



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Foz do Iguaçu, Paraná

2018.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

**ESTUDO COMPARATIVO DA ADERÊNCIA DE VERGALHÕES DE AÇO E DE
MATERIAIS COMPÓSITOS AO CONCRETO COM ALTA SALINIDADE,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE IMAGEM POR RAIOS X COLETADAS *IN-SITU***

RUDNEY BOSTEL

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke

Coorientadora: Prof. Dra. Ana Carolina Parapinski Santos

Foz do Iguaçu, Paraná

2018.

RUDNEY BOSTEL

**ESTUDO COMPARATIVO DA ADERÊNCIA DE VERGALHÕES DE AÇO E DE
MATERIAIS COMPÓSITOS AO CONCRETO COM ALTA SALINIDADE,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE IMAGEM POR RAIOS X COLETADAS *IN-SITU***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (PPGFISA-UNILA) como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke

Coorientadora: Prof. Dra Ana Carolina Parapinski Santos

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke (Orientador)

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho (Membro Externo)

Prof. Dr. Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso (Membro Interno)

Foz do Iguaçu, Paraná

2018.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação da Biblioteca Latino-Americana
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA

B747

Bostel, Rudney

Estudo comparativo da aderência de vergalhões de aço e de materiais compósitos ao concreto com alta salinidade, utilizando técnicas de imagem por raios x coletadas *in-situ* / Rudney Bostel. - Foz do Iguaçu-PR, 2018.

144 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza. Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada. Foz do Iguaçu - PR, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke.

Orientador: Prof. Dra. Ana Carolina Parapinski Santos

1. Concreto - Testes. 2. Aço - Corrosão. 3. Areia. 4. Agregados (Materiais de construção). I. Hönnicke, Marcelo Gonçalves. II. Santos, Ana Carolina Parapinski. III. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. IV. Título.

CDU 620.1-034.14'33.3

Resumo

O uso de areia salgada na mistura de concretos para construção civil tem crescido especialmente em locais onde existe escassez do produto. Contudo, essa salinidade ataca diretamente os vergalhões de aço nas estruturas de concreto armado, ocasionando problemas de corrosão. Uma alternativa é a utilização de vergalhões de materiais compósitos, que muitas vezes apresentam resistência mecânica igual ou superior ao aço, com a vantagem de não estarem sujeitos à corrosão. Geralmente, tais vergalhões são fabricados com fibras (basalto, vidro ou carbono) em uma matriz polimérica (resina epoxi). Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo de amostras de concreto armado (corpos de prova), submetidos ao ensaio “*pull-out*”, do qual é possível obter informações da aderência entre o concreto e os vergalhões inseridos nos corpos de prova. As propriedades dos vergalhões utilizados foram verificadas por medidas de difração de raios X, microscopia eletrônica (imagem e espectroscopia - EDS) e por ensaio de tração. Para cada tipo de vergalhão (Aço CA-50, Fibra de basalto e Fibra de vidro) foram produzidos corpos de prova em dois conjuntos: i) O primeiro contendo concreto com adição de cloreto de sódio (sal) e; ii) O segundo contendo concreto sem adição de cloreto de sódio. Os ensaios “*pull-out*” foram realizados em diferentes estágios de envelhecimento (63, 217 e 315 dias) após a moldagem dos corpos de prova. Os resultados obtidos mostram que a aderência entre os materiais diminui para os corpos de prova moldados com vergalhões de aço e concreto com adição sal (cerca de 20% em 315 dias), devido principalmente ao processo corrosivo. Esta diminuição da aderência não foi observada nos corpos de prova moldados com vergalhões de materiais compósitos (Fibra de basalto e Fibra de vidro). Os resultados também mostram que os vergalhões de Aço CA-50 suportam em média uma tensão de aderência superior (cerca de 30%) comparado aos vergalhões de materiais compósitos. Das radiografias realizadas *in-situ* foi possível extrair algumas informações importantes, tais como, locais de máxima compressão do concreto antes da perda de aderência, aparecimento de fissuras longitudinais e, o momento exato que ocorre a perda de aderência entre o vergalhão e o concreto.

Palavras-chave: concreto com adição sal, aderência, vergalhões de materiais compósitos, ensaio “*pull-out*”, radiografia *in-situ*.

Abstract

The use of salty sand in the concrete mixture for building construction has grown especially in places where there is absence of regular sand. However, the salinity attacks the steel rebar in reinforced concrete structures, resulting in corrosion problems. An alternative is to use composite material rebars, which shows similar or superior mechanical strength compared to steel rebar and are not strongly affected by corrosion. Usually, these rebars are manufactured with fibers (basalt, glass or carbon) in a polymer matrix (Epoxy resin). In this work, reinforced concrete samples (test samples) with and without addition of salt (sodium chloride), molded with different rebars (CA-50 Steel, Basalt Fiber and Glass Fiber), were submitted to the pull-out tests in order to take bonding information between the concrete and the rebar. The pull-out tests were performed at different ages (63, 217 and 315 days) after the molding. The results showed a bonding loss (about 20% in 315 days) for the test samples molded with steel rebar and salty concrete. This bonding loss was not observed in test samples molded with composite rebars (basalt fiber and glass fiber). Also, it was possible to detect that the CA-50 steel rebar supports higher bond strengths (~ 30% higher) compared to the composite rebars. Indeed, with *in-situ* radiographies, was possible to extract different information such as: i) locations of maximum concrete compression before the bonding loss; ii) appearance of longitudinal cracks and; iii) the exact moment of bonding loss between rebar and concrete. At last, the rebar properties were checked by tests of conformance, including X-ray diffraction, electron microscopy (imaging and spectroscopy - EDS) and stress-strain.

Keywords: salty-sand concrete, bonding, composite material rebars, pull-out test, *in-situ* radiography

À minha esposa Denise e aos meus filhos
Laura e Pedro...e também ao Isaque que
ainda está na barriga da mamãe!

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

Agradecimentos

A Deus pela força para superar as dificuldades enfrentadas durante o mestrado.

A minha família por entender os momentos de ausência para me dedicar a este trabalho. De forma especial agradeço a minha querida esposa Denise, por me incentivar e apoiar em todos os momentos.

Ao orientador Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke, que além dos conhecimentos transmitidos, agradeço pela confiança e paciência, cuja dedicação ao ensino e à pesquisa me proporcionou expandir muito os meus conhecimentos.

A coorientadora Prof. Dra Ana Carolina Parapinski Santos, pelas orientações e conhecimentos transmitidos sobre tecnologia do concreto, os quais foram fundamentais realização deste trabalho. Agradeço também pela ajuda fornecida por seus alunos durante a moldagem dos corpos de prova.

Ao PPGFISA, por todo o apoio concedido durante o mestrado, incluindo a secretaria do programa. Agradeço também aos professores, principalmente aos que tive oportunidade de trabalhar: Prof. Dr. Eduardo do Carmo, Prof. Dr. Abraão Jesse Capistrano de Souza, Prof. Dr. Juan de Dios Garrido Arrate e Prof. Dr. Luciano Calheiros Lapas.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Basso, por todo apoio proporcionado na realização dos ensaios de microscopia eletrônica por varredura – MEV.

Ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional pelo espaço concedido para preparação dos corpos de prova e também pelos equipamentos para realização dos ensaios. Agradeço de forma especial ao Eng.º Fábio L. Willrich por todo apoio e conhecimento transmitido, que foram fundamentais para realização dos ensaios.

A UNILA, em especial a Secretaria de Implantação do Campus, por todo o apoio concedido pelos colegas de trabalho. Agradeço pela concessão dos 9 meses de licença para me dedicar exclusivamente às atividades do mestrado.

A empresa Composite Group Chelyabinsk, em especial aos senhores Alex Ruzhinskiy e Mikhail Savinov, pelo fornecimento dos vergalhões de BFPR e GFPR utilizados neste trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Aderência entre vergalhões e concreto	21
2.1.1 Tipos de aderência e formas de ruptura.....	22
2.1.2 Fatores que influenciam na aderência	23
2.1.3 Ensaio de aderência.....	24
2.2 Influência da presença de cloretos no concreto armado	25
2.2.1 Variação da resistência à compressão do concreto na presença de cloretos	26
2.2.2 Corrosão de vergalhões de aço por cloretos	27
2.2.3 Variação da aderência entre vergalhão e concreto na presença de cloretos	30
2.3 Vergalhões de materiais compósitos	31
2.3.1 Vergalhão reforçado com fibra de vidro.....	34
2.3.2 Vergalhão reforçado com fibra de basalto.....	35
2.4 Radiografia	36
2.4.1 Produção de raios X por fontes convencionais.....	37
2.4.2 Interação da radiação com a matéria	40
2.4.3 Atenuação dos raios X.....	41
2.4.4 Imagens radiográficas.....	42
2.4.5 Radiografia industrial (<i>in-situ</i>)	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Idealização dos corpos de prova e ensaio “ <i>pull-out</i> ”	47
3.1.1 Projeto, construção e testes do suporte metálico para suporte dos corpos de prova para ensaios “ <i>pull-out</i> ”.	51
3.1.2 Simulação da atenuação de raios X nos corpos de prova	53
3.1.3 Preparação para moldagem dos corpos de prova.....	59
3.1.4 Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova.....	61
3.1.5 Moldagem, desmoldagem e armazenamento dos corpos de prova.	63
3.1.6 Montagem dos corpos de prova para ensaios “ <i>pull-out</i> ”	76
3.2 Montagem <i>in-situ</i> do equipamento de raios X	78
3.2.1 Especificações do equipamento de raios X	84
3.2.2 Especificações do detector digital	85
3.3 Caracterizações complementares.....	85

3.3.1 Difração de raios X.....	85
3.3.2 Microscopia eletrônica	89
3.3.3 Ensaio de tração dos vergalhões	95
4 RESULTADOS	103
4.1 Corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50	103
4.2 Corpos de prova com vergalhões de BFPR	111
4.3 Corpos de prova com vergalhões de GFPR.....	119
4.4 Resultados gerais	127
4.5 Radiografia <i>in-situ</i>	130
5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	135
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	138
REFERÊNCIAS	139
ANEXO I - Trabalhos publicados ou em fase de publicação	145

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TENSÃO DE ADERÊNCIA. FONTE: PINHEIRO (2007).....	21
FIGURA 2 - ADERÊNCIA MECÂNICA. FONTE: LEONHARDT E MONNING (2008).	23
FIGURA 3 – CONFIGURAÇÃO GERAL DO ENSAIO "PULL-OUT". FONTE RILEM (1973).	25
FIGURA 4 - PROCESSO DE CORROSÃO DENTRO DO CONCRETO. FONTE: FUSCO (2012).	29
FIGURA 5 - CORROSÃO POR ÍONS CLORETO. FONTE: FUSCO (2012).	29
FIGURA 6 - EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO NA TAXA DE CORROSÃO. FONTE: RIBEIRO (2014).	30
FIGURA 7 - LÂMINA DE FRP. FONTE: NACER (2006).....	32
FIGURA 8 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM TUBO DE RAIOS X COM UM ANODO GIRATÓRIO. FONTE: BUSHONG (2010).....	38
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA, BASEADA NO MODELO DE BOHR, DA PRODUÇÃO DE RAIOS X CARACTERÍSTICOS. FONTE: BUSHONG (2010).....	39
FIGURA 10 - FORMA GERAL DO ESPECTRO DE EMISSÃO DE RAIOS X. FONTE: BUSHONG (2010).	40
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM DETECTOR DIGITAL. FONTE: ORENSTEIN (2016).	43
FIGURA 12 - TÉCNICA GERAL DE ENSAIO RADIOGRÁFICO NA INDÚSTRIA. FONTE: ANDREUCCI (2014).	45
FIGURA 13 - TESTE RADIOGRÁFICO PRELIMINAR DE UMA PEÇA DE CONCRETO ARMADO, REALIZADO NO LABORATÓRIO INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIAS FÍSICAS (LICF) DA UNILA.	47
FIGURA 14 - IMAGEM OBTIDA POR RADIOGRAFIA - TESTE PRELIMINAR.	48
FIGURA 15 - CORPOS DE PROVA MOLDADOS - TESTE PRELIMINAR.	49
FIGURA 16 - TESTE DE IMAGEM RADIOGRÁFICA REALIZADO NO LICF COM O CORPO DE PROVA COM SEÇÃO REDUZIDA (DIÂMETRO DE 50 MM E COMPRIMENTO DE 20 MM) PARA IDENTIFICAÇÃO DO CONTRASTE.	50
FIGURA 17 - PROJETO SUPORTE METÁLICO PARA ENSAIO "PULL-OUT".....	51
FIGURA 18 - MONTAGEM EXPERIMENTAL ENSAIO "PULL-OUT" – TESTE PRELIMINAR.....	53
FIGURA 19 - ESPECTROS DE EMISSÃO CALCULADOS PARA UM TUBO DE RAIOS X COM ALVO DE TUNGSTÊNIO (W) EM DIFERENTES TENSÕES DE OPERAÇÃO: 70 kV, 80 kV E 90 kV. OS PICOS NO GRÁFICO REPRESENTAM AS TRANSIÇÕES DISCRETAS ENTRE AS CAMADAS L E K DO ÁTOMO DE TUNGSTÊNIO (W).....	54
FIGURA 20 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ATENUAÇÃO DO FEIXE DE RAIOS X EM UMA PEÇA CILÍNDRICA DE CONCRETO ARMADO.	55
FIGURA 21 - DETALHAMENTO DA ATENUAÇÃO NA REGIÃO II DA AMOSTRA.	56
FIGURA 22 - PERFIS RADIOGRÁFICOS SIMULADOS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PARA DIFERENTES TENSÕES APLICADAS NO TUBO DE RAIOS X (70 kV, 80 kV E 90 kV) – VERGALHÕES DE AÇO.	57
FIGURA 23 - PERFIS RADIOGRÁFICOS SIMULADOS DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PARA DIFERENTES TENSÕES APLICADAS NO TUBO DE RAIOS X (70 kV, 80 kV E 90 kV) – VERGALHÕES DE GFRP.	58
FIGURA 24 - PROJETO DE CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO PARA OS TESTES “PULL-OUT”. (A) VISTA SUPERIOR E SEÇÃO TRANSVERSAL LONGITUDINAL; (B) ESQUEMA TRIDIMENSIONAL COM PARTES EPS; (C) MODELO TRIDIMENSIONAL APÓS DESMOLDAGEM COMPLETA.	60
FIGURA 25 - MOLDE PADRÃO COM O ANEL DE EPS COLOCADO EM SUA BASE.	60
FIGURA 26 - TUBO DE PVC PARA CRIAR UMA REGIÃO SEM ADERÊNCIA ENTRE VERGALHÃO E CONCRETO DURANTE O PROCESSO DE MOLDAGEM.....	61
FIGURA 27 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT”. NOTE, EM (B) E (C) QUE FORAM UTILIZADAS TAMPAS CIRCULARES (TAMPO DE RALO DE 150 MM DE DIÂMETRO) PARA CENTRALIZAR O VERGALHÃO NA PARTE SUPERIOR DO MOLDE. PARA GARANTIR A CENTRALIDADE NA PARTE INFERIOR (FUNDO) DO MOLDE, UM CÍRCULO DE EPS COM 150 MM DE DIÂMETRO E 50 MM DE ALTURA FOI UTILIZADO CONFORME MOSTRADO EM (A). EM (D) SÃO TAMBÉM APRESENTADOS OS MOLDES PARA OS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO.	64
FIGURA 28 - TESTE DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE - CONCRETO – TESTE.	65
FIGURA 29 - SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” EM FASE FINAL DE MOLDAGEM.....	66
FIGURA 30 – AQUISIÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS UTILIZANDO UM CORPO DE PROVA DO SEGUNDO CONJUNTO PREPARADO PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT”.....	67

FIGURA 31 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES - ENSAIOS “PULL-OUT” – VERGALHÕES DE AÇO CA-50.....	69
FIGURA 32 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES - ENSAIOS “PULL-OUT” – VERGALHÕES DE BFPR.....	70
FIGURA 33 - PREPARAÇÃO DOS MOLDES - ENSAIOS “PULL-OUT” – VERGALHÕES DE GFPR.....	70
FIGURA 34 - TESTE DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE PARA O CONCRETO UTILIZADO NO CONJUNTO DEFINITIVO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” COM VERGALHÕES DE AÇO CA-50. (A) CONCRETO SEM SAL. (B) CONCRETO COM SAL.....	71
FIGURA 35 - TESTE DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE PARA O CONCRETO UTILIZADO NO CONJUNTO DEFINITIVO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” COM VERGALHÕES DE BFPR. (A) CONCRETO SEM SAL. (B) CONCRETO COM SAL.....	71
FIGURA 36 - TESTE DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE PARA O CONCRETO UTILIZADO NO CONJUNTO DEFINITIVO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” COM VERGALHÕES DE GFPR. (A) CONCRETO SEM SAL. (B) CONCRETO COM SAL.....	72
FIGURA 37 - CORPOS DE PROVA MOLDADOS - VERGALHÕES DE AÇO CA-50. (A) CONCRETO SEM SAL (B) CONCRETO COM SAL.....	73
FIGURA 38 - CORPOS DE PROVA MOLDADOS - VERGALHÕES DE BFPR. (A) CONCRETO SEM SAL (B) CONCRETO COM SAL.....	73
FIGURA 39 - CORPOS DE PROVA MOLDADOS - VERGALHÕES DE GFPR. (A) CONCRETO SEM SAL (B) CONCRETO COM SAL.....	74
FIGURA 40 - CORPOS DE PROVA DESMOLDADOS PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” (A E B) E ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES (C E D) COM VERGALHÕES DE AÇO CA-50. (A E C) SEM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO. (B E D) COM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO.....	75
FIGURA 41 - CORPOS DE PROVA DESMOLDADOS PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” (A E B) E ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES (C E D) COM VERGALHÕES DE BFPR. (A E C) SEM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO. (B E D) COM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO.....	75
FIGURA 42 - CORPOS DE PROVA DESMOLDADOS PARA TESTES COM ENSAIO “PULL-OUT” (A E B) E ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES (C E D) COM VERGALHÕES DE GFPR. (A E C) SEM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO. (B E D) COM ADIÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO.....	76
FIGURA 43 - MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO "PULL-OUT" COM OS CORPOS DE PROVA DEFINITIVOS. (A) SUPORTE METÁLICO, AGORA PINTADO DE BRANCO. (B) INDICADOR DE DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO. (C) DETALHE DO VERGALHÃO FIXADO À MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL DO LTC / ITAIPU BINACIONAL. (D) CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO. (E) IMAGEM DA TELA DO COMPUTADOR MOSTRANDO O SOFTWARE QUE CONTROLA A OPERAÇÃO DA MÁQUINA DE TRAÇÃO E ARMAZENA OS DADOS DO CARREGAMENTO VERSUS TEMPO. (F) IMAGEM DA TELA DO COMPUTADOR MOSTRANDO O SOFTWARE QUE ARMAZENA OS DADOS DE DESLOCAMENTO VERSUS TEMPO, MEDIDOS PELO INDICADOR DE DESLOCAMENTO.	77
FIGURA 44 - MONTAGEM EQUIPAMENTO DO TUBO MICROFOCO DE RAIOS X NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS DO LTC / ITAIPU BINACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS <i>IN-SITU</i> DURANTE O ENSAIO “PULL-OUT”. (A) TUBO DE RAIOS X POSICIONADO PRÓXIMO AO CORPO DE PROVA A SER SUBMETIDO AO ENSAIO. (B) DETALHE DA MONTAGEM DA PLACA DE CHUMBO, UTILIZADA COMO PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E MONTADA AO REDOR DO SUPORTE METÁLICO. (C.1) POSICIONAMENTO DO DETECTOR INTRA-ORAL DIGITAL. (C.2) JANELA DO TUBO MICROFOCO DE RAIOS X. (D) TELA DO COMPUTADOR MOSTRANDO O SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE RADIOGRAFIA <i>IN-SITU</i>	80
FIGURA 45 – SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS NA REGIÃO DE ADESÃO ENTRE CONCRETO E VERGALHÃO PARA DISTINTOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM SAL E COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50 EM DIFERENTES TEMPOS DE ENVELHECIMENTO. AS INTENSIDADES FORAM NORMALIZADAS EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE MÁXIMA DO LADO ESQUERDO DO VERGALHÃO PARA O CORPO DE PROVA COM IDADE DE ENVELHECIMENTO DE 63 DIAS.....	82
FIGURA 46 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS NA REGIÃO DE ADESÃO ENTRE CONCRETO E VERGALHÃO PARA DISTINTOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO SEM SAL E COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50 EM DIFERENTES TEMPOS DE ENVELHECIMENTO. AS INTENSIDADES FORAM NORMALIZADAS EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE MÁXIMA DO LADO ESQUERDO DO VERGALHÃO PARA O CORPO DE PROVA COM IDADE DE ENVELHECIMENTO DE 63 DIAS.....	82

FIGURA 47 – MONTAGEM EQUIPAMENTO DO TUBO MICROFOCO DE RAIOS X NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS DO LTC / ITAIPU BINACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS <i>IN-SITU</i> DURANTE O ENSAIO “PULL-OUT” COM CORPOS DE PROVA DE BFPR. (A) TUBO DE RAIOS X POSICIONADO PRÓXIMO AO CORPO DE PROVA A SER SUBMETIDO AO ENSAIO. (B) DETALHE DA MONTAGEM DA PLACA DE CHUMBO, UTILIZADA COMO PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E MONTADA AO REDOR DO SUPORTE METÁLICO (C.1) POSICIONAMENTO DO DETECTOR INTRA-ORAL DIGITAL. (C.2) JANELA DO TUBO MICROFOCO DE RAIOS X. (D) TELA DO COMPUTADOR MOSTRANDO O SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE RADIOGRAFIA <i>IN-SITU</i>	83
FIGURA 48 - AQUISIÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS NO LICF / UNILA PARA VERIFICAR A PRESENÇA DE CONTRASTE ENTRE VERGALHÃO E CONCRETO PARA VARIADAS DISTÂNCIAS FONTE-AMOSTRA, AMOSTRA-DETECTOR. (A) CORPO DE PROVA DE BFPR. (B) CORPO DE PROVA DE GRPR.....	84
FIGURA 49 - TUBO DE RAIOS X MICROFOCO MODELO KEVEX PXS5-927. FONTE: THERMOFISCHER SCIENTIFIC. ..	85
FIGURA 50 – ARRANJO EXPERIMENTAL NA GEOMETRIA θ - 2θ , NO DIFRATÔMETRO PANALYTICAL-EMPYREAN DO LICF / UNILA. (A) TUBO DE RAIOS X, (B) AMOSTRA E (C) DETECTOR CCD (“CHARGE COUPLED DEVICE”) BIDIMENSIONAL PIXEL3D.	86
FIGURA 51 - DIFRATOGRAMA DO VERGALHÃO DE AÇO CA-50. NOS GRÁFICOS SÃO INDICADOS OS ÍNDICES DE MILLER DOS PRINCIPAIS PLANOS CRISTALOGRAFICOS. TAMBÉM SÃO INDICADOS OS PICOS REFERENTE À MASSA DE EMBUTIMENTO UTILIZADA NO PORTA AMOSTRA.	87
FIGURA 52 - PORTA AMOSTRA EM TEFLON, COM A AMOSTRA, EM PÓ, DO VERGALHÃO DE BFPR.	88
FIGURA 53 - DIFRATOGRAMAS DOS PÓS OBTIDOS DOS VERGALHÕES BFPR E GFPR.....	89
FIGURA 54 - MEDIDAS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA – MEV. (A) MICROSCÓPIO ZEISS EVO MA10 DISPONÍVEL NO LABORATÓRIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DA UNILA. (B) GONIÔMETRO PARA FIXAÇÃO DA AMOSTRA DENTRO DA CÂMARA DE VÁCUO DO MEV. (C) TELA DO COMPUTADOR MOSTRANDO AS FIBRAS DE BASALTO NA PONTA DE UM PEDAÇO DE VERGALHÃO DE BFPR ESGARÇADO DURANTE O CORTE.	90
FIGURA 55 – RESULTADOS OBTIDOS DO MEV / EDS – VERGALHÃO DE BFPR – SEÇÃO TRANSVERSAL ÀS FIBRAS. (A) IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, INDICANDO TRÊS PONTOS DISTINTOS ONDE AS MEDIDAS DE EDS FORAM REALIZADAS. (B) RESULTADO DO EDS INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO VERGALHÃO: CARBONO (C), OXIGÊNIO (O), SILÍCIO (Si), OURO (Au), ALUMÍNIO (Al), FERRO (Fe), CÁLCIO (Ca), PALÁDIO (Pd), MAGNÉSIO (Mg), SÓDIO (Na) E POTÁSSIO (K). CARBONO É O ELEMENTO PRESENTE NA RESINA. OURO (Au) E PALÁDIO (Pd) SÃO DECORRENTES DA METALIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE.	91
FIGURA 56 - RESULTADOS OBTIDOS DO MEV / EDS – VERGALHÃO DE BFPR – SEÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS. (A) IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, INDICANDO TRÊS PONTOS DISTINTOS ONDE AS MEDIDAS DE EDS FORAM REALIZADAS. (B) RESULTADO DO EDS INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO VERGALHÃO: CARBONO (C), OXIGÊNIO (O), SILÍCIO (Si), CÁLCIO (Ca), ALUMÍNIO (Al), MAGNÉSIO (Mg) E POTÁSSIO (K). CARBONO É O ELEMENTO PRESENTE NA RESINA.....	91
FIGURA 57 - RESULTADOS OBTIDOS DO MEV / EDS – VERGALHÃO DE GFPR – SEÇÃO TRANSVERSAL ÀS FIBRAS. (A) IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, INDICANDO QUATRO PONTOS DISTINTOS ONDE AS MEDIDAS DE EDS FORAM REALIZADAS. (B) RESULTADO DO EDS INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO VERGALHÃO: OXIGÊNIO (O), SILÍCIO (Si), CÁLCIO (Ca), ALUMÍNIO (Al) E MAGNÉSIO (Mg). AUSÊNCIA DO ELEMENTO QUÍMICO CARBONO (C), POIS ESTE ELEMENTO ESTÁ PRESENTE SOMENTE NA RESINA.	92
FIGURA 58 - RESULTADOS OBTIDOS DO MEV / EDS – VERGALHÃO DE GFPR – SEÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS. (A) IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, INDICANDO TRÊS PONTOS DISTINTOS ONDE AS MEDIDAS DE EDS FORAM REALIZADAS. (B) RESULTADO DO EDS INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO VERGALHÃO: CARBONO (C), OXIGÊNIO (O), SILÍCIO (Si), ALUMÍNIO (Al), FERRO (Fe), CÁLCIO (Ca), MAGNÉSIO (Mg) E SÓDIO (Na). CARBONO É O ELEMENTO PRESENTE NA RESINA.....	92
FIGURA 59 - RESULTADOS OBTIDOS DO MEV / EDS – FIBRA DE BASALTO ISOLADA. (A) IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, INDICANDO TRÊS PONTOS DISTINTOS ONDE AS MEDIDAS DE EDS FORAM REALIZADAS. (B) RESULTADO DO EDS INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO VERGALHÃO: OXIGÊNIO (O), SILÍCIO (S), FERRO (Fe), ALUMÍNIO (Al), CÁLCIO (Ca), MAGNÉSIO (Mg), SÓDIO (Na) E POTÁSSIO (K). AUSÊNCIA DO ELEMENTO QUÍMICO CARBONO (C), POIS ESTE ELEMENTO ESTÁ PRESENTE SOMENTE NA RESINA.....	93

FIGURA 60 – MEDIDA DO DIÂMETRO DA FIBRA DE BASALTO ATRAVÉS DA IMAGEM OBTIDA POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 4290 VEZES.	94
FIGURA 61 - MEDIDA DO DIÂMETRO DA FIBRA DE VIDRO ATRAVÉS DA IMAGEM OBTIDA POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 3900 VEZES.	94
FIGURA 62 - IMAGEM RADIOGRÁFICA DAS FIBRAS DE BASALTO. RADIOGRAFIA OBTIDA COM FONTE MICROFOCO ALVO DE TUNGSTÊNIO, TENSÃO DE OPERAÇÃO DE 40KV E CORRENTE DE 57 μ A. DISTÂNCIA FONTE-AMOSTRA DE 12 CM E DISTÂNCIA AMOSTRA-DETECTOR DE 130 CM – AMPLIAÇÃO DE 12 VEZES. DIÂMETRO DA FIBRA DE 16 μ M.	95
FIGURA 63 - ENSAIO DE TRAÇÃO DO VERGALHÃO DE AÇO CA-50 REALIZADO NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS DO LTC / ITAIPU. (A) VERGALHÃO DE AÇO CA-50 FIXADO NAS GARRAS DA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS. UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVO MEDIDOR DE DEFORMAÇÕES INSTALADO EM CONTATO COM O VERGALHÃO DE AÇO CA-50 (B) AMOSTRAS APÓS SEREM SUBMETIDAS AO ENSAIO DE TRAÇÃO.	96
FIGURA 64 – RESULTADOS DE TENSÃO (MPa) X TEMPO (S) OBTIDOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO REALIZADAS NOS VERGALHÕES DE AÇO CA-50 PARA AS AMOSTRAS 1, 2 E 3.	96
FIGURA 65 – RESULTADOS DE DEFORMAÇÃO (MM) X TEMPO (S) E TENSÃO (MPa) X DESLOCAMENTO (MM) OBTIDOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO REALIZADAS NOS VERGALHÕES DE AÇO CA-50 PARA AS AMOSTRAS 2 E 3.	97
FIGURA 66 - ENSAIO DE TRAÇÃO DO VERGALHÃO DE AÇO CA-50 REALIZADO NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS DO LTC / ITAIPU. AS IMAGENS MOSTRAM, DA ESQUERDA PARA DIREITA RESPECTIVAMENTE OS VERGALHÕES DE BFPR E GFPR FIXADOS DIRETAMENTE NAS GARRAS DA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS.	98
FIGURA 67 – VERGALHÕES DE BFPR (PARTE SUPERIOR) E GFPR (PARTE INFERIOR) APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO – SALIÊNCIAS DOS VERGALHÕES DANIFICADAS PELO ESCORREGAMENTO NA REGIÃO DAS GARRAS DA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS.	99
FIGURA 68 – TUBOS METÁLICOS (LUVAS) UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DOS VERGALHÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS.	100
FIGURA 69 – AMOSTRAS DE VERGALHÕES DE BFPR (ESQUERDA) E GFPR (DIREITA) PREPARADAS PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO – UTILIZAÇÃO DE LUVAS DE TUBOS METÁLICOS PREENCHIDOS COM RESINA EPOXI.	101
FIGURA 70 – ENSAIO DE TRAÇÃO DO VERGALHÃO DE AÇO CA-50 REALIZADO NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS DO LTC / ITAIPU. AMOSTRA DE GFPR UTILIZANDO LUVAS DE TUBOS METÁLICOS PREENCHIDOS COM RESINA EPÓXI.	102
FIGURA 71 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	103
FIGURA 72 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	104
FIGURA 73 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 217 DIAS – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	105
FIGURA 74 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 217 DIAS – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	105
FIGURA 75 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 315 DIAS – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	106
FIGURA 76 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - 315 DIAS – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO	

DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	107
FIGURA 77 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TENSÃO DE ADERÊNCIA – CORPOS DE PROVA COM VERGALHÕES DE AÇO CA-50. DIMINUIÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA MÁXIMA AO LONGO DO TEMPO, PARA OS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM CONCRETO CONTENDO SAL. A TENSÃO DE ADERÊNCIA PARA OS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM CONCRETO SEM SAL AUMENTA DO PRIMEIRO (63 DIAS) PARA O ÚLTIMO (315 DIAS) ENSAIO.	110
FIGURA 78 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA COM VERGALHÕES DE AÇO CA-50. AUMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO, TANTO PARA O CONCRETO CONTENDO SAL QUANTO PARA O CONCRETO SEM SAL.	111
FIGURA 79 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	112
FIGURA 80 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	112
FIGURA 81 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 217 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	113
FIGURA 82 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 217 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	114
FIGURA 83 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 315 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	115
FIGURA 84 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – 315 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	115
FIGURA 85 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TENSÃO DE ADERÊNCIA – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÕES DE BFPR. VERIFICA-SE QUE INICIALMENTE (63 DIAS) A TENSÃO DE ADERÊNCIA É MAIOR PARA OS CORPOS DE PROVA CONTENDO CONCRETO COM SAL, PORÉM NOS ÚLTIMOS ENSAIOS (315 DIAS) ESTA TENDÊNCIA SE INVERTE, OU SEJA, A ADERÊNCIA É MAIOR PARA OS CORPOS DE PROVA SEM SAL. HÁ UMA SOBREPOSIÇÃO DAS BARRAS DE ERROS NESTA ÚLTIMA DATA.	118
FIGURA 86 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÕES DE BFPR. ENTRE OS ENSAIOS DE 63 DIAS E 217 DIAS HÁ UM AUMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA OS DOIS TIPOS DE CONCRETO (COM SAL E SEM SAL). PORÉM AMBOS OS VALORES DIMINUEM NO ENSAIO DE 315 DIAS EM RELAÇÃO AO ENSAIO DE 217 DIAS.	119
FIGURA 87 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	120
FIGURA 88 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 63 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	120
FIGURA 89 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 217 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE	

ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	121
FIGURA 90 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 217 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	122
FIGURA 91 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 315 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	123
FIGURA 92 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – 315 DIAS - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. OS GRÁFICOS MOSTRAM QUE ATÉ ATINGIR O MÁXIMO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA, O DESLOCAMENTO DO VERGALHÃO É MUITO PEQUENO, E APÓS ISTO O DESLOCAMENTO AUMENTA RAPIDAMENTE.	123
FIGURA 93 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TENSÃO DE ADERÊNCIA – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÕES DE GFPR. OBSERVA-SE QUE TANTO INICIALMENTE (63 DIAS) QUANTO NO ÚLTIMO ENSAIO (315 DIAS) OS VALORES PARA TENSÃO DE ADERÊNCIA SÃO MUITOS PRÓXIMOS (CONSIDERANDO AS BARRAS DE ERROS), TANTO PARA OS CORPOS DE PROVA CONTENDO CONCRETO COM SAL QUANTO PARA OS SEM SAL. .	126
FIGURA 94 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÕES DE GFPR. A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, TANTO PARA O CONCRETO CONTENDO SAL QUANTO PARA O CONCRETO SEM SAL, CRESCE DO PRIMEIRO (63 DIAS) PARA O SEGUNDO(217 DIAS). PORÉM HÁ UMA DIMINUIÇÃO DO VALOR DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO ÚLTIMO ENSAIO (315 DIAS) PARA O CONCRETO COM SAL, ENQUANTO PARA O CONCRETO SEM SAL, A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO QUASE NÃO VARIA.	127
FIGURA 95 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TENSÃO DE ADERÊNCIA – COMPARATIVO ENTRE OS VERGALHÕES – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - SEM SAL. COMPARATIVO DOS TRÊS TIPOS DE VERGALHÕES UTILIZADOS (AÇO CA-50, BFPR E GFPR).	128
FIGURA 96 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TENSÃO DE ADERÊNCIA – COMPARATIVO ENTRE OS VERGALHÕES – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO - COM SAL. COMPARATIVO DOS TRÊS TIPOS DE VERGALHÕES UTILIZADOS (AÇO CA-50, BFPR E GFPR).	128
FIGURA 97 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO – COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS UTILIZADOS NAS MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO SEM SAL, CONSIDERANDO OS TRÊS TIPOS DE VERGALHÕES UTILIZADOS (AÇO CA-50, BFPR E GFPR).	129
FIGURA 98 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO – COMPARATIVO DAS RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS UTILIZADOS NAS MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM SAL, CONSIDERANDO OS TRÊS TIPOS DE VERGALHÕES UTILIZADOS (AÇO CA-50, BFPR E GFPR).	129
FIGURA 99 - QUADROS RADIOGRÁFICOS, OBTIDOS DO FILME RADIOGRÁFICO <i>IN-SITU</i> REALIZADO DURANTE O ENSAIO "PULL-OUT" EM UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO "PULL-OUT".	131
FIGURA 100 - QUADROS RADIOGRÁFICOS, OBTIDOS DO FILME RADIOGRÁFICO <i>IN-SITU</i> REALIZADO DURANTE O ENSAIO "PULL-OUT" EM UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA ENSAIOS "PULL-OUT" DEFINITIVOS, DENOMINADO "POT-AC-SS-01".	131
FIGURA 101 - QUADROS RADIOGRÁFICOS, OBTIDOS DO FILME RADIOGRÁFICO <i>IN-SITU</i> REALIZADO DURANTE O ENSAIO "PULL-OUT" EM UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA ENSAIOS "PULL-OUT" DEFINITIVOS, DENOMINADO "POT-AC-CS-01".....	131
FIGURA 102 – COMPARATIVO DA MEDIDA DE DESLOCAMENTO OBTIDO ATRAVÉS DO DISPOSITIVO MEDIDOR E POR RADIOGRAFIA <i>IN-SITU</i> DURANTE OS ENSAIOS "PULL-OUT" PARA O CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO DE AÇO CA-50 MOLDADO PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO "PULL-OUT".	132
FIGURA 103 - COMPARATIVO DA MEDIDA DE DESLOCAMENTO OBTIDA ATRAVÉS DO DISPOSITIVO MEDIDOR E POR QUADROS RADIOGRÁFICOS, OBTIDOS DO FILME RADIOGRÁFICO <i>IN-SITU</i> REALIZADO DURANTE O ENSAIO "PULL-OUT" EM UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA ENSAIOS "PULL-OUT" DEFINITIVOS, DENOMINADO "POT-AC-SS-01".	133

FIGURA 104 - COMPARATIVO DA MEDIDA DE DESLOCAMENTO OBTIDA ATRAVÉS DO DISPOSITIVO MEDIDOR E POR QUADROS RADIOGRÁFICOS, OBTIDOS DO FILME RADIOGRÁFICO <i>IN-SITU</i> REALIZADO DURANTE O ENSAIO "PULL-OUT" EM UM CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA ENSAIOS "PULL-OUT" DEFINITIVOS, DENOMINADO " POT-AC-CS-01"	133
FIGURA 105 – IMAGENS PROCESSADAS A PARTIR DA SUBTRAÇÃO DE TODOS OS QUADROS RADIOGRÁFICOS DA IMAGEM RADIOGRÁFICA NA QUAL O CORPO DE PROVA NÃO HAVIA SOFRIDO NENHUM ESFORÇO/DEFORMAÇÃO (PRIMEIRO QUADRO RADIOGRÁFICO). NESTAS IMAGENS É POSSÍVEL OBSERVAR REGIÕES DE MÁXIMA COMPRESSÃO NO CONCRETO, LOCAIS DE RUPTURA, RACHADURA E PERDA DA ADERÊNCIA. CORPO DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM VERGALHÃO DE AÇO CA-50, MOLDADO PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA PARA TESTES COM ENSAIO "PULL-OUT" (O MESMO DA FIGURA 99).	134

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - INDICADORES PARA VERGALHÕES REFORÇADOS COM FIBRAS.	34
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA FIBRA DE VIDRO (% DE MASSA).	34
TABELA 3 – PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS VERGALHÕES DE GFPR.	35
TABELA 4 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS VERGALHÕES DE GFPR.	35
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA FIBRA DE BASALTO (% DE MASSA).	35
TABELA 6 - PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS VERGALHÕES DE BFPR.	36
TABELA 7 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS VERGALHÕES DE BFPR.	36
TABELA 8 - TRAÇO DO CONCRETO EM MASSA.	49
TABELA 9 - FABRICANTES DOS VERGALHÕES.	63
TABELA 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA.	67
TABELA 11 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES PARA O SEGUNDO CONJUNTO DE CORPOS DE PROVA.	67
TABELA 12 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA DEFINITIVOS PARA OS ENSAIOS "PULL-OUT".	68
TABELA 13 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA DEFINITIVOS PARA OS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES.	68
TABELA 14 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA ENSAIADOS - ENSAIO "PULL-OUT".	78
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE RAIOS X UTILIZADA. FONTE: THERMOFISCHER SCIENTIFIC.	84
TABELA 16 – QUANTIDADE DE AMOSTRA PREPARADAS PARA O ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA.	89
TABELA 17 - TENSÕES DE RUPTURA ENCONTRADAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA OS VERGALHÕES DE AÇO CA-50.	98
TABELA 18 – CARGAS APLICADAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO – VERGALHÕES DE BFPR E GFPR.	99
TABELA 19 – DIMENSÕES RECOMENDADAS PARA MONTAGEM DA LUVA DE TESTE UTILIZADA NO ENSAIO DE TRAÇÃO DOS VERGALHÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS. FONTE: ISC (2014).	100
TABELA 20 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 – AMOSTRAS SEM SAL.	107
TABELA 21 – RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE AÇO CA-50 - AMOSTRAS COM SAL.	108
TABELA 22 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - AMOSTRAS SEM SAL.	108
TABELA 23 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - AMOSTRAS SEM SAL.	109
TABELA 24 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO SEM SAL – RESUMO.	116
TABELA 25 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE BFPR – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM SAL – RESUMO.	116
TABELA 26 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO SEM SAL.	117
TABELA 27 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM SAL.	117
TABELA 28 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO SEM SAL – RESUMO.	124
TABELA 29 - RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" - VERGALHÕES DE GFPR – CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM SAL – RESUMO.	124
TABELA 30 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO SEM SAL.	125
TABELA 31 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES - CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO COM SAL.	125
TABELA 32 - QUANTIDADES DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS COLETADAS REFERENTES AOS RESULTADOS DOS ENSAIOS "PULL-OUT" COM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO MOLDADOS COM VERGALHÕES DE AÇO CA-50.	130

1 INTRODUÇÃO

Em uma estrutura de edificação de concreto, os elementos que compõem o arranjo estrutural podem estar submetidos tanto à força de tração quanto à força de compressão. A resistência à tração do concreto é menor em comparação à sua resistência à compressão. Considerando esta limitação do concreto, faz-se necessária a introdução de vergalhões de aço para resistir aos esforços de tração que vierem a surgir no elemento estrutural (FANELLA, 2011).

Para que o concreto armado (concreto + vergalhão) desempenhe as suas funções de resistência, deve ser garantida a igualdade das deformações específicas dos vergalhões e do concreto que os envolve, quando submetidos à carga. Isso é também assegurado por meio da aderência que surge na região de contato entre eles (WRIGHT e MACGREGOR, 2012).

O uso de areias marinhas para utilização na construção civil já é realizada em vários países (CAVALVANTI e FREIRE, 2007). No Brasil, a extração de areia em áreas costeiras, planícies de inundação de rios e dunas, para utilização como agregado na construção civil já vem ocorrendo há bastante tempo, principalmente nas regiões metropolitanas, ocasionando a exaustão destas fontes de recursos minerais próximos a estes centros urbanos, como também sérios problemas ambientais (CAVALVANTI e FREIRE, 2007). Contudo, a salinidade presente nas areias marinhas ataca diretamente os vergalhões de aço nas estruturas de concreto armado, ocasionando problemas de corrosão (RIBEIRO, 2014), o que pode influenciar o comportamento mecânico esperado para uma estrutura projetada em concreto armado (BAUER, 2000) chegando, inclusive, a uma diminuição da aderência entre o aço e o concreto (FANG, LUNDGREN, et al., 2006). Considerando isso, a substituição dos vergalhões de aço por vergalhões de materiais compósitos (fibra de vidro, fibra de basalto, etc), se mostra como uma alternativa viável para utilização em concretos com presença de sais, pois devido às características dos materiais que os compõem, não desenvolvem a corrosão (DONG, WU e XU, 2016).

Uma das formas de avaliar, em laboratório, a aderência entre o concreto e o vergalhão, no concreto armado, é por meio do ensaio “*pull-out*” (WATSTEIN, 1941). A metodologia do ensaio “*pull-out*” considera que uma força de tração seja aplicada ao vergalhão com o objetivo de arrancá-lo do concreto. Com esta força de arrancamento é possível inferir a tensão de aderência entre o concreto e o vergalhão (NAWY, 2009). Outra informação fundamental, para avaliação do comportamento da aderência, é a forma como ocorreu o arrancamento do

vergalhão do concreto [deslizamento, ruptura dos vergalhões ou fendilhamento (abertura de pequenas fendas ou rasgos)].

Neste trabalho foram realizados ensaios “*pull-out*” em corpos de prova de concreto armado com vergalhões de três materiais diferentes: i) vergalhões de Aço CA50; vergalhões de fibra de basalto e; iii) vergalhões de fibra de vidro. Para todos os tipos de vergalhões citados anteriormente, foram ensaiados dois (2) corpos de prova com sal (NaCl) inserido na mistura do concreto e dois corpos de prova sem sal. Para avaliar o comportamento da aderência dos três tipos de vergalhões ao longo do tempo, os ensaios foram realizados, em 9, 31 e 45 semanas após a moldagem. Com estes resultados foi possível avaliar se a aderência entre os vergalhões e o concreto, ao longo do tempo, foi alterada em função da presença ou não de sal. A introdução do cloreto de sódio diretamente na mistura de concreto tem como objetivo simular a utilização de areias marinhas.

Ainda, durante os ensaios “*pull-out*” também foi testado o uso da técnica radiográfica *in-situ*. Através da análise das imagens radiográficas obtidas, em alguns casos, foi possível verificar a medida do deslocamento relativo entre os materiais (concreto e vergalhão) e, também, observar os locais de maior compressão no concreto antes da ruptura.

Ensaio de tração, medidas por difração de raios X e medidas de microscopia eletrônica de varredura (imagem e espectroscopia) também foram realizados nos vergalhões utilizados neste trabalho, com o objetivo de verificar a conformidade dos parâmetros físicos, químicos e mecânicos destes materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aderência entre vergalhões e concreto

A aderência entre o concreto e vergalhões (aço ou materiais compósitos) é o mecanismo pelo qual se fundamenta o funcionamento de uma estrutura de concreto armado, permitindo assim que estes materiais trabalhem em conjunto quando solicitados.

Considerando isto, supõe-se que o alongamento do vergalhão e o concreto tenham a mesma deformação. O alongamento à tração do concreto é relativamente pequeno sem que ocorra fissuração, logo na presença de maiores esforços de tração o concreto começa o processo de fissuração, assim os vergalhões devem então absorver os esforços de tração. Desta forma, a aderência desenvolvida deve ser de tal forma que a abertura de fissuras na estrutura permaneça pequena (LEONHARDT e MONNING, 2008).

Para um vergalhão de aço imerso em uma peça de concreto, como a indicada na Figura 1, a tensão média de aderência é dada pela equação (PINHEIRO, 2007):

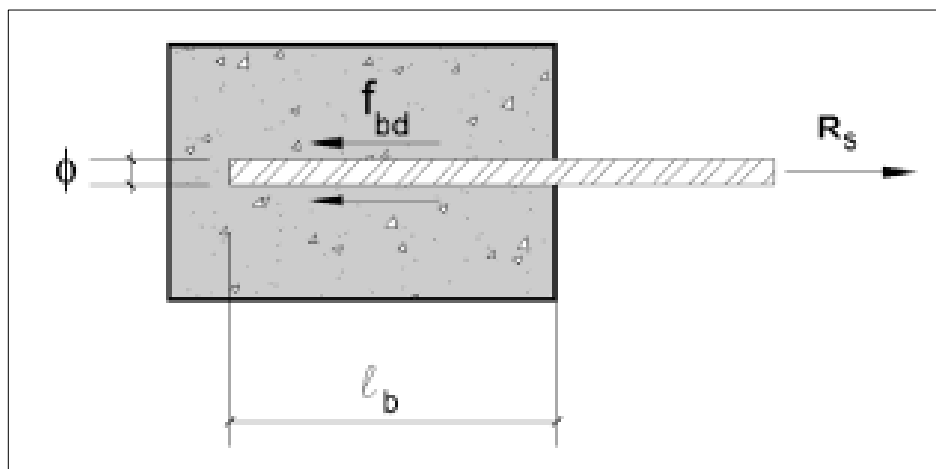


Figura 1 - Tensão de aderência. Fonte: Pinheiro (2007).

$$\tau_b = \frac{R_s}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} \quad (1)$$

Onde:

τ_b : Tensão média de aderência (Mpa)

R_s : Força atuante no vergalhão (N)

ϕ : Diâmetro do vergalhão (mm)

l_b : Comprimento de ancoragem (mm)

A exposição dos estudos sobre o comportamento da aderência entre vergalhões e concreto é apresentada nas seções a seguir, divididas por temas de relevância para realização deste trabalho. Na seção 2.1.1 é apresentada a classificação dos tipos de aderência e como ocorrem as rupturas. Na sequência, na seção 2.1.2 são mostrados os estudos sobre os fatores que influenciam na aderência entre vergalhão e concreto. Em seguida, na seção 2.1.3 são descritos os tipos de ensaios existentes para determinação da resistência de aderência entre vergalhões e concreto, enfatizando o ensaio “*pull-out*”.

