INTERFACE AÇO-CONCRETO REFRATÁRIO A ALTAS TEMPERATURAS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA

Guilherme Quinderé Romano

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Romildo Dias Toledo Filho
Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Rio de Janeiro
Abril de 2011

INTERFACE AÇO-CONCRETO REFRATÁRIO A ALTAS TEMPERATURAS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA

Guilherme Quinderé Romano

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr. Ing.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha, PhD.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, PhD.

Prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Marcos Martinez Silvoso, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL DE 2011

Romano, Guilherme Quinderé

Interface Aço-Concreto Refratário a Altas Temperaturas: Análise Experimental e Modelagem Numérica / Guilherme Quinderé Romano. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XXV, 168 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 142 -146.

1. Caracterização de Concretos. 2. Concreto Refratário. 3. Interface. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A Deus, à minha esposa Rita, à minha filha Isabel e ao meu filho Antonio, aos meus pais Lucy Quinderé Gomes e Renato Romano, às minhas irmãs Renata Quinderé Bittencourt e Roberta Quinderé Romano e ao meu cunhado Júlio César Bittencourt.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e da fortaleza para superar os obstáculos, bem como pela iluminação.

A toda a minha família, que tanto me apoiou e acreditou na realização deste trabalho.

Aos professores Romildo Dias Toledo Filho e Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, pelos ensinamentos, paciência, dedicação e orientação deste trabalho de tese.

Ao Professor Ronaldo Carvalho Battista, pelos ensinamentos e orientação na primeira etapa deste trabalho.

Ao Pesquisador Marcos Silvoso, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, em especial na utilização do programa *DIANA*. Às pesquisadoras Reila, Janine e Cintia.

Ao Instituto Militar de Engenharia – IME, em especial ao Chefe da Seção de Engenharia Mecânica TC Hamaoka, por ter proporcionado a oportunidade para que eu pudesse dar continuidade ao trabalho iniciado através da IMBEL e concluir esta tese de doutorado.

À Indústria de Material Bélico do Brasil – IMBEL, pela oportunidade oferecida e confiança depositada em mim na realização deste trabalho.

À Asea Brown Boveri – ABB e à PETROBRAS, que apoiaram o desenvolvimento da tecnologia que motivou este trabalho. Aos engenheiros Joel Ligiéro, Adyles Arato, Afonso Verges e Renato Bernardes que, em conjunto, trabalharam para o desenvolvimento da tecnologia que proporcionou este trabalho. À equipe técnica que tive a honra de coordenar ao longo do desenvolvimento da tecnologia Refratex, em especial aos técnicos: Clarus Antônio Magalhães de Oliveira Senne, Jorge Luiz dos Reis e Miguel José de Vilas Boas a aos colegas de trabalho Giancarlo Cantaluppi e Arivando Moraes.

Aos amigos Marcos Rocha e Renato Pinheiro. Aos amigos e também colegas Flávio Silva, Ederli, João, Margareth, Carlos Rossigalli, Vivian, Alex, Camila e Luiz pela paciência, ensinamentos e carinhosa atenção dispensados.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ: Júlio, Rodrigo, Renan, Alessandro, Flávio, Adaílton, Clodoaldo, Arnaldo, Santiago, Anísio, Manoel, Rosângela e Hugo.

Aos funcionários do PEC Luzidelle, Sandra, Amanda, Orlando, Jairo e Beth pelo apoio que prestaram.

À Agência Nacional de Petróleo - ANP e ao Centro de Pesquisas da Petrobras – CENPES pelo apoio financeiro destinado a esta pesquisa.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho e que não foram, aqui, citados. Muito obrigado!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

INTERFACE AÇO-CONCRETO REFRATÁRIO A ALTAS TEMPERATURAS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA

Guilherme Quinderé Romano

Abril/2011

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho
Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Programa: Engenharia Civil

O concreto refratário, utilizado para revestimentos de unidades de craqueamento catalítico fluido (UCCF), tem como principal função reduzir, ao longo de sua espessura, as temperaturas que, no interior destes vasos, podem ultrapassar a barreira dos 600°C. Sua aplicação é feita em toda a superfície interna destes equipamentos e são utilizadas ancoragens de aço inox para garantir a adesão do concreto refratário ao seu costado metálico. Existem ancoragens de diferentes tipos e a escolha da mais adequada depende de fatores como a espessura da camada de refratário a ser aplicada ou o tipo de refratário a ser utilizado. Neste cenário, surge o interesse pelo estudo da interface aço–concreto refratário, que é o objeto deste trabalho. Conhecer o comportamento dessa interface possibilita entender o papel desempenhado pelos grampos de ancoragem e assim considerá-lo na modelagem, construção e otimização.

