering of the University of Porto. Soil and Rocks, v. 34, n. 1, p 51-65.

ALONSO, U.R. (1996 b). Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica previsão da capacidade de carga através do ensaio SPTT. 3o Seminário de Engenharia de Fundações

Especiais - SEFE III, São Paulo, SP, 2: 141-151.

ALMEIDA, P. A. O., RODRIGUES, J. F. S. (2002). Introdução a Análise Experimental de Estruturas. Apostila, Laboratório de Sistemas Estruturais Ltda. Fortaleza. 24 p.

ANSARI, F., MENG, D. (2013b). Damped fiber optic low-frequency tiltmeter for real-time monitoring of structural displacements. IOP Publishing Ltd.

ANSARI, F. (2005). Fiber optic sensor reliability issues in structural health monitoring. SPIE, Bellingham, WA.

ANSARI, F. (1997). State-of-the-art in the Applications of Fiber-Optics Sensors to Cementitious Composites. Cement and Concrete Composites, v. 19, p. 3-19.

ANSARI, F. (2009). Structural health monitoring with fiber optic sensors. Front. Mech. Eng. China, 4(2):p 103–110.

BAI, J.; ZHAO, D.; ZHANG, X. (2011). Structural health monitoring of smart civil structures based on fiber bragg grating sensing technology. Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), p. 635 – 638.

BILODEAU, F., MALO, B., ALBERT, J., JOHNSON, D. C., HILL, K. O., HIBINO, Y., ABE, M. and KAWACHI, M. (1993). Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides. Optics Letters, v. 18, p. 953-955.

BORGES, C. R., GITIRANA, G. F. N., VARGAS, C. A. L. & GUIMARÃES, R. C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG, Gramado, RS.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. (2000). Modelo de normalização da curva característica. 32º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, 1:96-106.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2001). Estudo do Comportamento Mecânico dos Solos Não-Saturados com Base na Sucção Normalizada. 40 Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre - RS, vol. único: 134-148.

CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado G.TD- 009A/02. Doutorado em Geotecnia, UnB, 351p.

CERATTI, J.A., GEHLING, W.Y.Y., BICA, A.V.D. & RODRIGUES, M.R. (1996). Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul. 30a Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 2: 541-555.

CHENG, C.-H.; CHENG, K.-L.; LIU, W.-F. (2012). Reactive current sensor based on fiber bragg grating and a piezo-electric transducer. In: Photonics and Optoelectronics. [S.l.: s.n.].

CHOQUET, P., JUNEAU, F., BESSETE, J. (2000). New generation of Fabry-Perot fiber optics sensors for monitoring of structures. In: Spie Conference On Smart Structures And Materials, Newport Beach, USA.

CHOJNOWSKI, P.; JĘDRZEJEWSKI, K. P. (2006). Strain and temperature sensor applications of fiber Bragg gratings. In: R. S. Romaniuk (Ed.); Proceedings of SPIE. (Anais). v. 6347, p.63470W–63470W–11. [S.]: SPIE.

CORADIN, F. K.; POSSETTI, G. R. C.; KAMIKAWACHI, R. C.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. (2010). Etched Fiber Bragg Gratings Sensors for Water-Ethanol Mixtures : a Comparative Study. , v. 9, n. 2, p. 131–143.

COROTTI JR, R. DE P.; THALER, J.; KALINOWSKI, H. J.; et al. (2015). Etched FBG written in multimode fibers: sensing characteristics and applications in the liquid fuels sector. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 14, n. 1, p. 51–59.

COWIE, B. M.; WEBB, D. J.; TAM, B.; SLACK, P.; BRETT, P. N. (2007). Fibre Bragg grating sensors for distributive tactile sensing. Measurement Science and Technology, v. 18, n. 1, p. 138–146.

CRUZ JÚNIOR, A. J. (2016). Instrumentação de Fundações Estaqueadas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Geotecnia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 212 p.

CULSHAW, B., KERSEY, A. (2008). Fiber-optic sensing: A historical perspective. Journal of Lightwave Technology. 26:9-12, p. 1064–1078.

DAVIS, M. A., BELLEMORE, D. G., KERSEY, A. D. (1997). Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structural Components. Cement and Concrete Composites, v. 19, p. 45-57.

DUNNICLIFF, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. 1ª ed. Nova York:JohnWiley& Sons, Inc. 577p.