2.1.1 Tipos de aderência e formas de ruptura

Segundo (NAWY, 2009), a resistência devida à aderência é resultado de vários fatores. Entre eles, pode-se destacar: i) a adesão entre o concreto e o vergalhão; ii) a pressão do concreto endurecido contra o vergalhão devido ao encolhimento de secagem do concreto e; iii) o atrito na interface entre o vergalhão e o concreto surgido após pequenos deslocamentos.

Basicamente, a aderência (Figura 1) é classificada em três diferentes tipos (LEONHARDT e MONNING, 2008): i) Aderência por Adesão: É uma ligação que ocorre na superfície de contato entre o vergalhão e o concreto proveniente da adesão ou forças capilares. Este efeito está diretamente relacionado com a rugosidade e limpeza da superfície do vergalhão. Este tipo de aderência, sendo considerado isoladamente, não é capaz de proporcionar uma forte ligação entre o concreto e o vergalhão, pois é facilmente destruído caso ocorra pequenos deslocamentos; ii) Aderência por atrito: Após a ruptura da aderência por adesão, e com a ocorrência de pequenos deslocamentos relativos surge, no contato entre o concreto e o vergalhão, uma resistência de atrito devido à pressões transversais aos vergalhões. Estas pressões transversais são ocasionadas pela compressão transversal da carga aplicada e pela expansão (ou retração) do concreto e; iii) Aderência mecânica: Na região entre as ranhuras dos vergalhões e o concreto formam-se volumes que são solicitados ao corte antes que o vergalhão consiga se deslocar no concreto. Este tipo de ligação é o que proporciona maior efetividade e confiabilidade entre os tipos de aderência, permitindo que se aproveite melhor a resistência que o vergalhão pode oferecer. A resistência por aderência mecânica varia em função do tipo e tamanho de ranhura, que é diferente entre os tipos de vergalhões existentes.

Apesar da distinção entre aderência por atrito e aderência mecânica, pois efetivamente estas resistências ocorrem por razões diferentes, cabe ressaltar que aderência por atrito também é uma aderência mecânica do ponto de vista físico do processo.

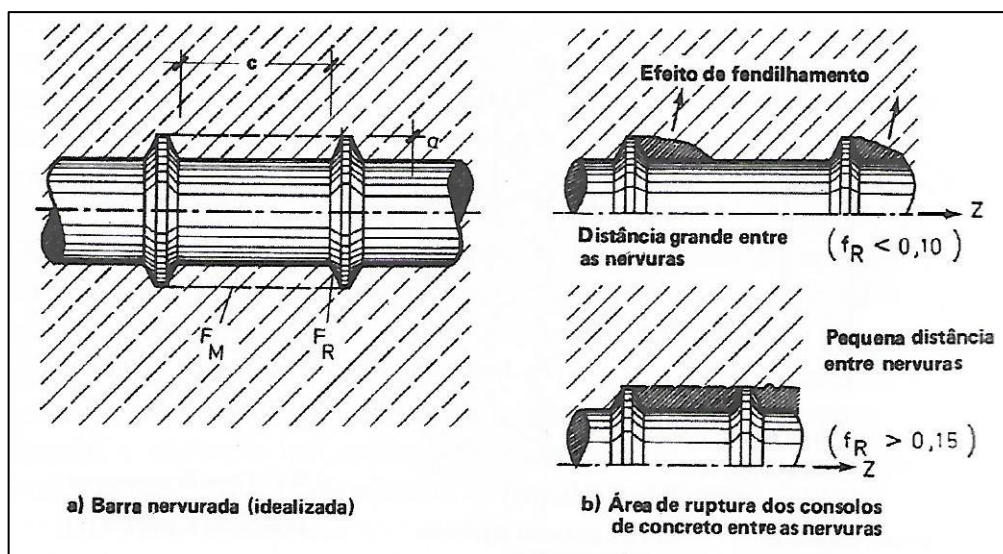


Figura 2 - Aderência mecânica. Fonte: Leonhardt e Monning (2008).

Ainda, de acordo com Tavares (2012) a tensão de aderência que se desenvolve ao longo do contato entre o concreto e o vergalhão pode ter a sua eficiência avaliada pela análise do deslocamento relativo ocorrido entre dos dois materiais, até certo limite, pois acima de certos valores, o deslocamento é dado pela perda da aderência. Considerando isto, as principais formas de perda de aderência são: i) Ruptura por deslizamento: Ocorre quando a resistência à compressão do concreto é atingida e rompem-se os consoles existentes devido às ranhuras do vergalhão e; ii) Ruptura por fendilhamento: Ocorre numa região adjacente ao vergalhão, devido ao aumento das tensões que superam a capacidade resistente do concreto.

2.1.2 Fatores que influenciam na aderência

A razão entre a força atuante no vergalhão e a superfície de contato com o concreto define a tensão de aderência. Alguns fatores podem alterar o comportamento da aderência e influenciar na sua quantificação. Vários destes fatores foram citados por França (2004) e Tavares (2012), dentre os quais se podem se destacar os seguintes: i) Resistência mecânica do concreto: Quanto maior a resistência mecânica do concreto, maiores esforços poderão ser suportados no contato entre os materiais, resultando em maior aderência; ii) Diâmetro do vergalhão: O diâmetro tem relação direta com a área superficial de aderência. Trabalhos experimentais realizados por Ducatti (1993) mostram que a tensão máxima de aderência diminui com o aumento do diâmetro do vergalhão; iii) Confinamento do vergalhão no concreto: Isto influencia o cone de fissuração. Desta forma, quanto maior o volume de

concreto ao redor do vergalhão, maior será a tensão de aderência, devido ao maior confinamento e; iv) Comprimento de ancoragem: A tensão de aderência cresce com o comprimento de ancoragem, porém este crescimento não é linear, pois a tensão de aderência é variável ao longo do comprimento do vergalhão.

2.1.3 Ensaios de aderência

A tensão de aderência entre o vergalhão e o concreto pode ser obtida por meio de vários ensaios, entre os quais podemos citar os seguintes (TAVARES, 2012):

- Ensaio de Arrancamento Direto: “*pull-out test*” (POT);
- Ensaio de Arrancamento excêntrico (“*cantilever bond test*”),
- Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial – “*ring pull-out test*”;
- Ensaios de Flexão – “*beam test* (Bt)”;
- Ensaio de Extremo de Viga – “*beam end test*”;
- Ensaio de Aderência do Tipo “*push-out test*”;
- Ensaios das Quatro Barras;
- Ensaio de Tração Direta.

O ensaio “*pull-out*” consiste, basicamente, em arrancar um vergalhão de um corpo de prova de concreto armado que está posicionado em uma máquina de tração. As extremidades do vergalhão ficam para fora do concreto. O que se mede é a força aplicada em uma das extremidades e o deslocamento na extremidade oposta. Por sua simplicidade, este ensaio é um dos ensaios mais tradicionais para avaliação da aderência entre vergalhões e o concreto. O procedimento para realizar o ensaio “*pull-out*” em laboratório, assim como a montagem de corpos de prova, é padronizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM, 1991). A Figura 3 abaixo mostra a montagem experimental para realização dos ensaios “*pull-out*”.

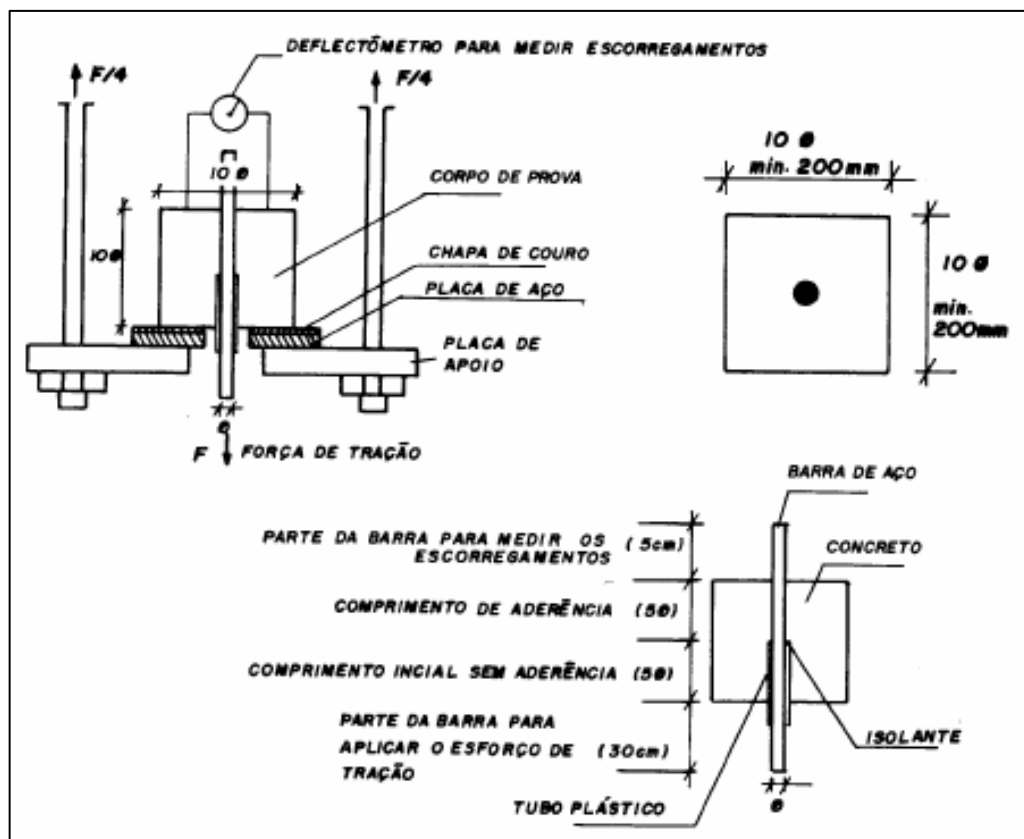


Figura 3 – Configuração geral do ensaio "Pull-out". Fonte RILEM (1973).

Vários estudos sobre aderência entre vergalhões e concreto já foram realizados utilizando a metodologia do ensaio “pull-out” (FRANÇA, 2004; FANG et al., 2006; YALCINER et al., 2012; DONG et al., 2016). No estudo de França (2004), sobre a análise do comportamento da aderência entre vergalhões e concreto com resíduos de borracha, o ensaio “pull-out” foi uma das metodologias utilizadas. Na avaliação do comportamento da aderência de vergalhões com corrosão e concreto, Fang et al. (2006) também fez uso do referido ensaio. Este ensaio também foi utilizado por Yalciner et al. (2012) em seu estudo experimental sobre a resistência de aderência entre vergalhões e concreto em função do cobrimento (região de ancoragem) do concreto, da resistência e do grau de corrosão do vergalhão. Para avaliar a durabilidade da aderência entre concreto com sal e vergalhões de aço ou de materiais compósitos, Dong et al. (2016) também utilizou os resultados de ensaios “pull-out”.

2.2 Influência da presença de cloretos no concreto armado

As areias extraídas de regiões oceânicas são basicamente compostas de quartzo e feldspato. Logo, por sua origem mineralógica, os sais presentes nestas areias não são oriundos das mesmas, mas tão somente da água do mar. Quando estas areias passam por processo de

secagem, o sal ainda restante permanece exclusivamente no exterior dos grãos de areia e cristalizam-se nos vazios entre os grãos, o que pode ser facilmente observado por microscópio (CAVALVANTI e FREIRE, 2007).

O cloreto de sódio é, entre os sais dissolvidos nas águas oceânicas, o mais predominante, com uma concentração em massa de 88% (MCCOY, 1996). A presença de sais na mistura de concreto armado pode influenciar na sua durabilidade, principalmente quando se inicia o processo de corrosão dos vergalhões.

A presença de íons cloreto em peças de estruturas de concreto armado é uma das principais causas do processo de corrosão dos vergalhões, atuando na fase de iniciação, quando ocorre o rompimento pontual do filme passivador, agindo diretamente na aceleração do processo corrosivo (RIBEIRO, 2014).

Como forma de prevenir tais danos, alguns limites são recomendados para a quantidade de íons cloreto presentes nos materiais que serão utilizados na mistura do concreto. De acordo com (BAUER, 2000), os cloretos tem efeitos deletérios em peças de concreto, mas ocasionalmente, podem ser adicionados como acelerador do tempo de pega, porém o ataque que estes íons provocam nos vergalhões, ocasionando corrosão, praticamente inviabilizam a utilização de cloretos na mistura de concreto armado. Desta forma, não se admite teores de cloreto de sódio superiores a 0,08% do peso da areia destinada a mistura do concreto.

De acordo com a norma ABNT NBR15900-1 (2009), o teor de cloreto na água não deve ser superior a 1.000 mg/l para areias utilizadas em concreto armado.

2.2.1 Variação da resistência à compressão do concreto na presença de cloretos

Alguns estudos indicam que a presença de cloretos nos agregados tem influência na resistência à compressão do concreto, cujos valores são superiores ao concreto sem adição de sal em sua mistura, principalmente nas datas iniciais de cura. (MCCOY, 1996) Após os 28 dias de cura, a resistência do concreto na presença de sal tende a ser menor.

No trabalho realizado por Wegian (2010) vários corpos de prova foram preparados variando as condições da água na mistura (água do mar ou água potável) e também as condições de cura da mistura de concreto (corpos de prova imersos em água do mar ou água potável). Foi possível observar que, com até 14 dias, o concreto misturado e curado com água do mar apresentou maior resistência do que concreto misturado e curado com água potável.

Após 28 dias a resistência do concreto misturado e curado com água potável aumentou gradativamente até 90 dias.

De forma semelhante, Olutoge & Amusan (2014) realizaram ensaios de compressão em corpos de prova de concreto que foram submetidos a diferentes situações de mistura e cura (novamente, em água do mar e água potável, tanto para mistura como para cura). Os resultados dos ensaios mostraram que novamente, em até 90 dias, a resistência à compressão do concreto é maior para aqueles misturados com sal.

Os resultados obtidos por Nagabhushana et al. (2017) indicam também um aumento na resistência à compressão dos corpos de prova utilizando níveis de até 25 mg/l de concentração de cloreto de sódio na mistura de concreto. Para níveis acima de 45 mg/l de concentração de cloreto de sódio na água de mistura, a resistência à compressão dos corpos de prova mostrou-se menor quando comparada com os corpos de prova utilizando mistura de concreto com água potável.

Pelos estudos citados anteriormente, observa-se que corpos de prova utilizando misturas de concreto com cloreto de sódio apresentam maior resistência (principalmente nas idades iniciais) quando comparado com corpos de prova utilizando misturas de concreto sem cloreto de sódio. Contudo, segundo Wegian (2010) existem outras variáveis que também podem influenciar na resistência do concreto, tais como a relação água /cimento, o tipo de cimento e o tipo de agregado.

2.2.2 Corrosão de vergalhões de aço por cloretos

O conceito de corrosão é estabelecido por diversos autores. De acordo com Helene (1986), entende-se corrosão como uma interação destrutiva com o ambiente, podendo ser uma reação química ou eletroquímica.

De forma semelhante, Gentil (1996) define corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica no meio ambiente no qual está inserido, podendo ocorrer com ou sem a ação de esforços mecânicos.

Em conformidade com a definição de Torres (2011), especificamente para o caso dos vergalhões de concreto armado, a corrosão é definida como uma reação eletroquímica cuja principal consequência é a deterioração do vergalhão, acarretando na perda de sua funcionalidade.

Segundo Ribeiro (2014) o processo de corrosão é um fenômeno complexo e pode ser entendido como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado

de ações danosas de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não, às ações físicas ou mecânicas de deterioração. No caso específico de vergalhões em concreto, os efeitos se manifestam na forma de manchas superficiais, seguidas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção resistente dos vergalhões e perda da aderência. Ou seja, leva à um comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo.

No caso específico de estruturas de concreto armado, cujo ambiente é altamente alcalino, forma-se uma camada protetora em torno do vergalhão, de caráter passivo. Esta passivação no vergalhão refere-se à perda de reatividade química do metal (RIBEIRO, 2014).

O processo de corrosão dos vergalhões em concreto somente ocorrerá com a destruição desta camada passivadora. Esta destruição pode ocorrer de modo generalizado, devido as seguintes causas (FUSCO, 2012):

- Redução do PH para um nível inferior a 9, principalmente por efeito da carbonatação da camada de cobrimento do vergalhão;
- Presença de íons cloreto (Cl^-) ou de poluição atmosférica acima de um valor crítico, conforme apresentado na seção 2.1;
- Perda de cálcio da massa de concreto em virtude da percolação de água através de seu interior (lixiviação).

O processo de corrosão em estruturas de concreto armado pode ser dividido em duas fases: iniciação e propagação Tuutti (1982). A fase de iniciação ocorre quando agentes agressivos capazes de destruir a camada passivadora do aço conseguem atravessar o cobrimento do concreto e alcançam o vergalhão em quantidade suficiente para causar a sua despassivação. A fase de propagação ocorre após a despassivação do vergalhão. Fatores como umidade e temperatura são relevantes no processo de corrosão, pois controlam a evaporação e a condensação da água no interior do concreto, atuando como eletrólito durante o processo eletroquímico de corrosão (RIBEIRO, 2014).

Para o desenvolvimento da corrosão do vergalhão no interior da estrutura de concreto, é necessário que junto a elas haja umidade e oxigênio, porque o meio em que estão inseridos é alcalino (FUSCO, 2012). A Figura 4 mostra, esquematicamente, o processo de corrosão do vergalhão dentro do concreto.

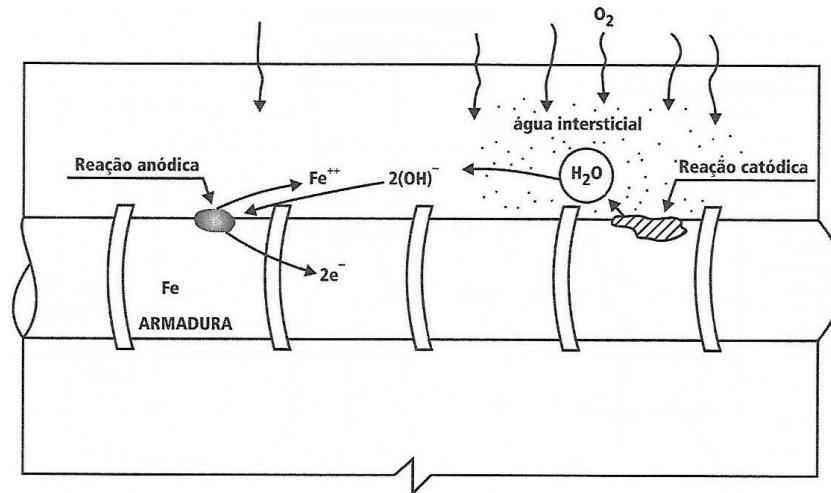


Figura 4 - Processo de corrosão dentro do concreto. Fonte: Fusco (2012).

Especificamente na situação de corrosão por cloretos, estes podem ser adicionados involuntariamente a partir de aditivos aceleradores do início de endurecimento do concreto (acelerador de pega), agregados e água contaminada. Dentre os agentes agressivos, o cloreto de sódio é o mais comum (RIBEIRO, 2014).

Os íons cloreto tem a capacidade de destruir a camada protetora que reveste os vergalhões de aço (camada de passivação) dentro do concreto, iniciando-se assim o início da reação anódica de solubilização do Fe^{2+} . Os íons cloreto funcionam durante a reação como catalizadores, mas não são consumidos durante a reação, agravando-se cada vez mais a intensidade da corrosão (FUSCO, 2012). A Figura 5 mostra, esquematicamente, o processo de corrosão dos vergalhões por cloretos.

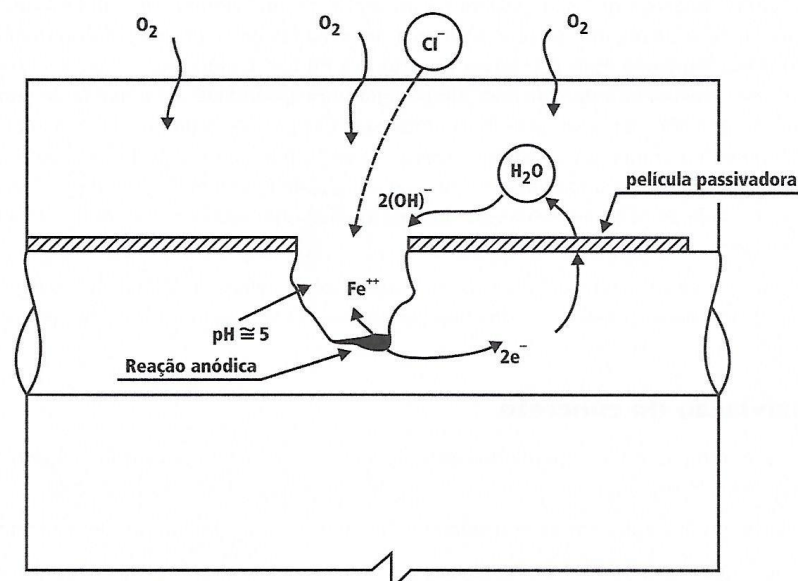


Figura 5 - Corrosão por íons cloreto. Fonte: Fusco (2012).

O efeito agressivo do cloreto de sódio na corrosão se deve ao fato de que este sal é um forte eletrólito e, conseqüentemente, um bom condutor de eletricidade, que é fundamental no processo de corrosão. Particularmente no caso do ferro em água saturada de ar, em temperatura ambiente, pode se observar que a taxa de corrosão inicialmente cresce com a concentração de cloreto de sódio, atingindo o máximo quando a concentração de cloreto de sódio é de 3%, a partir disso, a taxa de corrosão decresce até que a concentração de cloreto de sódio atinja um teor de 26% (RIBEIRO, 2014), conforme apresentado na Figura 6.

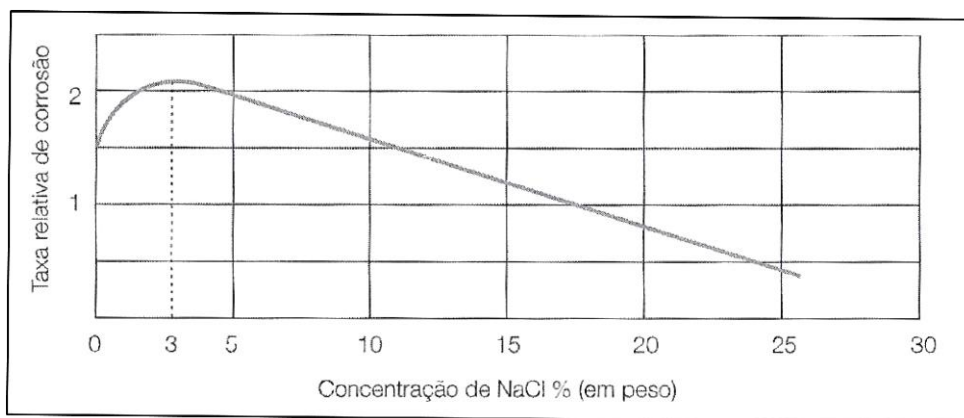


Figura 6 - Efeito da concentração de cloreto de sódio na taxa de corrosão. Fonte: Ribeiro (2014).

2.2.3 Variação da aderência entre vergalhão e concreto na presença de cloretos

Os efeitos da presença de cloretos sobre a resistência à compressão do concreto e sobre os vergalhões de aço foram expostos respectivamente nas seções anteriores (2.2.1 e 2.2.2). Como já relatado, a presença de sal (cloreto de sódio), sob certas condições, altera a resistência à compressão do concreto e provoca a corrosão dos vergalhões. Desta forma, como a aderência refere-se ao comportamento conjunto do vergalhão e do concreto, então é esperado que a resistência de aderência também seja influenciada com a presença de cloretos no concreto.

Vários estudos já foram realizados sobre o comportamento da aderência entre vergalhões e concreto em circunstâncias de ambiente salino e corrosão dos vergalhões. Nos trabalhos de Fang *et al.* (2004, 2006) e Lundgren (2007) a aderência entre o concreto e vergalhões de aço foi avaliada por meio de ensaios “*pull-out*” em corpos de prova cujo nível de corrosão variava entre 0% e 9%. Nos trabalhos Fang *et al.* (2006) e Lundgren (2007) o nível de corrosão foi controlado utilizando a técnica de corrosão eletrolítica. Através dos

resultados pode-se concluir que a aderência diminui com o aumento do nível de corrosão. A resistência de aderência entre o concreto e o vergalhão para o corpo de prova com nível de corrosão de 9% foi de apenas um terço quando comparada à aderência dos corpos de prova que não apresentaram corrosão. Contudo, para níveis de corrosão baixos (estados iniciais de corrosão de até 4%), os autores mostram que a aderência aumenta à medida que o nível de corrosão aumenta. Ainda no trabalho de Lundgren (2007), os efeitos da corrosão sobre a aderência foram também estudados teoricamente, através de modelagem pelo método de elementos finitos. As principais conclusões foram que, para vergalhões com nervuras, a corrosão em pequenos níveis (até 215 μm de penetração de corrosão) pode aumentar a capacidade de aderência. Contudo, níveis acima de tal valor, a aderência entre o vergalhão e o concreto caem abruptamente.

De modo semelhante Graeff *et al.* (2007). Os corpos de prova moldados e submetidos a um processo de corrosão acelerada, através da impressão de uma corrente constante também foram utilizados para o estudo dos efeitos da corrosão na aderência entre os vergalhões de aço e o concreto, por meio de ensaios “*pull-out*”. Pode-se concluir que para valores pequenos de grau de corrosão (2 e 5%) houve um aumento na tensão de aderência, possivelmente decorrente da deposição de óxidos na região em torno do vergalhão, o que incrementa o atrito superficial. Em contrapartida, para graus de corrosão elevados ($> 10\%$), houve uma redução na tensão de aderência.

Ainda, o efeito da corrosão sobre a resistência de aderência também foi avaliado por Yalciner *et al.* (2012). Através dos resultados de ensaios “*pull-out*” em corpos de provas com vergalhões de aço em diferentes níveis de corrosão, diferentes traços de concreto com diferentes profundidades de cobertura de concreto (ancoragem), pode-se concluir que corpos de prova com valores altos de resistência à compressão e com corrosão mostraram um maior percentual de perda de aderência devido a ruptura do concreto durante os ensaios *pull-out*.

2.3 Vergalhões de materiais compósitos

Um material compósito é definido como a combinação de dois ou mais materiais distintos para alcançar um novo material cujo desempenho geral é maior do que os componentes individuais (AMMAR, 2014).

No caso específico dos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras (FRP), estes são constituídos basicamente por dois componentes: i) As fibras, que são os elementos que suportam as cargas e ii) a matriz, que garante a coesão das fibras, a retransmissão das

cargas aplicadas às fibras e a proteção das fibras do ambiente externo (NACER, 2006). A Figura 7 apresenta, esquema como é constituído uma lâmina de FRP.

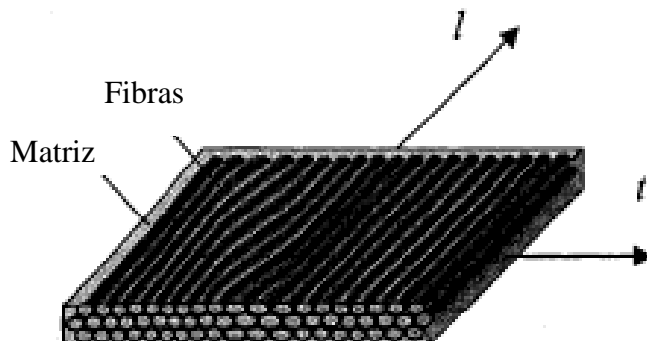


Figura 7 - Lâmina de FRP. Fonte: Nacer (2006).

Os estudos para obtenção de materiais resistentes, rígidos e leves para aplicações estruturais diversas, desde aeronaves, naves espaciais, submarinos, navios, componentes de robôs, dispositivos protéticos, estruturas civis, automóveis e caminhões, sempre focaram na utilização de materiais reforçados com fibras (HYER, 2009).

Especificamente, para o setor da construção civil, além dos requisitos gerais de capacidade de suporte e operação adequada, as estruturas de concreto armado de edifícios também são exigidas para satisfazer algumas exigências específicas, tais como resistência à corrosão, transparência eletromagnética (não afetados eletromagneticamente) e resistência dielétrica (PLEVKOV, *et al.*, 2017). Além disso, os vergalhões de FRP possuem maior resistência à tração que vergalhões de aço, chegando a alguns casos ser três vezes superior e também são mais leves em comparação com os vergalhões de aço (Composite Group Chelyabinsk).

Uma maneira para atender aos requisitos citados anteriormente seria a utilização de vergalhões de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra (vergalhões de FRP). Os vergalhões FRP são uma alternativa ao uso de vergalhões de aço em estruturas de concreto armado, pois apresentam algumas vantagens em relação ao aço, tais como, a resistência à corrosão, baixa condutividade elétrica, maior resistência à tração por unidade de massa e menor peso específico (LAU e PAM, 2010; KARA, *et al.*, 2015).

Estas características tornaram os vergalhões FRP mais atraentes para o campo da engenharia civil, devido à sua capacidade de atender aos requisitos funcionais, juntamente com as rigorosas exigências estruturais. A simplicidade associada à aplicação destes materiais

os torna muito atrativos em aplicações de engenharia civil, especialmente quando existem restrições de peso, espaço ou tempo (KARBHARI, 2007).

Vergalhões FRP utilizando fibras de vidro, carbono e aramida (Poliâmidas aromáticas) têm sido amplamente utilizados na construção civil nas últimas décadas. Recentemente, os vergalhões reforçados com fibra de basalto (BFRP) surgiram como uma alternativa promissora aos vergalhões reforçados com fibra de vidro (GFRP) (AMMAR, 2014).

Como já mencionado na introdução, neste trabalho utilizamos os vergalhões de GFRP e vergalhões de BFRP no estudo da aderência entre estes vergalhões, comparativamente à aderência entre vergalhões de aço e o concreto. A aderência entre vergalhões de materiais compósitos e o concreto já foi estudada em outros trabalhos, como descreveremos a seguir.

No trabalho realizado por Yan *et al.* (2016) foi analisado o comportamento de aderência entre vergalhões de materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro e o concreto por meio de um banco de dados com 682 testes de ensaio “*pull-out*”. Os autores concluíram que existe uma perda de aderência para condições ambientais tais como, gelo e degelo, variação de umidade, soluções alcalinas e altas temperaturas. Ainda, os autores ressaltam que a influência destas condições ambientais, na aderência entre o vergalhão reforçado com fibra de vidro e o concreto, precisa ser investigada mais profundamente.

Dong *et al.* (2015) investigou a durabilidade da aderência entre o concreto e vergalhões de aço protegidos com uma camada de fibra de basalto. A aderência foi avaliada, comparativamente, por meio de ensaios “*pull-out*”, sob condições de presença de salinidade e sem salinidade na mistura do concreto. Testes com vergalhões de aço sem proteção de fibra de basalto também foram realizados para comparação. Os testes foram realizados em 30, 60 e 90 dias após a moldagem dos corpos de prova. Pelos resultados obtidos nos ensaios, após os 90 dias de moldagem, a resistência de aderência diminuiu para os corpos de prova com vergalhões de aço comum. Os vergalhões de aço protegidos com uma camada de fibra de basalto tiveram excelente comportamento de aderência, tanto na condição de utilização de areia com salinidade, quanto com areia sem sal.

A norma ISC (2014) estabelece requisitos mínimos para a fabricação dos vergalhões reforçados com fibras. Estes valores são apresentados na Tabela 1.

Indicador	Valor
Resistência de aderência (MPa)	12
Redução do limite máximo de resistência após sua exposição ao meio alcalino (%)	25
Resistência de aderência após exposição ao meio alcalino (MPa)	10
Temperatura máxima de utilização (°C)	60

Tabela 1 - Indicadores para vergalhões reforçados com fibras.

Nas seções 2.3.1 e 2.3.2 a seguir serão apresentadas de forma mais detalhada as propriedades dos vergalhões de GFRP e BFPR.

2.3.1 Vergalhão reforçado com fibra de vidro

Vergalhões de GFRP são fabricados por um processo de pultrusão com cerca de 80% de fibra de vidro na composição. Estes vergalhões estão disponíveis com diâmetro externo de 4 a 20 mm com relevo de distribuição (ranhuras) em espiral. Estes materiais tem boa resistência física, química e possuem características comparadas com os vergalhões de aço. O vergalhão de GFRP é cerca de quatro vezes mais leve do que o vergalhão de aço, possuindo características de resistência semelhantes, o que reduz significativamente os custos de transporte para embarque, carga e descarga, assim como despesas operacionais no canteiro de obras (KUMAR, *et al.*, 2016). Este material de construção é composto de fibra de vidro e resinas termoendurecíveis. O primeiro garante alta resistência aos vergalhões, enquanto o segundo funciona como o aglutinante das fibras (Composite Group Chelyabinsk).

As fibras de vidro contidas nos vergalhões de GFPR possuem a composição química em percentual de massa, conforme apresentada na Tabela 1 (WEI e CAO, *et al.*, 2010).

SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Fe_xO_y	TiO₂	B₂O₃
52,1 - 53,4	13,5 - 14,5	18,5 - 19,5	3,6 - 4,4	0 - 1	0 - 0,6	0 - 0,5	8,0 - 9,0

Tabela 2 - Composição química da fibra de vidro (% de massa).

Segundo dados do fabricante dos vergalhões de GFPR (Composite Group Chelyabinsk), fornecedor do material para utilização nos ensaios deste trabalho, estes vergalhões são constituídos basicamente por fibra de vidro e polímeros a base de resina epóxi. As principais características físicas e mecânicas deste material são apresentadas na Tabela 2:

Resistência à Tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Densidade (kg/m^3)
1000 - 1300	50	0,9 – 1,2	1900

Tabela 3 – Parâmetros físicos e mecânicos dos vergalhões de GFPR.

A norma ISC (2014) estabelece os parâmetros mínimos para fabricação dos vergalhões GFPR (Tabela 4).

Item	Valor
Resistência à tração (MPa)	800
Módulo de elasticidade (GPa)	50
Resistência à compressão (MPa)	300

Tabela 4 - Valores de referência para os vergalhões de GFPR.

2.3.2 Vergalhão reforçado com fibra de basalto

O basalto é um mineral de origem vulcânica, escuro ou negro. Suas rochas são pesadas, tenazes e resistentes. É a rocha mais abundante da superfície terrestre. A composição do basalto é variável e nem sempre útil para a produção de fibras, devido à presença ou ausência de alguns elementos (LAPENA e MARINUCCI, *et al.*, 2012).

O vergalhão reforçado com fibra de basalto é um tipo de vergalhão para utilização em construção civil. É um material compósito de matriz polimérica. A base deste vergalhão é o basalto, uma substância duradoura de origem vulcânica. No processo de fabricação, o basalto é aquecido a uma temperatura de cerca de 1400 °C. Esta substância aquecida então é esticada produzindo fibras, então neste momento o material polimérico é aplicado como uma substância de ligação (Composite Group Chelyabinsk).

As fibras de basalto contidas nos vergalhões de BFPR possuem a composição química em percentual de massa, conforme apresentada na Tabela 5 (WEI e CAO, *et al.*, 2010).

SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Fe_xO_y	TiO₂	Na₂O
48,4	14,7	7,7	4,7	1,6	15,3	3,8	3,0

Tabela 5 - Composição química da fibra de basalto (% de massa).

Conforme já citado anteriormente, a respeito das vantagens dos vergalhões de FPR sobre os vergalhões de aço, podem-se destacar novamente as seguintes características dos vergalhões de BFPR, conforme relacionado pelo fabricante de tais materiais (Composite Group Chelyabinsk) (Tabela 6): i) Possui resistência à tração cerca de 2 vezes e meia maior que a do vergalhão de aço; ii) Possui massa específica de cerca 5 vezes menor do que o vergalhão de aço, o que reduz o peso estrutural; iii) Menos peso e a possibilidade de entregá-lo em bobinas minimizam as operações de manuseio e montagem.

Resistência à Tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Densidade (kg/m^3)
1000 - 1100	50 - 70	0,35 – 2,0	1900

Tabela 6 - Parâmetros físicos e mecânicos dos vergalhões de BFPR.

A norma ISC (2014) estabelece os requisitos mínimos para a fabricação dos BFPR (Tabela 7).

Item	Valor
Resistência à tração (MPa)	800
Módulo de elasticidade (GPa)	50
Resistência à compressão (Mpa)	300

Tabela 7 - Valores de referência para os vergalhões de BFPR.

A aplicação de vergalhões BFRP no reforço de estruturas de concreto parece ser promissora. No entanto, a ampla aceitação de seu uso exige uma investigação abrangente de seu desempenho estrutural e mecânico para garantir sua adequação às aplicações de engenharia civil (AMMAR, 2014).

2.4 Radiografia

Entre os anos de 1870 e 1880, diferentes pesquisadores ao redor do mundo estavam investigando a condução de raios catódicos, ou elétrons, por meio de um grande tubo de vidro, parcialmente sob vácuo, conhecido como tubo de Crookes (Crookes, 1879). Em 8 de novembro de 1895, o físico Wilhelm Roentgen (Röntgen, 1896) estava trabalhando em seu laboratório de Física na Universidade Würzburg, na Alemanha. Ele havia escurecido seu

laboratório e fechado completamente seu tubo de Crookes com papel fotográfico preto para visualizar melhor os efeitos dos raios catódicos no tubo. Uma placa revestida com platinocianeto de bário, um material fluorescente, estava depositada por acaso sobre uma mesa a vários metros do tubo de Crookes. Nenhuma luz visível escapava do tubo de Crookes devido ao papel preto que a recobria, mas Roentgen observou que o platinocianeto de bário brilhava. A intensidade do brilho aumentava quando a placa era aproximada do tubo; conseqüentemente havia poucas dúvidas sobre a origem do estímulo do brilho. Este brilho é chamado de fluorescência. Roentgen reconheceu o valor de sua descoberta para a medicina. Produziu e publicou a primeira imagem de raios X médica, no início de 1896 (Röntgen, 1896; Bushong, 2010).

2.4.1 Produção de raios X por fontes convencionais

Os raios X são produzidos quando elétrons em alta velocidade (alta energia) atingem alvos metálicos (anodo). A energia cinética dos elétrons é transformada em energia eletromagnética (luz, onda eletromagnética). A função do equipamento de raios X é prover um fluxo controlado suficientemente intenso de elétrons para produzir um feixe de raios X apropriado para gerar uma boa imagem. Os três componentes principais de um equipamento de raios X são: i) Tubo de raios X; ii) painel de controle e iii) gerador de alta tensão. O tubo de raios X (Figura 8) está contido em uma caixa de proteção e, portanto, é inacessível. Seus componentes são considerados separadamente, mas deve estar claro que existem duas partes principais: o catodo e o anodo (BUSHONG, 2010).

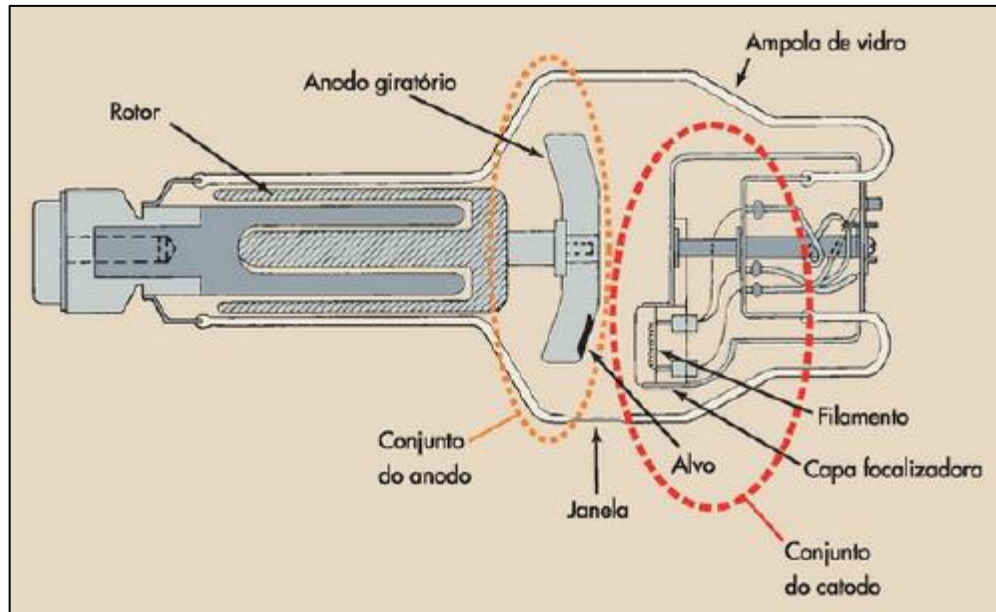


Figura 8 - Diagrama esquemático de um tubo de raios X com um anodo giratório. Fonte: Bushong (2010).

As interações do feixe de elétrons que são acelerados do catodo para o alvo metálico (anodo) do tubo de raios X produzem dois tipos de radiação: característica e de freamento (bremsstrahlung).

Radiação característica (Figura 9) ocorre quando a interação é suficiente para ionizar os átomos do alvo por meio da remoção de um elétron de um nível de energia mais interno (mais comumente, níveis K, L e M). Quando um elétron de um nível de energia mais externo preenche a vacância dos níveis de energia mais internos, um fóton (partícula de luz) de raios X é emitido. Esse fóton tem energia igual à diferença entre os níveis de energia da transição eletrônica envolvida, obedecendo ao princípio de exclusão de Pauli. Esse tipo de radiação é chamada de característica, porque depende do elemento constituinte do alvo. Como, para cada elemento, a energia de ligação dos elétrons ligados é diferente, a energia dos raios X característicos produzidos nos vários elementos também é distinta. A energia efetiva dos raios X característicos aumenta com o aumento do número atômico do elemento do alvo (BUSHONG, 2010).

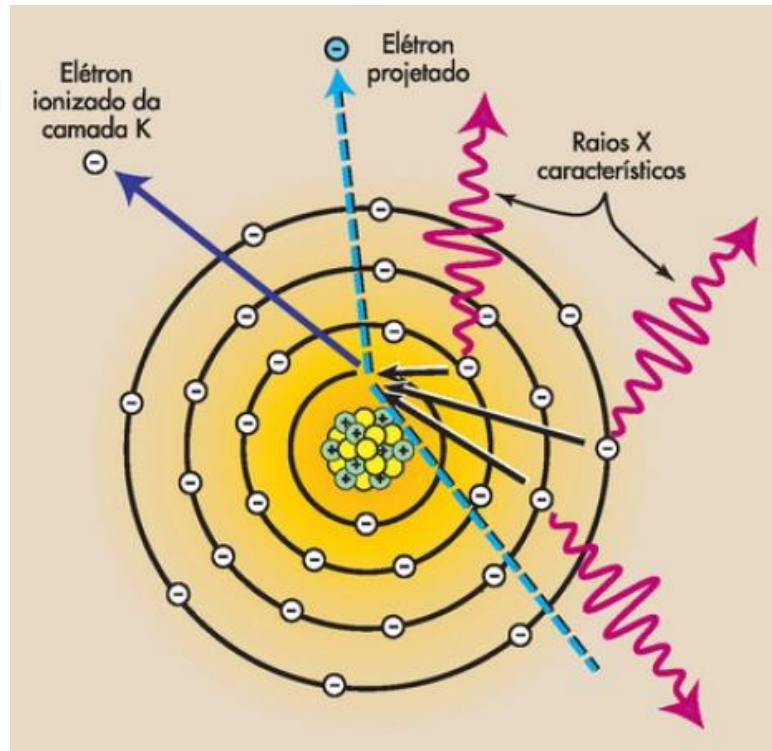


Figura 9 – Representação esquemática, baseada no modelo de Bohr, da produção de raios X característicos. Fonte: Bushong (2010).

A radiação de freamento é resultante da interação Coulumbiana entre os elétrons acelerados e os elétrons do alvo metálico. Pela Teoria Eletromagnética Clássica, qualquer elétron acelerado (ou desacelerado) emite radiação.

No tubo de raios X, existem dois componentes principais, o catodo onde se encontra um filamento de Tungstênio, responsável pela produção de elétrons por efeito termiônico, e o anodo onde está o alvo metálico. Para produzir os raios X, uma tensão, da ordem de quilovolts é aplicada entre anodo e catodo, fazendo com que os elétrons produzidos no filamento sejam acelerados até o alvo, interagindo com o mesmo e gerando, basicamente os dois tipos de radiação X, descritos anteriormente. É bom enfatizar que a maior parte da energia envolvida no processo é dissipada em forma de calor.

Os raios X produzidos no tubo são emitidos através de uma janela, que pode ser, geralmente, de vidro ou Berílio (Be), formando um feixe cônico de raios X com energias variadas, caracterizadas pelo espectro de emissão de raios X. O feixe de raios X é caracterizado pela quantidade (número de fótons de raios X) e pela qualidade (penetrabilidade do feixe). A quantidade é linearmente dependente da corrente elétrica que passa pelo filamento e exponencialmente dependente (potência de ordem 2) da tensão aplicada entre catodo (filamento) e anodo (alvo). A quantidade de raios X emitida por um tubo pode ser

quantificada pelo espectro de emissão do tubo de raios X, que nos fornece a quantidade de fótons emitida em função da sua energia, conforme apresentado na Figura 10 (BUSHONG, 2010).

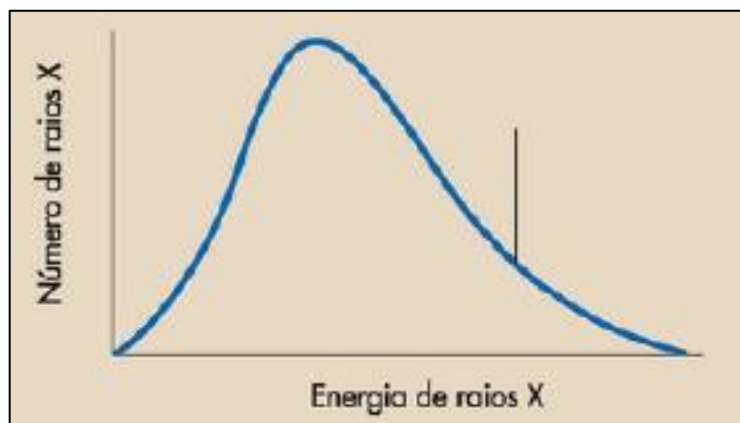


Figura 10 - Forma geral do espectro de emissão de raios X. Fonte: Bushong (2010).

A qualidade do feixe depende fundamentalmente do valor médio do espectro de emissão e da largura de banda que pode ser otimizada pela utilização de filtros (geralmente lâminas de Al e Cu, com diferentes espessuras).

2.4.2 Interação da radiação com a matéria

Quando os raios X incidem em algum tipo de material, eles podem interagir com os átomos do material através de um dos seguintes mecanismos: i) espalhamento elástico; ii) efeito Compton; iii) efeito fotoelétrico e iv) produção de pares. A probabilidade de cada mecanismo de interação depende do número atômico dos átomos do material, da densidade relativa e da energia do feixe de raios X incidente sobre o material. O espalhamento elástico (espalhamento Thompson, refração, difração, espalhamento a baixo ângulo e espalhamento difuso) é aquele em que a energia do fóton espalhado é a mesma do fóton incidente. O efeito fotoelétrico é considerado um processo de absorção, pois a energia do fóton incidente é completamente absorvida pelo elétron ejetado do material. No efeito Compton, a energia do fóton é parcialmente absorvida pelos elétrons da matéria de tal forma que o fóton espalhado tem energia diferente do fóton incidente (espalhamento inelástico). Na produção de pares um fóton de alta energia é completamente absorvido pela matéria e um par elétron-pósitron é formado. A redução da quantidade de raios X, após interação com uma determinada espessura

de matéria, é chamada de atenuação. Os raios X são atenuados exponencialmente, significando que um feixe de raios X nunca será completamente atenuado pela matéria.

2.4.3 Atenuação dos raios X

Como já mencionado na seção anterior, a atenuação é a remoção de fótons de um feixe de raios X à medida que o mesmo passa através da matéria. A fração de fótons removidos de um feixe monocromático de raios X por unidade de espessura de material é chamado o coeficiente de atenuação linear (μ). O número de fótons removidos do feixe atravessando uma pequena espessura (Δx) pode ser expresso como (BUSHBERG, SEIBERT, *et al.*, 2002):

$$n = \mu N \Delta x \quad (2)$$

Onde:

n = o número de fótons removidos do feixe.

μ = coeficiente de atenuação linear

N = o número de fótons incidentes no material.