Neste trabalho, foram realizados ensaios para a caracterização do concreto refratário reforçado com fibras de aço com o objetivo de obter características físico-mecânicas, em temperatura ambiente e também a 210°C, que serão necessárias para alimentar modelos numéricos; foi desenvolvida, também, uma montagem experimental inédita, que permite avaliar a interface costado metálico-concreto refratário sob estas mesmas temperaturas. O programa computacional *DIANA* v.9.2 é utilizado para gerar modelos numéricos que, por meio de retroanálise dos resultados experimentais obtidos e sem modelar os grampos explicitamente, avalia a interface costado metálico-concreto refratário, possibilitando obter suas características.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INTERFACE BETWEEN STEEL AND REFRACTORY CONCRETE TO HIGH TEMPERATURES: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND COMPUTATIONAL MODELING

Guilherme Quinderé Romano

April/2011

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho
Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Department: Civil Engineering

The refractory concrete lining used in FCC units has as its main function to generate a thermal gradient layer to reduce in the vessel steel wall the high inner temperatures that may exceed 600 °C. This lining is applied as the entire inner surface of the vessel and stainless steel anchorages are used to assure the adhesion of the refractory concrete on the steel wall. There are different types of anchorages the most suitable choice depends on factors such as the thickness of the lining or the type of the refractory used. In this scenary comes out the interest to study the interface between the steel wall and this refractory concrete. The main objective of this research work, which is also of practical to understand interface behaviour serves to understand the role planned by the anchorages in order to consider them in modeling, and also in the construction and optimization of these FCC units.

Tests were carried out for the numerical, physical and mechanical characterization of reinforced refractory concrete with stainless fibers in ambient temperatures and also at 210 °C. These characteristics were taken into account in the used numerical models moreover it was developed an original experimental setup which permits to evaluate the interface between the steel plate and refractory concrete layer at the same test temperatures. The software DIANA v.9.2 was used to create models that through a feedback analysis of the obtained experimental results and without model the anchorages explicitily allows for obtaining the interface characteristics.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....xii
LISTA DE TABELAS.....xviii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....xx

I INTRODUÇÃO 1

I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÃO 1
I.2 OBJETIVOS 5
I.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE 5

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8

II.1 INTRODUÇÃO 8
II.2 EMPREGO DOS REFRATÁRIOS 8
II.3 CONCRETO COMUM E CONCRETO REFRATÁRIO 12
II.4 CONCRETOS REFRATÁRIOS FIBROSOS 13
II.5 MODELAGEM NUMÉRICA PARA REVESTIMENTOS REFRATÁRIOS.....16

III MATERIAIS E MÉTODOS 21

III.1 INTRODUÇÃO 21
III.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL 21
III.3 MATERIAIS 27
III.3.1 Concreto Refratário.....27
III.3.2 Fibras de Aço.....28
III.3.3 Discos de Aço 29
III.3.4 Grampos de Ancoragem 30
III.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO REFRATÁRIO.....31
III.4.1 Moldagem 31
III.4.2 Cura, Secagem e Queima.....32
III.5 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE REFRATÁRIOS 34
III.5.1 Ensaio de Reologia.....34
III.5.1.1 Ensaio da Mesa de Consistência Padrão 34
III.5.2 Ensaios Mecânicos 35
III.5.2.1 Ensaio de Compressão 37
III.5.2.2 Ensaio de Flexão..... 39

III.5.2.3 Ensaio de Tração 41
III.5.3 Ensaios Físicos 45
III.5.3.1 Ensaio de Alongamento durante o Aquecimento 45
III.5.3.2 Ensaio de Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica ... 47
III.6 ENSAIOS PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA DA INTERFACE DISCO DE AÇO E CONCRETO REFRATÁRIO 49