FREITAS NETO, O. (2013). Avaliação Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil. 2013. 253f. Tese (Doutorado em Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília.

GALLIPOLI, D., WHEELER, S. J. & KARSTUNEN, M. (2003). Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. Géotechnique, 53: 105-112.

GARCIA, J. R. (2006). Estudo do comportamento carga vs recalque de estacas raiz carregadas à compressão. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GARCIA, J. R. (2015). Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. 2015. 340 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo

laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

GIOZZA, W. F., CONFORT, E., WALDMAN, H., (1991). *Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas*, São Paulo.

GOWAR, J. (1984). *Optical Communication Systems*, Prantice-Hall.

GLISIC, B., INAUDI, D. (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. Chichester: John Wiley and Sons, Inc.

GRATTAN, K. T. V., MEGGITT, B. T. (1998). *Optical fiber sensor technology*. Kluwer Academic Publishers.

GRAVER, T., INAUDI, D., DOORNINK, J. (2004). Growing market acceptance for fiber optic solutions in civil structures. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 5589, p. 44–55.

GUAN, B., TAM, H., TAO, X., DONG X., (2000). Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 12, n. 6, p. 675-677.

GUPTA, B. D. (2006). *Fiber optic sensors: Principles and applications*. New India Publishing.

HBM. (2008). *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. The Route to Measurement Transducers –A Guide to the Use of the HBM k Series Foil Strain Gages e Accessories*. Manual. Darmstadt.

HECHT, E., (2001). *Optics*. Adelphi University.

HEO, J.-S.; CHUNG, J.-H.; LEE, J.-J. (2006). Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 126, n. 2, p. 312–327.

HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., (1978). Photosensitivity in Optical Fiber Waveguide: Application to Reflection Filter Fabrication. *Applied Physics Letters*, vol 32, p. 647-649.

HILL, K. O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., ALBERT, J., (1993). Bragg Gratings Fabricated in Monomode Photosensitive Optical Fiber by UV Exposure Through a Phase Mask, *Applied Physics Letters*, vol. 62, n. 10, p. 1035-1037.

HILL, K. O., MELTZ, G. (1997). Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1263-1276.

HOFFMANN, K. (2012). *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 257p.

HUSTON, et al. (1994). Intelligent Civil Structures-Activities in Vermont. *Smart Materials and Structures* 3:3. P. 129-139.

HOUSTON, S. L., WALSH, K. D. & HOUSTON, W. N. (1997). Shear Strength Contribution of Soil Suction in Cemented Soil. 3o Simpósio de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro-RJ, vol.1 , p. 25-33.

INAUDI, D., GLISIC, B. (2005). Development of distributed strain and temperature sensing cables. In: International Conference On Optical Fiber Sensors, 17. Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, p. 222-225.

IVCE, R.; JURDANA, I.; MOHOVI, R. (2011). Vibrations monitoring on board ship with a fiber optic sensors. ELMAR, 2011 Proceedings, p. 165 – 168.

JOHANSSON, S., WATLEY, D. (2005). Optical Allusions. International Water Power & Dam Construction, p. 22-25.

KAMIZI, M. A.; POSSETTI, G. R. C.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. (2015). Fiber Bragg grating sensors probed by artificial intelligence to detect and localize impacts on structures. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 14, n. SI-1, p. 25–34.

KASHYAP, R. (1999). Fiber Bragg Gratings, San Diego: Academic Press.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., KOO, K. P., (1997). “Fiber Grating Sensors”, Journal of Lightwave Technology 15, 1442-1463.

KLEMBA, F. (2005). Sensores Óticos a Fibra Aplicados à Área de Petróleo. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 80 p.

KO, J. M., NI, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. Engineering Structures. 27:12, p. 1715–1725.

KROHN, D. A. (2000). Fiber optic sensors: fundamentals and applications (3rd ed.). ISA.

KUKUREKA, S., MIAO, P., METJE, N, CHAPMAN, D., ROGERS, C. (2005). Mechanical reliability of optical fiber sensors for tunnel displacement monitoring. In: International Conference On Optical Fiber Sensors, 17., 2005, Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, p. 1052-1055.

LAM, D. K. W., GARSIDE, B. K. (1981). Characterization of single mode optical fiber filters. Applied Optics, 20(3) p. 440–445.

LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V., REED, W. A. (1993). High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultra high sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. Electronics Letters, v. 29, n. 13, p.1191-1193.