Δx = espessura

À medida que a espessura aumenta, no entanto, a relação não é linear. O processo de atenuação é contínuo da superfície frontal do material atenuante até a superfície de saída na parte posterior. Para calcular com precisão o número de fótons removidos do feixe usando equação (2), cálculos múltiplos utilizando espessuras muito pequenas de material (Δx) seriam necessários. Alternativamente, o cálculo pode ser empregado para otimizar este processo. Para um feixe monoenergético de fótons incidente sobre um material de qualquer espessura, existe uma relação exponencial [Lei de Lambert-Beer (1870)] entre o número de fótons incidentes (N_0) e aqueles que são transmitidos (N) através de uma espessura x (BUSHBERG, SEIBERT, *et al.*, 2002):

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

Para uma determinada espessura de material, a probabilidade de interação depende do número de átomos que os raios X encontram por unidade de distância. A densidade (g/cm^3) do material afeta este número. Por exemplo, se a densidade for duplicada, os fótons

encontrarão o dobro de átomos por unidade de distância através do material. Essa dependência pode ser superada pela normalização do coeficiente de atenuação linear pela a densidade do material. O então chamado, coeficiente de atenuação de massa (BUSHBERG, SEIBERT, *et al.*, 2002) é dado por:

$$\text{Coeficiente de atenuação de massa } (\mu/\rho)[g/cm^3] = \frac{\text{Coeficiente de atenuação linear } (\mu)[cm^{-1}]}{\text{Densidade do material } (\rho)[g/cm^3]} \quad (4)$$

HUBBELL e SELTZER (1996) apresentam tabelas e gráficos de coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) para vários elementos ($Z= 1$ até 92) e também 48 compostos e misturas de interesse radiológico. Utilizamos estes valores nas simulações de atenuação do feixe de raios X em peças de concreto armado que apresentaremos na seção 3.1.

2.4.4 Imagens radiográficas

A projeção da imagem do feixe de raios X que emerge do tubo é quase uniforme. Essa uniformidade pode ser verificada com o uso de um detector de imagem (filme radiográfico ou detector digital); Após a interação com a amostra, a projeção da imagem do feixe (radiografia) não é mais uniforme, mas varia de acordo com as características dos materiais presentes na amostra que o feixe de raios X atravessou, produzindo diferentes intensidades caracterizando o contraste da imagem radiográfica.

Como já comentado, os detectores de imagem radiográfica podem ser filmes ou detectores digitais. Os filmes radiográficos são compostos por uma base em poliéster que, normalmente, é coberta dos dois lados por uma camada chamada de emulsão (filme de emulsão dupla). A emulsão contém, tipicamente, cristais de brometo de prata (AgBr). Quando exposto aos raios X o Bromo é dissociado da Prata e ocorre a formação da imagem. O AgBr não é sensível somente aos raios X, mas também à parte do espectro de luz visível. Por essa razão filmes radiográficos devem sempre ser manuseados em câmera escura ou somente na presença de luz vermelha, tanto para preparação para exposição como para revelação.

Os sistemas de radiografia digital vêm se tornando mais acessíveis nos últimos 20 anos. Detectores de diferentes tipos podem ser encontrados. Os mais populares são os detectores bidimensionais tipo “*flat pannel*” com chip CMOS acoplados à um dispositivo intensificador de imagem (tela fluorescente) que converte raios X em luz visível.

Na Figura 11 é apresentado, de forma esquemática, as partes que compõem a montagem de um detector intra-oral digital.

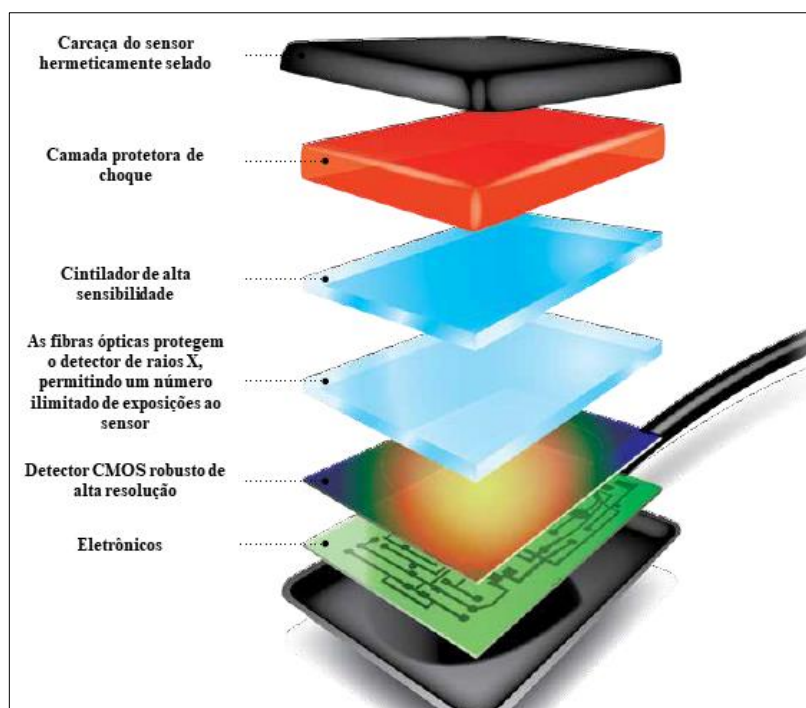


Figura 11 – Representação esquemática de um detector digital. Fonte: Orenstein (2016).

Segundo Orenstein (2016) existem diversas características relacionadas aos distintos dispositivos utilizados em um detector intra-oral (Figura 11), dentre os quais podemos destacar:

- **Cintilador:** Está localizado abaixo da carcaça hermeticamente selada do detector e camada de proteção contra choques (um recurso de qualquer sensor de alta qualidade, pois um sensor é frequentemente a vítima de mordidas de pacientes em tratamento dentário, choques e quedas). O cintilador é responsável por transformar raios X em luz visível por meio de fluorescência. A eficiência do cintilador pode ser afetada pelo tipo de material pelo qual é produzido. Os cintiladores são, geralmente, de iodeto de cério (CsI) dopados com Tálcio (Ta). A espessura do cintilador pode afetar a resolução da imagem.
- **A placa de fibra óptica:** Como os cintiladores não conseguem impedir a passagem de parte dos fótons de raios X incidentes, alguns apresentam uma placa de fibra óptica com objetivo de absorver fótons de raios X que não foram convertidos em luz visível e guiar, de forma não dispersa a luz visível do cintilador para a próxima camada do sensor (chip CMOS - (“Complementary Metal-Oxide-Semiconductor”).
- **Chip CMOS:** O chip CMOS converte a luz gerada pelo cintilador em um sinal digital que pode ser enviado para o computador. O tamanho dos pixels afetam diretamente a

imagem radiográfica. Se eles são muito pequenos, normalmente, a sensibilidade do detector é reduzida e uma maior intensidade de raios X é necessária para obter uma imagem. Se os pixels são muito grandes, a resolução espacial (a capacidade de discriminar com precisão dois objetos próximos) da imagem é reduzida. O tamanho do pixel deve ser determinado com base no tipo e espessura do cintilador utilizado. Outra característica do detector é a sua faixa dinâmica, que determina a quantidade de tons de cinza de um detector. Quanto maior a faixa dinâmica, maior a possibilidade de obtermos diferentes níveis de contraste, contudo a transferência de dados é mais lenta. Tentando otimizar isso, os fabricantes tem adotado o uso de faixas dinâmicas nem tão baixas (detectores de 8 bits) nem tão altas (detectores de 24 bits), propondo o uso de detectores com chip de 12 bits e 14 bits.

- Cabo USB ou wireless: Uma vez que a conversão da imagem tenha sido bem sucedida em pixels, a informação é transferida para o computador através do cabo. Atualmente, os sensores integram uma comunicação de protocolo USB com o detector. Alguns sistemas de transmissão sem fio estão disponíveis, mas o custo-benefício ainda permanece desfavorável.

A imagem digital tem várias vantagens importantes sobre a imagem obtida com filmes radiográficos. Imagens digitais são obtidas mais rapidamente do que imagens convencionais porque o processamento químico é desnecessário. Imagens digitais podem ser vistas simultaneamente por múltiplos observadores em diversos locais e podem ser transferidas e arquivadas eletronicamente, economizando com isso tempo de recuperação de imagem e espaço para armazenamento de arquivo de filme. A faixa dinâmica linear aliada a possibilidade de pós-processamento da matriz de dados (imagem representada por uma matriz, onde cada elemento é um pixel do detector), utilizando dados de imagem do feixe com a amostra, sem a amostra e do detector sem receber radiação (imagem de campo escuro) permitindo a extração de mais informações em cada imagem são mais algumas das vantagens que podemos citar ainda, imagens *in-situ*, como na fluoroscopia tornam-se possíveis, dependendo da taxa de transferência de imagens do detector. A limitação atual da imagem radiográfica digital é a alta resolução espacial com grande campo de visão. Neste campo, os filmes ainda tem superioridade.

2.4.5 Radiografia industrial (*in-situ*)

Dentre as diferentes técnicas de imagem por raios X, a radiografia (Röntgen, 1896) é a mais antiga. No entanto, ainda é o maior em uso em aplicações médicas (BUSHONG, 2010) bem como em aplicações industriais (CHIFFRE, CARMIGNATO, *et al.*, 2014) devido à sua simplicidade. A técnica em si foi aprimorada nos últimos 30 anos com a disponibilidade de detectores de raios X digitais [CCDs e “flat pannels” (SONODA, TAKANO, *et al.*, 1983 e NEITZEL, 2005)]. Com esta tecnologia, foi possível realizar imagens radiográficas *in-situ* com alto contraste e alta resolução.

A radiografia industrial é uma das técnicas utilizadas para a inspeção de amostras de concreto (OESCH, 2016; TALLMAN e WANG, 2016 e SHARMA , REN, *et al.*, 2016) com o intuito de detectar variações de intensidade na imagem obtida de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha. Em outras palavras, a radiografia é um método capaz de detectar com boa sensibilidade diferentes detalhes em um dado volume de amostra. Defeitos volumétricos como vazios e inclusões, que apresentam uma espessura variável em todas as direções, serão facilmente detectadas desde que não sejam muito pequenos em relação à espessura da peça (ANDREUCCI, 2014). Na Figura 12 é apresentado, de forma esquemática, a técnica de radiografia para o ensaios na indústria.

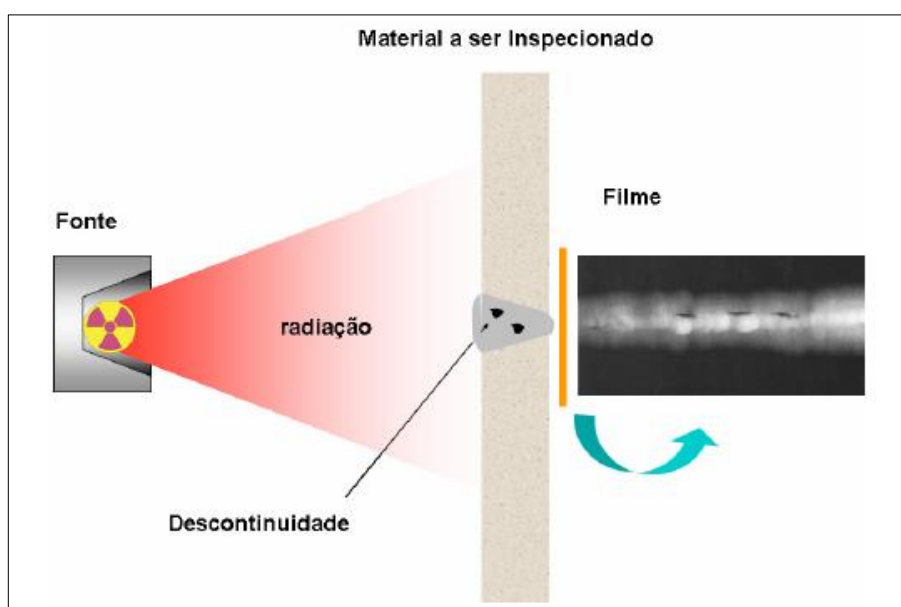


Figura 12 - Técnica Geral de Ensaio Radiográfico na indústria. Fonte: Andreucci (2014).

Técnicas de imagem por raios X em peças ensaiadas de concreto, com o objetivo de se observar processos de ruptura, já foram utilizadas em alguns trabalhos. No trabalho de SHARMA *et al.* (2016) foi utilizada a tomografia computadorizada de raios X para observar as rupturas em amostras de concreto submetidas à ensaios de compressão cíclicas. A tomografia computadorizada de raios X também foi utilizada por (OESCH, 2016) para investigar o processo de ruptura da ligação entre vergalhões e concreto em amostras retiradas submetidas à ensaios “*pull-out*”. SKARŻYŃSKI e TEJCHMAN (2016) também utilizaram a tomografia computadorizada de raios X para estudar o processo de fratura no concreto em peças de concreto submetidas ao ensaio de carregamento.

Neste trabalho, foram realizados ensaios de “*pull-out*” combinado com radiografia *in-situ*, no intuito de correlacionar a tensão de aderência entre o concreto e o vergalhão com informações sobre o processo de deslizamento do vergalhão no concreto. O detalhamento da montagem experimental para aquisição de imagens radiográficas durante realização do ensaio “*pull-out*” está detalhada na seção 3.3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Idealização dos corpos de prova e ensaio “pull-out”

Visando a confecção mais adequada dos corpos de prova, alguns estudos preliminares foram realizados levando em consideração as peculiaridades da pesquisa. Neste planejamento foram considerados, os materiais que seriam utilizados na mistura do concreto, os equipamentos disponíveis nos laboratórios para realização dos ensaios e também as dimensões dos corpos de prova, em especial devido ao equipamento de raios X utilizado para aquisição das imagens radiográficas. Tal equipamento possui tensão máxima de 90 kV, que limita a penetrabilidade no concreto armado.

Um primeiro teste com o equipamento de raios X foi realizado com o objetivo de verificar a aquisição de imagens em uma peça de concreto armado de 24 mm de espessura, conforme apresentada na Figura 13.

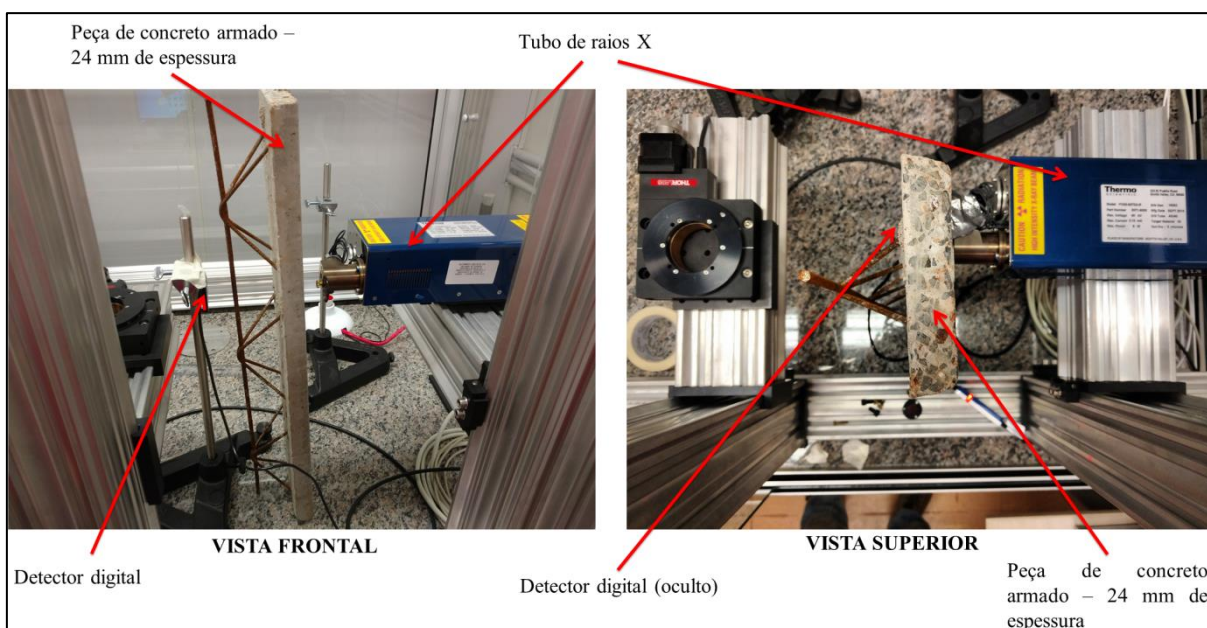


Figura 13 - Teste radiográfico preliminar de uma peça de concreto armado, realizado no Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas (LICF) da UNILA.

A tensão e a corrente utilizada na operação do tubo de raios X foi de 79 kV e 84 μ A, respectivamente. A imagem obtida (Figura 14) mostra o vergalhão no interior da peça de concreto.

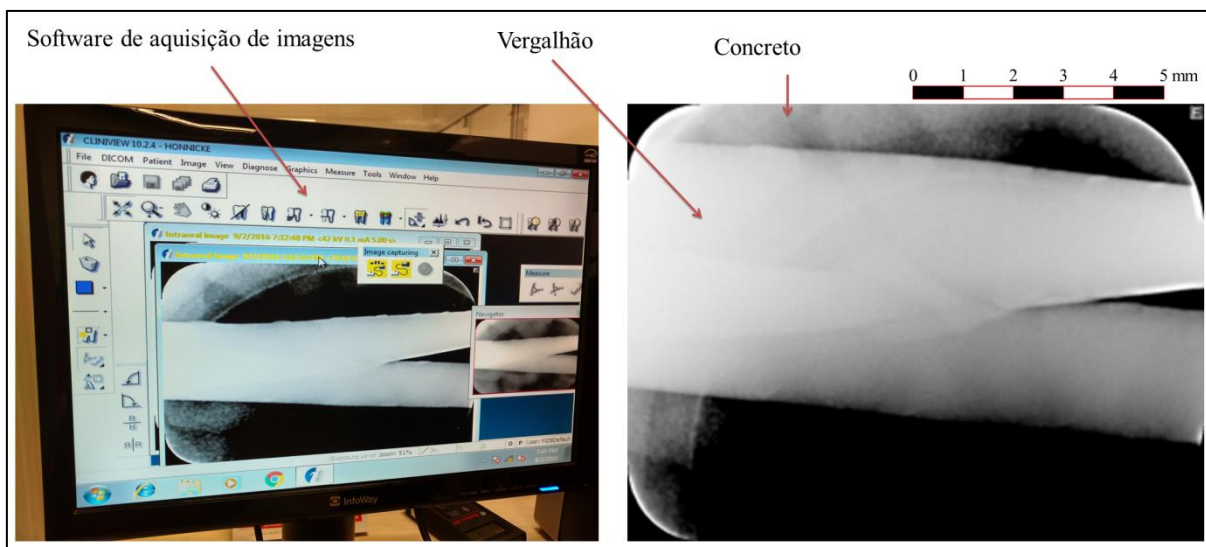


Figura 14 - Imagem obtida por radiografia - teste preliminar.

Com este resultado, pode-se concluir que, com o equipamento de raios X disponível, seria possível obter imagens radiográficas de peças de concreto armado com qualidade necessária para os objetivos da pesquisa. Porém, a peça utilizada possuía apenas 24 mm de espessura, que é muito abaixo da espessura necessária para um corpo de prova para realizar o ensaio “*pull-out*” (ASTM C234-91, 1991) que, tipicamente, são amostras cilíndricas com diâmetro de 150 mm e comprimento de 300 mm. Para vencer tal limitação, foi idealizada uma redução do diâmetro do corpo de prova ao longo de parte do eixo vertical do mesmo, que possibilitasse a aquisição de imagens radiográficas com o equipamento de raios X disponível. Além disso, foi necessário projetar, construir e testar um suporte metálico para realização dos ensaios “*pull-out*”.

Os ensaios “*pull-out*” foram executados na máquina universal de ensaios (TimeGroup WAW1000C), disponível no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTC / Itaipu Binacional).

Desta forma, iniciou-se a confecção dos primeiros protótipos de corpos de prova para realização dos ensaios “*pull-out*”. Em uma primeira etapa adequou-se a fabricação de corpos de prova com uma seção de menor diâmetro possível, quando se utilizou moldes padrão de 150 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento. A seção de 50 mm foi fabricada através da inserção de um anel de madeira no fundo do molde (diâmetro interno de 50 mm, diâmetro externo de 150 mm e espessura de 20 mm) que fabricamos utilizando uma serra “tico-tico”. Foram moldados três corpos de prova para ensaio “*pull-out*” e quatro corpos de prova para ensaio de compressão simples (diâmetro de 100 mm e 200 mm de comprimento), conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15 - Corpos de prova moldados - Teste preliminar.

O traço (proporção de materiais na mistura) do concreto (sem sal) utilizado nesse processo de moldagem preliminar é o apresentado na Tabela 8. No dia seguinte à moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados na câmara úmida do LTC / Itaipu Binacional até o dia do ensaio “*pull-out*”.

Material	Concreto sem sal	Concreto com sal
Cimento	1,000	1,000
Areia	2,940	2,940
Brita	3,333	3,333
Água	0,686	0,686
Sal	-	0,017

Tabela 8 - Traço do concreto em massa.

Ainda, antes de submetermos os corpos de prova aos ensaios “*pull-out*”, testes com o equipamento de raios X foram realizados com o objetivo de testar se, na região com seção reduzida (50 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento) do corpo de prova, seria possível adquirir imagens radiográficas com contraste entre vergalhão e concreto. Os testes com equipamento de raios X foram novamente realizados no LICF / UNILA, conforme

apresentado na Figura 16. Para isso, os corpos de prova foram tirados da câmara úmida do LTC / Itaipu Binacional e levados para o LICF / UNILA para o teste. Após o teste os corpos de prova voltaram para a câmara úmida do LTC / Itaipu Binacional.

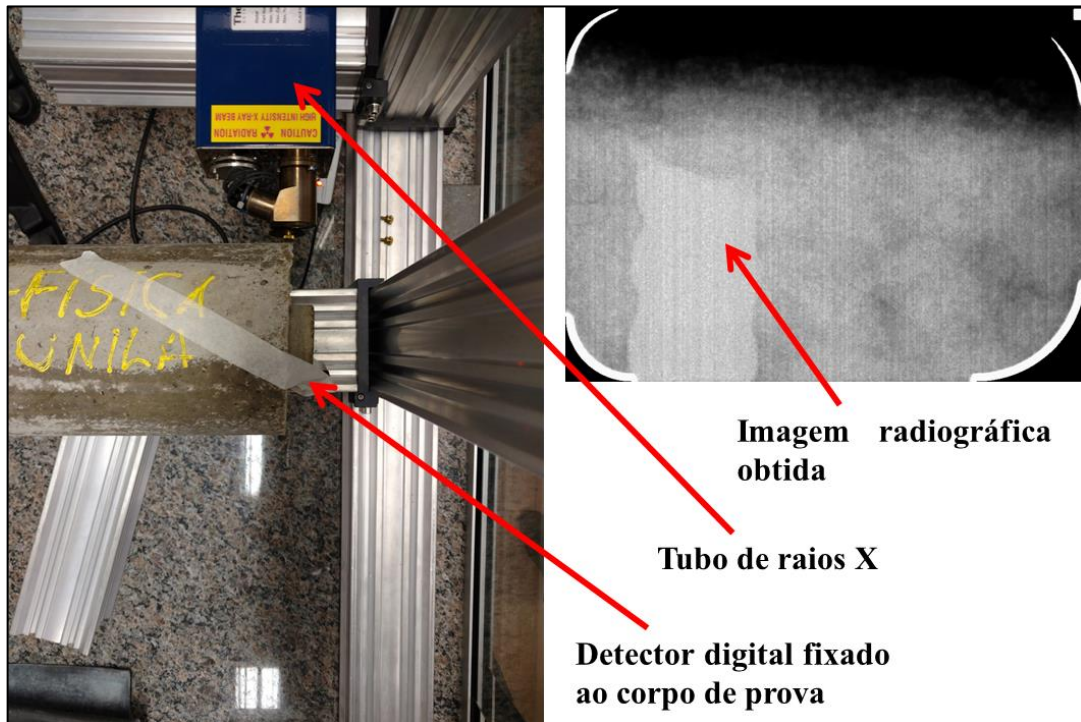


Figura 16 - Teste de imagem radiográfica realizado no LICF com o corpo de prova com seção reduzida (diâmetro de 50 mm e comprimento de 20 mm) para identificação do contraste.

Os resultados obtidos na radiografia mostram que a redução do diâmetro de 150 mm para 50 mm ainda é insuficiente para identificação de contraste na região entre vergalhão e concreto. Para melhor visualização da interface entre vergalhão e concreto é necessário que o diâmetro seja reduzido ainda mais com o intuito de aumentar o contraste na imagem radiográfica. Mesmo assim, utilizamos os corpos de prova para testes preliminares do ensaio “*pull-out*”, contudo sem raios X. Para os testes preliminares do ensaio “*pull-out*” foi necessário, projetarmos e construirmos um suporte metálico para fixação dos corpos de prova na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional.

3.1.1 Projeto, construção e testes do suporte metálico para suporte dos corpos de prova para ensaios “pull-out”.

Para suportar corpos de prova para os testes “pull-out”, um suporte metálico de aço carbono (SAE 1020) composto de três partes diferentes foi projetado e construído (Figura 17). Este suporte metálico foi projetado para ser montado na máquina universal do LTC / Itaipu Binacional e suportar corpos de prova de concreto armado com dimensões de até 300 mm de altura e de até 150 mm de diâmetro. Os furos abertos nas regiões centrais do suporte metálico foram projetados para o posicionamento dos vergalhões.

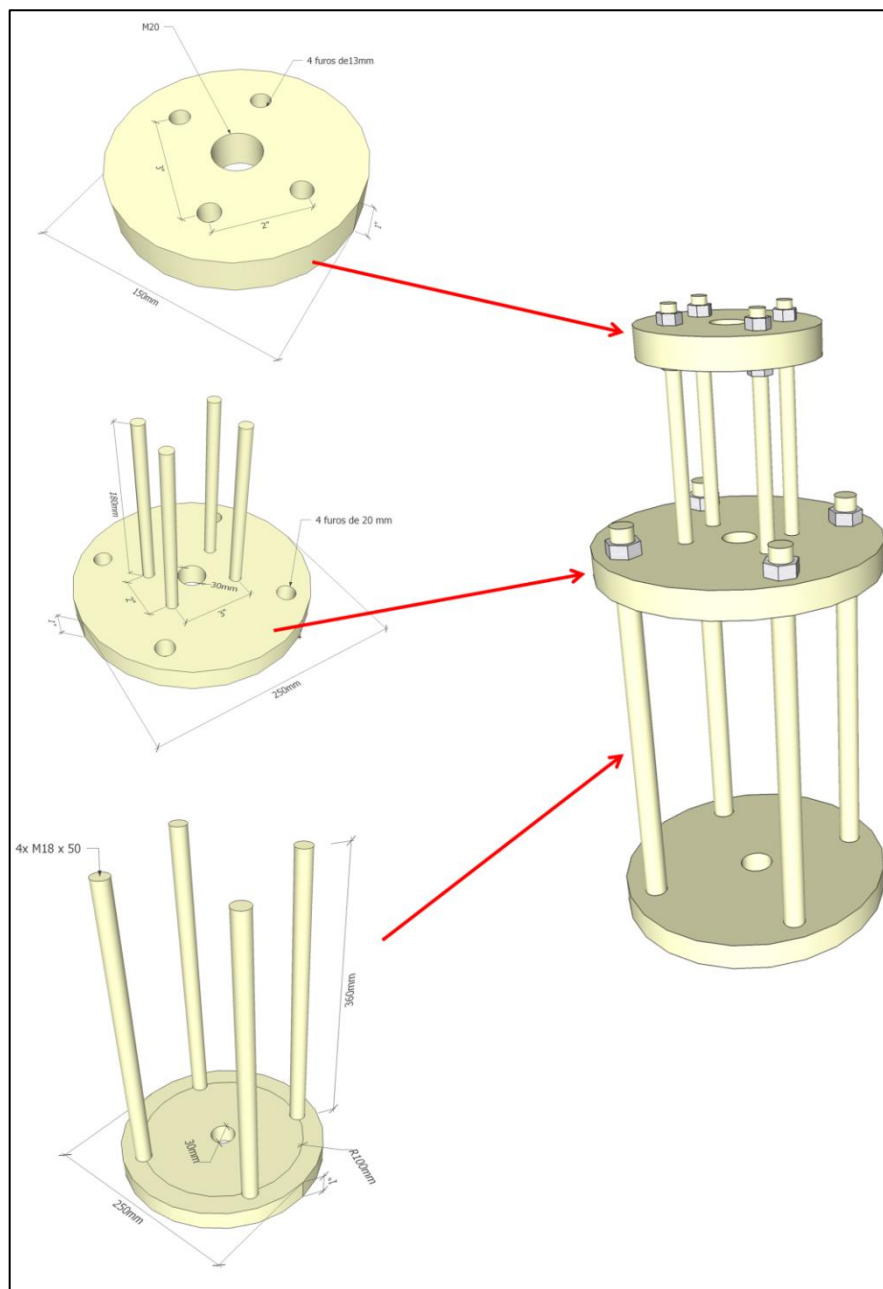


Figura 17 - Projeto suporte metálico para ensaio "pull-out".

Com o suporte metálico projetado e construído, passamos para os testes de montagem / ensaio “*pull-out*” na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional. O suporte metálico foi fixado na parte superior da máquina universal de ensaios usando um pino de rosca. O vergalhão da amostra de concreto armado é fixado na parte inferior da máquina. A máquina de teste universal é operada hidráulicamente e controlada por computador, o que permite puxar o vergalhão de Aço CA-50 a uma taxa constante de deslocamento. Os dados de carregamento versus tempo são adquiridos pela máquina universal de testes. Um transdutor indutivo de deslocamento miniatura (HBM - 1-WI / 10 mm-T) é utilizado para medir o deslocamento relativo do vergalhão em relação ao concreto.

Para os primeiros testes do ensaio “*pull-out*” apenas dois, dos três corpos de prova moldados, foram utilizados. Na Figura 18 são mostrados os detalhes da montagem do suporte metálico na máquina de teste universal do LTC / Itaipu Binacional. Pode-se verificar que o mesmo foi fabricado em acordo com as dimensões da máquina e não precisaria de ajustes para ser utilizado nos próximos ensaios.

Contudo, com relação às dimensões dos corpos de prova para os ensaios “*pull-out*”, percebemos que, além da redução no diâmetro da região com seção reduzida (já notada com os ensaios radiográficos preliminares), outros ajustes deveriam ser realizados: i) diminuir o comprimento de ancoragem do vergalhão, pois nos ensaios “*pull-out*” realizados, os vergalhões romperam antes da perda de aderência entre o vergalhão e o concreto; ii) Deixar um trecho do vergalhão exposto na parte superior do corpo de prova para instalação do medidor de deslocamento e iii) Garantir que, ao serem moldados, os vergalhões estejam centralizados e totalmente verticais em relação ao corpo de prova.

Nas seções 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4 e 3.1.5 serão apresentados, de forma mais detalhada, todas as considerações a respeito da preparação dos corpos de prova, tanto os que foram utilizados nos ensaios “*pull-out*”, quanto os utilizados nos ensaios de compressão simples.



Figura 18 - Montagem experimental ensaio "pull-out" – Teste preliminar.

3.1.2 Simulação da atenuação de raios X nos corpos de prova

O concreto armado apresenta alta atenuação do feixe de raios X, especialmente devido às espessuras normalmente utilizadas em peças estruturais, associadas à sua densidade de massa média de, aproximadamente, $2500 \text{ kg} / \text{m}^3$ (ABNT NBR 6120, 1980). Então, para adquirir imagens radiográficas de concreto armado, o tamanho das amostras desempenha um importante papel no contraste da imagem e deve ser considerado antes do início de qualquer aquisição radiográfica.

Para tanto, foram simulados os perfis radiográficos de amostras de concreto armado de forma cilíndrica com diferentes diâmetros (30 mm, 40 mm, 50 mm e 150 mm) e um vergalhão de Aço CA-50 com diâmetro fixo de 6,3 mm, em seu centro, levando em consideração os coeficientes de atenuação dos diferentes materiais (vergalhões de aço e concreto) (HUBBELL e SELTZER, 1996). Tais simulações foram realizadas considerando todo o espectro de emissão calculado de um tubo de raios X (sem utilização de filtros) com alvo de tungstênio (W) (HERNANDEZ e BOONE, 2014) em diferentes tensões de trabalho [70 kV, 80 kV e 90 kV (que é o máximo disponível da fonte microfoco de raios X que temos disponível no LICF / Unila)], conforme apresentado na Figura 19.

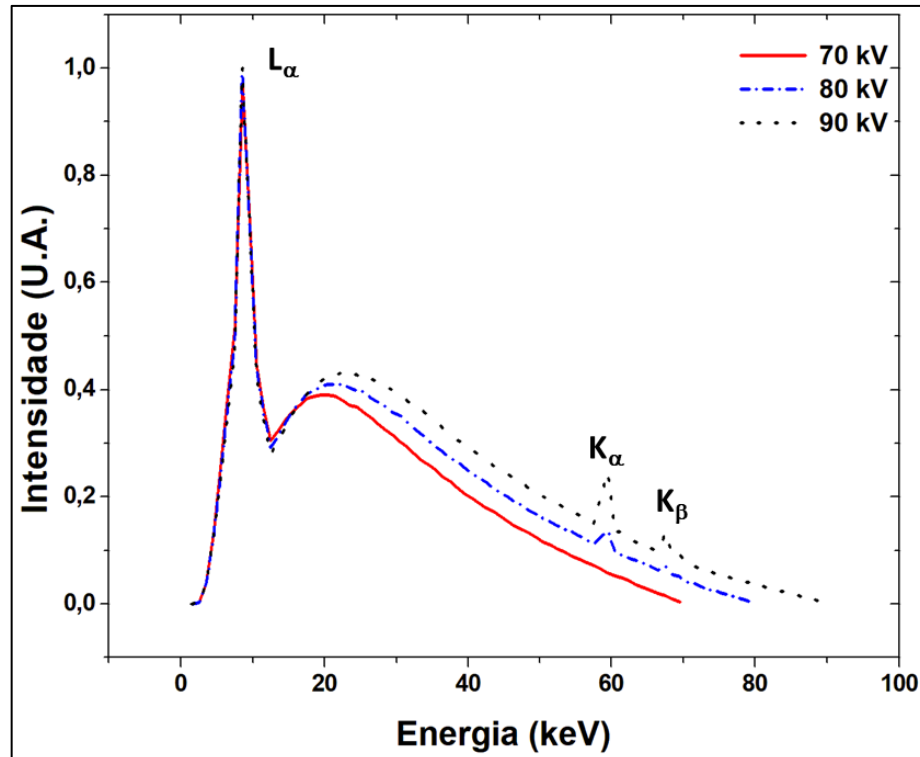


Figura 19 - Espectros de emissão calculados para um tubo de raios X com alvo de tungstênio (W) em diferentes tensões de operação: 70 kV, 80 kV e 90 kV. Os picos no gráfico representam as transições discretas entre as camadas L e K do átomo de tungstênio (W).

Os valores relativos de intensidade, obtidos do espectro calculado (Figura 19) foram adotados como a intensidade total do feixe incidente sobre a amostra. O coeficiente de atenuação do concreto e do aço foram então ponderados para cada valor de energia do espectro de emissão do tubo de raios X. A Figura 20, a seguir, mostra de forma esquemática o problema abordado. Por questões de simplificação, foi considerado nesta simulação que o feixe se propaga da fonte de raios X até o detector de forma linear. Nas regiões I e III, o feixe atravessa apenas a parte constituída de concreto. Na região II, está localizado na parte central o vergalhão, onde os parâmetros deste material também precisam ser considerados. Note que a espessura da amostra de concreto armado (t) também é variável, desde o valor mínimo (igual a zero nas bordas da amostra) até o valor máximo (igual ao diâmetro do corpo de prova) na parte central do corpo de prova. Então, a intensidade do feixe de raios X foi calculada com base na equação (3) apresentada na seção 2.4.3. Logo, para as regiões I e III as respectivas intensidades dos feixes foram calculadas pelas equações (5) e (6):

$$I_I = I_0 e^{-\mu_c t_I} \quad (5);$$

$$I_{III} = I_0 e^{-\mu_c t_{III}} \quad (6);$$

Onde, μ_c é o coeficiente de atenuação para o concreto, t_I e t_{III} são as espessuras que o feixe atravessa as regiões I e III, respectivamente, I_0 é a intensidade do feixe incidente e, I_I e I_{III} são as intensidades transmitidas nas regiões I e III respectivamente.

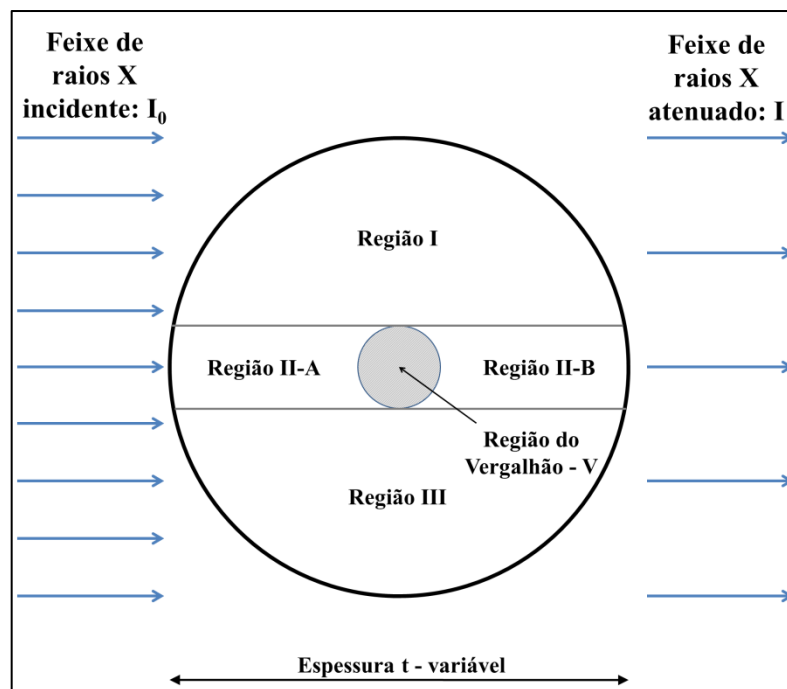


Figura 20 – Ilustração esquemática da atenuação do feixe de raios X em uma peça cilíndrica de concreto armado.

Para a região II, que foi subdividida na região II-A, V e II-B (Figura 21), seguindo a sequência da passagem do feixe de raios X, o cálculo da atenuação foi realizado em partes. Primeiramente, foi calculada a atenuação na região II-A, considerando como a intensidade do feixe incidente o valor I_0 , da mesma forma que foi adotado para as regiões I e III, tal que:

$$I_{II-A} = I_0 e^{-\mu_c t_{II-A}} \quad (7)$$

Onde, μ_c é o coeficiente de atenuação para o concreto, t_{II-A} é a espessura que o feixe atravessa na região I_{I-A} e, I_{II-A} é a intensidade transmitida pela região II-A.

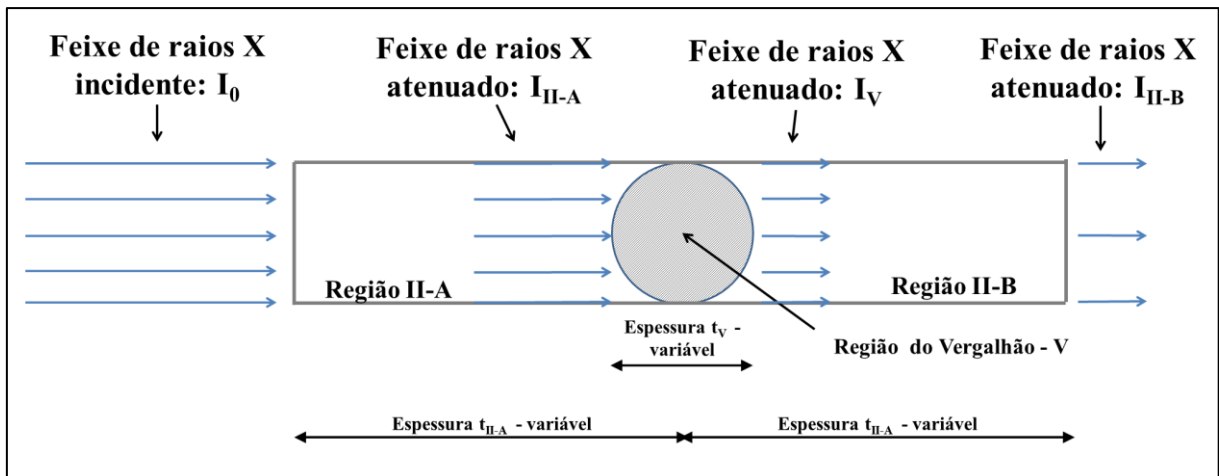


Figura 21 - Detalhamento da atenuação na região II da amostra.

Para a região V, onde se localiza o vergalhão, o feixe incidente passa a ter o valor de I_{II-A} , conforme calculado pela equação (7). Desta forma, a intensidade transmitida pela região V (I_V), foi calculada pela equação (8):

$$I_V = (I_0 e^{-\mu_c t_{II-A}}) e^{-\mu_V t_V} \quad (8)$$

Onde, μ_V é o coeficiente de atenuação para o vergalhão e t_V é a espessura que o feixe atravessa na região V.

Para a região II-B, o feixe incidente foi considerado como aquele calculado pela equação (8), isto é, I_V . Sendo assim, intensidade do feixe após passar pela região II-B (I_{II-B}) foi calculada utilizando a equação (9):

$$I_{II-B} = [(I_0 e^{-\mu_c t_{II-A}}) e^{-\mu_V t_V}] e^{-\mu_c t_{II-B}} \quad (9)$$

Na qual, μ_{II-B} é o coeficiente de atenuação para o vergalhão e t_{II-B} é a espessura que o feixe atravessa na região V. Cabe ressaltar que apesar do concreto ser um material heterogêneo, foi considerado para este material um coeficiente de atenuação constante ao longo da amostra. Então, a intensidade do feixe após passar pela região II-B é a intensidade que foi adotada na simulação como a intensidade final que, em uma situação real, seria a intensidade do feixe ao atingir o detector. Cabe ressaltar que, nestas simulações, não foram consideradas as atenuações decorrentes da passagem do feixe pelo ar e também a decorrente da janela de Berílio (Be) do tubo de raios X que, para as tensões aplicadas ao tubo de raios X,

seriam de ordem bem inferiores comparadas com os outros materiais pelos quais o feixe está atravessando (concreto e vergalhão). Assim, de forma mais simplificada, a intensidade final para a região II, pode ser escrita como:

$$I_{II} = I_0 e^{-(\mu_c t_{II-A} + \mu_v t_V + \mu_c t_{II-B})} \quad (10)$$

O resultado dos cálculos (perfis das seções transversais das imagens radiográficas) é mostrado na Figura 22.

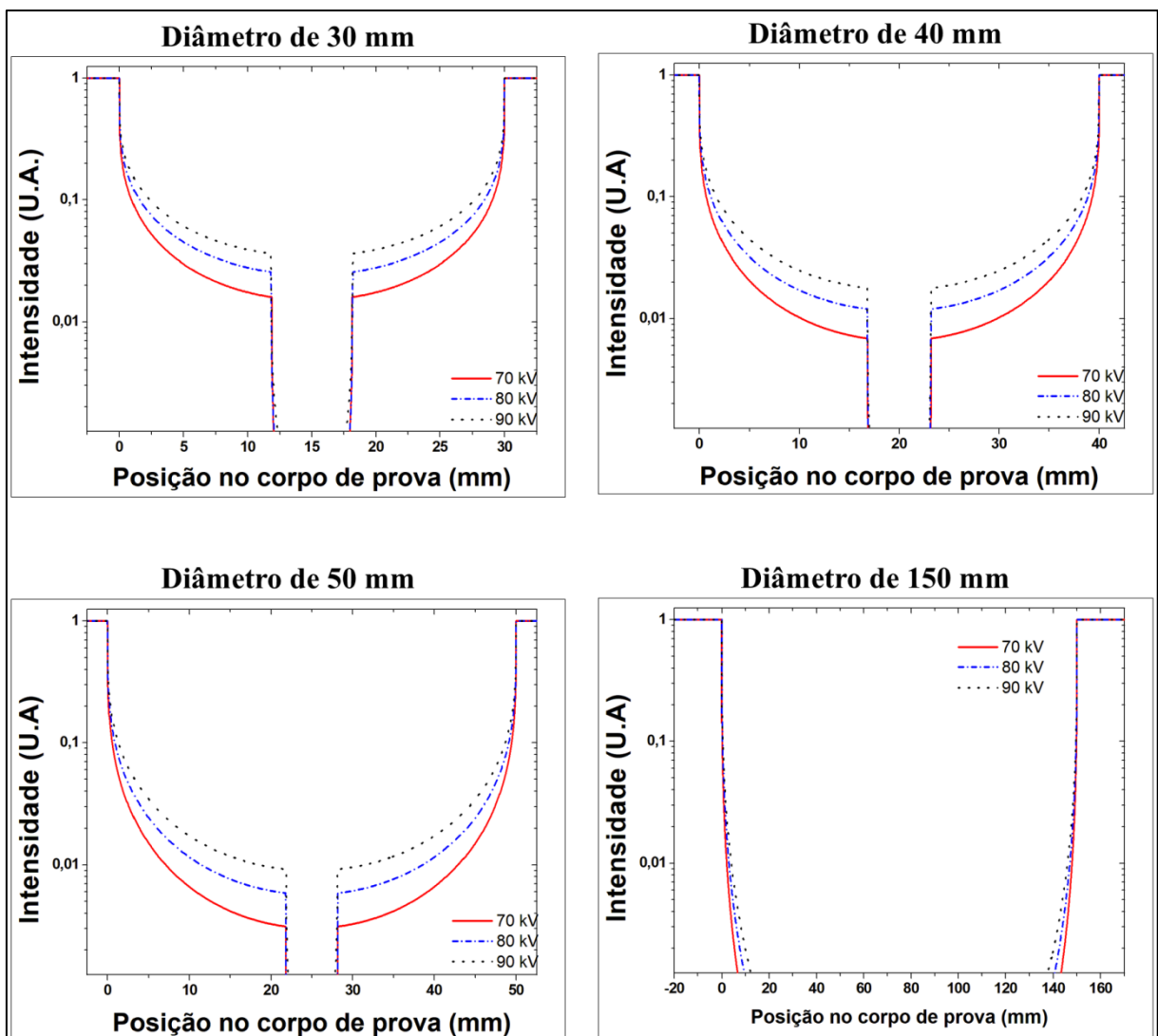


Figura 22 - Perfis radiográficos simulados das amostras de concreto para diferentes tensões aplicadas no tubo de raios X (70 kV, 80 kV e 90 kV) – Vergalhões de aço.

A partir desses resultados da Figura 22, pode-se verificar que, mesmo se fosse utilizada a tensão máxima disponível no tubo de raios X disponível (90 kV), não seria

possível obter contraste suficiente ($< 1\%$) na região de adesão entre o vergalhão de aço e o concreto para as amostras mais espessas de concreto armado cilíndrico (50 mm e 150 mm). No entanto, para espessuras pequenas (30 mm e 40 mm), é possível obter algum contraste ($> 1\%$) na região de adesão entre o vergalhão de aço e o concreto. Essa informação foi essencial para o projeto dos corpos de prova de concreto armado definitivos, que será discutido na seção 3.1.3, a seguir.

De forma semelhante, perfis das seções transversais das imagens radiográficas considerando o uso de vergalhões de GFRP (“glass fiber reinforced polymer” - fibra de vidro) também foram simulados. Os coeficientes de atenuação dos diferentes materiais também foram utilizados da mesma fonte (HUBBELL e SELTZER, 1996). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 23.