IV CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRATÁRIOS 55

IV.1 INTRODUÇÃO 55
IV.2 CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRATÁRIOS 55
IV.2.1 Propriedades Reológicas 55
IV.2.1.1 Ensaio de Reologia 55
IV.2.2 Propriedades Mecânicas 56
IV.2.2.1 Comportamento Tensão – Deformação na Compressão 56
IV.2.2.2 Ensaio de Flexão 60
IV.2.2.3 Ensaio de Tração Direta 68
IV.2.3 Propriedades Físicas 73
IV.2.3.1 Ensaio de Alongamento Durante o Aquecimento 73
IV.2.3.2 Ensaio de Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica ... 75

V AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INTERFACE 77

V.1 RESULTADOS PARA A INTERFACE SEM ANCORAGEM 77
V.2 RESULTADOS PARA A INTERFACE COM ANCORAGEM 83
V.2.1 Resultados para GCR0 110 AMB 83
V.2.2 Amostras de GCR0 110 AMB com Falha na Solda 85
V.2.3 Resultados para GCR1.24 110 AMB 86
V.2.4 Amostras para GCR1.24 110 AMB com Falha na Solda 87
V.2.5 Resultados para GCR0 210 210 88
V.2.6 Amostras para GCR0 210 210 com Falha na Solda 90
V.2.7 Amostras para GCR0 210 210 com Falha na Solda e Grande Esticamento 91
V.2.8 Resultados para GCR1.24 210 210 92
V.2.9 Amostras para GCR1.24 210 210 com Falha na Solda 94
V.2.10 Amostras para GCR0 110 AMB com 150 mm de diâmetro e Falha na Solda 95
V.2.11 Resultado para GCR1.24 110 AMB com 150 mm de diâmetro 96

V.2.12 Amostra para GCR1.24 110 AMB com 150 mm de diâmetro e Falha na Solda..... 98
V.2.13 Comparativos entre os Resultados Obtidos para Interface com Ancoragem.....99

VI MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERFACE 103

VI.1 INTRODUÇÃO 103
VI.2 GERAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS.....103
VI.2.1 Idealização do Modelo 103
VI.2.2 Geometria 107
VI.2.3 Malha, Restrições e Carregamento.....107
VI.2.4 Leis de Comportamento dos Materiais 110
III.6.1.1 Lei de Comportamento do Aço 110
III.6.1.2 Lei de Comportamento do Concreto..... 110
III.6.1.3 Lei de Comportamento da Interface 114
VI.2.5 Geração de Resultados 116
VI.3 RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA.....118
VI.4.1 Resultado para GCR0 110 AMB 118
VI.4.2 Resultado para GCR0 110 AMB com falha na solda.....119
VI.4.3 Resultado para GCR1.24 110 AMB 121
VI.4.4 Resultado para GCR1.24 110 AMB com falha na solda.....123
VI.4.5 Resultado para GCR0 210 210 125
VI.4.6 Resultado para GCR0 210 210 com falha na solda.....128
VI.4.7 Resultado para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado 129
VI.4.8 Resultado para GCR1.24 210 210 131
VI.4.9 Resultado para GCR1.24 210 210 com falha na solda.....134
VI.4.10 Passos de carga utilizados para os modelos numéricos gerados.....135
VI.4.11 Comparativo das Curvas Tensão Versus Deslocamento 136

VII CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....139

VII.1 CONCLUSÕES 139
VII.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 141