LIANG, W.; HUANG, Y.; XU, Y.; LEE, R. K.; YARIV, A. (2005). Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors. Applied Physics Letters, v. 86, n. 15, p. 151122.

LI, H. N., LI, D. S., SONG, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. Engineering Structures. 26:11, p. 1647–1657.

- LÓPEZ-HIGUERA, J. M. (1998). *Optical Sensors*. Universidad de Cantabria.
- LÓPEZ-HIGUERA, J. M. (2002). *Handbook of optical fibre sensing technology*. Wiley.
- LOURENÇO, I. J., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., (2010). Fiber Bragg Grating Sensor to Monitor Stress Kinetics in Drying Process of Commercial Latex Paints, *Sensors*,10, p. 4761-4776; doi:10.3390/s100504761.
- MARINHO, F.A.M. (1995). A Técnica do Papel Filtro para Medição de Sucção. Encontro sobre Solos não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 1-14.
- MARINHO, F. A. M. & PINTO, C. S. (1997). Evaluation of Pore Size Characteristic of Plastic Soils. 3o Simpósio de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro-RJ, vol.1, p. 1-11.
- MEASURES, R. M. (2001). *Structural monitoring with fiber optic technology*. London: Academic Press.
- MELTZ, G., MOREY, W.W., GLENN, W. H., (1989). Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method, **Optics Letters**, v. 14, p. 823-825.
- MICHEL, B. E., & KAUFMANN, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant physiology*, 51(5), 914–6. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=366375&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- MONTEIRO, F.F. (2016). Influência da Saturação na Interação Solo-Estrutura em Solo Tropical do Distrito Federal. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2016 — 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- MUCHETI, A. S. (2008). Estaca hélice segmentada: execução, verificação de integridade e estudo de comportamento. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NEGRI, L.; ZILLI, G.; CUNHA, C. DA; et al. (2011). FBG refractometry and electrical impedance analysis in fuel samples characterization. 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011). (Anais). p.867–871. Natal: IEEE.
- NOGUEIRA, R. C. R. (2004). Comportamento de estacas tipo raiz, instrumentadas, submetidas à compressão axial, em solo de diabásio. 2004. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- O'DWYER, M. J., MAISTROS, G. M., JAMES, S. W., TATAM, R. P., PARTRIDGE, I. K., (1998). Relating the State of Cure to the Real-time Internal Strain Development in a Curing Composite Using In-Fibre Bragg Gratings and Dielectric Sensors, *Measurement and Science Technology*, n. 9, p. 1153-1158.
- OLIVEIRA, V. (2012). *Redes de Bragg para Medições em altas temperaturas*. Tese

(Doutorado)— Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

OLIVEIRA, F. M. D. R. (2013). Rede de Bragg aplicada na monitoração da deformação mecânica de verniz acrílico durante a secagem. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 75p.

OTHONOS, A. (1997). Fiber Bragg Gratings. *Review Sciences Instrument*, v. 68, p. 4309-4341.

OTHONOS, A., KALLI, K. (1999). *Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House.

PACHECO, R. T. (2004). Análise da interação entre estacas escavadas em solo residual. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

PAN, X. W., LIANG, D., LI, D., (2006). Optical Fiber Sensor Layer Embedded in Smart Composite Material and Structure, *Smart Materials and Structures*, n. 15, p. 1231-1234.

PESSOA, F.H.C (2004). Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 151p.

POLOSSO, T. (2001). Fiber Bragg gratings optical sensing technology. *Smart Materials Bulletin*, p. 7-10.

QUADROS, P.AJ. (2014). ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 105 p.

RAN, Z., RAO, Y., NIE, N., CHEN, R. (2005). Long distance fiber bragg grating sensor system based on hybrid Raman/erbium-doped fiber amplification. In: *International Conference On Optical Fiber Sensors*, 17., Brugges. *Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering*, p. 583-586.

RAO, Y. J., YUAN, S. F., ZENG, X. K., LIAN, D. K., ZHU, Y., WANG, Y. P., HUANG, S.L., LIU, T. Y., FERNANDO, G. F., ZHANG, L., BENNION, I., (2002). Simultaneous Strain and Temperature Measurement of Advanced 3-D Braided Composite Materials Using an Improved EFPI/FBG System, *Optics and Lasers in Engineering*, n. 38, p. 557–566.

SALES, M. M. (2000). Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. 2000. 229 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília.