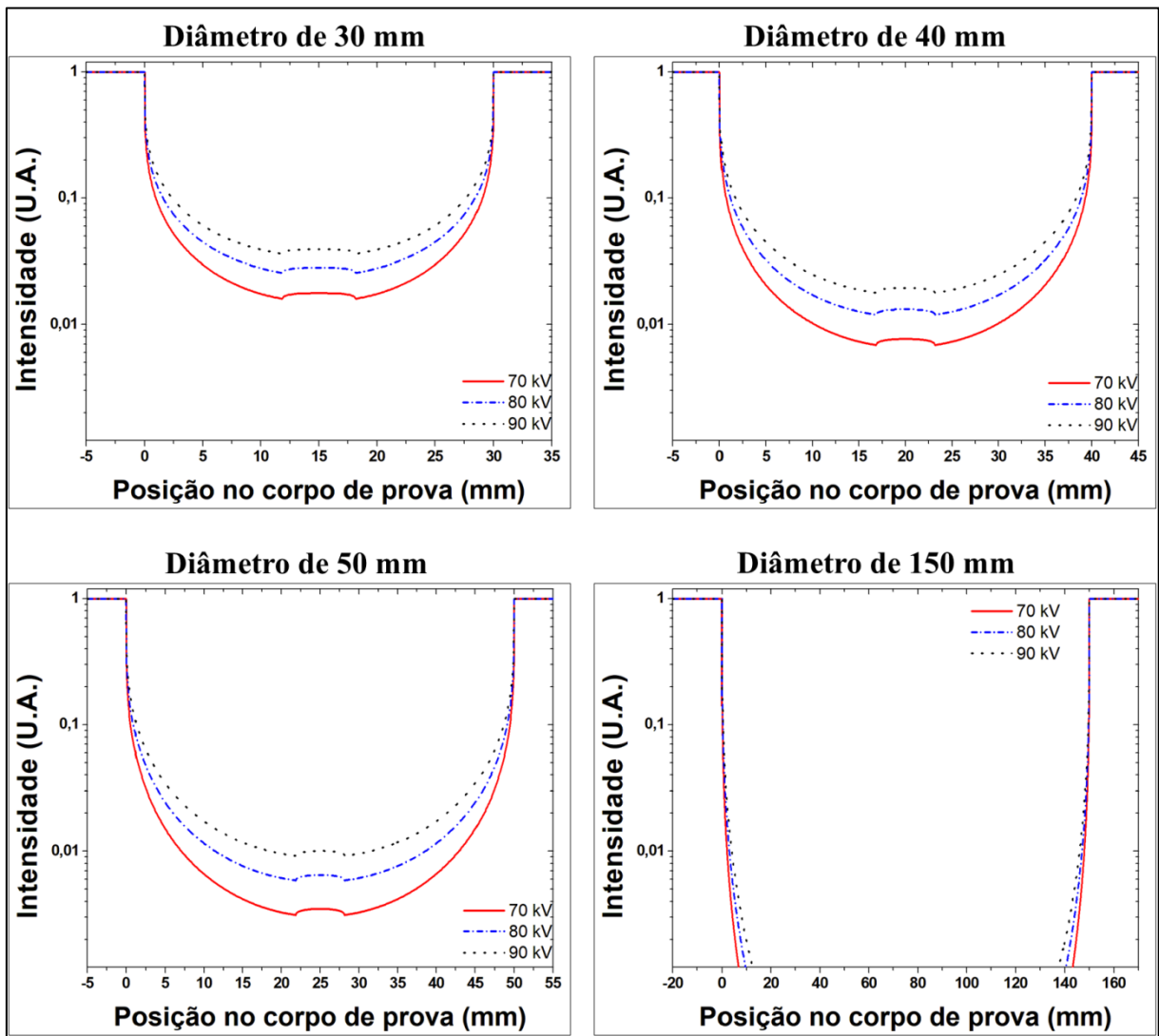


Figura 23 - Perfis radiográficos simulados das amostras de concreto para diferentes tensões aplicadas no tubo de raios X (70 kV, 80 kV e 90 kV) – Vergalhões de GFRP.

Assim como nas simulações com vergalhões de aço, mesmo utilizando a tensão máxima disponível do nosso tubo de raios X (90 kV), o contraste observado seria ainda menor do que com o uso dos vergalhões de aço. Isso ocorre porque, diferente do aço, que tem densidade de, aproximadamente 7850 g/cm^3 , o vergalhão de GFRP possui densidade média muito próxima à do concreto (1900 g/cm^3 e 2500 g/cm^3 , respectivamente).

Não foi realizada a simulação dos perfis das seções transversais das imagens radiográficas considerando o uso de vergalhões de BFRP (“basalt fiber reinforced polymer” – fibra de basalto), pois estes possuem densidade (cerca de 1900 g/cm^3), que é idêntica à dos vergalhões GFRP, produzindo resultados muito semelhantes.

Pelos resultados obtidos nas simulações com vergalhões de GFRP e BFRP a aquisição de imagens radiográficas em amostras de concreto armado com tais vergalhões com o equipamento de raios X que temos disponível no LICF / Unila se mostra de difícil aplicação, pois o contraste na região de adesão entre o vergalhão e o concreto deverá ser muito pequeno. Isso será mostrado, experimentalmente na seção 3.2.

3.1.3 Preparação para moldagem dos corpos de prova

Como já comentado anteriormente, os procedimentos para a execução do ensaio “*pull-out*”, bem como para a moldagem dos corpos de prova de concreto armado são relatados pela norma ASTM C234-91a (1991). Neste trabalho, algumas dimensões dos corpos de prova de concreto armado precisaram ser adaptadas, principalmente devido à limitação imposta pela atenuação do feixe de raios X do concreto, conforme apresentado e discutido na seção 3.1.2.

Baseado nas nossas simulações dos perfis das seções transversais das imagens radiográficas, verificamos que o contraste de atenuação do feixe de raios X na região entre o vergalhão de Aço CA-50 e o concreto é mais enfatizado para amostras cilíndricas de concreto armado com diâmetro entre 30 mm e 40 mm. Para as tensões de tubos de raios X disponíveis no equipamento utilizado, as amostras de concreto armado foram projetadas com uma pequena seção com diâmetro entre 35 mm e 40 mm e altura de 40 mm, como apresentado na Figura 24.

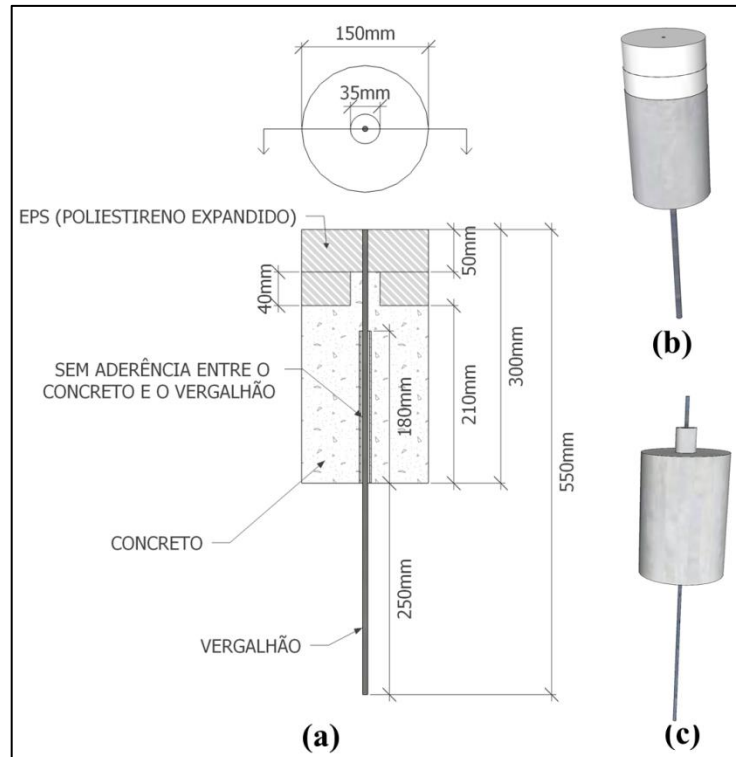


Figura 24 - Projeto de corpo de prova de concreto armado para os testes “pull-out”. (a) vista superior e seção transversal longitudinal; (b) esquema tridimensional com partes EPS; (c) modelo tridimensional após desmoldagem completa.

Para preparar os corpos de prova conforme as dimensões apresentadas na Figura 24, o molde padrão de 150 mm de diâmetro foi modificado pela fixação de um anel EPS (poliestireno expandido) (40 mm de espessura e diâmetro externo de 150 mm e diâmetro interno de 35 mm) na base do molde padrão (Figura 25).



Figura 25 - Molde padrão com o anel de EPS colocado em sua base.

Além disso, a região de aderência entre o concreto e o vergalhão de Aço CA-50 foi mantida em um comprimento de 70 mm no eixo longitudinal, incluindo a região com diâmetro reduzido (40 mm de altura). Este comprimento de ancoragem é superior ao estabelecido por RILEM (1973), no qual tal comprimento deveria ser cinco vezes o diâmetro do vergalhão, que no caso deste trabalho seria de 31,5 mm para corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50 e 30 mm para vergalhões de GFRP e BFRP. Para evitar o contato entre o concreto e o vergalhão de Aço CA-50 ao longo do comprimento remanescente (180 mm), um tubo de PVC flexível com diâmetro interno de 8 mm foi inserido e selado nas extremidades com cola de vinil acetato de etileno (cola quente) para evitar a entrada da pasta de cimento durante o processo de moldagem (Figura 26). Detalhes técnicos sobre os vergalhões utilizados serão apresentados na próxima seção.

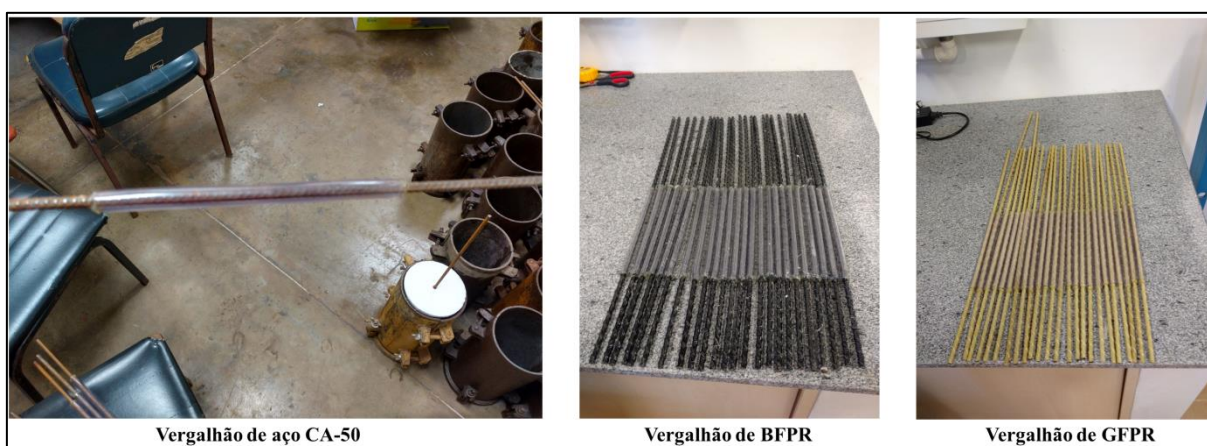


Figura 26 - Tubo de PVC para criar uma região sem aderência entre vergalhão e concreto durante o processo de moldagem.

3.1.4 Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova

Neste trabalho foram preparados dois tipos de concreto: concreto sem adição de cloreto de sódio (sem sal) e concreto com adição de cloreto de sódio (com sal). O traço unitário em massa (proporção da massa dos materiais em relação à massa do cimento) na mistura de ambos é igual, porém na mistura do concreto com sal foi adicionado 0,017 kg de cloreto de sódio para cada quilograma de cimento. A quantidade de cloreto de sódio utilizada neste trabalho é maior do que a utilizada por DONG et al. (2016), no qual foi utilizado 0,0131 kg de cloreto de sódio para cada quilograma de cimento na mistura do concreto, além do sal já

presente na areia. Já apresentamos, anteriormente, na Tabela 8, os traços unitários para ambos os concretos (com e sem adição de cloreto de sódio).

A quantidade de sal utilizada na mistura do concreto com sal é superior a sete vezes em relação ao máximo permitido, de acordo com BAUER (2000), conforme já apresentado na seção 2.2. Já em relação ao descrito na norma ABNT NBR15900-1 (2009), também já relatado na seção 2.2, este limite é ultrapassado em cerca de 10 vezes. Esta adição de cloreto de sódio em teores bem acima do permitido pelas referências citadas tem o objetivo de acelerar o processo de corrosão dos vergalhões.

Na mistura de concreto, foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial CP V - ARI (CIPLAN EXTRA FORTE). Este tipo de cimento está especificado na norma ABNT NBR 5733 (1991). A areia utilizada é proveniente da extração natural de rio, da região de Foz do Iguaçu. O teste de granulometria não foi realizado, porém a areia foi adquirida no comércio local especializado em materiais para a construção civil, atendendo às especificações dos padrões da norma ABNT NBR 7211 (2005). O agregado graúdo empregado na mistura do concreto é de origem de rocha basáltica, diâmetro máximo de 9,5 mm, classificado como brita zero, de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2005). A água utilizada foi fornecida pela empresa local de abastecimento de água (SANEPAR).

Foram utilizados no processo de moldagem dos corpos de prova de concreto armado vergalhões de três materiais diferentes (Figura 23): i) Aço CA-50 (ABNT NBR 7480, 1996); ii) GFRP (fibra de vidro) e iii) BFRP (fibra de basalto). As propriedades físicas e mecânicas dos vergalhões de materiais compósitos (GFRP e BFRP) foram apresentadas nas seções 2.3, 2.3.1 e 2.3.2. A norma ABNT NBR 7480 (1996) apresenta as propriedades do vergalhão de Aço CA-50, que, entre as suas principais características pode-se destacar uma resistência característica ao escoamento de 500 MPa. Além disso, esses vergalhões têm saliências transversais ou oblíquas.

O diâmetro dos vergalhões utilizados na moldagem das amostras foi de 6,3 mm, para os vergalhões de Aço CA-50 e 6,0 mm para os vergalhões de GFRP e BFRP. Estes vergalhões também foram submetidos a ensaios de tração que serão apresentados de forma mais detalhada na seção 3.4.3.

Os fabricantes dos vergalhões utilizados neste trabalho estão relacionados na Tabela 9.

Vergalhão	Fabricante	País de origem
Aço CA-50	GERDAU	Brasil
GFPR	COMPOSITE GROUPE	Rússia
BFPR		

Tabela 9 - Fabricantes dos vergalhões.

3.1.5 Moldagem, desmoldagem e armazenamento dos corpos de prova.

3.1.5.1 Segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “pull-out”

Novamente, ainda para fins de teste, tanto do traço utilizado para mistura do concreto quanto da montagem experimental para o ensaio “pull-out” (seção 3.2) utilizando também radiografia *in-situ*, foram moldados outros três corpos de prova para ensaio “pull-out” e outros três corpos de prova para ensaio de compressão simples, utilizando o concreto cujo traço é o mesmo apresentado na Tabela 8 (concreto ainda sem adição de sal). Nesta fase ainda de testes, apenas vergalhões de Aço CA-50 foram utilizados. Antes da moldagem propriamente dita, os moldes cilíndricos de diâmetro 150 mm e 300 mm de altura foram preparados. Para isso foi realizada uma limpeza em seu interior e posteriormente aplicado graxa para facilitar o processo de desmoldagem. Os vergalhões também foram preparados de acordo com o descrito na seção 3.1.3 e Figura 26. Os moldes de EPS, conforme apresentados na Figura 25, foram novamente inseridos dentro do molde para conseguir a geometria pretendida para o corpo de prova. Na Figura 27 são apresentados os moldes prontos para moldagem.

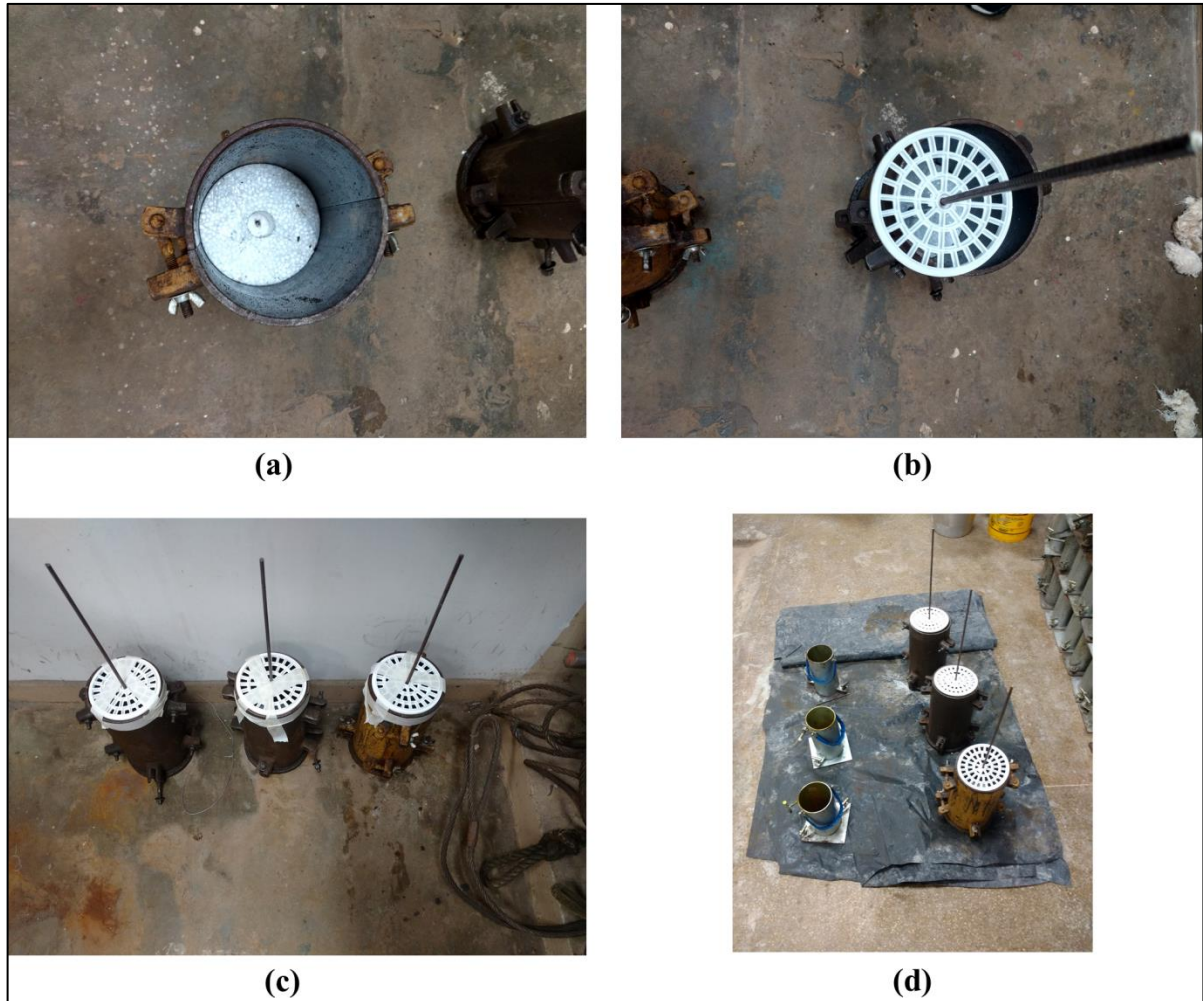


Figura 27 - Preparação dos moldes para o segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “pull-out”. Note, em (b) e (c) que foram utilizadas tampas circulares (tampo de ralo de 150 mm de diâmetro) para centralizar o vergalhão na parte superior do molde. Para garantir a centralidade na parte inferior (fundo) do molde, um círculo de EPS com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura foi utilizado conforme mostrado em (a). Em (d) são também apresentados os moldes para os corpos de prova para ensaios de compressão.

Com os moldes preparados para receber a mistura de concreto, passamos a preparar a mesma. Previamente à realização da mistura do concreto, os materiais necessários para a fabricação da mistura foram pesados e separados. A umidade da areia foi medida e a quantidade de água presente na areia, foi considerada no total necessário de água para mistura. A mistura dos materiais foi realizada no LTC / Itaipu Binacional. Foi utilizada uma betoneira elétrica com capacidade de 300 litros. Após a mistura completa dos materiais e, antes da moldagem dos corpos de prova, foi realizado o teste de abatimento do tronco de cone do concreto (“slump test”) (Figura 28) de acordo com a norma ABNT NBR NM 67 (1998). Na Figura 28(a) mostramos o molde em formato de tronco de cone padrão, onde o concreto é

inserido. Na Figura 28(b) apresentamos o concreto logo após a retirada do molde. Neste momento é medido o abatimento do volume de concreto. O resultado permite obter informações sobre a consistência do concreto. Neste caso, o resultado do teste foi um abatimento de 70 mm. Para peças estruturais simples o valor esperado é de 50 mm a 120 mm.

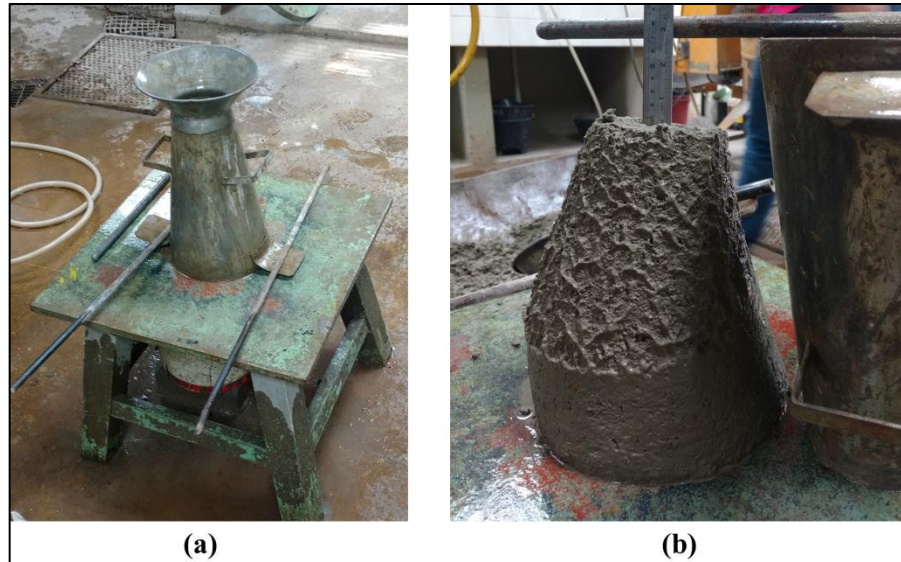


Figura 28 - Teste de abatimento do tronco de cone - Concreto – Teste.

Com a aprovação do valor obtido no ensaio de abatimento (dentro da norma), os moldes foram preenchidos em três camadas. O adensamento do concreto foi realizado conforme norma ABNT NBR 5738 (2003), golpeando 25 vezes cada camada com uma haste metálica. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples seguiu a mesma metodologia da norma ABNT NBR 5738 (2003). Na Figura 29 são mostrados os corpos de prova já moldados.



Figura 29 - Segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*” em fase final de moldagem.

A desmoldagem dos corpos de prova ocorreu após 48 horas da moldagem. Foi retirada apenas a parte metálica dos moldes padronizados, não se retirando ainda os moldes de EPS.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados na câmara úmida, (ambiente com umidade e temperatura controlado) localizada no LTC / Itaipu Binacional. Estes ficaram armazenados neste local até o dia dos ensaios “*pull-out*” e de compressão simples.

Antes da realização dos ensaios “*pull-out*”, alguns testes de aquisição de imagens radiográficas foram novamente efetuados no LICF / UNILA (Figura 30). Os testes mostraram que, com a redução do diâmetro da região com seção reduzida foi possível detectar um contraste que torna possível uma nítida visualização da região entre vergalhão e concreto.

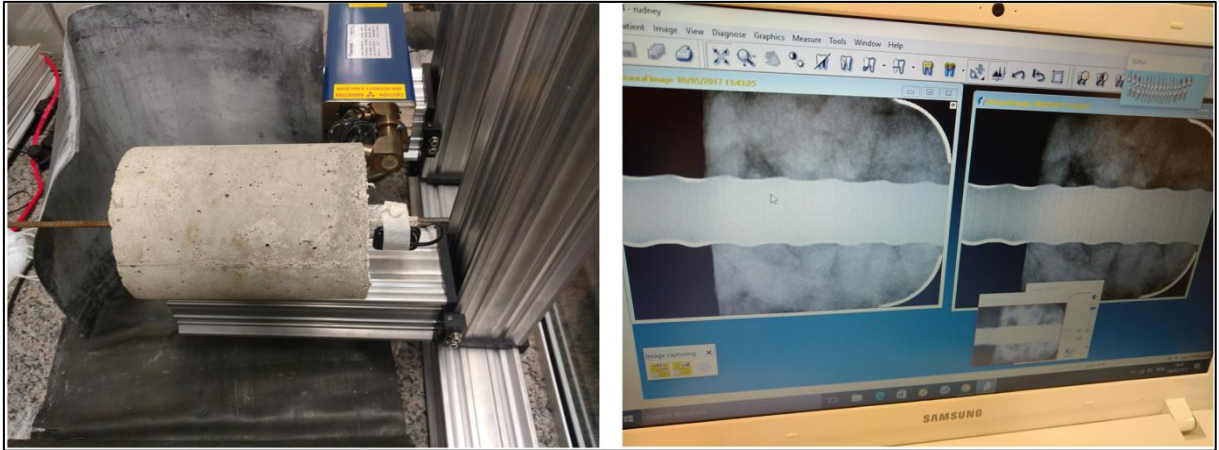


Figura 30 – Aquisição de imagens radiográficas utilizando um corpo de prova do segundo conjunto preparado para testes com ensaio “pull-out”.

Dos três corpos de prova moldados, apenas dois foram submetidos ao ensaio “pull-out”, ainda sem uso de radiografia *in-situ* devido a complexidade (em especial com uso da proteção radiológica) do acoplamento do tubo microfoco de raios X na máquina de ensaio universal do LTC / Itaipu Binacional. O terceiro corpo de prova foi então reservado para os testes “pull-out” com radiografia *in-situ* a serem apresentados nas próximas seções. Os resultados obtidos nestes ensaios “pull-out” sem uso de radiografia *in-situ* estão apresentados na Tabela 10.

Amostra	Tensão de aderência máxima (MPa)
1	7,20
2	10,84

Tabela 10 - Resultados dos ensaios "pull-out" para o segundo conjunto de corpos de prova.

Quanto aos resultados dos ensaios de compressão simples, estes são apresentados na Tabela 11 a seguir.

Amostra	Tensão de compressão (MPa)
1	30,49
2	28,64
3	31,84

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão simples para o segundo conjunto de corpos de prova.

Após estes resultados, verificou-se que, para a sequência da pesquisa, a metodologia adotada na fabricação dos corpos de prova e a montagem experimental do ensaio “*pull-out*” estavam, finalmente, adequadas. Na seção 3.1.5.2 a seguir será apresentado como foi realizado o processo de fabricação dos corpos de prova específicos para o estudo que é o objetivo deste trabalho.

3.1.5.2 Corpos de prova definitivos para ensaios “*pull-out*”

A produção dos corpos de prova para a pesquisa deste trabalho, tanto para os ensaios “*pull-out*” quanto para os ensaios de compressão simples, seguiram a mesma metodologia descrita na seção 3.1.5.1 já apresentada. Neste caso, também foram moldados corpos de prova para o ensaio “*pull-out*” com vergalhões de GFRP e BFRP, além dos vergalhões de Aço CA-50. A moldagem para cada tipo de vergalhão ocorreu em dias diferentes, mas sempre utilizando os traços de concreto apresentados na Tabela 8, tanto para o concreto sem sal quanto para o concreto com sal. Nas Tabelas 12 e 13 são apresentadas as quantidades de corpos de prova produzidos para os ensaios “*pull-out*” e de compressão simples, respectivamente.

Tipo de Vergalhão	Quantidade de corpos de prova – “<i>pull-out</i>”	
	Concreto sem sal	Concreto com sal
Aço CA-50	12	12
BFRP	12	12
GFRP	12	12

Tabela 12 - Quantidade de corpos de prova definitivos para os ensaios “*pull-out*”.

Tipo de Vergalhão	Quantidade de corpos de prova – Compressão	
	Concreto sem sal	Concreto com sal
Aço CA-50	12	12
BFRP	12	12
GFRP	12	12

Tabela 13 - Quantidade de corpos de prova definitivos para os ensaios de compressão simples.

A preparação dos moldes também foi realizada, preliminarmente, à moldagem dos corpos de prova, seguindo a mesma metodologia descrita na seção 3.1.5.1, ou seja, realizando a limpeza dos moldes padrão, aplicando graxa para facilitar o processo de desmolde e posicionando os moldes de EPS na parte inferior dos moldes padrão. Assim como a moldagem, a preparação dos corpos de prova também ocorreu em dias diferentes para cada tipo de vergalhão. Desta forma, para cada moldagem, foi necessário preparar 24 moldes para ensaios “*pull-out*” (12 para concreto sem sal e 12 para concreto com sal), conforme as quantidades da Tabela 12. Para os ensaios de compressão simples foram moldados 24 corpos de prova (12 para concreto sem sal e 12 para concreto com sal), conforme as quantidades da Tabela 13. Nas Figuras 31, 32 e 33 são apresentados os moldes preparados para moldagem dos corpos de prova para ensaio “*pull-out*”, utilizando vergalhões de Aço CA-50, vergalhões de BFRP e vergalhões de GFRP, respectivamente.



Figura 31 - Preparação dos moldes - Ensaio “*pull-out*” – Vergalhões de Aço CA-50.



Figura 32 - Preparação dos moldes - Ensaio “*pull-out*” – Vergalhões de BFPR.



Figura 33 - Preparação dos moldes - Ensaio “*pull-out*” – Vergalhões de GFPR.

Observa-se na Figura 31 que, diferentemente dos moldes preparados no segundo conjunto de corpos de prova para ensaios “*pull-out*”, onde foi utilizado tampo de ralo de 150 mm de diâmetro na parte superior do molde, nesta moldagem foram utilizados moldes circulares de EPS (de menor custo) para garantir a centralidade dos vergalhões.

Novamente, os materiais, para cada dia de mistura, foram pesados e separados anteriormente. A umidade da areia foi medida e a quantidade de água presente foi considerada na quantidade total necessária para mistura, conforme traço apresentado na Tabela 8. Para cada dia de mistura do concreto, ou seja, para cada tipo de vergalhão, foram realizadas duas

misturas do concreto, uma sem adição de cloreto de sódio e outra com adição de cloreto de sódio na proporção apresentada na Tabela 8. A mistura dos materiais foi realizada novamente no LTC / Itaipu Binacional com a mesma betoneira de 300 litros. Após a mistura completa dos materiais e antes da moldagem dos corpos de prova, foi realizado, novamente, o teste de abatimento do tronco de cone do concreto (“slump test”), de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR NM 67, (1998), conforme apresentados nas Figuras 34, 35 e 36.



Figura 34 - Teste de abatimento do tronco de cone para o concreto utilizado no conjunto definitivo de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*” com vergalhões de Aço CA-50. (a) Concreto sem sal. (b) Concreto com sal.

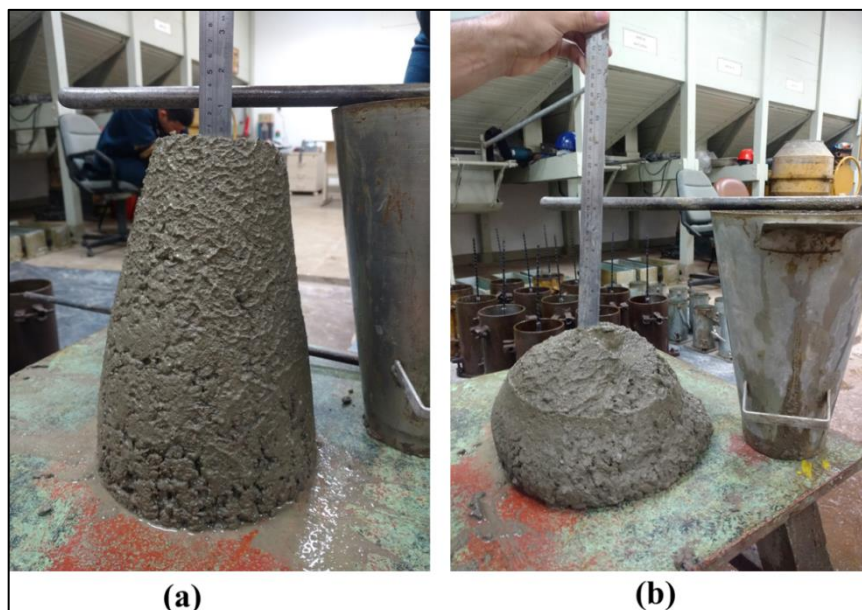


Figura 35 - Teste de abatimento do tronco de cone para o concreto utilizado no conjunto definitivo de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*” com vergalhões de BFPR. (a) Concreto sem sal. (b) Concreto com sal.

A Figura 35 (b) mostra que o abatimento foi muito alto (aproximadamente 160). No momento não foi identificada a possível causa, pois a quantidade de materiais utilizada foi a mesma nas duas misturas (Sem sal e Com sal). Apesar desta diferença no resultado do valor do abatimento do concreto, isso não influenciou significativamente na sua resistência a compressão, conforme será apresentado na seção 4.2.

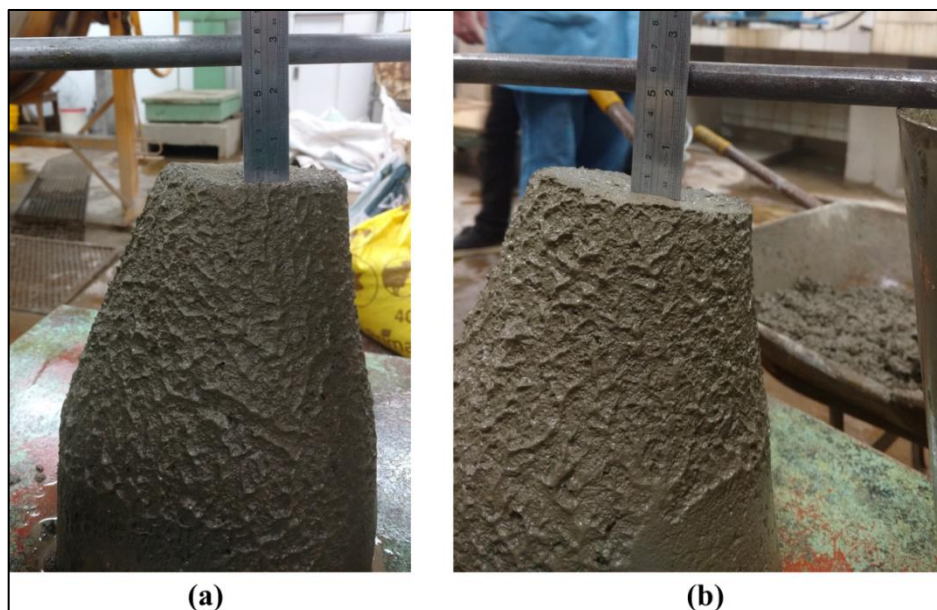


Figura 36 - Teste de abatimento do tronco de cone para o concreto utilizado no conjunto definitivo de corpos de prova para testes com ensaio “pull-out” com vergalhões de GFPR. (a) Concreto sem sal. (b) Concreto com sal.

Novamente, a moldagem dos corpos de prova ocorreu após se verificar que estavam satisfatórios os resultados obtidos nos ensaios de abatimento do tronco de cone. Os moldes foram preenchidos em três camadas. O adensamento do concreto foi realizado conforme norma ABNT NBR 5738 (2003), golpeando 25 vezes cada camada com uma haste metálica.

A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples seguiu a mesma metodologia da norma ABNT NBR 5738 (2003). As Figuras 37, 38 e 39 mostram os corpos de prova moldados.

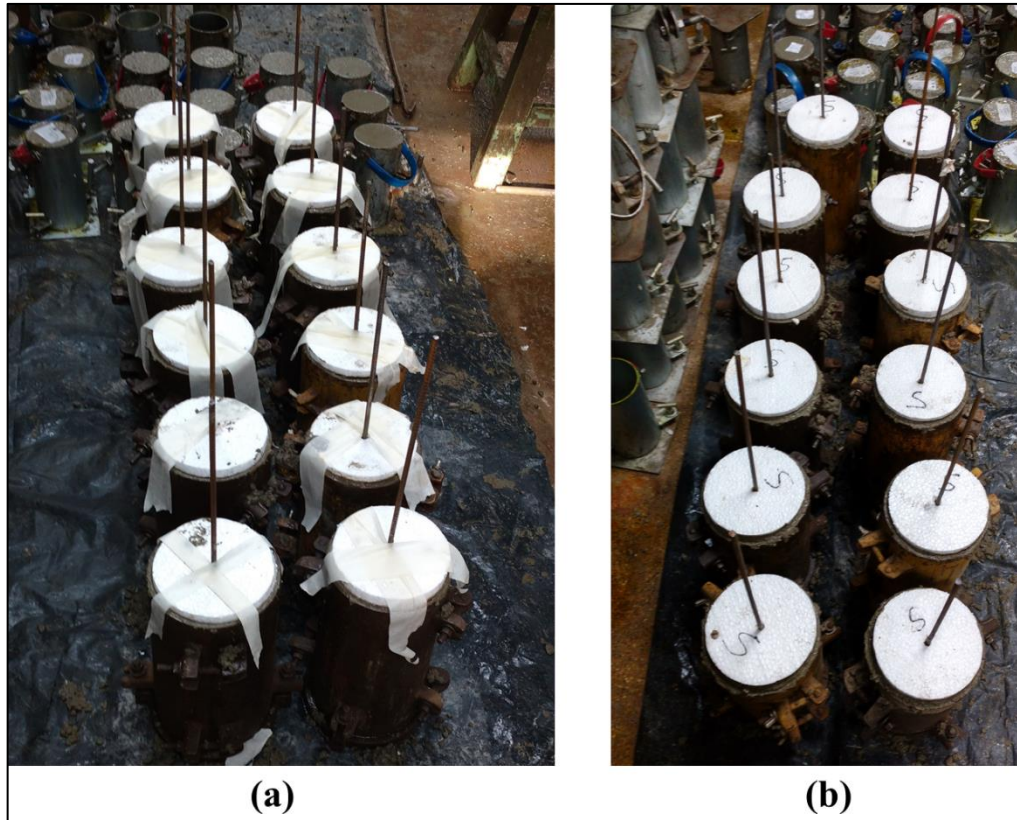


Figura 37 - Corpos de prova moldados - Vergalhões de Aço CA-50. (a) concreto sem sal (b) concreto com sal.



Figura 38 - Corpos de prova moldados - Vergalhões de BFPR. (a) concreto sem sal (b) concreto com sal.



Figura 39 - Corpos de prova moldados - Vergalhões de GFPR. (a) concreto sem sal (b) concreto com sal.

Como anteriormente, a desmoldagem dos corpos de prova ocorreu após 48 horas da moldagem. Foi retirada apenas a parte metálica dos moldes padronizados, não se retirando ainda os moldes de EPS. Nas Figuras 40, 41 e 42 são apresentados os corpos de prova já desmoldados.

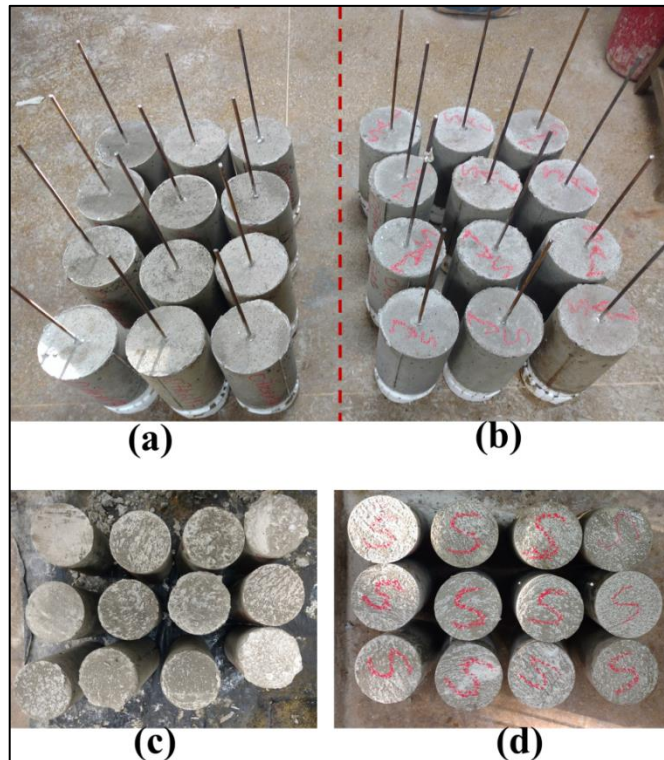


Figura 40 - Corpos de prova desmoldados para testes com ensaio “pull-out” (a e b) e ensaios de compressão simples (c e d) com vergalhões de Aço CA-50. (a e c) Sem adição de cloreto de sódio. (b e d) Com adição de cloreto de sódio.

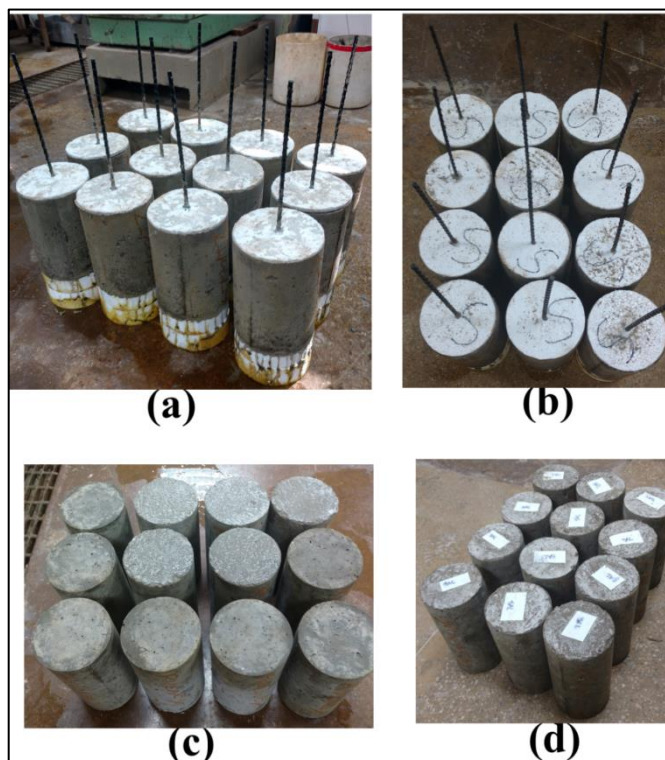


Figura 41 - Corpos de prova desmoldados para testes com ensaio “pull-out” (a e b) e ensaios de compressão simples (c e d) com vergalhões de BFPR. (a e c) Sem adição de cloreto de sódio. (b e d) Com adição de cloreto de sódio.

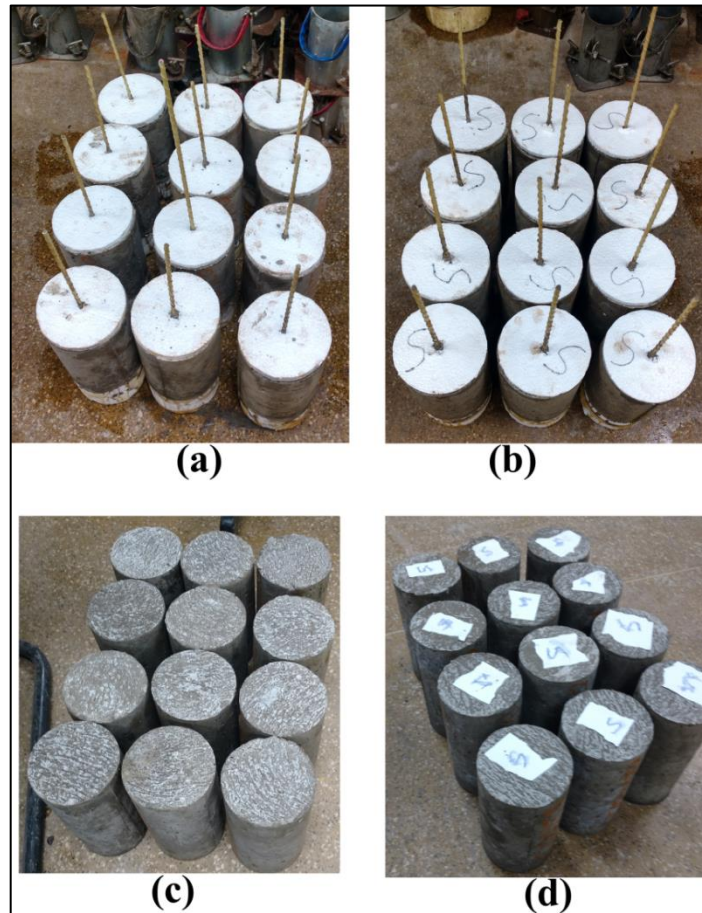


Figura 42 - Corpos de prova desmoldados para testes com ensaio “*pull-out*” (a e b) e ensaios de compressão simples (c e d) com vergalhões de GFPR. (a e c) Sem adição de cloreto de sódio. (b e d) Com adição de cloreto de sódio.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram, também, armazenados na câmara úmida do LTC / Itaipu Binacional. Estes ficaram armazenados neste local até o dia dos ensaios “*pull-out*” e de compressão simples. Nesta câmara, o ambiente era mantido com úmido durante todo o tempo, por meio de um lançamento periódico de água, diretamente sobre os corpos de prova.

3.1.6 Montagem dos corpos de prova para ensaios “*pull-out*”

A Figura 43 mostra os principais componentes da montagem experimental para realização dos ensaios “*pull-out*” com os corpos de prova definitivos:

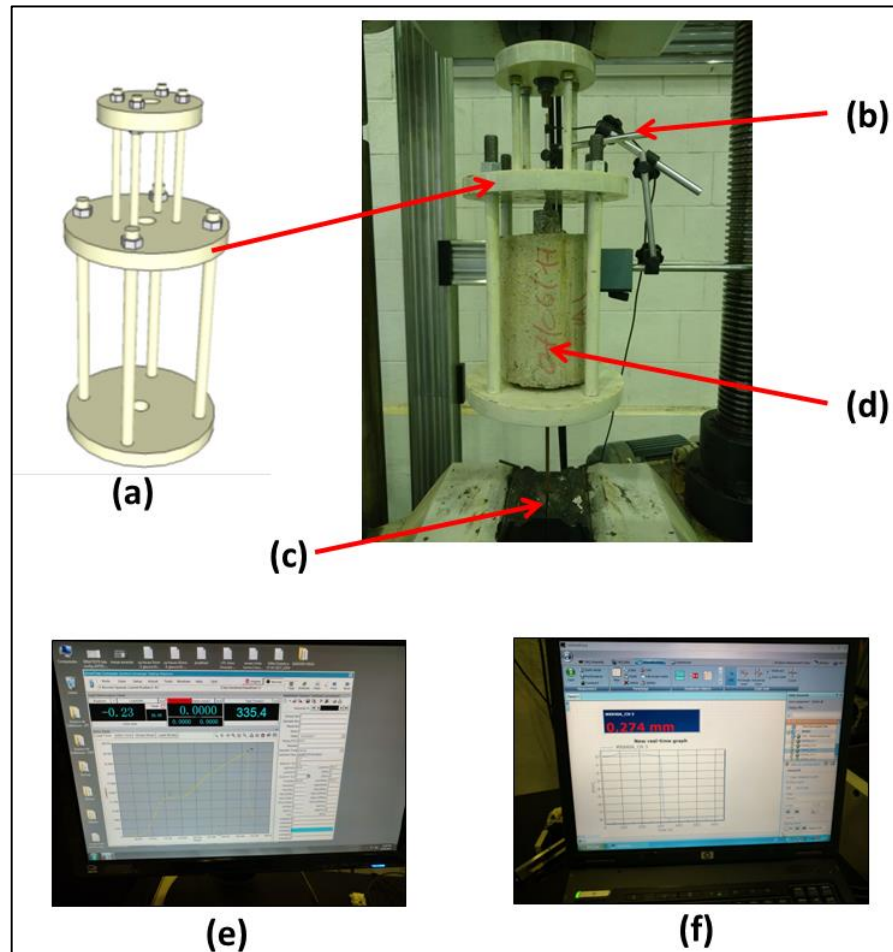


Figura 43 - Montagem experimental para realização do ensaio "pull-out" com os corpos de prova definitivos. (a) Suporte metálico, agora pintado de branco. (b) Indicador de deslocamento do vergalhão. c) Detalhe do vergalhão fixado à máquina de ensaio universal do LTC / Itaipu Binacional. d) Corpo de prova de concreto armado. (e) Imagem da tela do computador mostrando o software que controla a operação da máquina de tração e armazena os dados do carregamento versus tempo. (f) Imagem da tela do computador mostrando o software que armazena os dados de deslocamento versus tempo, medidos pelo indicador de deslocamento.

Foram realizados três séries de ensaios ao longo do tempo, com o objetivo de observar o comportamento da aderência entre os vergalhões e o concreto, tanto para o concreto sem sal quanto para o concreto com sal.

A quantidade de corpos de prova ensaiados e o tempo decorrido após a moldagem estão relacionados na Tabela 14 a seguir.

Tipo de vergalhão	Salinidade	Tempo após a moldagem		
		63 dias	217 dias	315 dias
Aço CA-50	Sem sal	2	2	2
	Com sal	2	2	2
BFPR	Sem sal	2	2	2
	Com sal	2	2	2
GFPR	Sem sal	2	2	2
	Com sal	2	2	2

Tabela 14 - Quantidade de corpos de prova ensaiados - ensaio “pull-out”.

Pode se observar que a quantidade de corpos de prova ensaiados apresentados na Tabela 14 é inferior a quantidade que foi moldada, conforme a Tabela 12. As datas para realização dos ensaios foram escolhidas considerando a disponibilidade para utilização do LTC / Itaipu Binacional e também o prazo máximo para conclusão deste trabalho. Desta forma, os tempos (63, 217 e 315), que equivalem respectivamente a 9, 31 e 45 semanas, foram escolhidos de tal forma que os intervalos entre os ensaios não fossem muitos diferentes, porém se restringindo as limitações já relatadas anteriormente.

Os demais corpos de prova serão ensaiados posteriormente a conclusão deste trabalho, em datas ainda a serem definidas.

Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados na seção 4.

3.2 Montagem *in-situ* do equipamento de raios X

Imagens radiográficas foram adquiridas *in-situ* simultaneamente com alguns dos ensaios “pull-out”. Para isso, uma fonte de raios X microfoco (tamanho de foco 4,5 μm e tensão de operação máxima de 90 kV) e um detector intra-oral digital (36,02 x 25,99 mm^2 com 1896 x 1368 pixels e tamanho de pixel de 19 x 19 μm^2) foram anexados à máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional. As imagens radiográficas foram adquiridas na região de diâmetro reduzido (diâmetro entre 35 mm e 40 mm e altura de 40 mm). O tubo de raios X foi ajustado para trabalhar em 70 kV e 43 μA . Este foi o melhor ajuste onde conseguimos conciliar a proteção radiológica adequada com um contraste na imagem radiográfica suficiente para distinguir a região entre vergalhão e concreto, em conformidade com as simulações apresentadas na seção 3.1.2. Para reduzir o tempo de transferência de dados da coleta de dados *in-situ*, o detector intra-oral digital foi configurado no modo

“binning” (2 x 2 pixels) (tamanho de pixel de $38 \times 38 \mu\text{m}^2$). No entanto, como o feixe de raios X é divergente e sabendo que as distâncias fonte-amostra e amostra-detector foram de 90 mm e 25 mm, respectivamente, a ampliação da imagem M foi de, aproximadamente, 1,3 vezes. Então, as imagens radiográficas adquiridas mostram um tamanho de pixel virtual de aproximadamente $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Com essa configuração, cada quadro do vídeo radiográfico (radiografia *in-situ*) foi adquirido com um tempo de repetição de 4 segundos. A limitação da taxa de quadros do vídeo radiográfico se deve à velocidade de transferência da imagem do detector bidimensional para o computador (via USB 2.0).

Para assegurar a proteção radiológica, placas de chumbo de 2 mm de espessura foram montadas ao redor do suporte metálico. A radiação ambiente foi monitorada por contador Geiger. Nas seções 3.3.1 e 3.3.2 serão apresentados em mais detalhes as especificações da fonte de raios X e do detector bidimensional utilizados neste trabalho.

A montagem do tubo microfoco de raios X na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional para aquisição de imagens radiográficas durante o ensaio “*pull-out*” é mostrada na Figura 44.

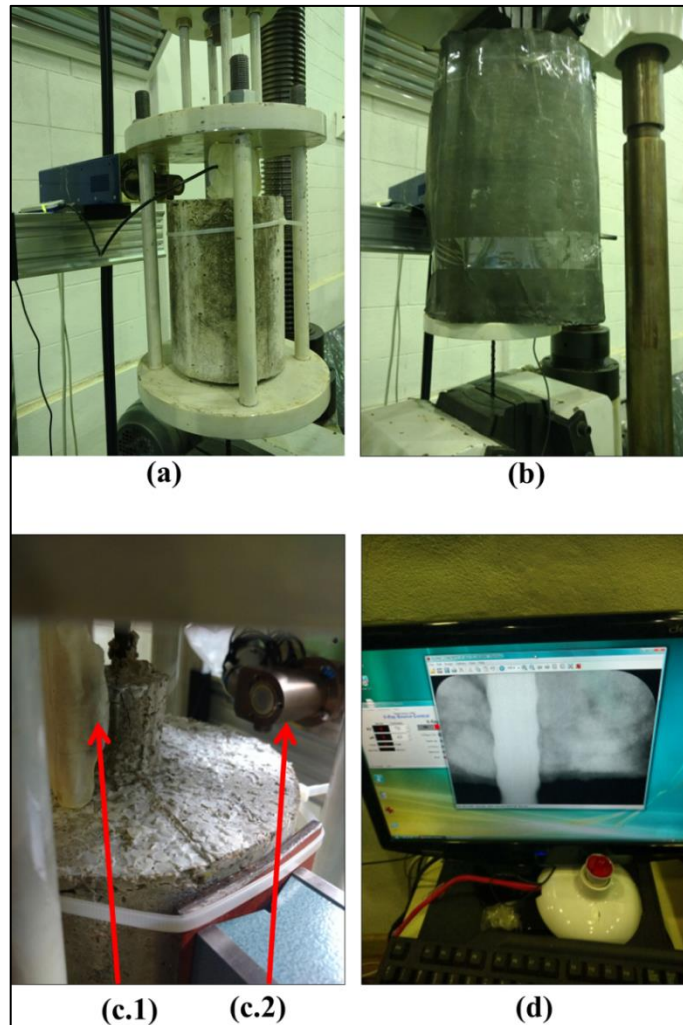


Figura 44 - Montagem equipamento do tubo microfoco de raios X na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional para aquisição de imagens radiográficas *in-situ* durante o ensaio “*pull-out*”. (a) Tubo de raios X posicionado próximo ao corpo de prova a ser submetido ao ensaio. (b) Detalhe da montagem da placa de chumbo, utilizada como proteção radiológica e montada ao redor do suporte metálico. (c.1) Posicionamento do detector intra-oral digital. (c.2) Janela do tubo microfoco de raios X. (d) Tela do computador mostrando o software para aquisição de radiografia *in-situ*.

Inicialmente, o planejava-se coletar imagens radiográficas *in-situ* de todos os ensaios “*pull-out*” com todos os corpos de prova (diferentes vergalhões, com e sem adição de sal na mistura do concreto). O primeiro teste foi realizado no último, dos três corpos de prova, do segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*”, descritos na seção 3.1.5.1 (corpo de prova de concreto armado sem sal com vergalhão de Aço CA-50). Nos corpos de prova definitivos, a coleta de imagens radiográficas nos ensaios “*pull-out*” foi realizada em apenas três corpos de prova (concreto armado com adição sal e vergalhão de Aço CA-50, concreto armado sem adição de sal e vergalhão de Aço CA-50 e concreto armado com adição de sal de vergalhão de BFPR) com tempo de envelhecimento de 63 dias após a

moldagem. Na seção 4 são apresentados os resultados obtidos da radiografia *in-situ* destas amostras.

Quanto aos corpos de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50 para as demais datas de ensaios (217 e 315 dias), a radiografia *in-situ* durante o ensaio “*pull-out*” também não foi realizada. Esta decisão ocorreu após análise de imagens radiográficas de corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50, cuja coleta ocorreu no LICF / UNILA em datas imediatamente anteriores aos ensaios “*pull-out*”. Pelas imagens obtidas, não foi possível observar diferença de contraste perceptível entre corpos de prova ensaiados em datas de envelhecimento distintas. Caso algum contraste fosse encontrado nas imagens radiográficas, isso indicaria um possível nível de corrosão dos vergalhões. Com estes testes terão continuidade ao longo dos próximos dois anos, faremos os mesmos testes antes do ensaio “*pull-out*”. Caso alguma diferença no contraste seja encontrada, os próximos ensaios “*pull-out*” com os corpos de prova com vergalhão de Aço CA-50 serão realizados com a aquisição *in-situ* de imagens radiográficas. Nas Figuras 45 e 46 são apresentadas a seções transversais das imagens radiográficas obtidas (na região próxima ao vergalhão e o concreto) para corpos de prova moldados com concreto com sal e sem sal em diferentes tempos de envelhecimento. Não é possível encontrar variações significativas no perfil das imagens na região de contato entre os dois materiais. Caso houvesse uma diferença significativa, poderíamos correlacionar a mesma com a presença de corrosão devido à menor atenuação do óxido de ferro aos raios X.

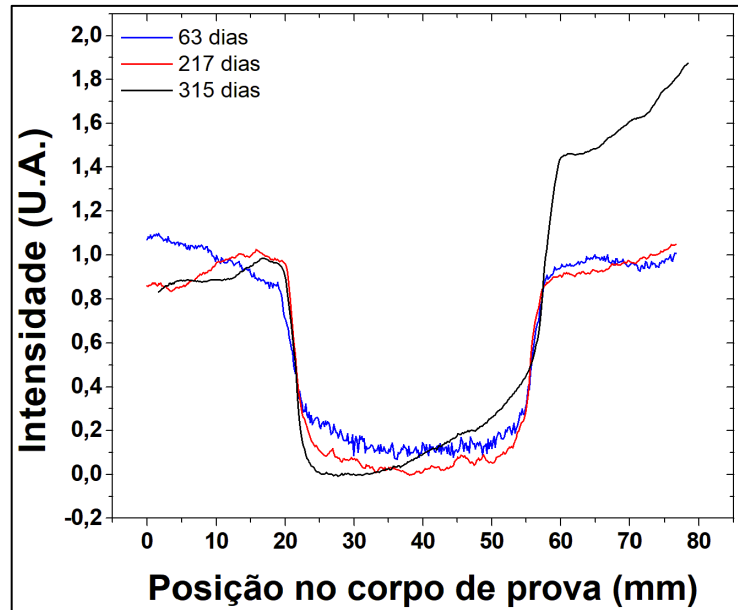


Figura 45 – Seções transversais das imagens radiográficas na região de adesão entre concreto e vergalhão para distintos corpos de prova de concreto armado com sal e com vergalhão de Aço CA-50 em diferentes tempos de envelhecimento. As intensidades foram normalizadas em função da intensidade máxima do lado esquerdo do vergalhão para o corpo de prova com idade de envelhecimento de 63 dias.

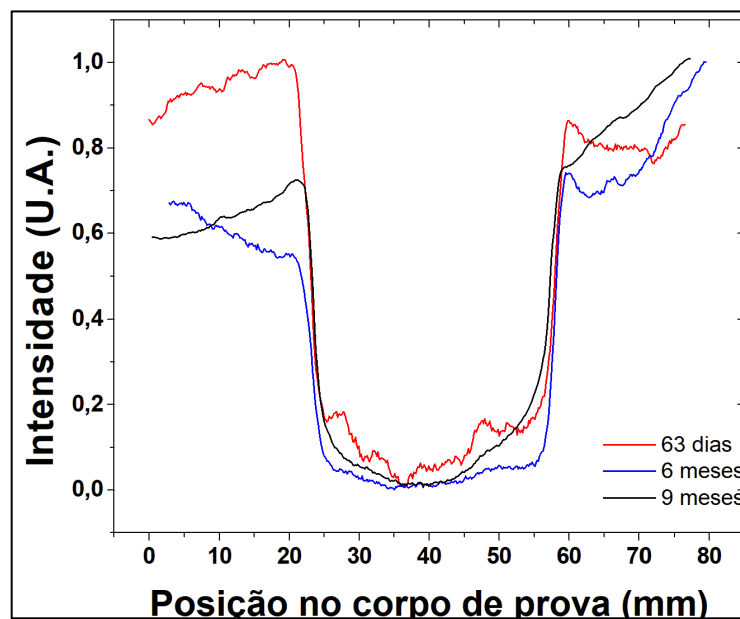


Figura 46 - Seções transversais das imagens radiográficas na região de adesão entre concreto e vergalhão para distintos corpos de prova de concreto armado sem sal e com vergalhão de Aço CA-50 em diferentes tempos de envelhecimento. As intensidades foram normalizadas em função da intensidade máxima do lado esquerdo do vergalhão para o corpo de prova com idade de envelhecimento de 63 dias.

Quanto aos corpos de prova com vergalhões de BFPR e GFPR, conforme mostrado, teoricamente, na seção 3.1.1, com o tubo de raios X que temos disponível, (tensão de operação máxima de 90 kV) torna-se difícil a aquisição de imagens radiográficas que

mostrem uma diferença de contraste perceptível na região entre o vergalhão e o concreto. Para verificar isso, fizemos um teste radiográfico no primeiro ensaio “*pull-out*” com corpos de prova definitivos e vergalhão de BFPR (63 dias após a moldagem) (Figura 47), onde não foi possível encontrar um contraste perceptível na região entre vergalhão e concreto. Tentando encontrar alternativas para tal detecção (por exemplo, explorar contraste por fase), posteriormente ao ensaio, fizemos alguns outros testes radiográficos no LICF / UNILA variando as distâncias fonte-amostra e amostra-detector para corpos de prova com vergalhões BFPR e GFPR com e sem adição de sal. Dentro da sensibilidade do nosso detector, não conseguimos encontrar contraste perceptível na região entre vergalhão e concreto (Figura 48). Devido a isso, e somado aos requisitos de proteção radiológica, que deveriam ser levados em consideração, caso tivéssemos que coletar imagens a maiores distâncias do corpo de prova, determinou que para os demais ensaios “*pull-out*” com vergalhões de BFPR e GFPR, não se realizaram a aquisição de imagens radiográficas *in-situ*.

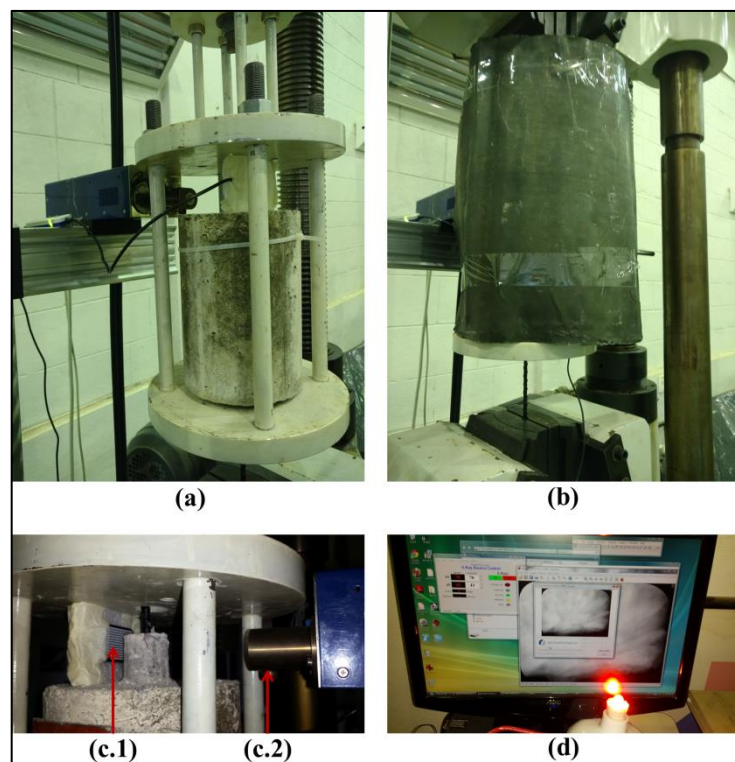


Figura 47 – Montagem equipamento do tubo microfoco de raios X na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu Binacional para aquisição de imagens radiográficas *in-situ* durante o ensaio “*pull-out*” com corpos de prova de BFPR. (a) Tubo de raios X posicionado próximo ao corpo de prova a ser submetido ao ensaio. (b) Detalhe da montagem da placa de chumbo, utilizada como proteção radiológica e montada ao redor do suporte metálico (c.1) Posicionamento do detector intra-oral digital. (c.2) Janela do tubo microfoco de raios X. (d) Tela do computador mostrando o software para aquisição de radiografia *in-situ*.

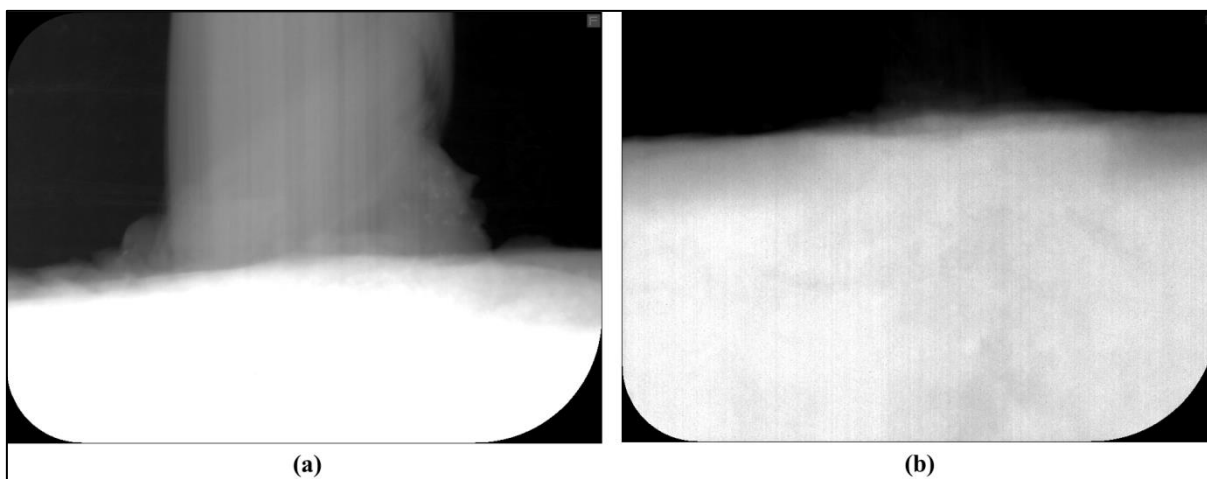


Figura 48 - Aquisição de imagens radiográficas no LICF / UNILA para verificar a presença de contraste entre vergalhão e concreto para variadas distâncias fonte-amostra, amostra-detector. (a) corpo de prova de BFPR. (b) corpo de prova de GRPR.

3.2.1 Especificações do equipamento de raios X

Neste trabalho, para a aquisição de imagens radiográficas foi utilizada a fonte de raios X microfoco [Kevex PXS5-927 Tungsten (W) (90 kV) com tamanho de foco de 5 μm] produzido pela ThermoFischer Scientific (ThermoFischer Scientific). Tal equipamento foi adquirido por projeto individual pelo edital Fluxo Contínuo da Fundação Araucária (proc. no. 302/2013) e está disponível para uso no LICF / UNILA. As principais características relacionadas deste equipamento estão relacionadas na Tabela 15.

Thermo Scientific PXS5-927 - Especificações	
Faixa de tensão operacional	20 kV à 90 kV
Máxima potência	8 watts, 45 à 90kV
Corrente máxima	0,178 μA à 45kV
Tamanho de foco	5 microns em 4 watts, 45 à 90kV 9 microns em 8 watts, 45 à 90kV
Cone de iluminação	45°
Distância entre o ponto focal e a janela	8,5 mm
Diâmetro da janela	Aproximadamente 11,7 mm
Material e espessura da janela	Berílio, espessura de 0,127 mm
Material do alvo	Tungstênio (W)
Peso	Aproximadamente 3,6 kg
Interface de controle	Controle digital e monitoramento das condições de operação e status através da porta RS-232-C

Tabela 15 - Características da fonte de raios X utilizada. Fonte: ThermoFischer Scientific.

A Figura 49 mostra a imagem da fonte de raios X da ThermoFischer Scientific, modelo Kevex PXS5-927, conforme já especificado na Tabela 12.



Figura 49 - Tubo de raios X microfoco modelo Kevex PXS5-927. Fonte: ThermoFischer Scientific.

3.2.2 Especificações do detector digital

Na aquisição de imagens radiográficas, foi utilizado um detector intra-oral digital (KavoKerr Snapshot2) de 36,02 x 25,99 mm² com 1896 x 1368 pixels (tamanho de pixel de 19 x 19 μm²).

3.3 Caracterizações complementares

3.3.1 Difração de raios X

Amostras dos vergalhões (Aço CA-50, BFPR e GFPR) foram também submetidas à medidas de difração de raios X no difratômetro multi-usuário (Panalytical Empyrean) da UNILA disponível no LICF, tendo por objetivo a caracterização das composições estrutural de tais materiais. A Figura 50 mostra o arranjo experimental (geometria θ - 2θ) na parte interna do difratômetro Panalytical Empyrean de utilizado.

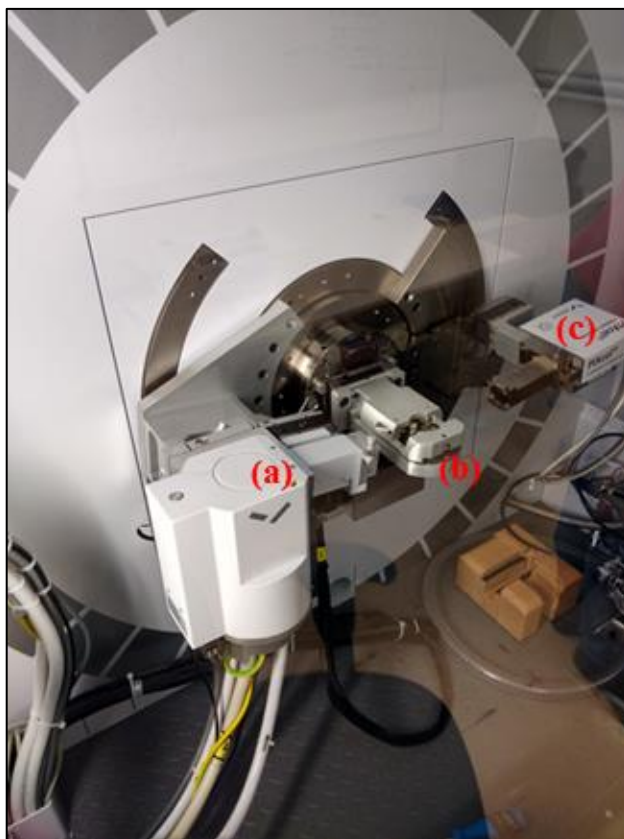


Figura 50 – Arranjo experimental na geometria θ - 2θ , no difratômetro Panalytical-Empyrean do LICF / UNILA. (a) Tubo de raios X, (b) amostra e (c) detector CCD (“charge coupled device”) bidimensional Pixel3D.

Primeiramente, amostras de aproximadamente 0,5 cm de comprimento por, aproximadamente, 6 mm de diâmetro, de cada tipo de vergalhão (Aço CA-50, BFPR e GFPR) foram lixadas na politriz metalográfica também disponível no LICF / UNILA. Em seguida as mesmas foram submetidas à difração de raios X. As medidas foram realizadas utilizando um tubo de raios X com alvo de Cu com o difratômetro operando em 40 kV e 20 mA. Uma fenda XY de 5 mm x 0,5 mm (largura x altura) foi utilizada. Os resultados são apresentados nos difratogramas da Figura 51. As indexações mostram a liga de Ferro Manganês na razão de 0,95/0,05 - Ficha JCPDS no. 98-010-3521) para os vergalhões de Aço CA-50, conforme esperado para este material. Para os vergalhões de BFPR e GFPR encontramos difração apenas da massa de embutimento utilizada no porta amostra. Por este motivo não apresentamos estes resultados aqui.

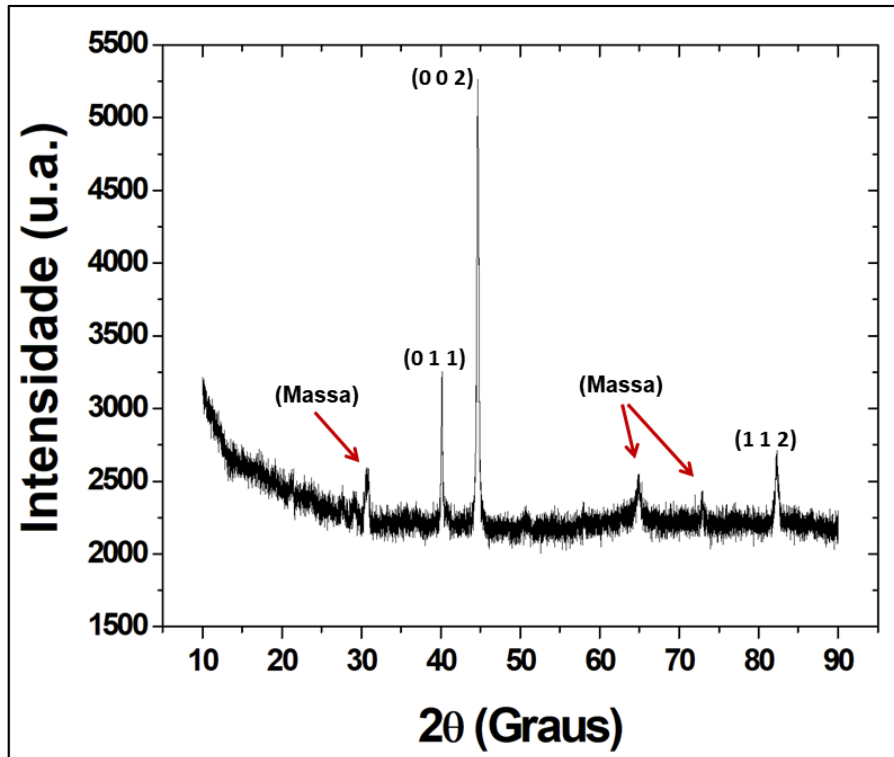


Figura 51 - Difratograma do vergalhão de Aço CA-50. Nos gráficos são indicados os índices de Miller dos principais planos cristalográficos. Também são indicados os picos referente à massa de embutimento utilizada no porta amostra.

Como nas medidas anteriores não foi possível atribuir nenhum pico de difração para as amostras de vergalhões de BFPR e GFPR, resolvemos repetir as medidas nos mesmos, contudo moendo os vergalhões e preparando um pó dos mesmos. A moenda foi realizada com um gral de porcelana com pistilo. A Figura 52 mostra o porta amostra preenchido com o pó obtido a partir de uma amostra de vergalhão de BFPR.



Figura 52 - Porta amostra em teflon, com a amostra, em pó, do vergalhão de BFPR.

Os difratogramas destas novas medidas são apresentados na Figura 53. Notamos os mesmo resultados para os dois diferentes tipos de amostras, isto nos levou a supor que poderiam ser feitos de um mesmo material. Não conseguimos indexar os dados. Contudo como os picos tem uma largura angular grande, suspeitou-se que poderiam ser da resina presente em ambos os vergalhões. Isso nos levou a realizar medidas de espectroscopia (EDS – “*energy dispersive X-ray spectroscopy*”) disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica multiusuário da UNILA, com o intuito de quantificar os elementos presentes nos vergalhões de BFRP e GFRP.

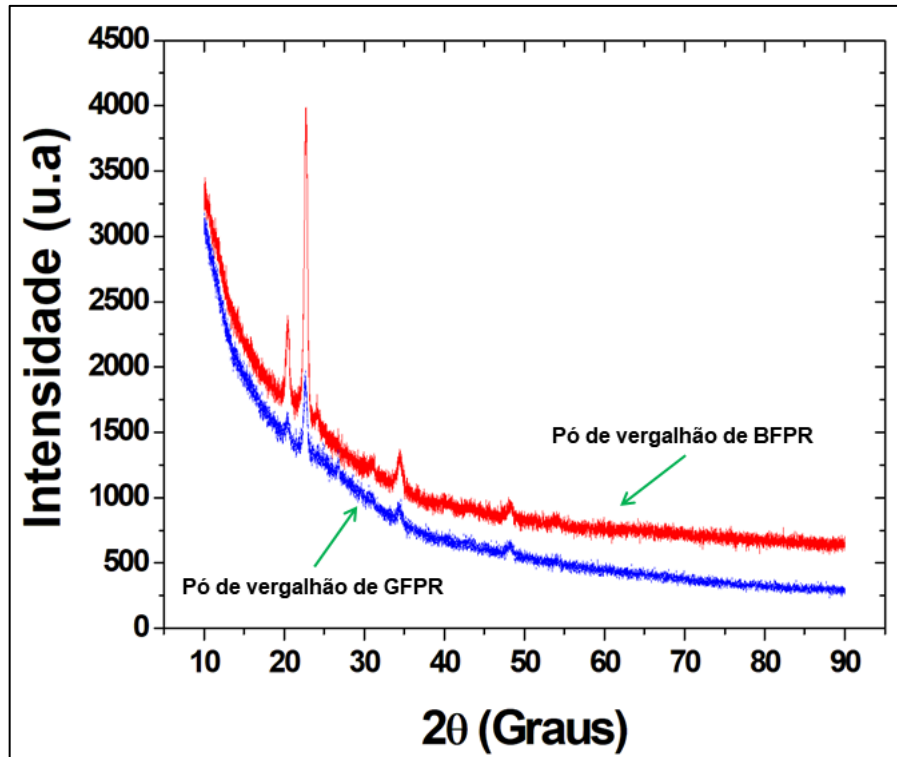


Figura 53 - Difratogramas dos pós obtidos dos vergalhões BFPR e GFPR.

3.3.2 Microscopia eletrônica

Para realização deste ensaio foram preparada no total 6 amostras [Figura 52 (b)], distribuídas conforme apresentado na Tabela 16.

Vergalhão	Seção	Quantidade
BFPR	Longitudinal	2
	Transversal	1
	Transversal (esgarçada)	1
GFPR	Longitudinal	1
	Transversal	1

Tabela 16 – Quantidade de amostra preparadas para o ensaio de microscopia eletrônica.

A amostra de BFPR de seção transversal (esgarçada) foi obtida ocasionalmente durante o corte do vergalhão.

Para análise das amostras de vergalhões de BFPR e GFPR por microscopia eletrônica por varredura (MEV) as amostras tiveram que ser preparadas com polimento e/ou limpeza de superfície e, em seguida metalização de superfície. Para polimento, utilizamos a politriz

metalográfica do LICF / UNILA. Para limpeza, as mesmas foram imersas em Álcool isopropílico, por 10 minutos. A metalização foi feita utilizando uma evaporadora anexa ao MeV, utilizando como material uma liga de Ouro/Paládio. Com as amostras prontas, as mesmas foram inseridas no microscópio. O esquema experimental é mostrado na Figura 54.

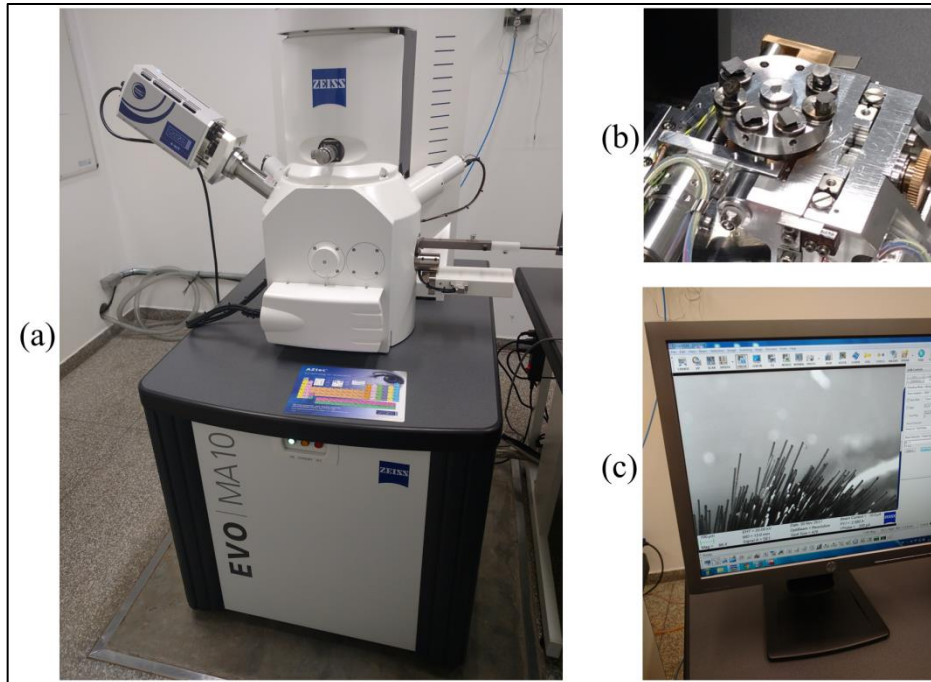


Figura 54 - Medidas de microscopia Eletrônica por Varredura – MEV. (a) Microscópio Zeiss EVO MA10 disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UNILA. (b) Goniômetro para fixação da amostra dentro da câmara de vácuo do MEV. (c) Tela do computador mostrando as fibras de basalto na ponta de um pedaço de vergalhão de BFPR esgarçado durante o corte.

Para obtenção de informações da composição química dos materiais foi utilizada a técnica de Espectroscopia de Dispersão de Energia dos raios X (EDS). Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 55, 56, 57 e 58, para medidas realizadas em diferentes seções dos distintos vergalhões (GFPR e BFPR).

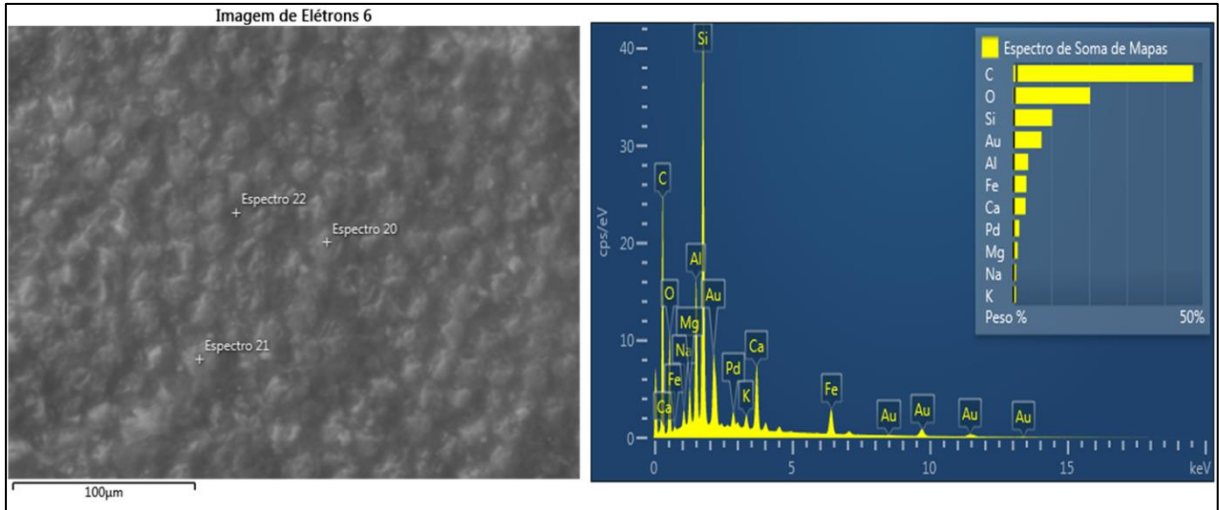


Figura 55 – Resultados obtidos do MEV / EDS – Vergalhão de BFPR – Seção transversal às fibras. (a) Imagem por microscopia eletrônica, indicando três pontos distintos onde as medidas de EDS foram realizadas. (b) Resultado do EDS indicando os principais elementos químicos presentes no vergalhão: Carbono (C), Oxigênio (O), Silício (Si), Ouro (Au), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Paládio (Pd), Magnésio (Mg), Sódio (Na) e Potássio (K). Carbono é o elemento presente na resina. Ouro (Au) e Paládio (Pd) são decorrentes da metalização da superfície.

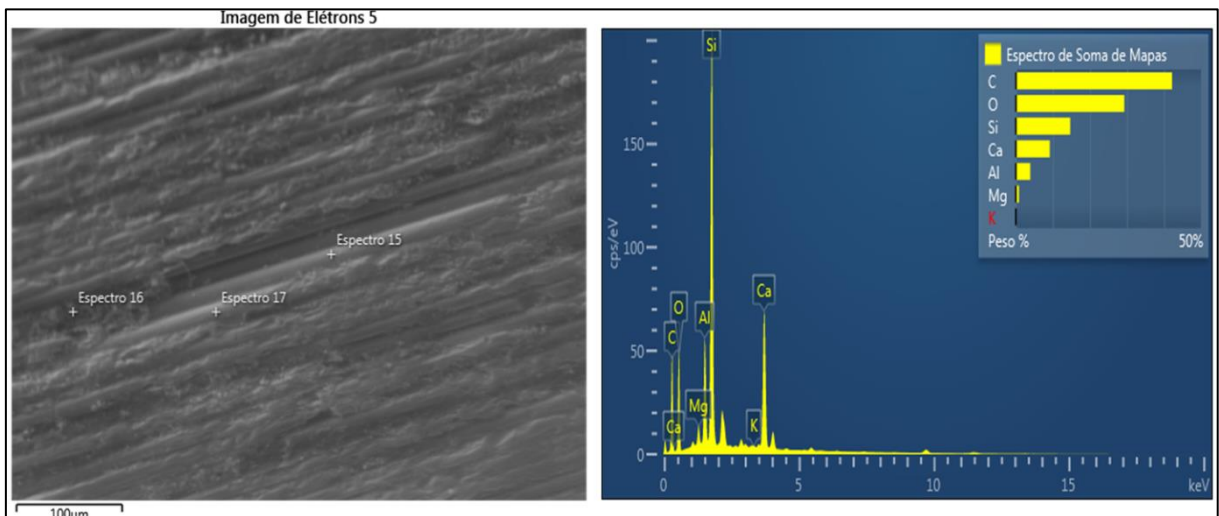


Figura 56 - Resultados obtidos do MEV / EDS – Vergalhão de BFPR – Seção paralela às fibras. (a) Imagem por microscopia eletrônica, indicando três pontos distintos onde as medidas de EDS foram realizadas. (b) Resultado do EDS indicando os principais elementos químicos presentes no vergalhão: Carbono (C), Oxigênio (O), Silício (Si), Cálcio (Ca), Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Potássio (K). Carbono é o elemento presente na resina.

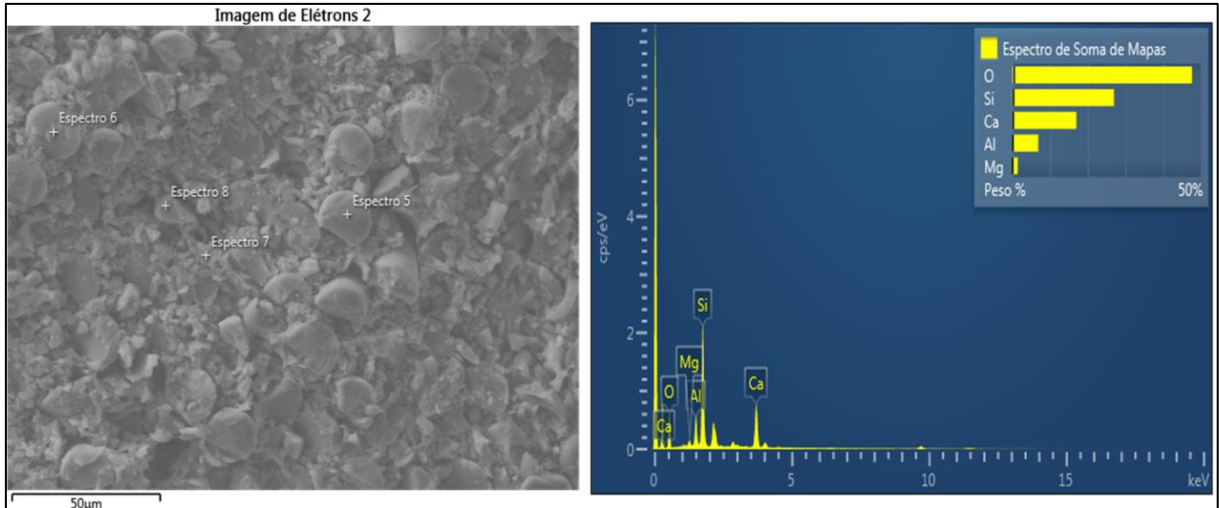


Figura 57 - Resultados obtidos do MEV / EDS – Vergalhão de GFPR – Seção transversal às fibras. (a) Imagem por microscopia eletrônica, indicando quatro pontos distintos onde as medidas de EDS foram realizadas. (b) Resultado do EDS indicando os principais elementos químicos presentes no vergalhão: Oxigênio (O), Silício (Si), Cálcio (Ca), Alumínio (Al) e Magnésio (Mg). Ausência do elemento químico Carbono (C), pois este elemento está presente somente na resina.

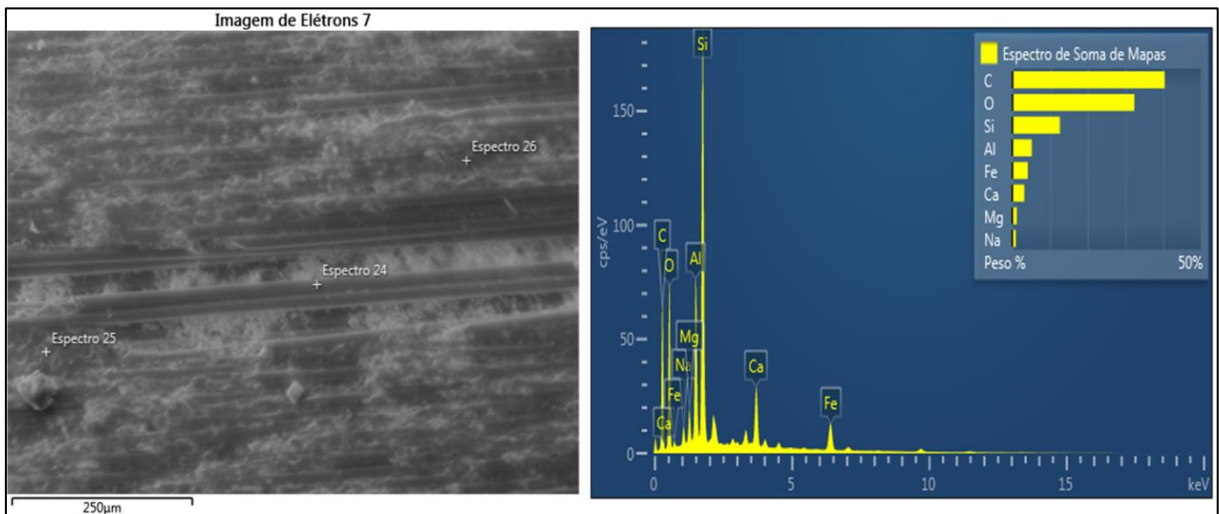


Figura 58 - Resultados obtidos do MEV / EDS – Vergalhão de GFPR – Seção paralela às fibras. (a) Imagem por microscopia eletrônica, indicando três pontos distintos onde as medidas de EDS foram realizadas. (b) Resultado do EDS indicando os principais elementos químicos presentes no vergalhão: Carbono (C), Oxigênio (O), Silício (Si), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Sódio (Na). Carbono é o elemento presente na resina.

Os resultados de EDS mostrados nas Figuras 55, 56, 57 e 58 estão em acordo com o que é exposto na literatura (WEI e CAO, *et al.*, 2010), conforme apresentamos nas Tabelas 2 e 5. Para vergalhões GFPR as fibras são compostas basicamente de O, Si, Ca, Al. Para vergalhões BFPR as fibras são compostas basicamente de O, Si, Fe, Ca, Mg, Na e K.

Ainda foi feita uma análise por EDS de uma fibra de basalto isolada, no vergalhão de BFPR com a ponta esgarçada (Figura 59). Os resultados mostram a ausência do Carbono, pois tal elemento químico é encontrado somente na resina do vergalhão, e como a análise neste caso é somente em pontos localizados na fibra de basalto, a ausência do elemento químico Carbono (C) era esperado. Esta situação também é observada na Figura 57 (Resultados obtidos do MEV / EDS – Vergalhão de GFPR – Seção transversal às fibras), na qual os quatro pontos escolhidos para a análise por EDS coincidem com as seções transversais de fibras de vidro presentes nos vergalhões de GFPR. Como nenhum destes quatro pontos está localizado em regiões onde há a presença de resina, era esperada a ausência do elemento químico Carbono (C) no resultado.

Ainda com vistas a determinar o tamanho das fibras, imagens de MEV foram realizadas com maior ampliação (Figuras 60 e 61). Diâmetros entre 16 μ m e 18 μ m foram encontrados para os dois tipos de fibra (BFPR e GFPR). Esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos por imagens radiográficas das fibras de basalto (Figura 62), na qual é possível por meio da contagem de pixels, estimar o diâmetro da fibra em 16 μ m.

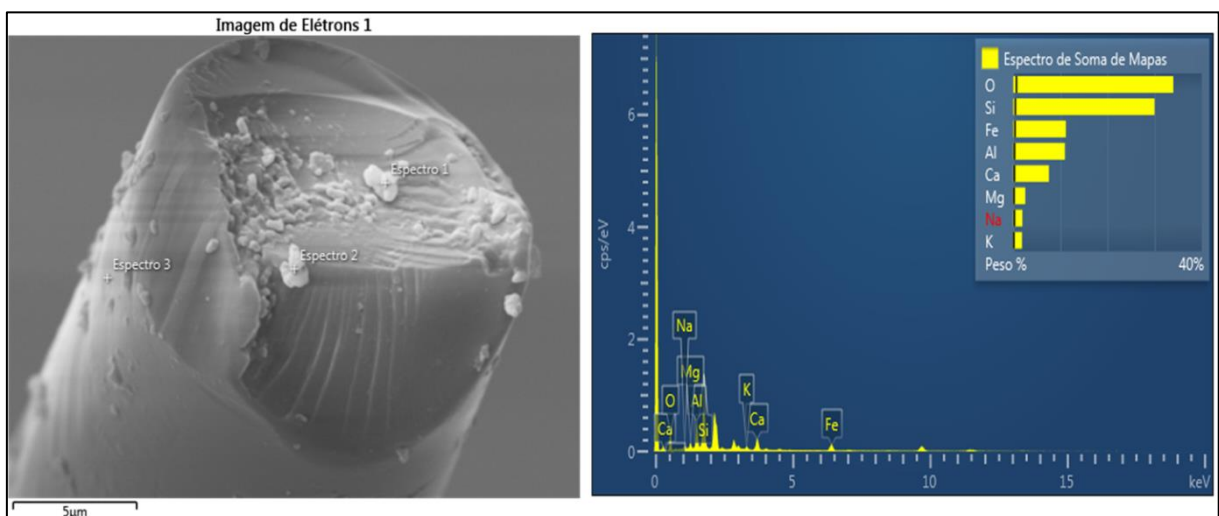


Figura 59 - Resultados obtidos do MEV / EDS – Fibra de basalto isolada. (a) Imagem por microscopia eletrônica, indicando três pontos distintos onde as medidas de EDS foram realizadas. (b) Resultado do EDS indicando os principais elementos químicos presentes no vergalhão: Oxigênio (O), Silício (S), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na) e Potássio (K). Ausência do elemento químico Carbono (C), pois este elemento está presente somente na resina.

Observa-se que nas Figuras 54, 55, 56 e 57 os elementos químicos Ouro (Au) e Paládio (Pd) estão ausentes dos resultados. Esta exclusão foi realizada propositalmente no

software que controla a execução do ensaio, pois se sabia que tais elementos químicos eram provenientes da metalização da superfície dos materiais com uma liga de Ouro/Paládio.

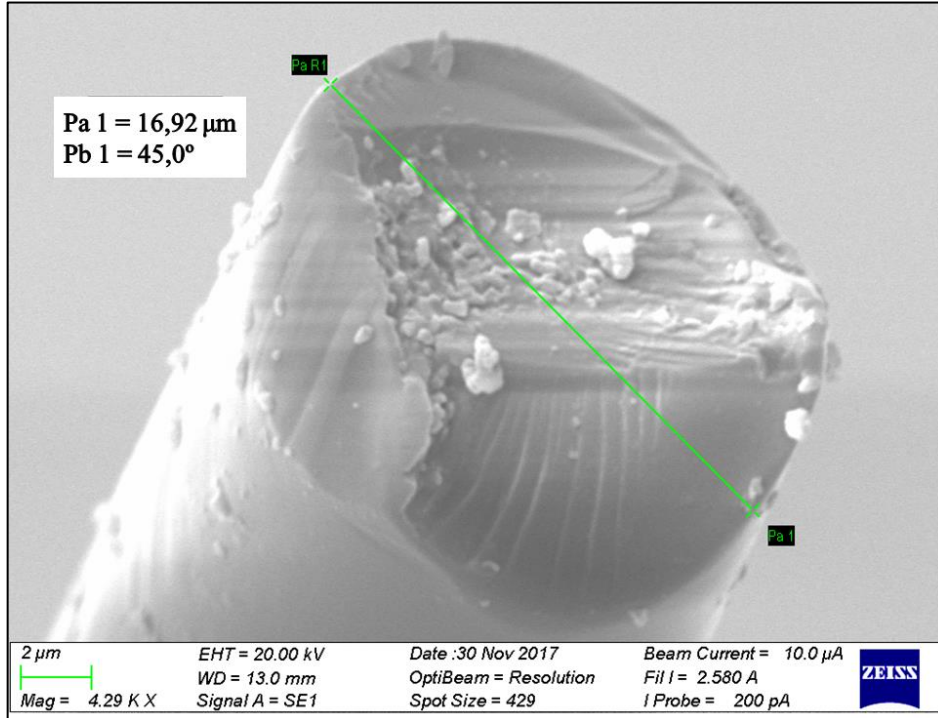


Figura 60 – Medida do diâmetro da fibra de basalto através da imagem obtida por MEV com ampliação de 4290 vezes.