SCHNAID, F. (2000). *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. São Paulo, SP: Oficina de Textos.

SENIOR, J. M. (1992). *Optical fiber communications: principles and practice*. New York: Prentice Hall.

SILVA JÚNIOR, D. N. (1990). *Fibras Ópticas*. Érica Editora LTDA.

SINGH, H., SIRKIS, J. S., (1997). Temperature and Strain Measurement by Combining ILFE and Bragg Grating Optical Fiber Sensors, *Experimental mechanics*, v. 37, n. 4, p. 414-419.

SOARES, J.M. (1999). Emprego do SPT-T e Pressiômetro Ménard em um Depósito Arenoso da Região Litorânea de João Pessoa. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Geotecnia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 98p.

SOUSA JÚNIOR, R. P. (2017). Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

SOUZA, A. (2001). Estaca piloto instrumentada: uma ferramenta para o estudo de capacidade de carga de estacas quando submetidas a esforços axiais de compressão. 2001. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

TAIT, G.; ROGOWSKI, R. (2005). Fiber bragg grating sensors for real-time health monitoring of aerospace vehicles. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, p. 924–926.

TANG, A. M., CUI, Y. J., QIAN, L. X., DELAGE, P., & YE, W. M. (2011). Calibration of the osmotic technique of controlling suction using a miniature tensiometer. In Jotisankasa, Sawangsuriya, Soralump, & Mairaing (Eds.), *Unsaturated Soils: Theory and Practice* (pp. 423–427).

TENNYSON, R. C. (2001). Installation, use and repair of fiber optic sensors. Manitoba: ISIS Canada.

TENNYSON, R. C., COROY, T., DUCK, G., MANUELPILLAI, G., MULVIHILL, P., COOPER, D. J. F., SMITH, P. W. E., MUFTI, A. A., JALALI, S. J. (2000). Fibre optic sensors in civil engineering structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27:5, p. 880–889.

UDD, E., SPILLMAN, W. B. (2011). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists* (2nd ed.). Wiley-Interscience.

VILASBOAS, J. M. L., MACHADO, S. L., PINTO, S. A. (2016). Utilização do método do papel-filtro para determinação de curvas de retenção de água em argamassas e concretos. *Revista IBRACON de Estrutura e Materiais*, Volume 9, Nr 4. p. 525 - 543 • ISSN 1983-4195.

VILLALBA, S., CASAS, J. R. (2012). Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures. Technical University of Catalonia, Construction Engineering Department, UPC, Barcelona, Spain, Elsevier.

WATKINS, S. E. (2003). Smart Bridges with fiber-optic Sensors. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, p. 25-30.

WHEELER, S. J. & KARUBE, D. (1996). Constitutive modeling. Proc. 1st Conference on

Unsaturated Soils, Paris. Balkema, 3: 1323-1356.

XIANG, B., (2010). Applications of Fiber Grating (FG) in Modern Optical Communications and Beyond, International Journal of Advances in Optical Communication and Networks, v.1, n.1.

YANG, H. Z.; QIAO, X. G.; WANG, Y. P.; ALI, M. M.; LAI, M. H.; LIM, K. S.; AHMAD, H. (2015). In-fiber gratings for simultaneous monitoring temperature and strain in ultrahigh temperature. IEEE Photonics Technology Letters.

YEO, T., ECKSTEIN, D., MCKINLEY, B., BOSWELL, L., GRATTAN, K. (2005). Fibre-optic sensor for the monitoring of moisture ingress and porosity of concrete. In: International Conference On Optical Fiber Sensors, 17. Brugges. Proceedings... SPIE: International Society for optical engineering, p. 491-494.

YI, J.; ZHANG, H.; QIAO, X.; ZHU, X. (2012). Shape monitoring for wing structure using fiber bragg grating sensors. Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), p. 1032–1036.

YIN, S., RUFFIN, P. B., YU, F. T. S. (2008). – Fiber optic sensors (2nd ed.). CRC Press.

YU, Y.; TAM, H.; CHUNG, W.; DEMOKAN, M. S. (2000). Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature. Optics Letters, v. 25, n. 16, p. 1141–1143.

ZHAO, Y., MENG, Q., CHEN, K., (2006). Novel Current Measurement Method Based on Fiber Bragg Grating Sensor Technology, Sensors and Actuators A, v. 126, n. 1, p. 112-116.