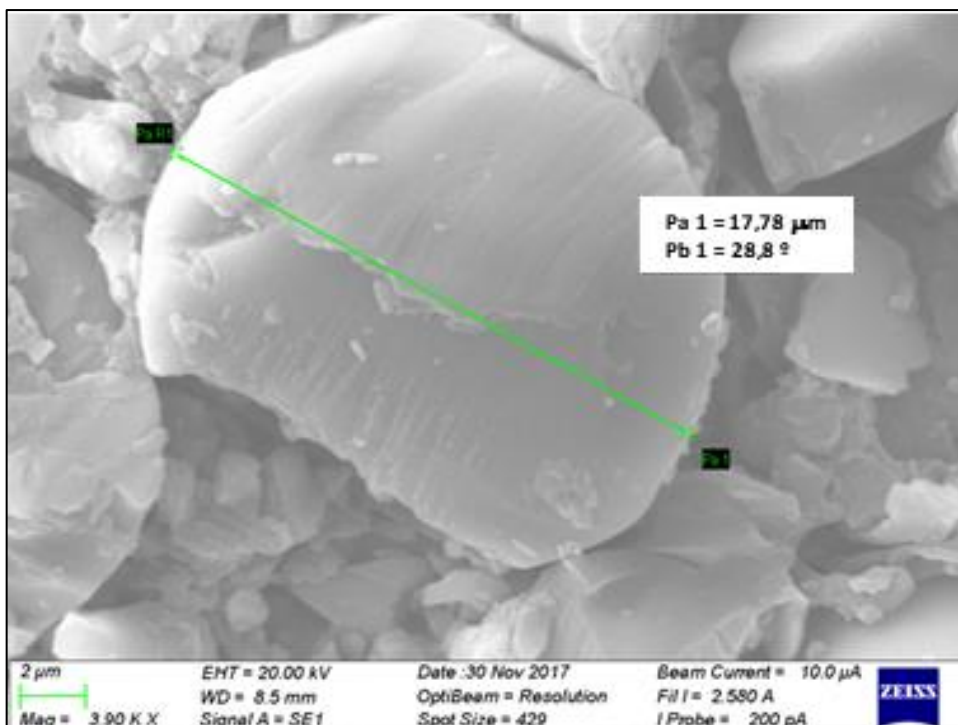


Figura 61 - Medida do diâmetro da fibra de vidro através da imagem obtida por MEV com ampliação de 3900 vezes.

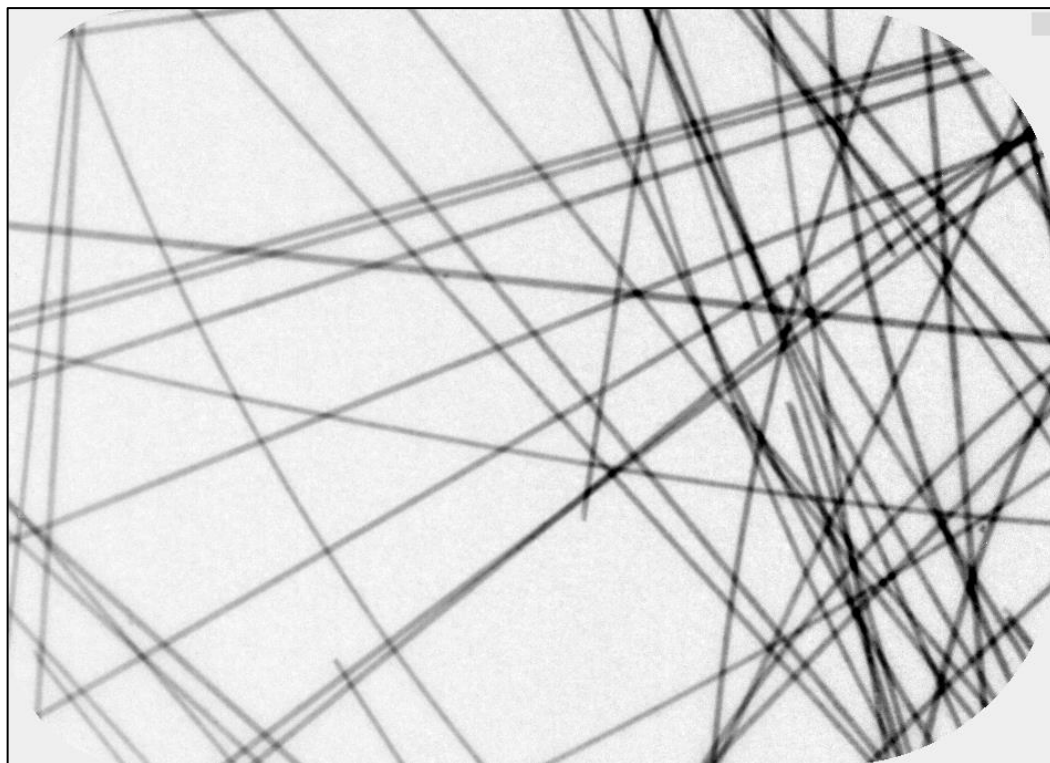


Figura 62 - Imagem radiográfica das fibras de basalto. Radiografia obtida com fonte microfoco alvo de tungstênio, tensão de operação de 40KV e corrente de 57 μ A. Distância fonte-amostra de 12 cm e distância amostra-detector de 130 cm – Ampliação de 12 vezes. Diâmetro da fibra de 16 μ m.

3.3.3 Ensaio de tração dos vergalhões

Para confirmação de conformidade com as especificações e as normas vigentes, os vergalhões utilizados neste trabalho também foram submetidos à ensaios de tração. Os ensaios também foram realizados na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu. Nas seções 3.4.3.1 e 3.4.3.2 são apresentados como foram realizados os ensaios de tração nos vergalhões de Aço CA-50 e materiais compósitos (BFPR e GFPR), respectivamente.

3.4.3.1 Vergalhões de Aço CA-50

Foram preparadas três amostras de vergalhões de Aço CA-50 de aproximadamente 30 cm cada. As três amostras de vergalhões de Aço CA-50 foram submetidas ao ensaio de tração até atingirem a ruptura, conforme apresentado na Figura 63.

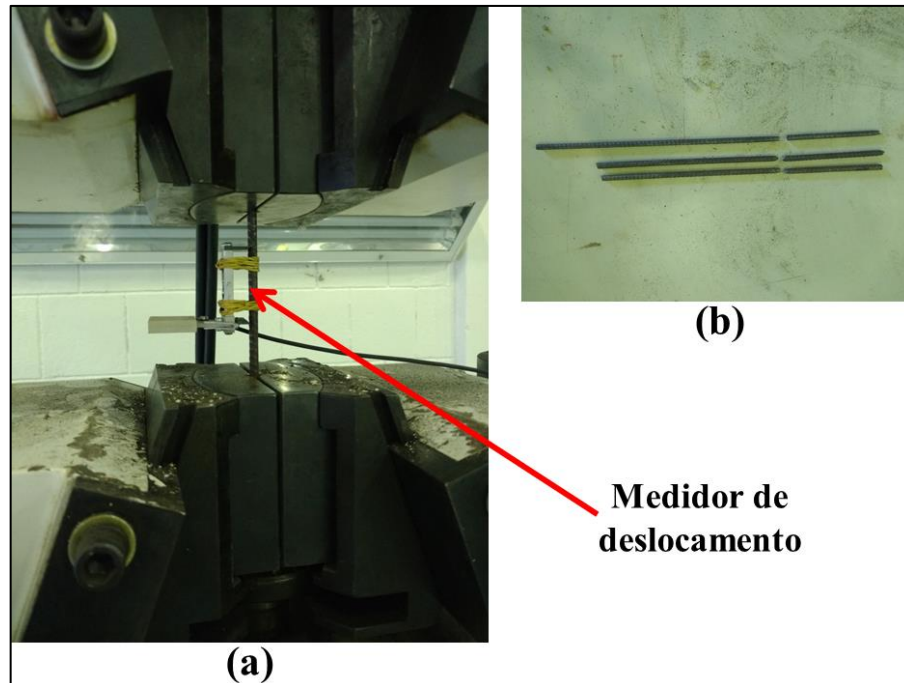


Figura 63 - Ensaio de tração do vergalhão de Aço CA-50 realizado na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu. (a) vergalhão de Aço CA-50 fixado nas garras da máquina universal de ensaios. Utilização de dispositivo medidor de deformações instalado em contato com o vergalhão de Aço CA-50 (b) amostras após serem submetidas ao ensaio de tração.

A operação da máquina universal de ensaios é feita da mesma forma que procedemos para os ensaios “*pull-out*”, isto é, via software que armazena os dados de carregamento em função do tempo. Os resultados de tensão (carregamento) em função do tempo são apresentados na Figura 64.

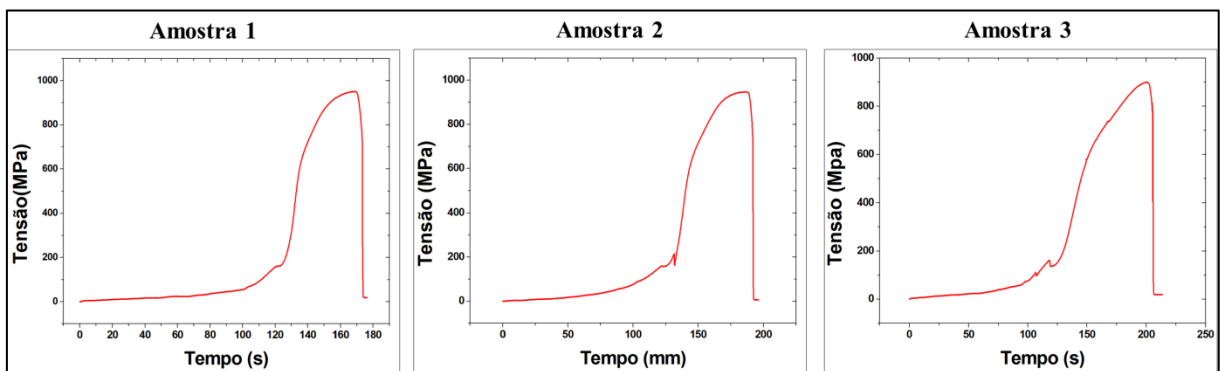


Figura 64 – Resultados de Tensão (Mpa) x Tempo (s) obtidos dos ensaios de tração realizadas nos vergalhões de Aço CA-50 para as amostras 1, 2 e 3.

Contudo, em duas das três amostras também foi medida a deformação do vergalhão ao longo do ensaio, através de um medidor de deformação anexado à máquina de ensaios

universal, conforme mostrado na Figura 63 (a). Os dados de deformação em função do tempo também foram coletados e armazenados por software. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 65.

O objetivo de realizar as medidas de deformação dos vergalhões ao longo do ensaio era medir o módulo de elasticidade do vergalhão de Aço CA-50. Conforme ABNT NBR 7480 (1996), para o cálculo do módulo de elasticidade é necessário determinar trecho linear no gráfico “Tensão x Deformação”. Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 65 mostram que este trecho não ficou tão evidente, devido principalmente pelo pequeno diâmetro do material (6,3 mm). Diante disso, não foram realizados os cálculos do módulo de elasticidade do vergalhão. Como as medidas de deformação aumentam a complexidade na realização do ensaio de tração, somente em duas amostras a medida da deformação foi realizada.

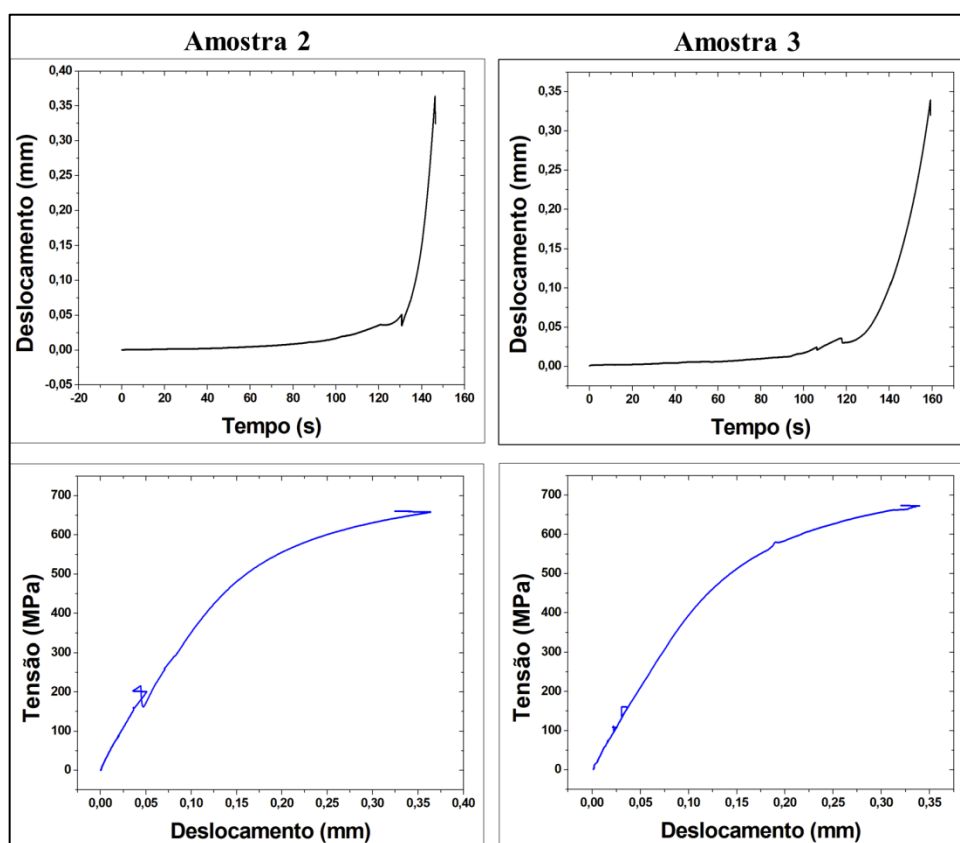


Figura 65 – Resultados de Deformação (mm) x Tempo (s) e Tensão (Mpa) x Deslocamento (mm) obtidos dos ensaios de tração realizadas nos vergalhões de Aço CA-50 para as amostras 2 e 3.

Os resultados apresentados nas Figuras 64 e 65 mostram que as medidas de tensão e deformação são muito semelhantes para as três amostras. Os limites de resistência encontrados para as três amostras estão destacados na Tabela 17.

Amostra	Limite de resistência (MPa)
1	950,20
2	946,35
3	899,83
Média	932,13

Tabela 17 - Tensões de ruptura encontradas nos ensaios de tração para os vergalhões de Aço CA-50.

Os valores de limites de resistência à tração que obtivemos nos ensaios estão acima do mínimo necessário conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 7480 (1996), que no caso do Aço CA-50 deve ser 8% superior a resistência de escoamento. Para o Aço CA-50 a resistência ao escoamento é de 500 MPa, logo, este valor mínimo para o limite de resistência é de 540 MPa.

3.4.3.2 Vergalhões de BFPR e GFPR

Amostras de vergalhões de BFPR e GFPR foram submetidas ao ensaio de tração conforme apresentado na Figura 66.

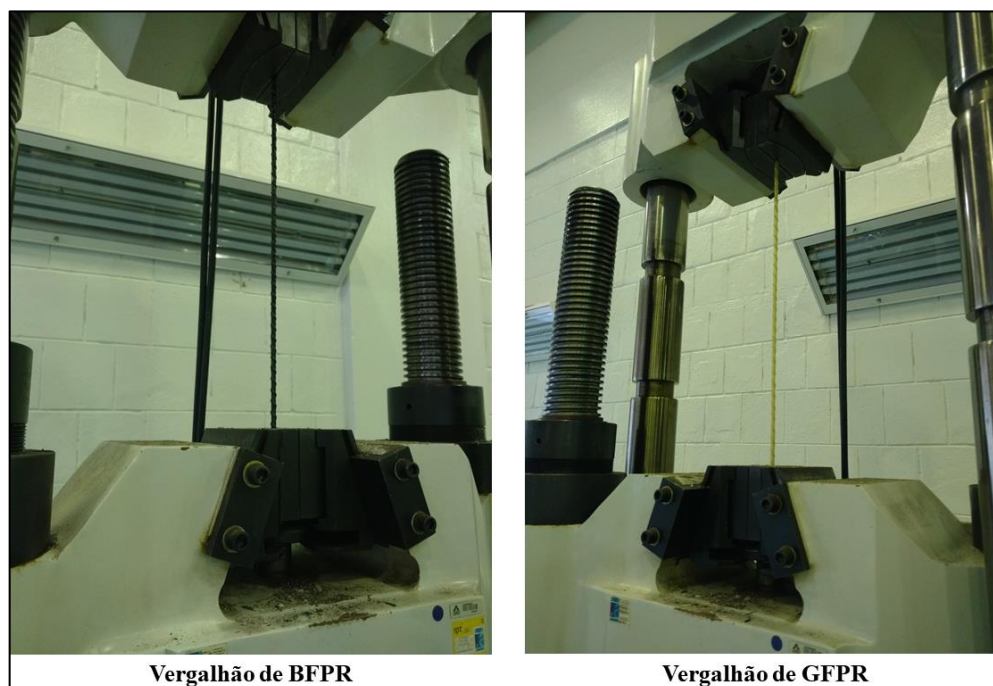


Figura 66 - Ensaio de tração do vergalhão de Aço CA-50 realizado na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu. As imagens mostram, da esquerda para direita respectivamente os vergalhões de BFPR e GFPR fixados diretamente nas garras da máquina universal de ensaios.

Neste ensaio (Figura 66), os vergalhões foram fixados diretamente nas garras da máquina de tração. A metodologia não é a mais adequada, pois como será descrito a diante, devido as características de tais materiais, quando ocorre o aumento da carga aplicada, acontece o deslizamento dos vergalhões na região de contato com as garras, antes mesmo de chegar ao limite de resistência à tração (Figura 67).



Figura 67 – Vergalhões de BFPR (parte superior) e GFPR (parte inferior) após ensaio de tração – Saliências dos vergalhões danificadas pelo escorregamento na região das garras da máquina universal de ensaios.

Mesmo assim, antes de ocorrer o deslizamento, a carga aplicada aos vergalhões foram as seguintes (Tabela 18).

Amostra	Carga aplicada (kN)
BFPR	21,13
GFPR	18,96

Tabela 18 – Cargas aplicadas no ensaio de tração – Vergalhões de BFPR e GFPR.

Estes valores de carga aplicada aos vergalhões são muito próximos aos máximos valores aplicados aos vergalhões nos ensaios “*pull-out*”, afastando assim qualquer dúvida de possível ruptura dos vergalhões antes de atingir o valor máximo de aderência com o concreto.

Para contornar o problema de deslizamento nas garras, foi realizada uma preparação de novas amostras de vergalhões, baseando-se nas recomendações da norma ISC (2014), na

qual prevê a utilização de tubos de aço (luvas) preenchidos com resina, conforme apresentado na Figura 68.

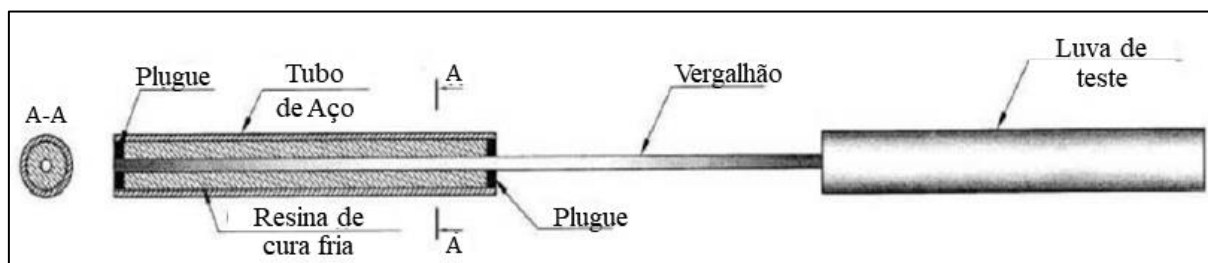


Figura 68 – Tubos metálicos (luvas) utilizados na execução do ensaio de tração dos vergalhões de materiais compósitos.

Com a utilização de tal metodologia, as garras da máquina de tração não estão em contato direto com os vergalhões, evitando assim danos nas saliências dos vergalhões e consequente escorregamento na região das garras ao serem tracionadas.

As dimensões recomendadas na norma ISC (2014) para a montagem apresentada na Figura 66 são as apresentadas na Tabela 19.

Diâmetro nominal do vergalhão (mm)	Luva de teste – medidas em mm		
	Diâmetro externo	Comprimento mínimo	Espessura da parede
4 a 10	35	300	3 a 5
12 a 16	42	350	
18 a 22	48	450	
25 a 30	60	500	

Tabela 19 – Dimensões recomendadas para montagem da luva de teste utilizada no ensaio de tração dos vergalhões de materiais compósitos. Fonte: ISC (2014).

Além das dimensões apresentadas na Tabela 19, a norma ISC (2014) ainda estabelece que o comprimento mínimo na zona de operação (trecho sem o cobrimento do tubo metálico) deve ser 40 vezes o diâmetro nominal do vergalhão. No caso específico deste trabalho, no qual é utilizado vergalhões com diâmetro nominal de 6 mm, tal comprimento deve ser de no mínimo de 240 mm.

Apesar das recomendações da norma ISC (2014) sobre as dimensões para preparação das amostras para os ensaios de tração, estas não foram possíveis de ser atendidas devido ao tamanho total das amostras dos vergalhões (700 mm). Considerando isso, as dimensões

adotadas foram de 250 mm para o comprimento dos tubos metálicos (luvas) e 200 mm para comprimento da zona de operação (trecho sem tubo). Para o preenchimento dos tubos foi utilizada resina epoxi. Foram preparadas duas amostras de vergalhões de BFPR e duas de GFPR (Figura 69).



Figura 69 – Amostras de vergalhões de BFPR (esquerda) e GFPR (direita) preparadas para o ensaio de tração – Utilização de luvas de tubos metálicos preenchidos com resina epoxi.

A Figura 70 apresenta a amostra posicionada na máquina de tração. Conforme previsto, as garras da máquina de tração estão em contato somente com os tubos metálicos (luvas) que envolvem os vergalhões de materiais compósitos, evitando assim danos às saliências dos vergalhões.



Figura 70 – Ensaio de tração do vergalhão de Aço CA-50 realizado na máquina universal de ensaios do LTC / Itaipu. Amostra de GFPR utilizando luvas de tubos metálicos preenchidos com resina epóxi.

Os ensaios não obtiveram sucesso, pois durante a aplicação da carga, houve um esmagamento do tubo metálico (luva), possivelmente devido há algum vazio dentro do tubo, o que ocasionou a perda de aderência entre a resina endurecida e o tubo metálico. Conseqüentemente o vergalhão, juntamente com a resina endurecida, foi arrancado do interior do tubo metálico, não permitindo assim a conclusão do ensaio.

Diante da impossibilidade de obter as informações de resistência à tração dos vergalhões de GFPR e BFPR, o valor considerado para tal parâmetro será aqueles apresentados nas seções 2.3.1 e 2.3.2, obtidos de informações disponibilizados pelo fabricante (Composite Group Chelyabinsk). Em suas especificações, o fabricante dos vergalhões indica que a resistência à tração, tanto dos vergalhões de BFPR quanto dos vergalhões de GFPR, é em torno de 1000 MPa. Para o caso dos vergalhões utilizados neste trabalho, que possuem diâmetro de 6 mm, isto equivale a um resistência a tração de 28,3 kN. Nos ensaios “*pull-out*” realizados neste trabalho, nos quais os corpos de prova possuíam vergalhões de BFPR ou GFPR, a força máxima aplicada jamais superou 20 kN, o que afasta com certa segurança a possibilidade de rompimento dos vergalhões antes de atingir a máxima tensão de aderência.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios “*pull-out*” e de compressão, conforme metodologia descrita na seção 3. Nas seções 4.1, 4.2 e 4.3, serão apresentados os resultados específicos para os corpos de prova moldados com vergalhões de Aço CA-50, BFPR e GFPR, respectivamente.

4.1 Corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50

As Figuras 71 e 72 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio “*pull-out*” para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios ocorreram 63 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

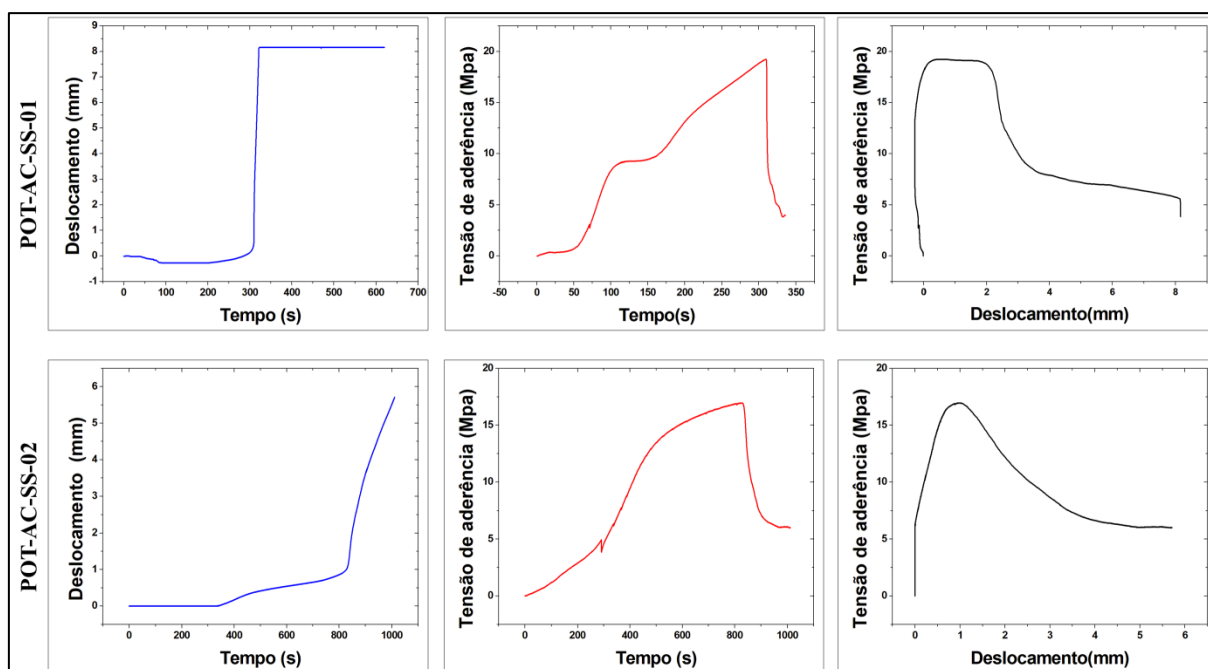


Figura 71 - Resultados dos ensaios “*pull-out*” - vergalhões de Aço CA-50 - 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

No gráfico de Tensão de aderência vs. Deslocamento (Figura 71), para o corpo de prova POT-AC-SS-01, ocorre um “deslocamento negativo”. Este deslocamento foi devido a uma pequena irregularidade na base do corpo de prova que estava em contato com o suporte

metálico. Ao se iniciar o carregamento, houve um pequeno deslocamento do corpo de prova até que este se ajustasse e não mais se deslocasse durante o ensaio.

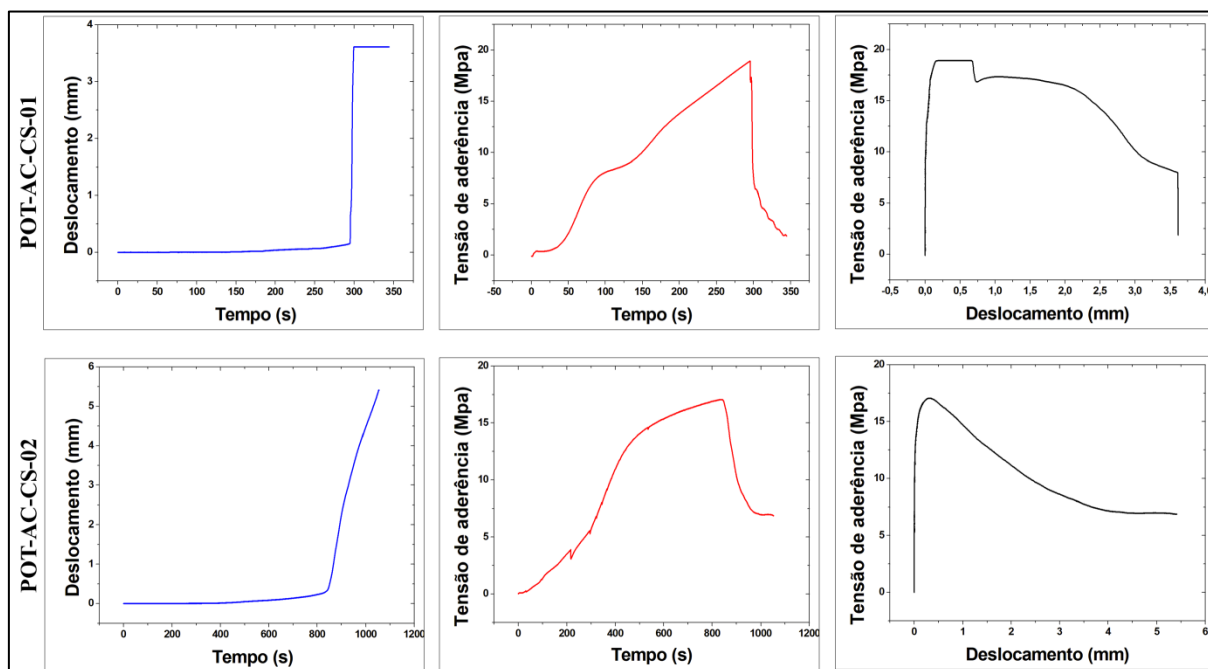


Figura 72 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 - 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

As Figuras 73 e 74 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios ocorreram 217 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

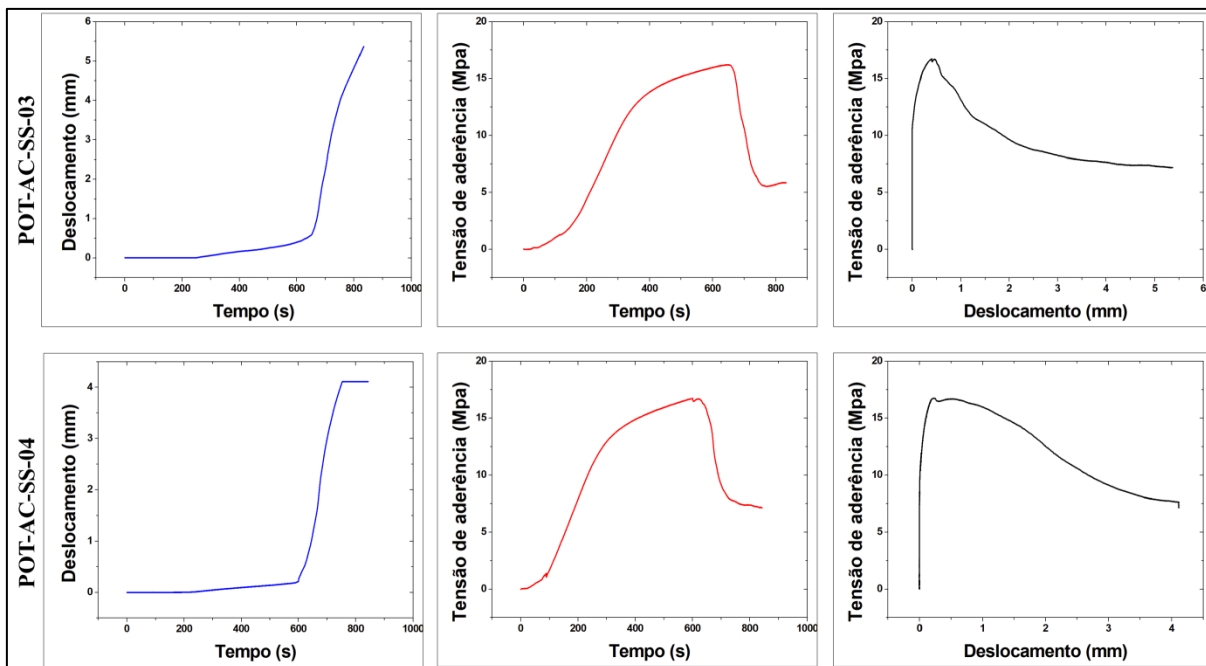


Figura 73 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 - 217 dias – Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

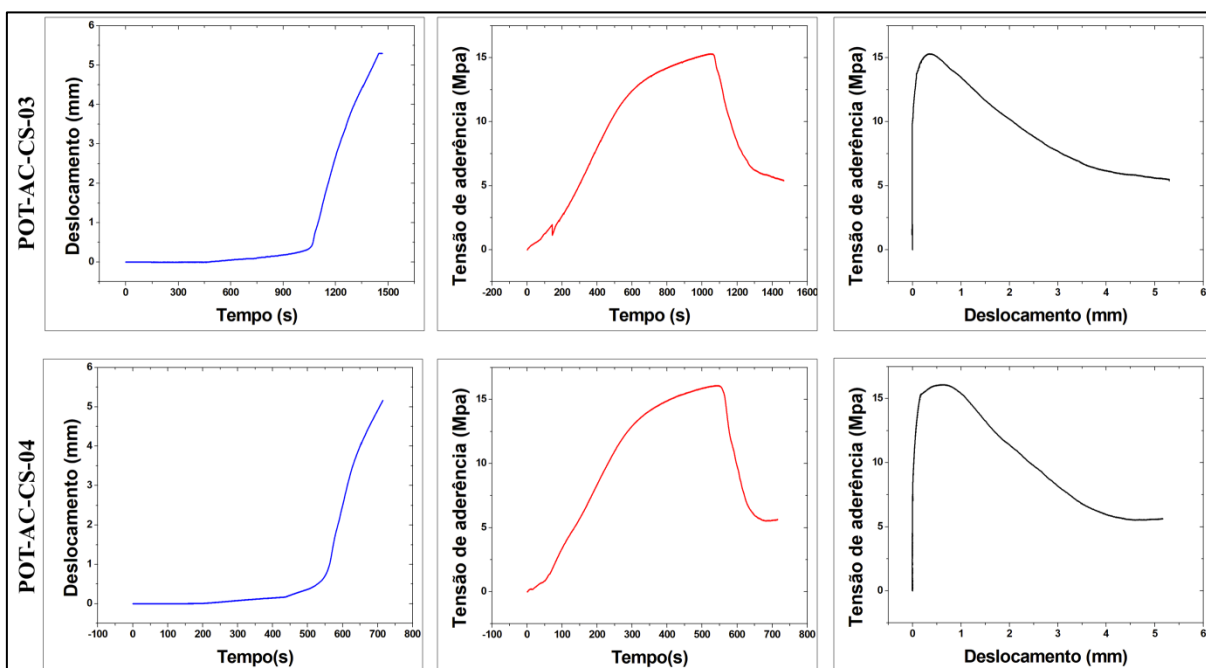


Figura 74 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 - 217 dias – Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

Por fim, as Figuras 75 e 76 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes

ensaios ocorreram 315 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

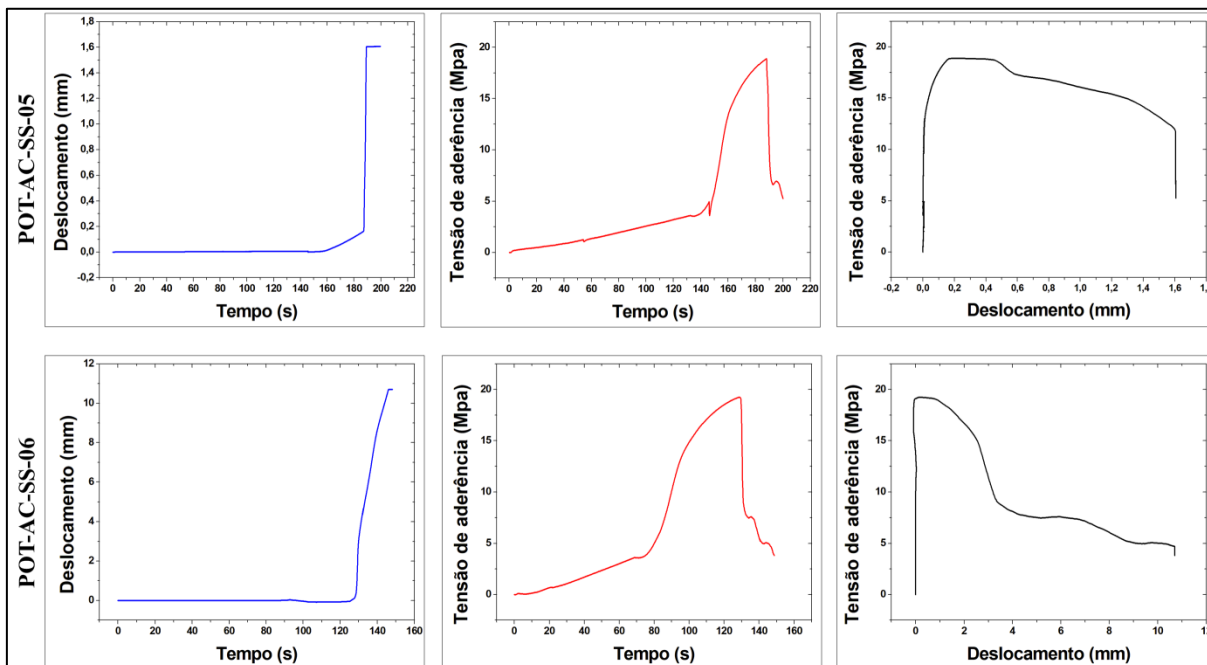


Figura 75 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 - 315 dias – Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

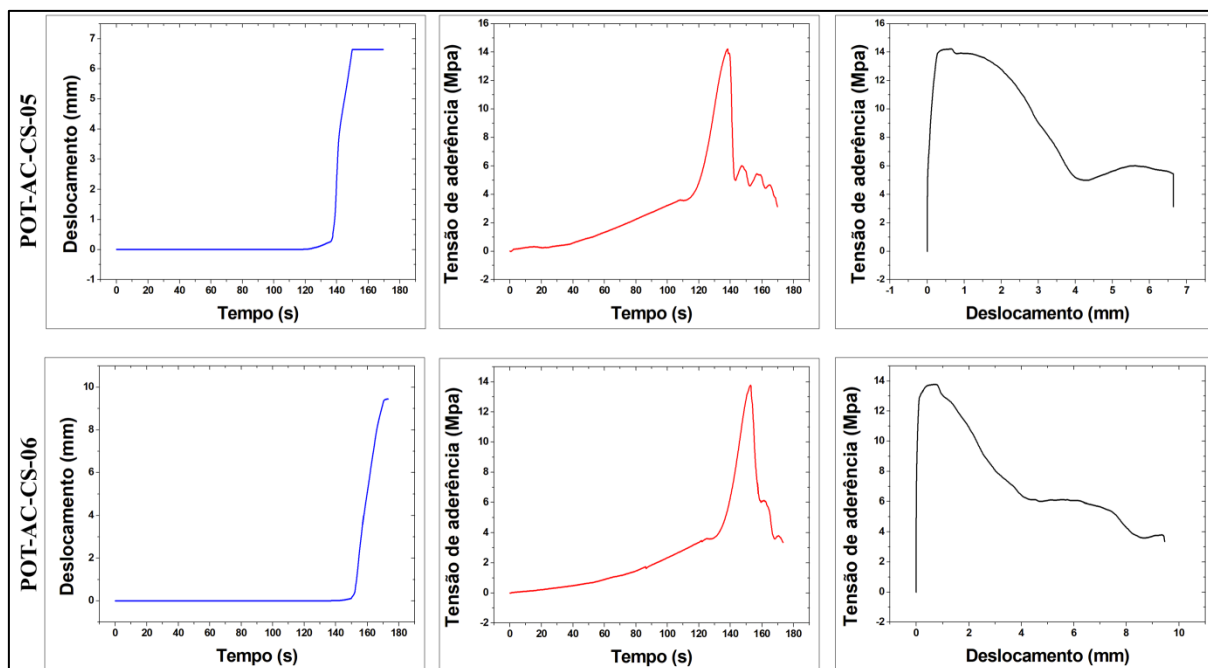


Figura 76 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 - 315 dias – Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

Nas Tabelas 20 e 21 são apresentados, de forma resumida, os valores máximos e, seus respectivos valores médios para a tensão de aderência obtida em cada ensaio "pull-out" realizado nos corpos de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-AC-SS-01	63 dias	19,24	18,10
POT-AC-SS-02		16,96	
POT-AC-SS-03	217 dias	16,21	16,47
POT-AC-SS-04		16,74	
POT-AC-SS-05	315 dias	18,87	19,06
POT-AC-SS-06		19,25	

Tabela 20 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de Aço CA-50 – amostras sem sal.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-AC-CS-01	63 dias	18,93	17,99
POT-AC-CS-02		17,06	
POT-AC-CS-03	217 dias	15,30	15,69
POT-AC-CS-04		16,08	
POT-AC-CS-05	315 dias	14,23	14,00
POT-AC-CS-06		13,77	

Tabela 21 – Resultados dos ensaios “pull-out” - vergalhões de Aço CA-50 - amostras com sal.

Nas Tabelas 22 e 23 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para todos os corpos de prova ensaiados assim como a média obtida para cada período analisado (63, 217 e 315 dias após a moldagem). Os resultados obtidos para as amostras “CS-AC-SS-04” e “CS-AC-CS-08” foram excluídos das médias por apresentarem um desvio superior a 5%.

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-AC-SS-01	63 dias	33,10	33,16
RC-AC-SS-02		33,25	
RC-AC-SS-03		33,12	
RC-AC-SS-04		36,47	
RC-AC-SS-05	217 dias	43,00	42,63
RC-AC-SS-06		41,96	
RC-AC-SS-07		41,92	
RC-AC-SS-08		43,62	
RC-AC-SS-09	315 dias	40,20	42,13
RC-AC-SS-10		44,05	

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de compressão simples - amostras sem sal.

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-AC-CS-01	63 dias	35,74	35,68
RC-AC-CS-02		35,62	
RC-AC-CS-03		34,97	
RC-AC-CS-04		36,37	
RC-AC-CS-05	217 dias	39,56	39,58
RC-AC-CS-06		40,11	
RC-AC-CS-07		39,06	
RC-AC-CS-08		35,74	
RC-AC-CS-09	315 dias	42,06	42,50
RC-AC-CS-10		42,94	

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de compressão simples - amostras sem sal.

A Figura 77 mostra como os resultados médios obtidos para tensão de aderência variou ao longo do tempo, tanto para os corpos de prova moldados com concreto sem sal quanto para os moldados com concreto contendo sal. As barras de erros contidas no gráfico representam a variação em relação à média.

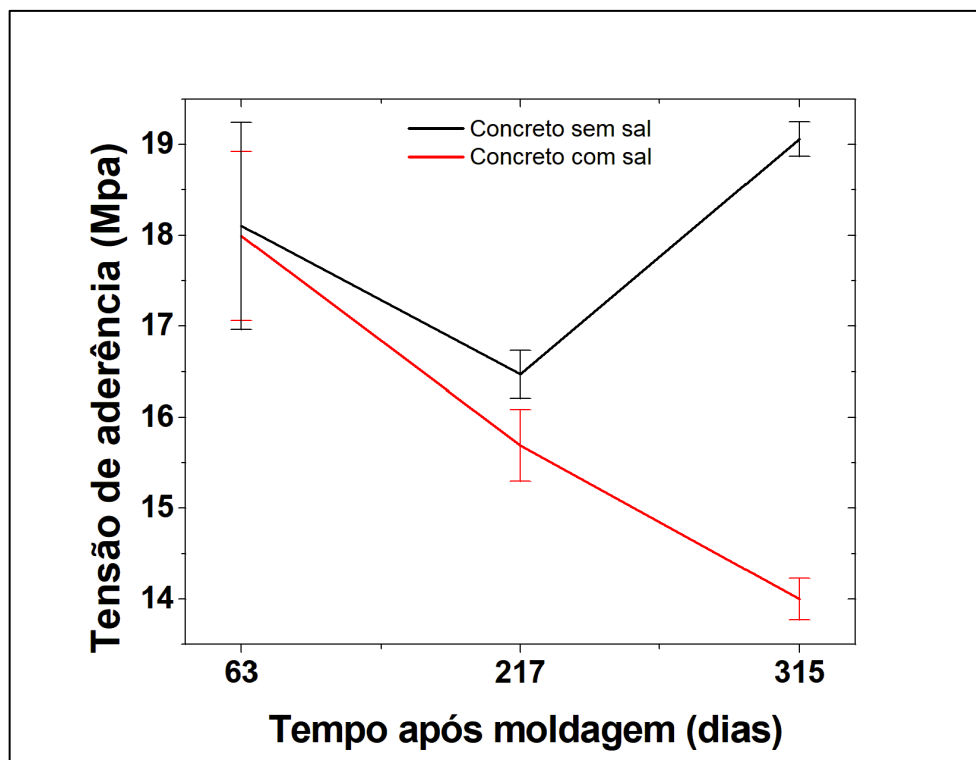


Figura 77 – Evolução temporal da tensão de aderência – Corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50. Diminuição da tensão de aderência máxima ao longo do tempo, para os corpos de prova moldados com concreto contendo sal. A tensão de aderência para os corpos de prova moldados com concreto sem sal aumenta do primeiro (63 dias) para o último (315 dias) ensaio.

Já a variação da resistência à compressão média, tanto para concreto contendo sal quanto para concreto sem a presença de sal, é mostrada na Figura 78. Neste caso, as barras de erros apresentados no gráfico da referida figura, correspondem ao desvio padrão dos resultados, também apresentados nas Tabelas 22 e 23.

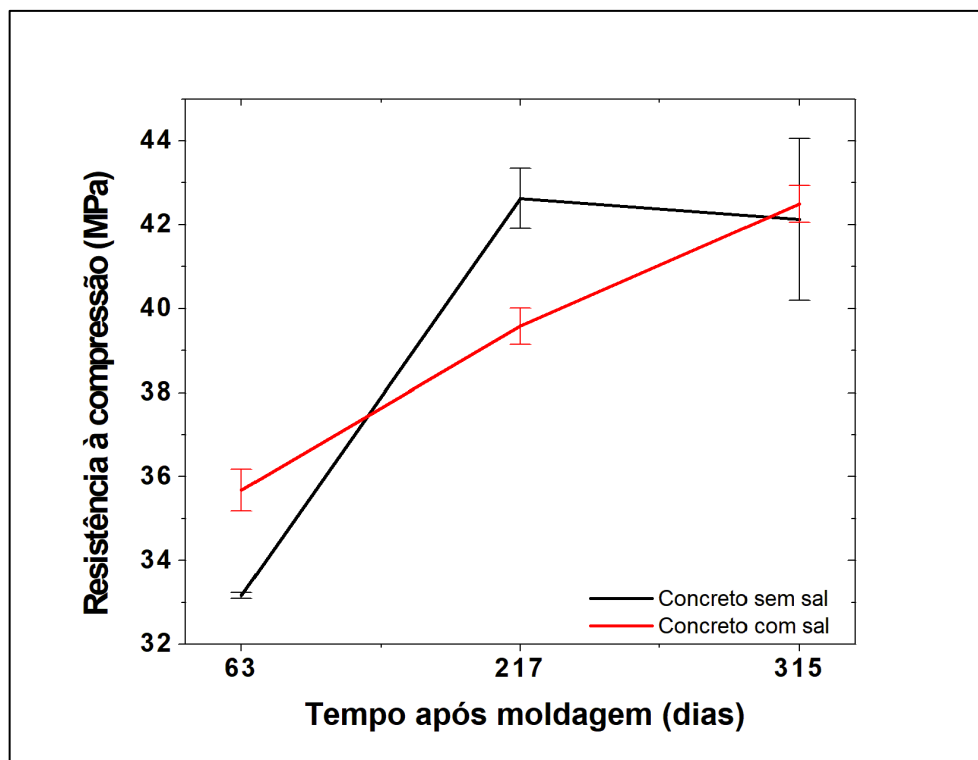


Figura 78 - Evolução temporal da resistência à compressão – Corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50. Aumento da resistência à compressão ao longo do tempo, tanto para o concreto contendo sal quanto para o concreto sem sal.

4.2 Corpos de prova com vergalhões de BFPR

A sequência de apresentação dos resultados obtidos para os vergalhões de BFPR é idêntica a apresentação dos resultados obtidos para os vergalhões de Aço CA-50, conforme já mostrado na seção 4.1.

As Figuras 79 e 80 a seguir mostram os gráficos dos dados coletados durante o ensaio “*pull-out*” para amostras contendo concreto sem sal e com sal respectivamente. Estes ensaios ocorreram após 63 dias da moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento x tempo, tensão de aderência x tempo e tensão de aderência x deslocamento.

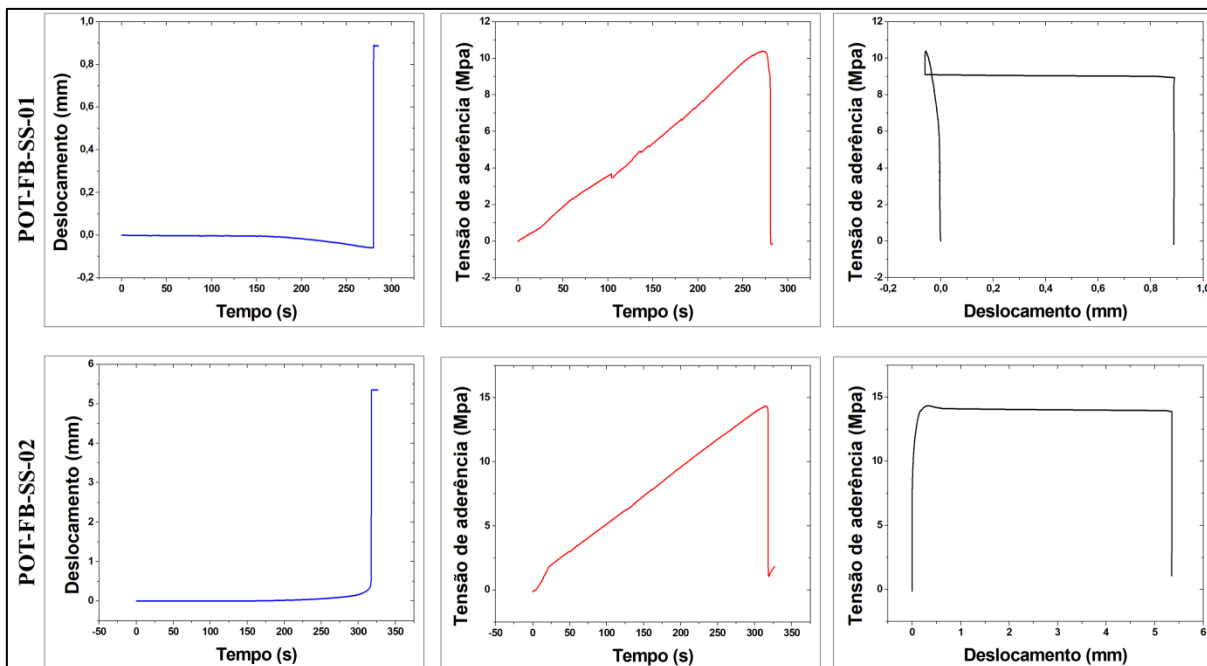


Figura 79 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

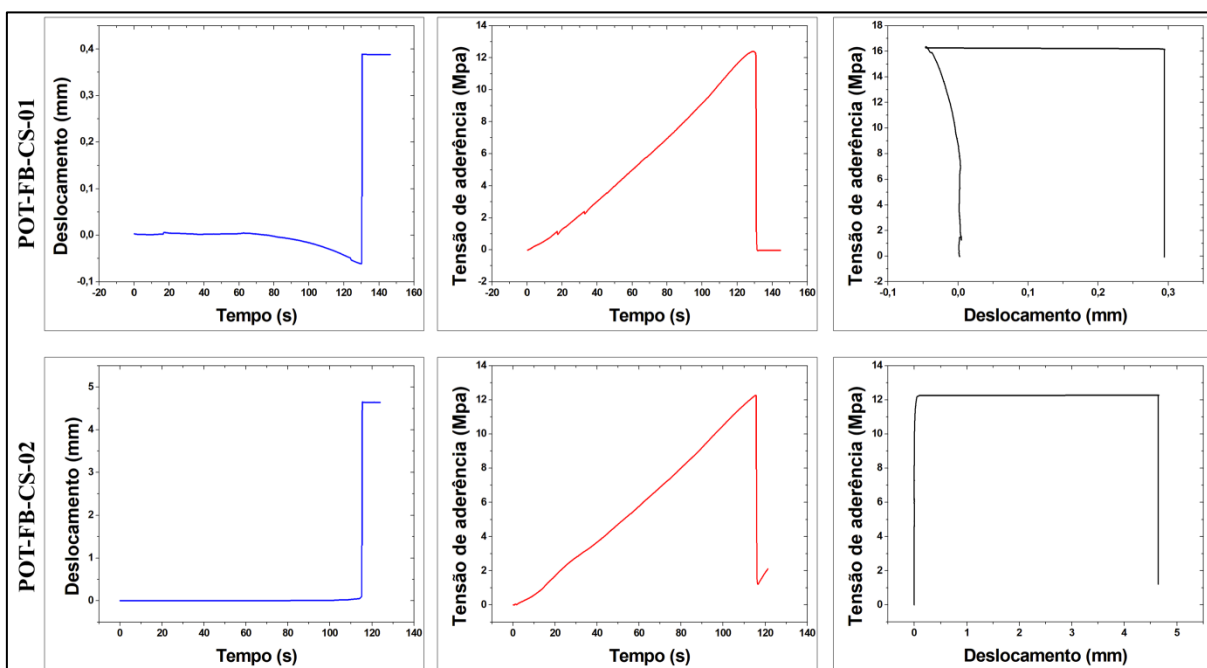


Figura 80 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

As Figuras 81 e 82 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios

ocorreram 217 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

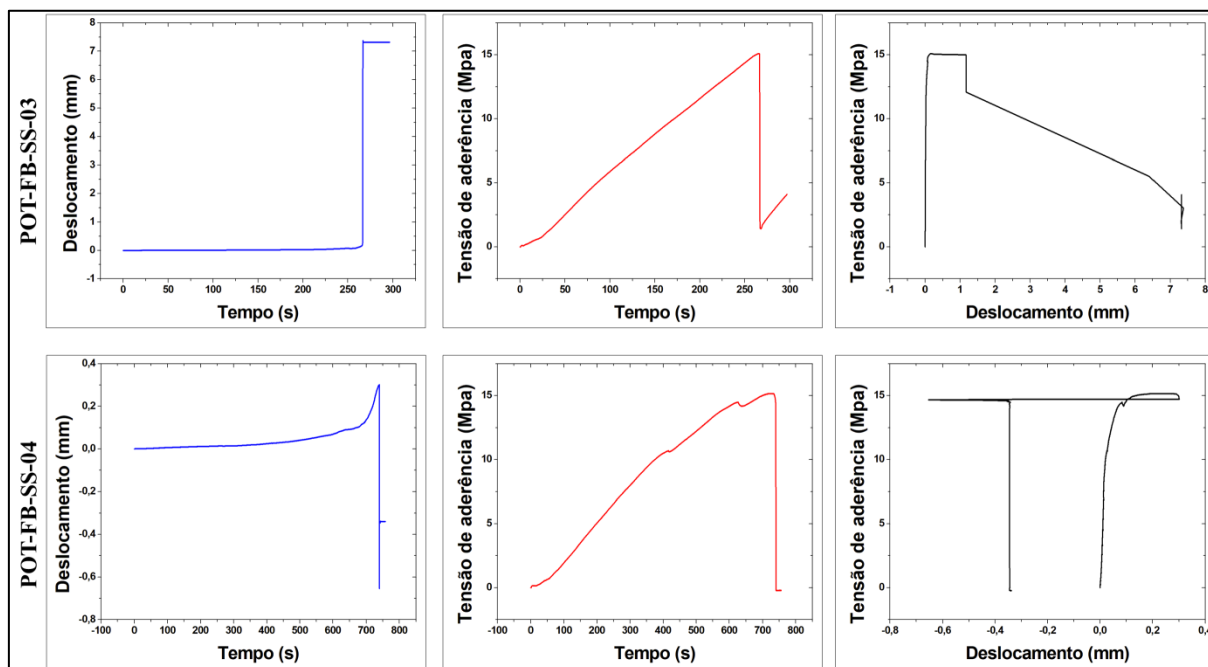


Figura 81 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 217 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

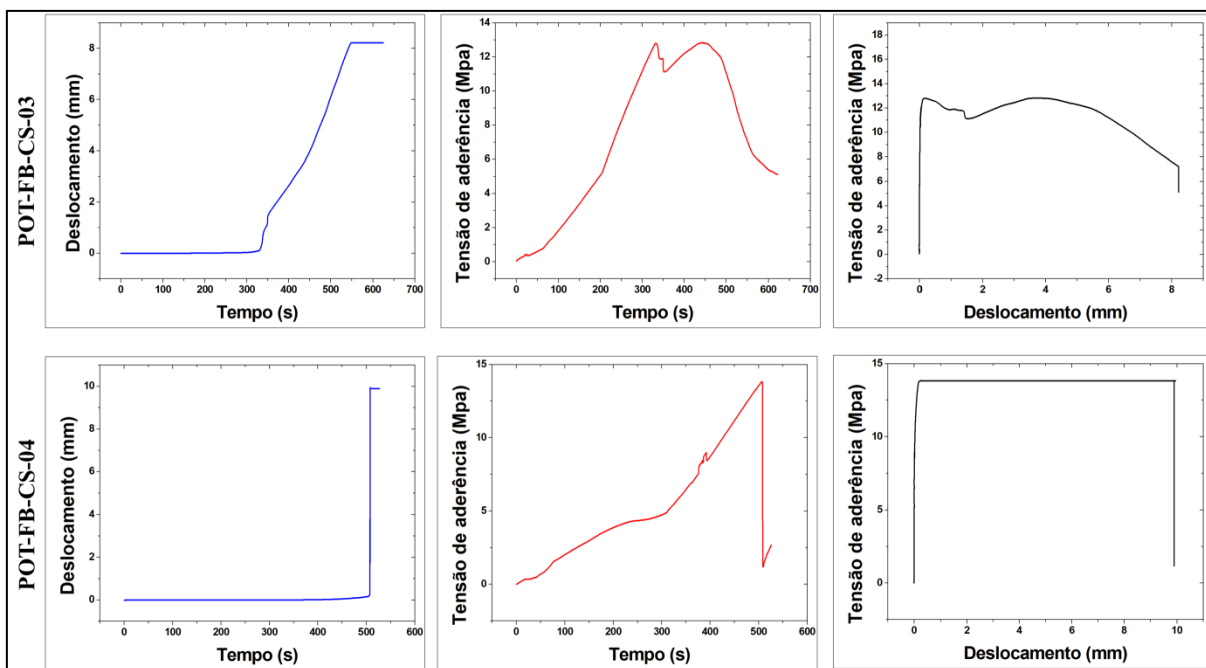


Figura 82 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 217 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

Por fim, as Figuras 83 e 84 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios ocorreram 315 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

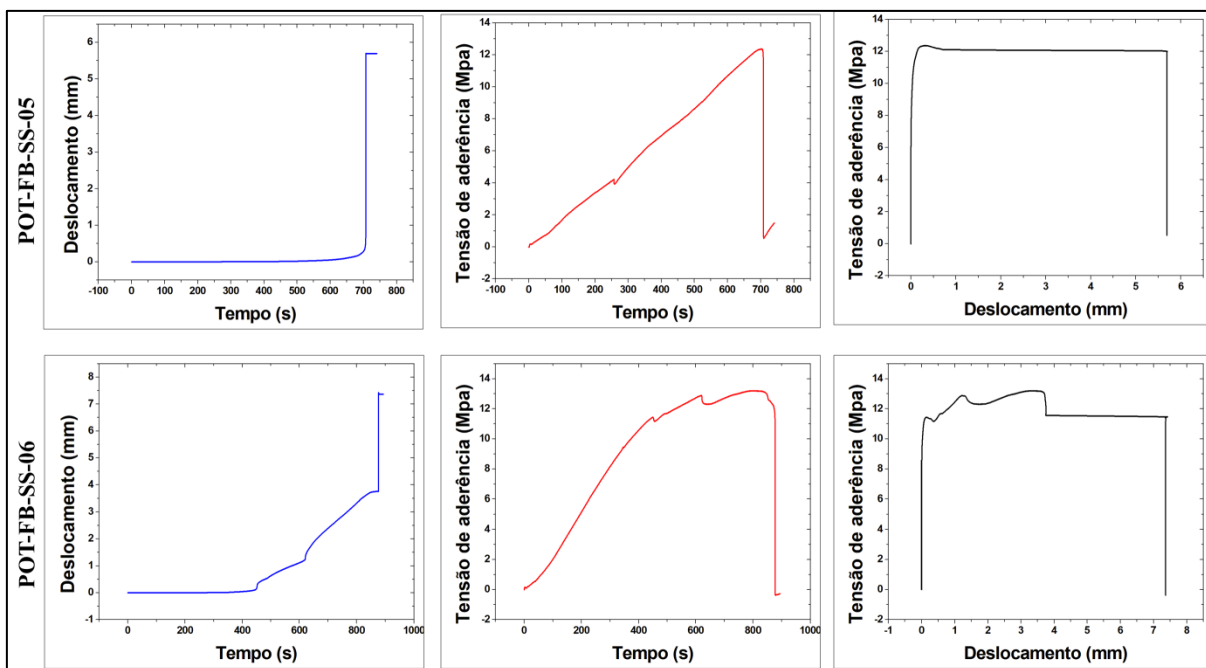


Figura 83 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 315 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

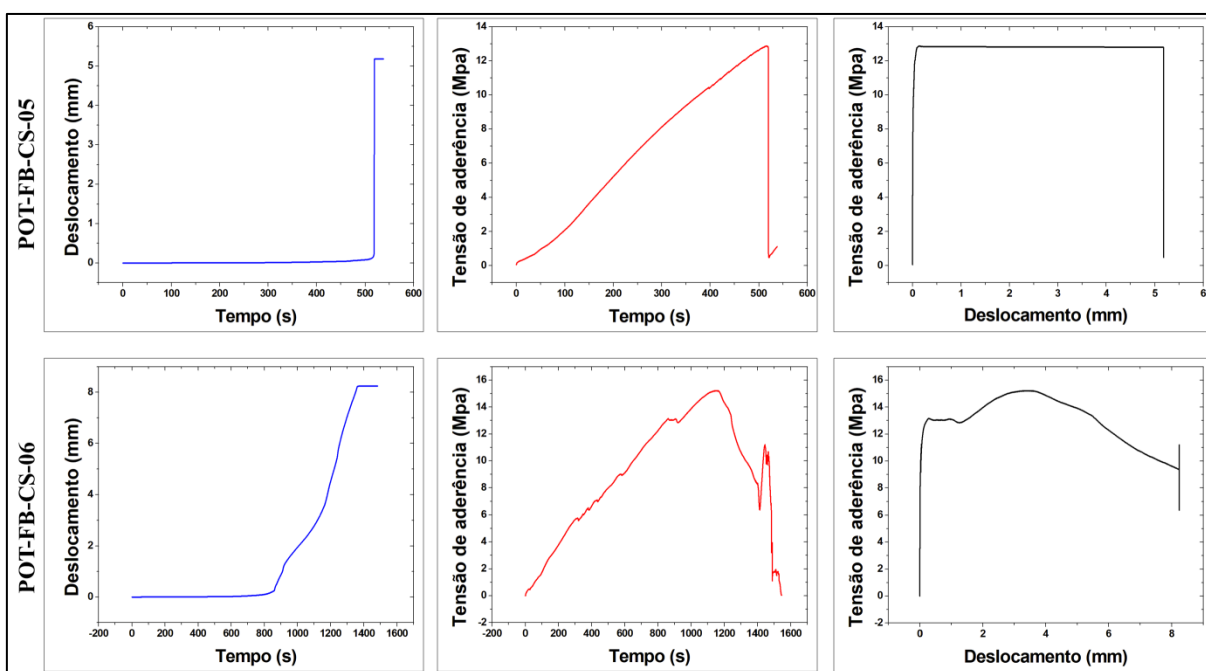


Figura 84 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de BFPR – 315 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

A Tabela 24 apresenta de forma resumida os valores máximos obtidos para a tensão de aderência para cada ensaio "pull-out" realizado e também a média dos valores para cada

período após a moldagem dos corpos de prova. Estes valores referem-se aos corpos de prova moldados com concreto sem sal. Já os resultados para os que foram moldados com concreto contendo sal são apresentados na Tabela 25. O resultado obtido para a amostra “POT-FB-SS-01” foi desconsiderado, pois durante o ensaio ocorreu o deslizamento da garra que fixava o vergalhão à máquina de tração, e isto ocorreu antes de atingir o valor máximo de aderência entre o vergalhão e o concreto.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-FB-SS-01	63 dias	10,38	14,33
POT-FB-SS-02		14,33	
POT-FB-SS-03	217 dias	15,10	15,13
POT-FB-SS-04		15,16	
POT-FB-SS-05	315 dias	12,36	12,78
POT-FB-SS-06		13,19	

Tabela 24 - Resultados dos ensaios “pull-out” - vergalhões de BFPR – Corpos de prova de concreto armado sem sal – resumo.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-FB-CS-01	63 dias	12,39	12,33
POT-FB-CS-02		12,27	
POT-FB-CS-03	217 dias	12,83	13,33
POT-FB-CS-04		13,84	
POT-FB-CS-05	315 dias	12,87	14,04
POT-FB-CS-06		15,21	

Tabela 25 - Resultados dos ensaios “pull-out” - vergalhões de BFPR – Corpos de prova de concreto armado com sal – resumo.

Nas Tabelas 26 e 27 são apresentados dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para todos os corpos de prova ensaiados assim como a média obtida para cada período analisado (63, 217 e 315 dias após a moldagem). O resultado obtido para a amostra “CS-FB-CS-08” foi excluído da média por apresentar um desvio superior a 5%.

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-FB-SS-01	63 dias	27,20	27,34
RC-FB-SS-02		26,75	
RC-FB-SS-03		26,63	
RC-FB-SS-04		28,78	
RC-FB-SS-05	217 dias	36,37	36,74
RC-FB-SS-06		36,97	
RC-FB-SS-07		36,92	
RC-FB-SS-08		36,70	
RC-FB-SS-09	315 dias	29,73	30,05
RC-FB-SS-10		30,38	

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de compressão simples - Corpos de prova de concreto sem sal.

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-FB-CS-01	63 dias	32,05	31,80
RC-FB-CS-02		31,50	
RC-FB-CS-03		32,63	
RC-FB-CS-04		31,03	
RC-FB-CS-05	217 dias	36,65	37,20
RC-FB-CS-06		37,40	
RC-FB-CS-07		37,57	
RC-FB-CS-08		31,33	
RC-FB-CS-09	315 dias	33,97	33,74
RC-FB-CS-10		33,50	

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de compressão simples - Corpos de prova de concreto com sal.

A Figura 85 mostra como os resultados médios obtidos para tensão de aderência variou ao longo do tempo, tanto para os corpos de prova moldados com concreto sem sal quanto para os moldados com concreto contendo sal. As barras de erros contidas no gráfico representa a variação em relação à média.

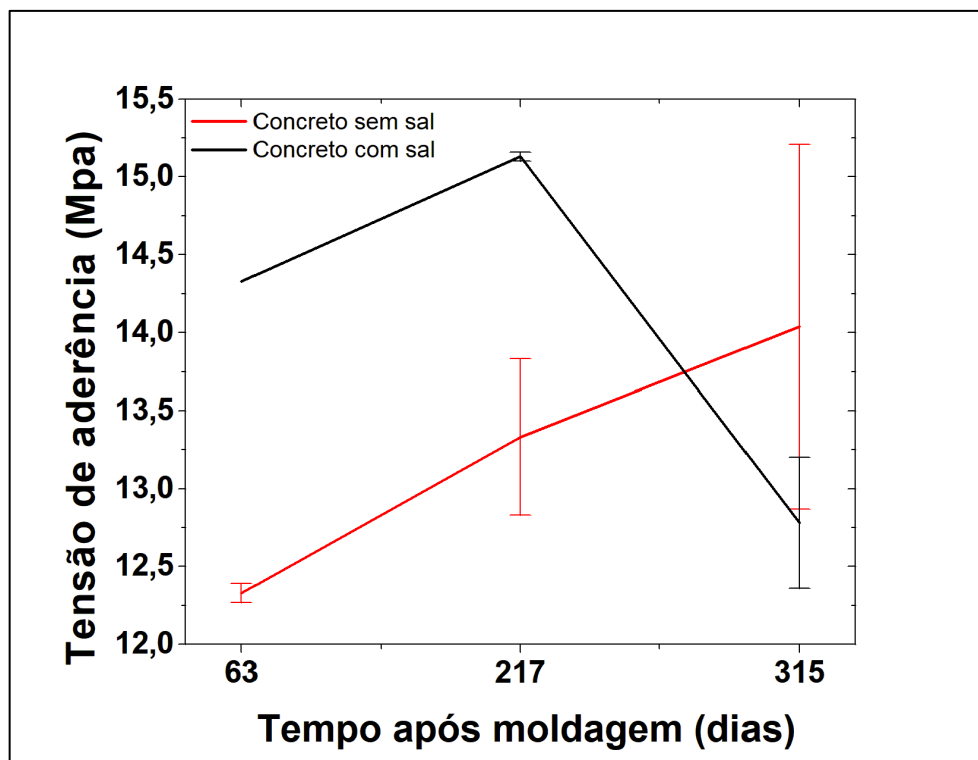


Figura 85 - Evolução temporal da tensão de aderência – Corpos de prova de concreto armado com vergalhões de BFPR. Verifica-se que inicialmente (63 dias) a tensão de aderência é maior para os corpos de prova contendo concreto com sal, porém nos últimos ensaios (315 dias) esta tendência se inverte, ou seja, a aderência é maior para os corpos de prova sem sal. Há uma sobreposição das barras de erros nesta última data.

Já a variação da resistência à compressão média, tanto para concretos contendo sal quanto para concreto sem a presença de sal, pode ser observada na Figura 86 a seguir. Neste caso, as barras de erros apresentados no gráfico da referida figura, corresponde ao desvio padrão dos resultados, já apresentados nas Tabelas 26 e 27.

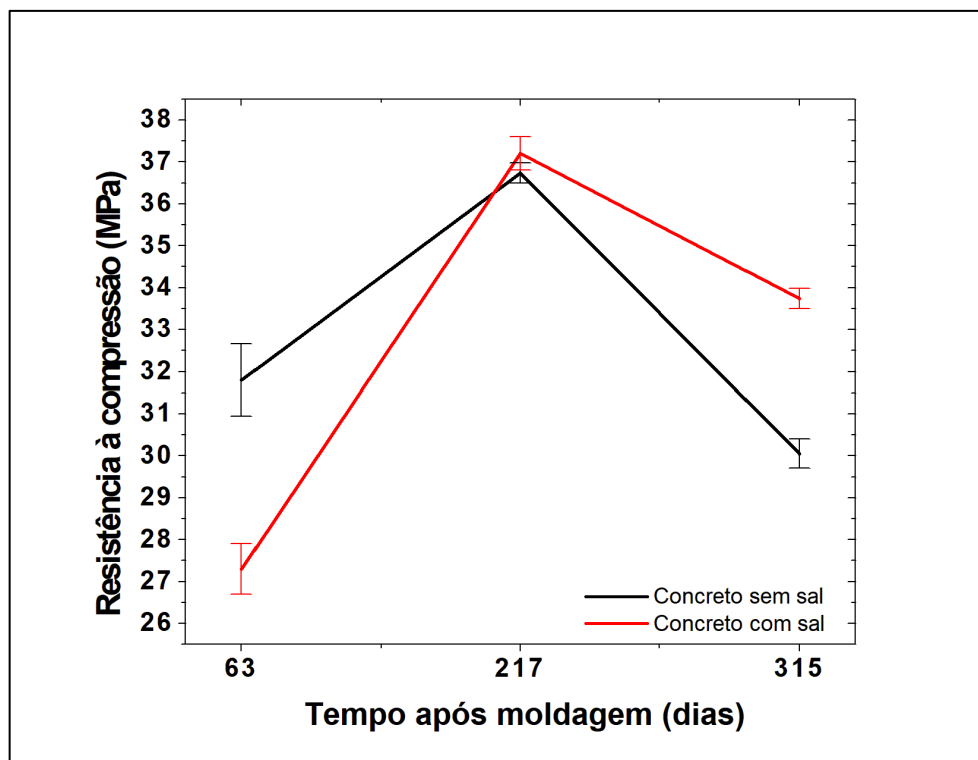


Figura 86 - Evolução temporal da resistência à compressão – Corpos de prova de concreto armado com vergalhões de BFPR. Entre os ensaios de 63 dias e 217 dias há um aumento da resistência à compressão para os dois tipos de concreto (com sal e sem sal). Porém ambos os valores diminuem no ensaio de 315 dias em relação ao ensaio de 217 dias.

4.3 Corpos de prova com vergalhões de GFPR

A forma de apresentação dos resultados obtidos para os vergalhões de GFPR é idêntica a apresentação dos resultados obtidos para os vergalhões de Aço CA-50 e BFPR, conforme já mostrados na seções 4.1 e 4.2.

As Figuras 87 e 88 a seguir mostram os gráficos dos dados coletados durante o ensaio “*pull-out*” para amostras contendo concreto sem sal e com sal respectivamente. Estes ensaios ocorreram após 63 dias da moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento vs. tempo, tensão de aderência vs. tempo e tensão de aderência x deslocamento. Os dados de deslocamento em função do tempo para a amostra “com sal 02” foi perdido ao salvar o arquivo. Conseqüentemente dos gráficos de deslocamento em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento não foram possíveis de serem apresentados na Figura 88.

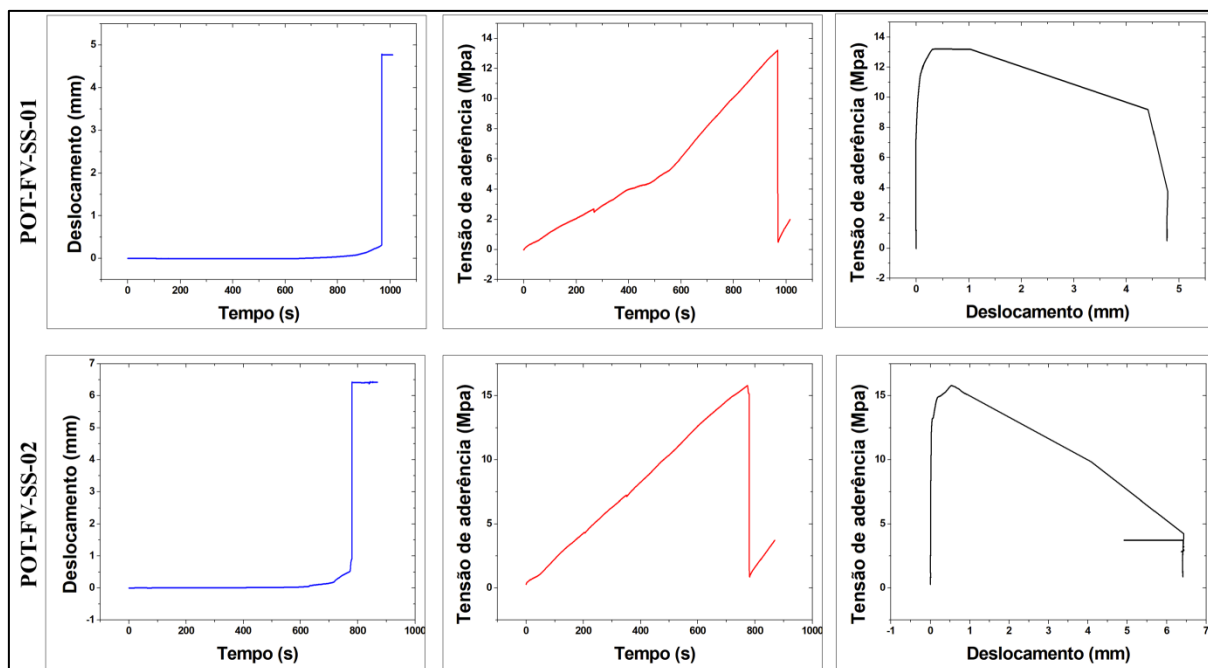


Figura 87 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

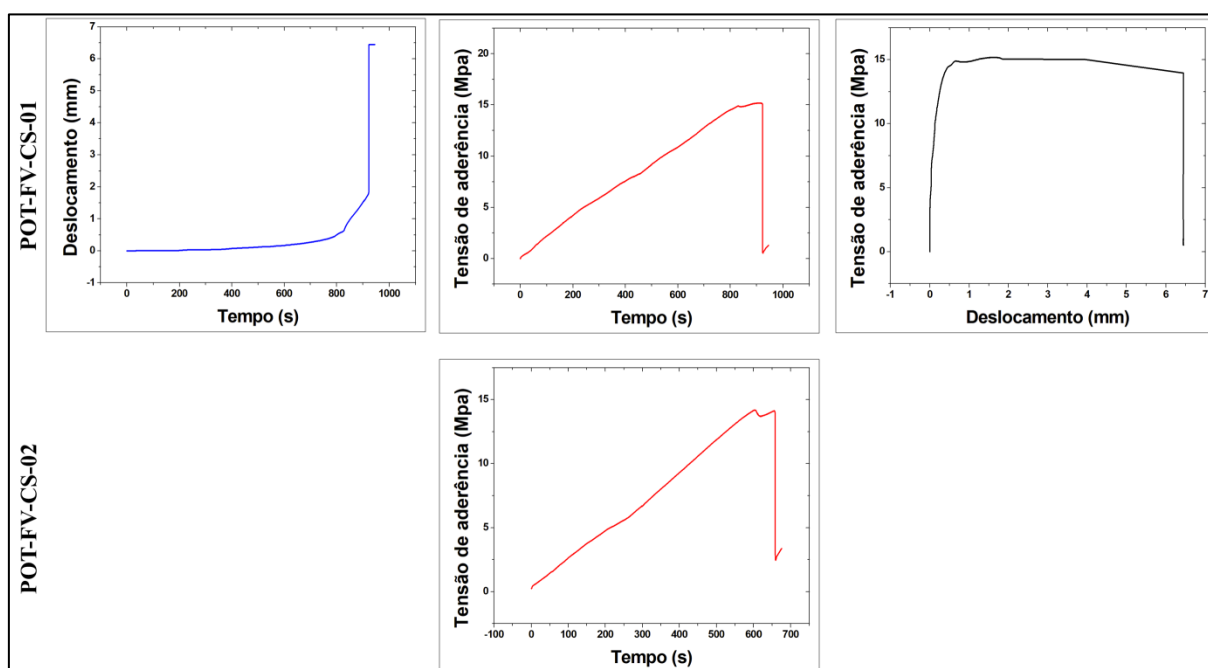


Figura 88 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 63 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

As Figuras 89 e 90 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios

ocorreram 217 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento. Os dados de tensão em função do tempo para a amostra “sem sal 03” foi perdido ao salvar o arquivo. Foi anotado apenas o valor máximo da carga aplicada. Consequentemente dos gráficos de tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento não foram possíveis de serem apresentados na Figura 89.

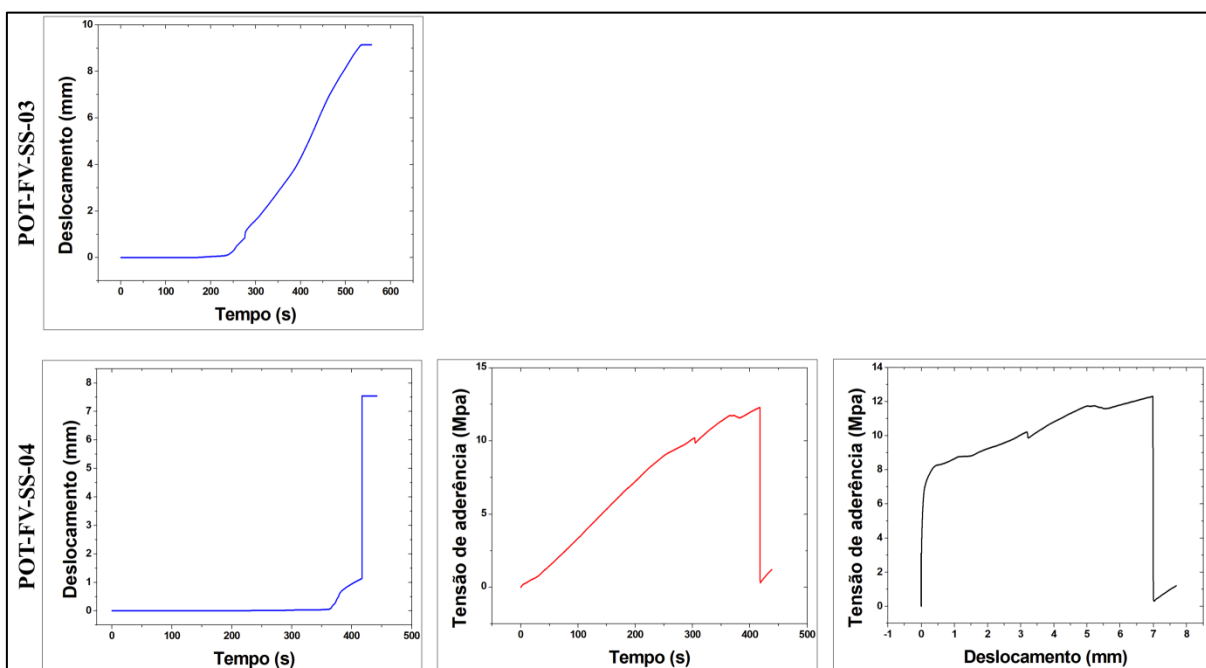


Figura 89 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 217 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

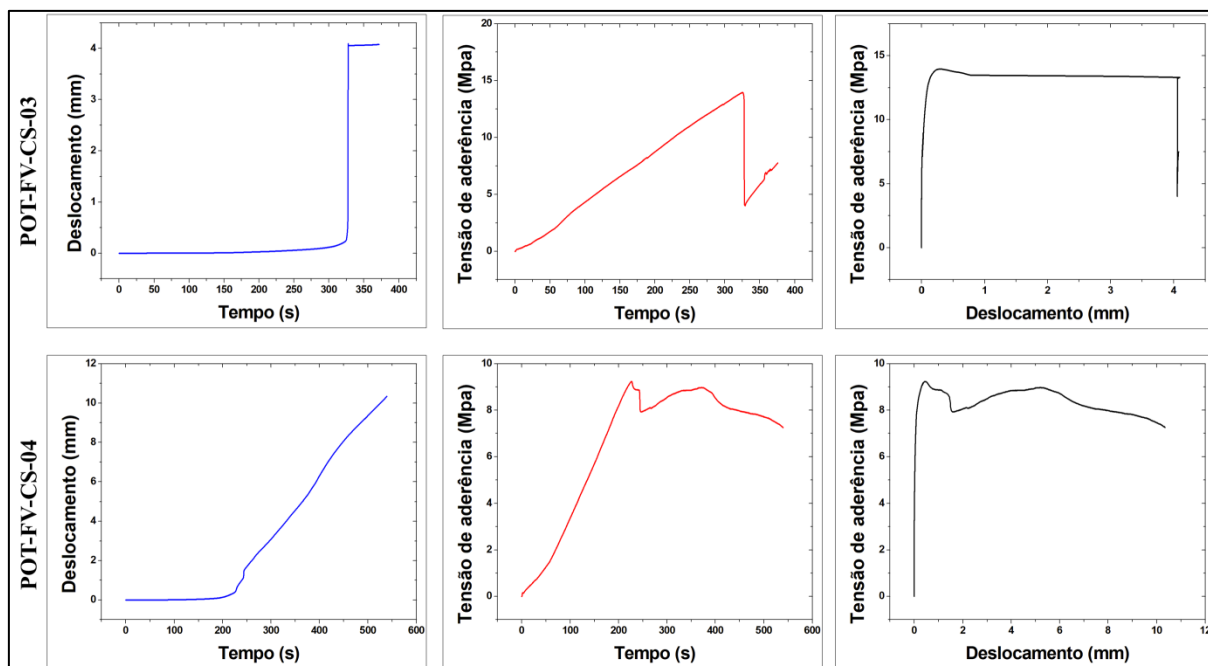


Figura 90 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 217 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

Por fim, as Figuras 91 e 92 mostram, respectivamente, os gráficos dos dados coletados durante o ensaio "pull-out" para corpos de prova de concreto armado sem sal e com sal. Estes ensaios ocorreram 315 dias após a moldagem dos mesmos. Nestas figuras são apresentados os gráficos de deslocamento em função do tempo, tensão de aderência em função do tempo e tensão de aderência em função do deslocamento.

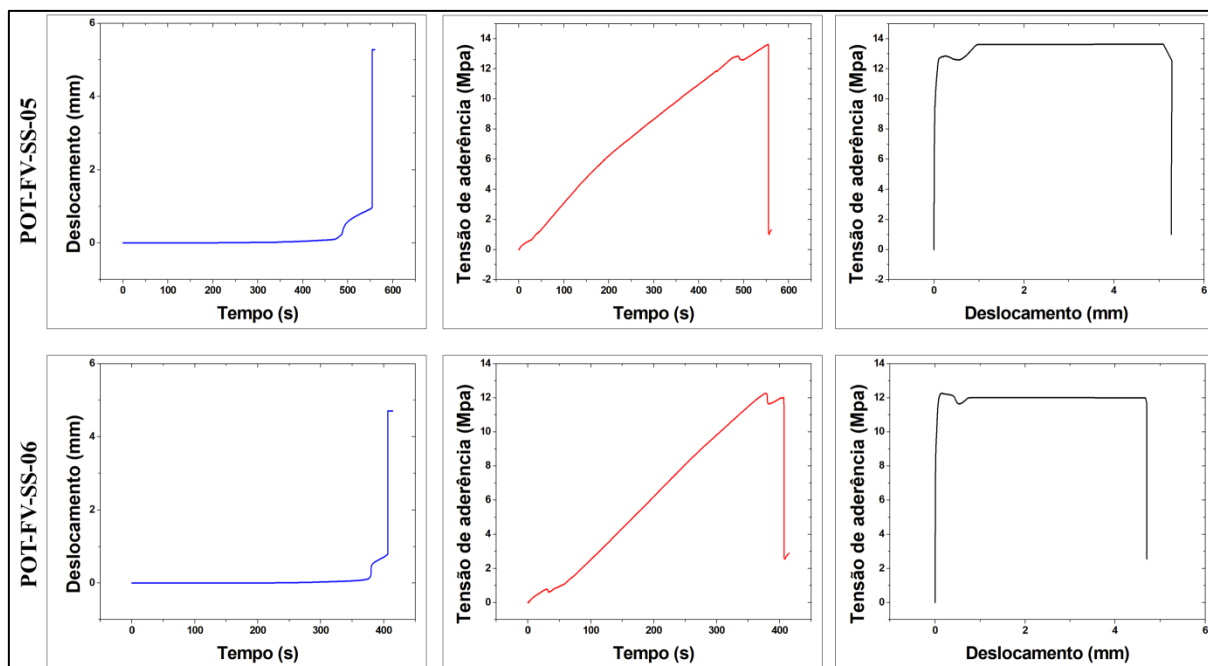


Figura 91 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 315 dias - Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

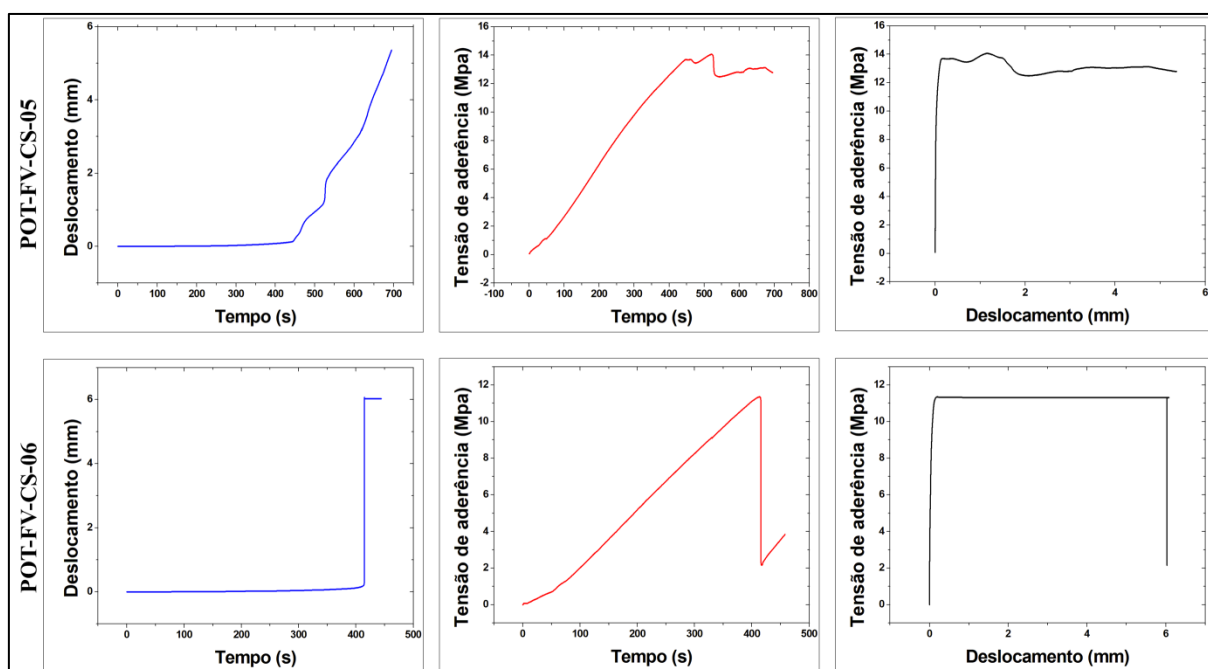


Figura 92 - Resultados dos ensaios "pull-out" - vergalhões de GFPR – 315 dias - Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Os gráficos mostram que até atingir o máximo da tensão de aderência, o deslocamento do vergalhão é muito pequeno, e após isto o deslocamento aumenta rapidamente.

A Tabela 28 apresenta de forma resumida os valores máximos obtidos para a tensão de aderência para cada ensaio "pull-out" realizado e também a média dos valores para cada

período após a moldagem dos corpos de prova. Estes valores referem-se aos corpos de prova moldados com concreto sem sal. Já os resultados para os que foram moldados com concreto contendo sal são apresentados na Tabela 29. O resultado obtido para a amostra “Com sal 04” foi desconsiderado, pois durante os ensaios ocorreu a ruptura de parte do corpo de prova na região de diâmetro reduzido, não sendo possível neste caso medir a tensão máxima de aderência entre o vergalhão e o concreto.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-FV-SS-01	63 dias	13,20	14,50
POT-FV-SS-02		15,79	
POT-FV-SS-03	217 dias	12,56	12,43
POT-FV-SS-04		12,30	
POT-FV-SS-05	315 dias	13,63	12,95
POT-FV-SS-06		12,26	

Tabela 28 - Resultados dos ensaios “pull-out” - vergalhões de GFPR – Corpos de prova de concreto armado sem sal – resumo.

Amostra	Tempo após a moldagem	Tensão de aderência máxima (MPa)	
		Amostra	Média
POT-FV-CS-01	63 dias	15,18	14,68
POT-FV-CS-02		14,19	
POT-FV-CS-03	217 dias	13,95	13,95
POT-FV-CS-04		9,23	
POT-FV-CS-05	315 dias	14,07	12,71
POT-FV-CS-06		11,35	

Tabela 29 - Resultados dos ensaios “pull-out” - vergalhões de GFPR – Corpos de prova de concreto armado com sal – resumo.

Nas Tabelas 30 e 31 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para todos os corpos de prova ensaiados assim como a média obtida para cada período analisado (63, 217 e 315 dias após a moldagem).

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-FV-SS-01	63 dias	35,87	36,27
RC-FV-SS-02		36,20	
RC-FV-SS-03		36,75	
RC-FV-SS-04		36,27	
RC-FV-SS-05	217 dias	42,09	41,74
RC-FV-SS-06		40,87	
RC-FV-SS-07		42,92	
RC-FV-SS-08		41,09	
RC-FV-SS-09	315 dias	41,09	41,99
RC-FV-SS-10		42,89	

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de compressão simples - Corpos de prova de concreto armado sem sal.

Amostra	Tempo após a moldagem	Resistência à compressão (MPa)	
		Amostra	Média
RC-FV-CS-01	63 dias	37,27	37,10
RC-FV-CS-02		36,85	
RC-FV-CS-03		36,32	
RC-FV-CS-04		37,95	
RC-FV-CS-05	217 dias	41,67	42,35
RC-FV-CS-06		42,37	
RC-FV-CS-07		42,24	
RC-FV-CS-08		43,12	
RC-FV-CS-09	315 dias	40,89	39,87
RC-FV-CS-10		38,85	

Tabela 31 - Resultados dos ensaios de compressão simples - Corpos de prova de concreto armado com sal.

A Figura 93 mostra como os resultados médios obtidos para tensão de aderência variou ao longo do tempo, tanto para os corpos de prova moldados com concreto sem sal quanto para os moldados com concreto contendo sal. As barras de erros contidas no gráfico representam a variação em relação à média.

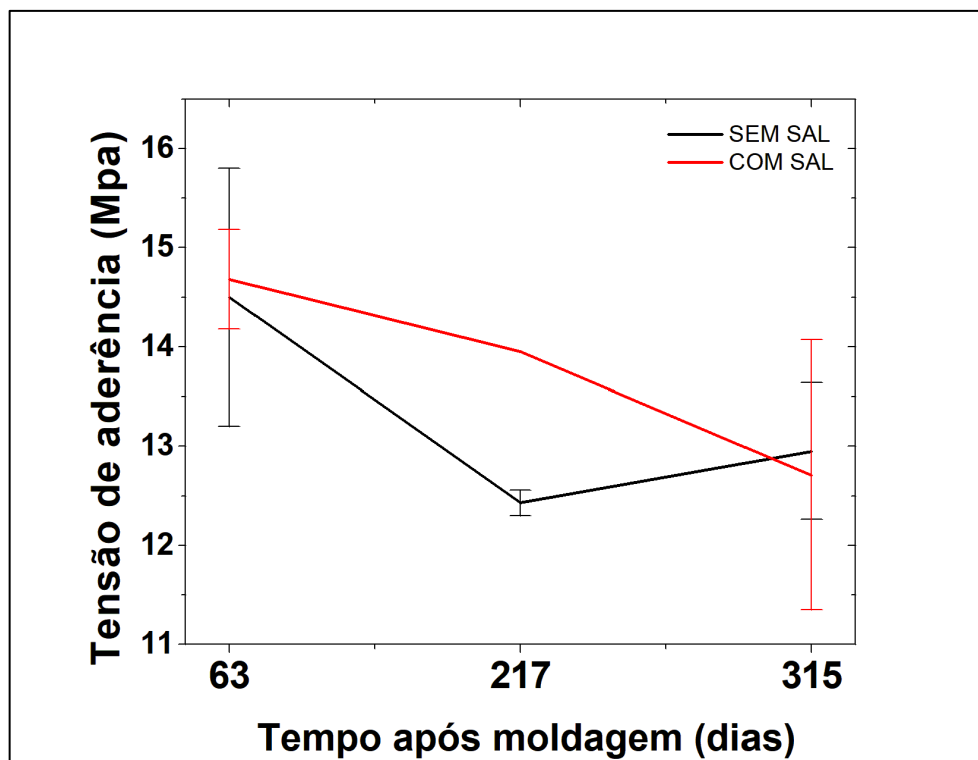


Figura 93 - Evolução temporal da tensão de aderência – Corpos de prova de concreto armado com vergalhões de GFPR. Observa-se que tanto inicialmente (63 dias) quanto no último ensaio (315 dias) os valores para tensão de aderência são muito próximos (considerando as barras de erros), tanto para os corpos de prova contendo concreto com sal quanto para os sem sal.

Já a variação da resistência à compressão média, tanto para concretos contendo sal quanto para concreto sem a presença de sal, pode ser observada na Figura 94 a seguir. Neste caso, as barras de erros apresentadas no gráfico da referida figura, correspondem ao desvio padrão dos resultados, já apresentados nas Tabelas 30 e 31.

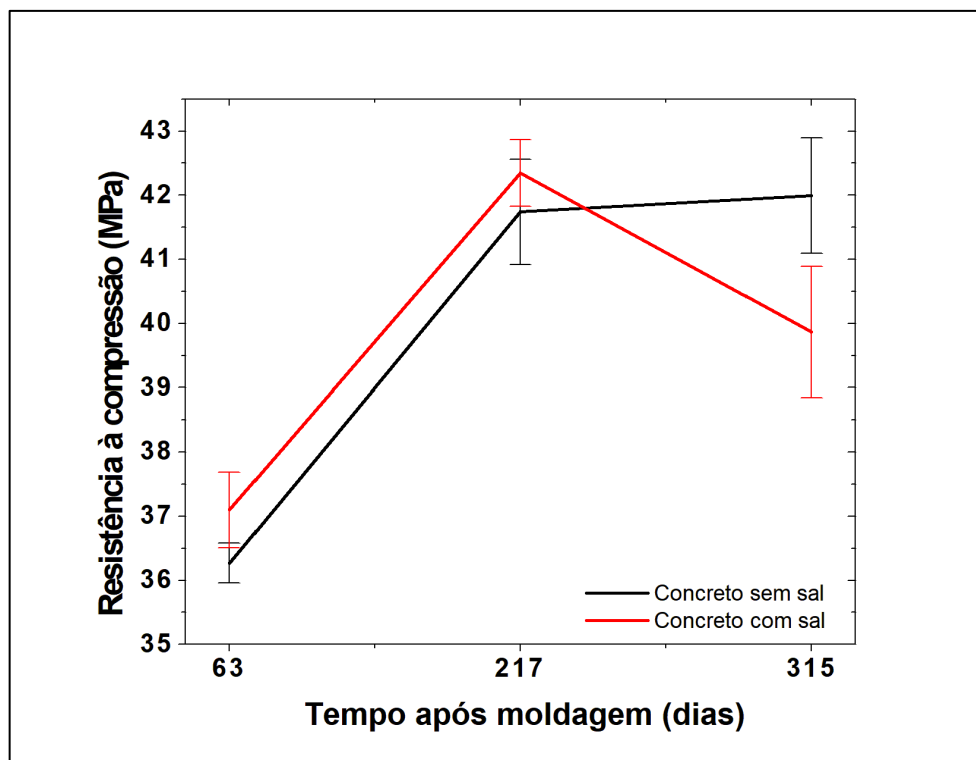


Figura 94 - Evolução temporal da resistência à compressão – Corpos de prova de concreto armado com vergalhões de GFPR. A resistência à compressão, tanto para o concreto contendo sal quanto para o concreto sem sal, cresce do primeiro (63 dias) para o segundo(217 dias). Porém há uma diminuição do valor de resistência à compressão no último ensaio (315 dias) para o concreto com sal, enquanto para o concreto sem sal, a resistência à compressão quase não varia.

4.4 Resultados gerais

Apresentamos nessa seção uma compilação de todos os resultados da seção 4.1 à 4.3, para efeitos de comparação entre os resultados obtidos com os corpos de prova de concreto armado e os diferentes tipos de vergalhão.

Nas Figuras 95 e 96 mostram em um mesmo gráfico, para fins de comparação, a variação ao longo do tempo da tensão de aderência considerando os três tipos de vergalhões utilizados neste trabalho (Aço CA-50, BFPR e GFPR). As Figuras 95 e 96 referem-se à corpos de provas moldados sem sal e com sal, respectivamente.

De modo semelhante, as Figuras 97 e 98 apresentam a variação ao longo a resistência à compressão dos concretos (sem sal e com sal, respectivamente) utilizados nas moldagens dos corpos de provas de concreto armado, considerando os três tipos de vergalhões utilizados neste trabalho (Aço CA-50, BFPR e GFPR).

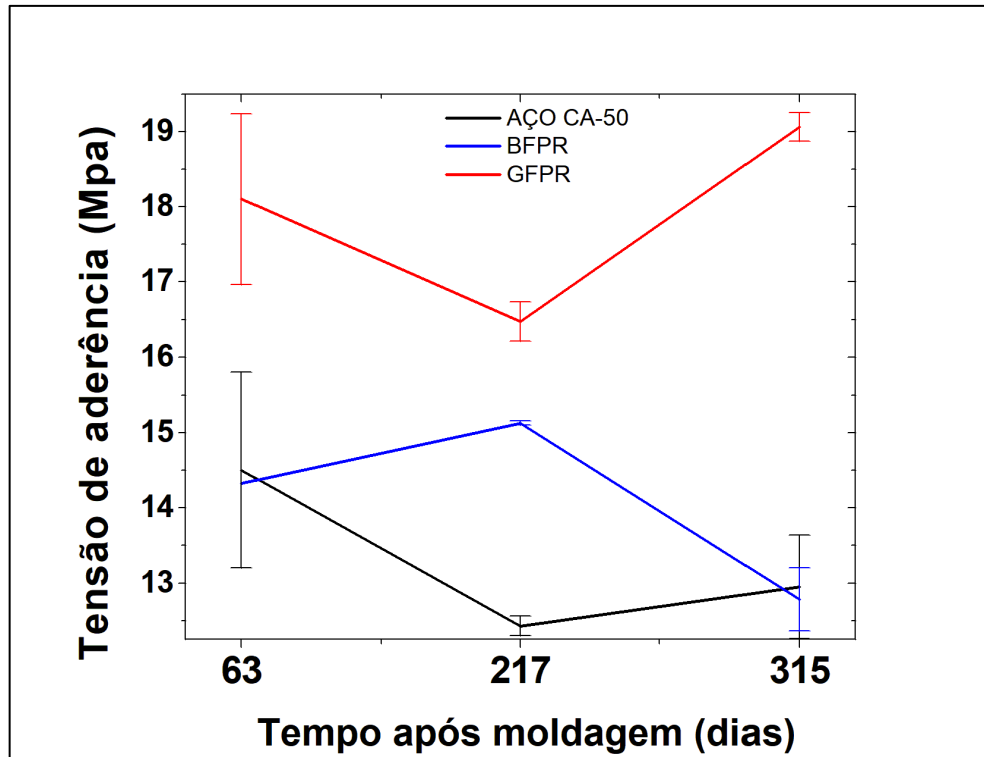


Figura 95 - Evolução temporal da tensão de aderência – Comparativo entre os vergalhões – Corpos de prova de concreto armado - Sem sal. Comparativo dos três tipos de vergalhões utilizados (Aço CA-50, BFPR e GFPR).

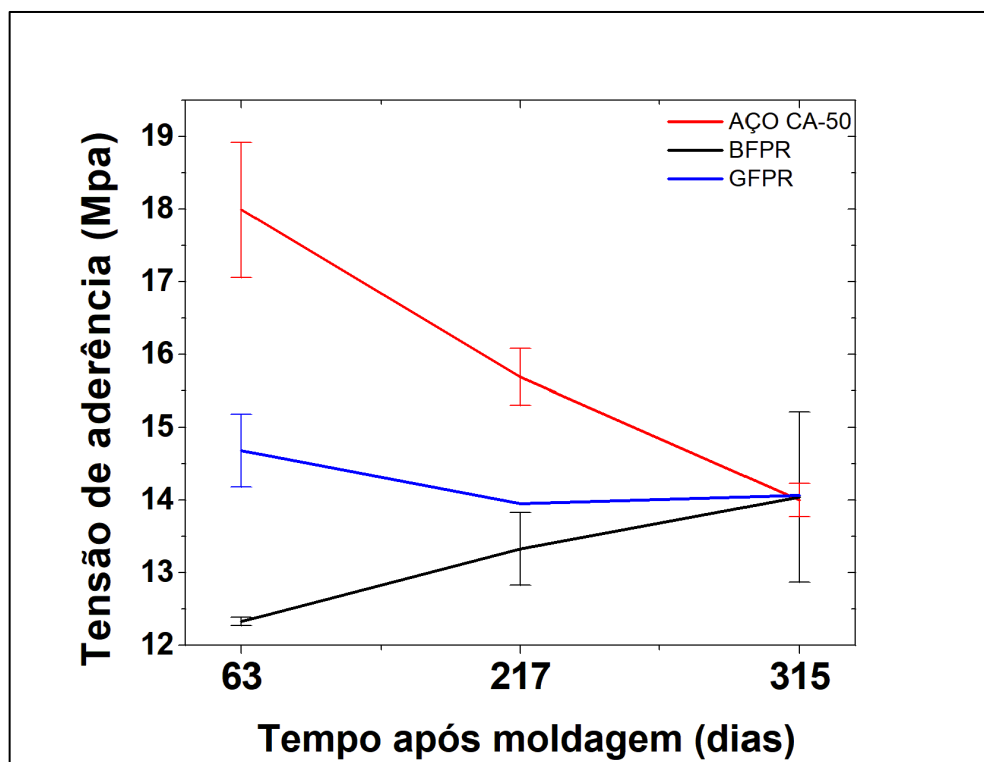


Figura 96 - Evolução temporal da tensão de aderência – Comparativo entre os vergalhões – Corpos de prova de concreto armado - Com sal. Comparativo dos três tipos de vergalhões utilizados (Aço CA-50, BFPR e GFPR).

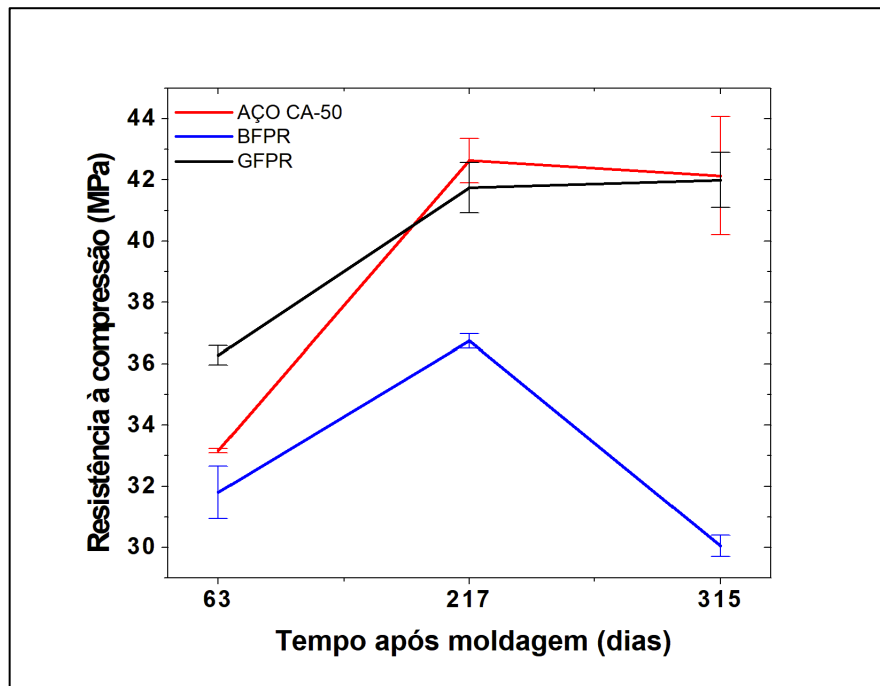


Figura 97 - Evolução temporal da resistência à compressão do concreto – Comparativo das resistências dos concretos utilizados nas moldagens dos corpos de prova de concreto sem sal, considerando os três tipos de vergalhões utilizados (Aço CA-50, BFPR e GFPR).

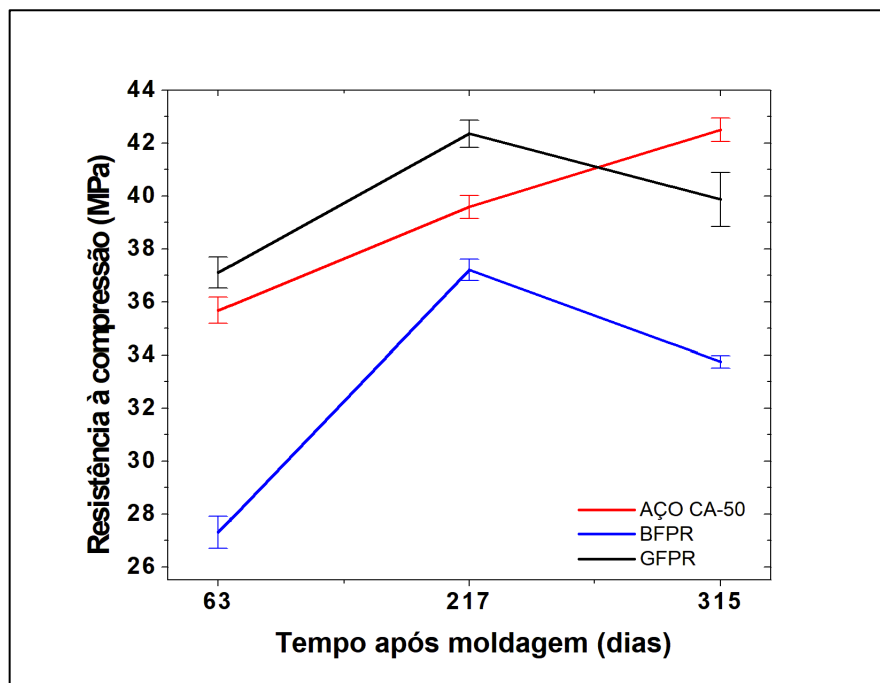


Figura 98 - Evolução temporal da resistência à compressão do concreto – Comparativo das resistências dos concretos utilizados nas moldagens dos corpos de prova de concreto com sal, considerando os três tipos de vergalhões utilizados (Aço CA-50, BFPR e GFPR).

4.5 Radiografia *in-situ*

Como já descrito na seção 3.2, a aquisição de imagens radiográficas ocorridas durante o ensaio “*pull-out*” foi realizada para quatro corpos de prova, sendo um corpo de prova de concreto armado sem sal com Aço CA-50 pertencente ao segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*” (seção 3.1.5.1), outros dois corpos de prova de concreto armado com vergalhões de Aço CA-50 para ensaios “*pull-out*” definitivos (seção 3.1.5.2), denominados “POT-AC-SS-01” e “POT-AC-CS-01” (Tabelas 20 e 21) e um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de BFPR no qual não conseguimos encontrar contraste perceptível na região de adesão entre vergalhão e concreto. Conforme já mencionado na seção 3.2. Para os equipamentos utilizados, o tempo de aquisição para cada quadro radiográfico foi de aproximadamente 4 segundos.

Amostra	Quantidade de imagens
Teste preliminar	196
POT-AC-SS-01	71
POT-AC-CS-01	64

Tabela 32 - Quantidades de imagens radiográficas coletadas referentes aos resultados dos ensaios “*pull-out*” com corpos de prova de concreto armado moldados com vergalhões de Aço CA-50.

Para cada imagem radiográfica foi gerado um arquivo com extensão RAW, isto é sem nenhuma compactação. Estes arquivos podem ser visualizados, por exemplo, em softwares como ImageJ, Matlab e Octave.

As Figuras 99, 100 e 101 mostram alguns quadros radiográficos (“*frames*”) obtidos durante os ensaios “*pull-out*”. O primeiro quadro se refere à um instante, durante o ensaio “*pull-out*”, onde ainda não houve deslocamento do vergalhão em relação ao concreto. No segundo quadro, este deslocamento já está iniciado. No terceiro quadro existe o deslocamento livre do vergalhão, após a perda de adesão.

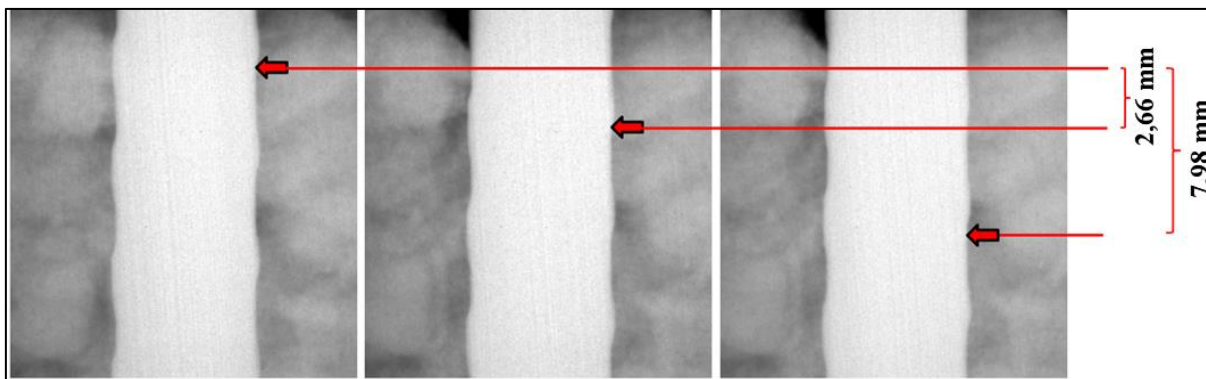


Figura 99 - Quadros radiográficos, obtidos do filme radiográfico *in-situ* realizado durante o ensaio "pull-out" em um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para o segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio "pull-out".

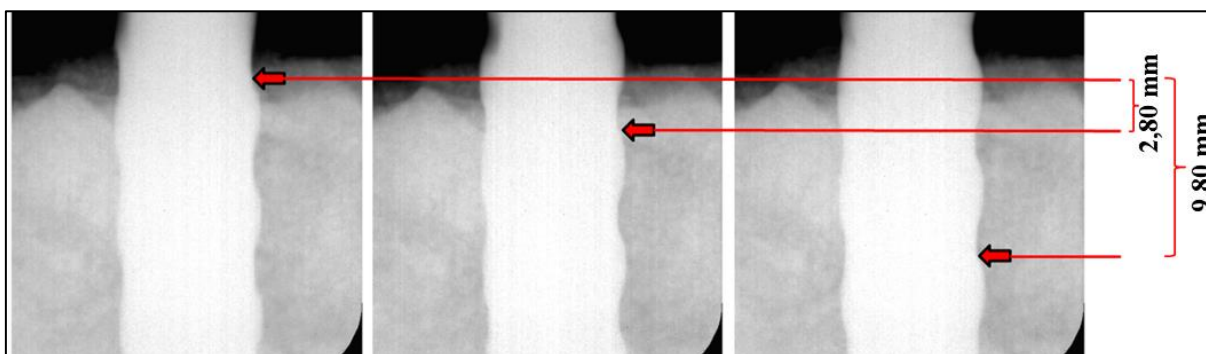


Figura 100 - Quadros radiográficos, obtidos do filme radiográfico *in-situ* realizado durante o ensaio "pull-out" em um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para ensaios "pull-out" definitivos, denominado "POT-AC-SS-01".

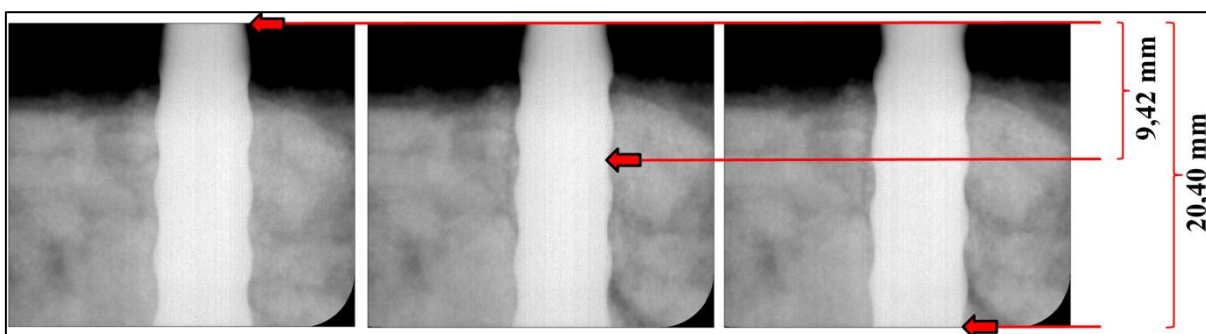


Figura 101 - Quadros radiográficos, obtidos do filme radiográfico *in-situ* realizado durante o ensaio "pull-out" em um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para ensaios "pull-out" definitivos, denominado "POT-AC-CS-01".

Como mostrado nas Figuras 99, 100 e 101, foi possível, a partir das imagens medir o deslocamento em função do tempo do vergalhão em relação ao concreto. Para cada corpo de prova de concreto armado radiografado, foi possível medir, pixel por pixel, quadro a quadro,

o deslocamento relativo entre o vergalhão e o concreto. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos com o dispositivo medidor de deslocamento (Figuras 102, 103 e 104).

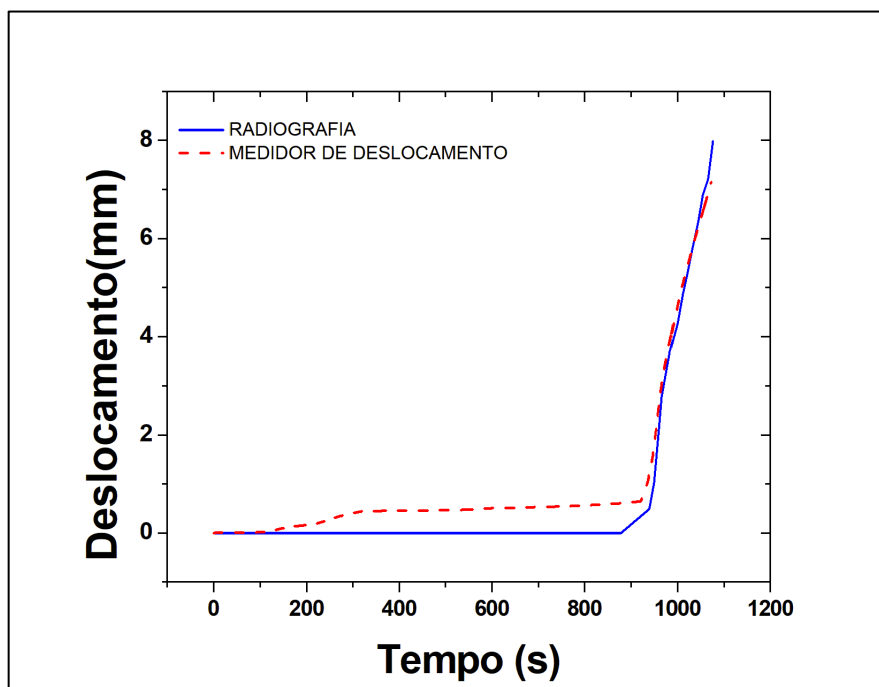


Figura 102 – Comparativo da medida de deslocamento obtido através do dispositivo medidor e por radiografia *in-situ* durante os ensaios “*pull-out*” para o corpo de prova de concreto armado de Aço CA-50 moldado para o segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*”.

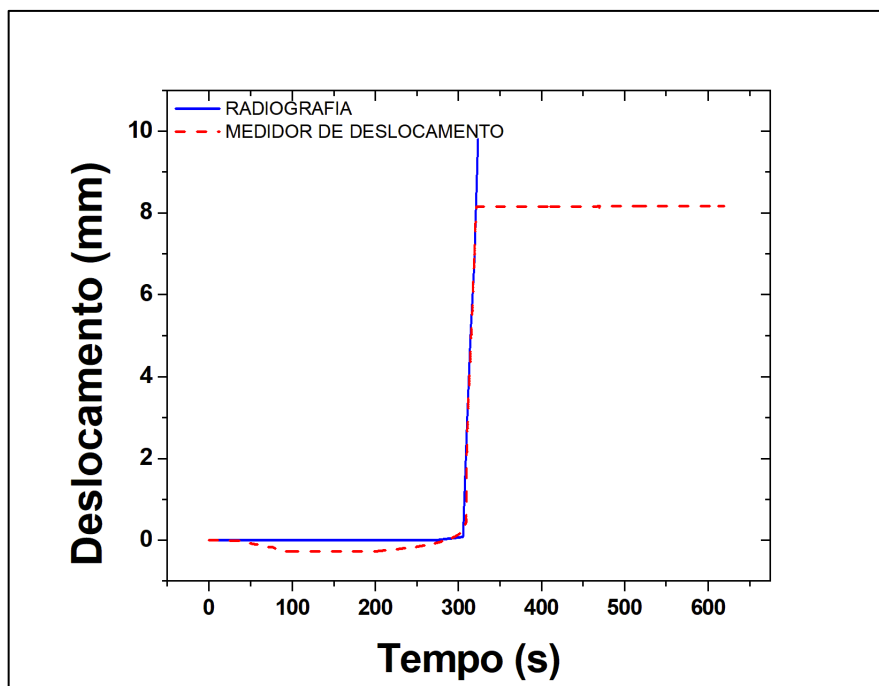


Figura 103 - Comparativo da medida de deslocamento obtida através do dispositivo medidor e por quadros radiográficos, obtidos do filme radiográfico *in-situ* realizado durante o ensaio "pull-out" em um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para ensaios "pull-out" definitivos, denominado "POT-AC-SS-01".

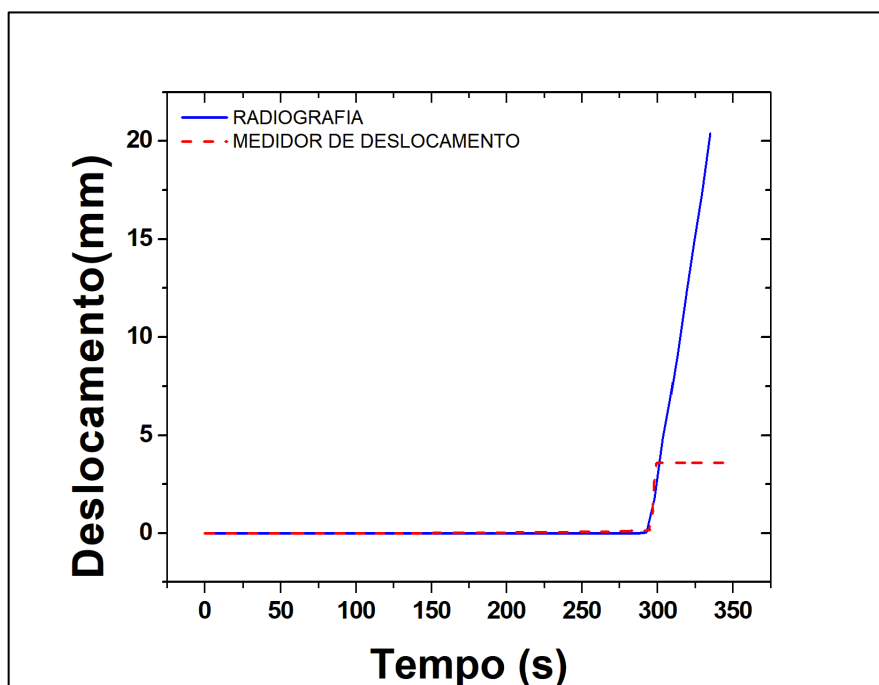


Figura 104 - Comparativo da medida de deslocamento obtida através do dispositivo medidor e por quadros radiográficos, obtidos do filme radiográfico *in-situ* realizado durante o ensaio "pull-out" em um corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para ensaios "pull-out" definitivos, denominado "POT-AC-CS-01".

Como mencionado na seção 1 (Introdução), outras informações importantes, que podemos esperar que sejam detectadas pela radiografia *in-situ* durante o ensaio “*pull-out*”, são deformações e pequenas rachaduras longitudinais no concreto. Para isso, foram subtraídos pixel por pixel, para todos os quadros (“*frames*”) radiográficos o primeiro quadro radiográfico, isto é, subtraímos de todas as imagens obtidas durante o ensaio “*pull-out*”, a imagem sem nenhuma deformação. Com isso, apenas detalhes cuja alteração durante o teste “*pull-out*” foram identificadas. Ao fazer isso, foi possível detectar / observar, logo antes da perda de aderência entre o vergalhão e o concreto, as regiões dentro do concreto com máxima deformação (compressão máxima) (Figura 103). Também foi possível detectar / observar rachaduras longitudinais e também o momento exato que ocorre a perda de aderência entre o vergalhão de Aço CA-50 e o concreto (Figura 105).

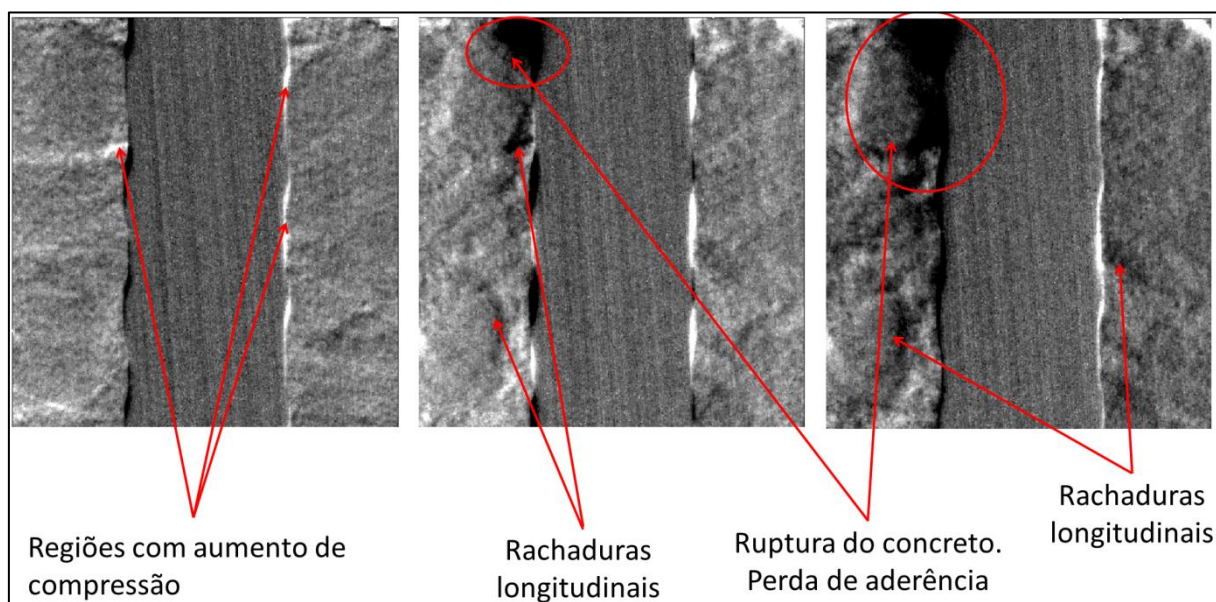


Figura 105 – Imagens processadas a partir da subtração de todos os quadros radiográficos da imagem radiográfica na qual o corpo de prova não havia sofrido nenhum esforço/deformação (primeiro quadro radiográfico). Nestas imagens é possível observar regiões de máxima compressão no concreto, locais de ruptura, rachadura e perda da aderência. Corpo de prova de concreto armado com vergalhão de Aço CA-50, moldado para o segundo conjunto de corpos de prova para testes com ensaio “*pull-out*” (O mesmo da Figura 99).

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Desenvolvemos neste trabalho um estudo comparativo da aderência entre o concreto e vergalhões de diferentes materiais. Como já mencionado, foram utilizados três tipos de vergalhões: i) Aço CA-50; ii) Vergalhões reforçados com Fibra de Basalto (BFPR) e iii) Vergalhões reforçados com fibra de Vidro (GFPR). Para cada tipo de vergalhão, foram fabricados (moldados) corpos de prova de concreto armado com sal e outros sem sal. Para medir a tensão de aderência entre os vergalhões e concreto foram realizados ensaios de arrancamento do tipo “*pull-out*”. Concomitantemente, para verificação da resistência do concreto, ensaios de compressão em corpos de prova de concreto (sem a presença do vergalhão) também foram realizados. Todos os ensaios foram realizados em 63, 217 e 315 dias após a moldagem dos corpos de prova. Durante a realização de alguns destes ensaios “*pull-out*” foram adquiridas imagens radiográficas. A partir da revisão bibliográfica e dos resultados obtidos, podemos chegar às seguintes conclusões:

- Para os corpos de prova de concreto armado moldados com vergalhões de Aço CA-50, observa-se que entre o primeiro (63 dias) e o último (315 dias) ensaio há uma redução dos valores de tensão de aderência para os corpos de prova contendo sal em sua mistura. (Figura 77)
- Quanto à resistência à compressão do concreto utilizado nos corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50, pode-se observar que inicialmente (63 dias) o concreto contendo sal obteve maior resistência à compressão comparada ao concreto sem sal. Porém, aos 315 dias as resistências de ambos convergiram para valores muito próximos (Figura 78).
- Para os corpos de prova moldados com vergalhões de BFPR, verifica-se que inicialmente (63 dias) a tensão de aderência é maior para os corpos de prova contendo concreto com sal, porém nos últimos ensaios (315 dias) esta tendência se inverte, ou seja, a aderência é maior para os corpos de prova sem sal (Figura 85). Ressalva-se que há uma sobreposição das barras de erros nesta última data.
- Quanto à resistência à compressão do concreto utilizado nos corpos de prova com vergalhões de BFPR, assim como aconteceu com a tensão de aderência, os corpos de prova contendo sal obtiveram maior resistência à compressão inicialmente (63 dias) e aos 315 dias isso se inverteu (Figura 86). Como já relatado na revisão bibliográfica, a resistência à compressão é um dos fatores que contribuem para maior tensão de

aderência suportada entre o concreto e o vergalhão. Neste caso, dos vergalhões de BFPR, pudemos observar que há um alinhamento do comportamento dos dois parâmetros.

- Nos resultados obtidos nos ensaios “*pull-out*” com os corpos de prova contendo vergalhões de GFPR, observa-se que, tanto inicialmente (63 dias) quanto no último ensaio (315 dias), os valores para tensão de aderência são muito próximos, tanto para os corpos de prova contendo concreto com sal quanto para os que não continham salinidade (Figura 93).
- Quanto a resistência à compressão dos concretos utilizados nos corpos de prova contendo vergalhões de GFPR, verifica-se que há um aumento da resistência entre os primeiros ensaios (63 dias) e os últimos ensaios (315 dias), tanto para o concreto contendo sal quanto o concreto sem sal (Figura 94).
- De modo geral, a utilização de concreto com sal, conforme se constata na (Figura 96) que, apenas para os corpos de prova com vergalhões de Aço CA-50, ocorre uma queda da tensão de aderência ao longo do tempo (em torno de 20%). Isso confirma as informações obtidas na revisão da bibliografia, na qual foi descrito que a presença de sal na mistura de concreto favorece a corrosão dos vergalhões de aço e, como consequência do início de processo corrosivo pode destacar a diminuição da aderência entre o concreto e o vergalhão de aço. Já para os corpos de prova com vergalhões de materiais compósitos (BFPR e GFPR) a tensão de aderência entre o concreto e os vergalhões não se alterou de modo relevante ao longo do tempo. Isso também confirma os dados da literatura, que os mesmos não estão sujeitos ao processo corrosivo. Salientamos aqui, que nosso estudo é o mais longo constatado na literatura sobre esse assunto. Os trabalhos existentes limitam-se à tempos de 90 dias após moldagem. Pretendemos ainda estender os estudos para tempos mais longos (aproximadamente, mais 2 anos), pois ainda dispomos de corpos de prova.
- Para os corpos de prova moldados sem sal, para os três tipos de vergalhões (Aço CA-50, BFPR e GFPR) a tensão de aderência teve pouca alteração ao longo do período analisado. Ou seja, comparando os resultados dos primeiros ensaios (63 dias) com os resultados dos últimos ensaios (315 dias) as alterações não foram significativas (Figura 95) e estão em acordo com os resultados de resistência à compressão (Figura 97). Conforme relatado na revisão bibliográfica, a resistência à compressão é um dos fatores que afetam a aderência entre o concreto e o vergalhão.

- Ainda, os resultados obtidos dos ensaios “*pull-out*” (Figuras 95 e 96) indicam que os vergalhões de Aço CA-50 suportam uma tensão de aderência superior (cerca de 30%) aos vergalhões de BFPR e GFPR, tanto em corpos de prova de concreto armado com sal como sem sal. Na hipótese de utilização dos vergalhões de BFPR e GFPR em projetos de estrutura de concreto armado, mesmo que estes suportem maiores esforços de tração do que o Aço CA-50, seriam necessários maiores comprimentos de ancoragem para suportar os mesmos esforços que os vergalhões de Aço CA-50.
- Nas medidas de difração de raios X não foi possível identificar a estrutura das fibras dos vergalhões. Observamos apenas “difração” da resina presente.
- As medidas de Microscopia Eletrônica por Varredura - MEV confirmaram a composição química dos vergalhões de BFPR, GFPR e da resina presente (Tabela 2 e Tabela 5). Ainda, foi possível obter informação sobre a forma e tamanho (de 16 μm a 18 μm) das fibras de basalto e vidro dos vergalhões (Figuras 60 e 61) que também foi confirmada por medidas de radiografia de raios X de alta resolução ($7 \times 7 \mu\text{m}^2$) e contraste (Figura 62).
- A aquisição de imagens radiográficas *in-situ* concomitantemente à realização dos ensaios “*pull-out*” mostrou-se uma técnica adequada para acompanhar as propriedades de aderência entre o vergalhão de Aço CA-50 e o concreto durante o referido ensaio. A partir das imagens obtidas foi possível determinar, medindo pixel por pixel e quadro a quadro, o deslocamento relativo do vergalhão em relação ao concreto. Isso significa que qualquer outra ferramenta de medição de deslocamento relativo (como o dispositivo medidor de deslocamento) poderia ser removida da montagem experimental do ensaio “*pull-out*”. Além disso, outras informações foram possíveis de serem detectadas / vistas: i) regiões dentro do concreto com compressão máxima imediatamente antes da perda de aderência; ii) grandes fissuras longitudinais e; iii) o momento exato em que ocorre a perda de aderência entre o vergalhão e o concreto. Não obtivemos sucesso na detecção de oxidação na região de aderência para os tempos analisados até o momento. Isso se deve, em parte, a baixa resolução e sensibilidade do nosso sistema de detecção. Contudo, esperamos detectar algum contraste nas imagens que iremos realizar nos ensaios com tempo de envelhecimento maior que iremos realizar, aproximadamente, nos próximos 2 anos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de continuidade desta pesquisa, objetivando aprofundar os conhecimentos da utilização dos vergalhões de materiais compósitos em estruturas de concreto armado, assim como a utilização de técnicas de raios X *in-situ*, outros estudos serão e poderão ser realizados para maior compreensão das propriedades de tais materiais e aprimoramento das técnicas de ensaios realizados:

- Realizar os ensaios “*pull-out*” nos demais corpos de prova que foram moldados, porém ainda não utilizados. Realizaremos mais três etapas de ensaios. Estes ocorrerão em 490 dias (ainda este ano), 735 dias (2019) e 1015 dias (2020) após a moldagem dos mesmos.
- Verificar se nas datas citadas no tópico anterior é possível observar por meio de imagens radiográficas o processo corrosivo nos vergalhões de Aço CA-50. Caso tenhamos um novo detector disponível, com mesma resolução, porém com maior área de detecção e com maior sensibilidade para explorarmos maiores ampliações, poderemos explorar o uso de contraste por fase (radiografia por contraste de fase) para detecção da corrosão, bem como para identificação dos vergalhões de BFPR e GFPR dentro do concreto.
- Fazer uma pesquisa sobre modelagem numérica da tensão de aderência entre vergalhões e o concreto e compará-los com os resultados obtidos nos ensaios “*pull-out*” deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ADASOORIYA, N. D.; SAMARAKOON, S.; GUDMESTAD, O. T. Corrosion propagation phase and bond strength degradation of reinforced concrete structures: state of the art. **International Journal of Computational Methods**, v. 6, p. 499–514, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C234-91a**. Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced Steel. Philadelphia. 1991.

AMMAR, A. M. **Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Université Laval. Quebec, 2014.

ANDREUCCI, R. A Radiologia Industrial. **Associação brasileira de ensaios não destrutivos**, São Paulo, jul. 2014. Disponível em <https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/Radiologia-Jul-2014.pdf>. Acesso em 25/04/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1 : Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Barras e fios de aço para armaduras para concreto. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BARBOSA, M. T. G.; SÁNCHEZ FILHO, E. S. The bond stress x slipping relationship. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 9, p. 745-753, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, v. 1, 2000.

BUSHBERG, J. T. et al. **The essential physics of medical imaging**. 2. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2002.

BUSHONG, S. C. **Ciência Radiológica para tecnólogos - Física, Biologia e proteção**. Tradução da 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

CAVALVANTI, V. M. M.; FREIRE, G. S. S. A possibilidade de utilização de areias marinhas como agregado na construção civil na região metropolitana de Fortaleza, estado do Ceará. **Gravel**, v. 5, p. 11-24, 2007. Disponível em http://www.ufrgs.br/gravel/5/Gravel_5_02.pdf. Acesso em 12/03/2018.

CHIFFRE, L. D. et al. Industrial applications of computed tomography. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, p. 655-677, 2014.

Composite Group Chelyabinsk. **Composite Group Chelyabinsk**. Disponível em: <<http://compositegroupworld.com/produktsiya.html>>. Acesso em: 09 Abril 2018.

CROOKES, W. On the illumination of lines of molecular pressure, and the trajectory of molecules. **Phil. Trans. R. Soc. Lond**, v. 170, p. 135- 164, 1879.

DONG, Z.; WU, G.; XU, Y. Experimental study on the bond durability between steel-FRP composite bars (SFCBs) and sea sand concrete in ocean environment. **Construction and building materials**, v.115, p. 277 - 284, 2016.

DUCATTI, V. A. **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. 1993. 259 f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FANELLA, D. A. **Reinforced Concrete Structures, Analysis and Design** - 1. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

FANG, C. et al. Corrosion influence on bond in reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2159-2167, 2004.

FANG, C. et al. Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete. **Cement and concrete research**, v.36, p. 1931-1938, 2006.

FRANÇA, V. H. **Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira. 2004.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2012.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos - LTC, 1996.

GRAEFF, Â. G. et al. Perda de aderência entre o concreto e a armadura devido à corrosão: análise experimental e implicações no dimensionamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais de 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em estruturas para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

HERNADEZ A.M., BOONE J.M. Tungsten anode spectral model using interpolating cubic splines: unfiltered x-ray spectra from 20 kV to 640 kV. **Med. Phys.** 41(4):042101, 2014.

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. **Radiation Physics Division, PML, NIST**. [S.l.]. 1996. Disponível em <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.

HYER, M. W. **Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials**. Lancaster: DEStech Publications, 2009.

ISC (2014) GOST 31938-2012: fibre-reinforced polymer bar for concrete reinforcement. Interstate Council For Standardization, Metrology And Certification, Moscou, Russia.

KARA, I. F.; ASHOUR, A. F.; KÖROGLU, M. A. Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams. **Composite Structures**, v. 129, p. 111-121, 2015.

KARBHARI, V. M. **Durability of Composites for Civil Structural Applications**. 1. ed. Pennsylvania: Woodhead Pub., 2007.

KUMAR, D. S.; RAJKUMAR, R. Experimental investigation on flexural behavior of concrete beam with glass fibre reinforced polymer rebar as internal reinforcement. **International Journal of Chemical Sciences**, v. 14, p. 319 - 329, 2016.

LAPENA, M. H.; MARINUCCI, G.; CARVALHO, O. D. Utilização da fibra de basalto em aplicações estruturais – revisão e propostas de aplicação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20, 2012. Joinville. **Anais do 20º Congresso brasileiro de engenharia e ciências dos materiais**. Disponível em <http://www.metallum.com.br/20cbecimat/trabalhos-completos-cbecimat.php>.

LAU, D.; PAM, H. J. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 32, p. 3857-3865, 2010.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. **Construções de concreto - Principios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado - Vol. 1**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

LUNDGREN, K. Effect of corrosion on the bond between steel. **Magazine of Concrete Research**, v. 59, p. 447–461, 2007.

MCCOY, W. J. Mixing and curing water for concrete. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*, STP 169-A. pp.515–521, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1996.

NACER, R. **Évaluation des propriétés physiques et mécaniques de laminés en matériaux composites fabriqués par enroulement filamentaire**. 2006. 144 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Sherbrooke University, Quebec, 2006.

NAGABHUSHANA et al. Effect of salt water on compressive strength of concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 04, p. 2687 - 2690, 2017.

NAWY, E. G. **Reinforced concrete: a fundamental approach**. 6. ed. Nova Jersey: Pearson Education, 2009.

NEITZEL, U. Status and prospects of digital detector technology for CR and DR. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 114, p. 32-38, 2005.

OESCH, T. *In-Situ* CT Investigation of Pull-Out Failure for Reinforcing Bars Embedded in Conventional and High-Performance Concretes. In: 6th CONFERENCE ON INDUSTRIAL COMPUTED TOMOGRAPHY, Wels, Austria., 2016. **Papers**. Disponível em http://www.ndt.net/article/ctc2016/papers/ICT2016_paper_id83.pdf.

OLUTOGE, F. A.; AMUSAN, G. M. The Effect of Sea Water on Compressive Strength of Concrete. **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 3, p. 23-31, 2014.

ORENSTEIN, G. Discover more about the technology in your digital sensors - and what to look for in your next one. **Dentaltown Magazine**, v. dezembro de 2016, 2016.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios - notas de aula**. UFSC. [S.l.]. 2007. Disponível em http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf.

PLEVKOV, V. et al. Mechanical properties of composite rebar under static and short-term dynamic loading. **AIP Conference Proceedings**, v. 1800, p. 040018, 2017.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RILEM, FIP, CEB, “Essai portant sur l’adhérence des armatures du béton. 1. Essai par flexion (7-II-28D). 2. Essai par traction (7-II-128), Recommandations Provisoires. *Matériaux et Constructions*, (mars – avr), v. 6, n. 32, pp. 96–105, 1973.

RÖNTGEN, W. C. On a New Kind of Rays. **Nature**, v. 53, p. 274-276, 1896.

SHARMA, R. et al. Micro-mechanisms of concrete failure under cyclic compression: X-ray tomographic *in-situ* observations. In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, California USA, 2016. **Papers**. Disponível em < <http://framcos.org/FraMCoS-9/Full-Papers/205.pdf>>.

SKARŻYŃSKI, T.; TEJCHMAN, J. Experimental Investigations of Fracture Process in Concrete by Means of X-ray Micro-computed Tomography. **Strain**, v. 52, p. 26–45, 2016.

SONODA, M. et al. Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence. **Radiology**, v. 148, p. 833-838, 1983.

TALLMAN, T. N.; WANG, K. W. Damage and strain identification in multifunctional materials via electrical impedance tomography with constrained sine wave solutions. **Structural Health Monitoring**, v. 15(2), p. 235-244, 2016.

TAVARES, A. J. **Aderência Aço-concreto: análise numérica dos ensaios pull-out e APULOT**. 2012. 141 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2012.

Thermofischer Scientific. **ThermoFischer Scientific**. Disponível em: <<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/PXS5927> >. Acesso em: 09 maio de 2018.

TORRES, A. D. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta análise**. 2011. 170 p. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm. 1982.

WATSTEIN, D. Bond Stress in Concrete Pullout Specimens. **ACI Journal**, v. 38, p. 37-52, 1941.

WEGIAN, F. M. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. **IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**, v. 3, p. 235-243, 2010.

WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. **Materials and Design**, v. 31, p. 4244 - 4250, 2010.

WRIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete - Mechanics and Design**. Nova Jersey: Pearson education, 2012.

YALCINER, H.; EREN, O.; SENSOY, S. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level. **Cement and concrete research**, v. 42, p. 643-655, 2012.

YAN, F.; LIN, Z.; YANG, M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. **Composites Part B**, v. 98, p. 56-69, 2016.

ANEXO I - Trabalhos publicados ou em fase de publicação

1 – Resumo e apresentação oral de trabalho no 2º CONGRESSO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS APLICADAS NAS TRÊS FRONTEIRAS.

RESUMO DO TRABALHO:

Inspeção da aderência entre vergalhões de aço e concreto através de medidas *in-situ* por técnicas de imagem por raios X

Rudney Bostel, Ana Carolina Parapinski dos Santos, Fábio L. Willrich, João Bernardino de O. Lopes, Marcelo Gonçalves Hönnicke

A inspeção da aderência entre vergalhões de aço e o concreto é realizada através do ensaio de arrancamento (“*pull-out*”). As informações de aderência são obtidas através do monitoramento da força e do deslizamento, estas sendo medidas por uma célula de carga e por um dispositivo apalpador (medidor de deslocamento) colocado em contato com a ponta do vergalhão em análise. Neste trabalho incluímos no ensaio “*pull-out*” a inspeção radiográfica *in-situ*. Como fonte de raios X utilizamos uma fonte de raios X do tipo microfoco (Kevex PXS5-927) operando em 70 kV. Como detector foi utilizado um detector CCD de dentista (KaVo Kerr SNAPSHOT 2). Placas de chumbo com espessura de 2 mm foram moldadas em volta do experimento para assegurar a proteção radiológica. Com objetivo de diminuir a atenuação do feixe de raios X incidente sobre os corpos de prova cilíndricos (diâmetro de 15,0 cm por comprimento de 30,0 cm) os mesmos foram especialmente construídos com uma parte de sua seção transversal com menor dimensão (3,5 cm de diâmetro por 4,0 cm de comprimento). Mostraremos aqui que, a partir das imagens radiográficas podemos extrair *in-situ* algumas informações importantes, como, o próprio deslocamento do vergalhão durante o ensaio, bem como observar os locais de maior compressão do concreto ao redor do vergalhão, antes do seu total escorregamento. O traço do concreto utilizado bem como futuras aplicações da referida técnica também serão apresentados.

palavras-chave: concreto, materiais compósitos, ensaio *pull-out*, imagens por raios X.

2 – Submissão do artigo “**Watching the bonding between steel rebar and concrete with *in-situ* X-ray imaging**” à revista “Magazine of Concrete Research”

Status: Em revisão.