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....142
ANEXO.....148

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 – Unidade de UCCF [1] 1
Figura I.2 - Seção de um regenerador de UCCF 2
Figura I.3 – Ilustrativo da Interface Costado de Aço – Concreto Refratário em um *Riser* 3
Figura I.4 – Mecanismo de Formação de Fissuras [25] 3
Figura II.1 – Forno Rotativo [3] 8
Figura II.2 – Forno Elétrico [4] 9
Figura II.3 – Tijolos Refratários em diferentes formas [5] 9
Figura II.4 – Aplicação de Concreto Refratário por Projeção Pneumática [9] 10
Figura II.5 – Malha Hexagonal [6] 11
Figura II.6 – Tipos de ancoragem de refratários [6] 11
Figura II.7 – Alteração de Cor do Costado do Reator de UCCF [1] 12
Figura II.8 – Montagem experimental com Barra *Hopkinson* Modificada [13] 15
Figura II.9 – Comportamento da fratura obtida por impacto gerado através de Barra *Hopkinson* Modificada (a) amostra sem fibras (b) amostra com 1,0% de fibras em volume [13] 15
Figura II.10 – As três escalas do problema [22] 17
Figura II.11 – Detalhes da modelagem para micro e meso escalas [22] 17
Figura II.12 – Dispositivo experimental para avaliar ciclo térmico com transdutor de emissão acústica [22] 18
Figura II.13 – Teste de Arrancamento [22] 18
Figura II.14 – Análise do dano em um painel revestido com refratário com duas âncoras (um quarto do painel) [22] 19
Figura II.15 – Ensaio de Flexão de 4 pontos com painel de refratário (1,2 metro de comprimento [22] 19
Figura III.1 – Diagrama geral dos ensaios realizados para a caracterização de concretos refratários 25
Figura III.2 – Diagrama dos ensaios realizados para avaliar a interface 26
Figura III.3 – Curva Granulométrica do Concreto Refratário (Cekast-60) 28
Figura III.4 – Fibras de aço inox 28
Figura III.5 – Disco de aço 29
Figura III.6 – Grampo V tipo 1 utilizado nas amostras para avaliar a interface [33] 30
Figura III.7 – Misturador Planetário e Aspecto do Concreto Refratário em seu Interior 31
Figura III.8 – Câmara Úmida [11] 32
Figura III.9 – Forno Mufla Computadorizado 33

Figura III.10 – Temperatura x tempo para secagem de refratários 33
Figura III.11 – Temperatura x tempo para queima de refratários 34
Figura III.12 – Mesa de Consistência Padrão 35
Figura III.13 – Prensa *Shimadzu* EH-F EM300K1-070-0A 35
Figura III.14 - Forno utilizado para ensaios de compressão a quente 36
Figura III.15 - Forno utilizado para ensaios de flexão, tração e avaliação de interface a quente [27] 36
Figura III.16 – Ensaio de compressão a frio 37
Figura III.17 – Ensaio de compressão a quente 38
Figura III.18 – Ensaio de Flexão a frio 39
Figura III.19 – Ensaio de Flexão a quente 40
Figura III.20 – Garras utilizadas para ensaio de tração direta 41
Figura III.21 – Corpos de prova utilizados para ensaio de tração direta 42
Figura III.22 – Molde para ensaio de tração 43
Figura III.23 – Detalhe do interior do corpo de prova utilizado para tração 43
Figura III.24 – Montagem Experimental do Ensaio de Tração a Frio 44
Figura III.25 – Montagem experimental do ensaio de tração a quente 45
Figura III.26 – Corpos de prova para ensaios de alongamento durante o aquecimento 46
Figura III.27 – Equipamento para ensaio de alongamento durante o aquecimento 46
Figura III.28 – Interior do forno onde a amostra foi colocada para o ensaio de alongamento durante o aquecimento 47
Figura III.29 – Corpos de prova em água fervente 48
Figura III.30 – Aparato para pesagem submersa dos CP´s 49
Figura III.31 – Molde para ensaio de interface com diâmetro de 100 mm 50
Figura III.32 – Dimensões do Corpo de Prova de 100 mm de diâmetro e geometria do sistema disco - grampo 50
Figura III.33 – Molde para ensaio de interface com diâmetro de 150 mm 51
Figura III.34 – Corpos de Prova com diâmetros de 100 mm e 150 mm 52
Figura III.35 – Montagem final para avaliar a interface disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário a frio 52
Figura III.36 – Montagem final para avaliar a interface disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário a quente 53
Figura IV.1 – Espalhamento para mistura CR0 55
Figura IV.2 – Influência do reforço fibroso no comportamento σ x ε na compressão 57
Figura IV.3 – Resistência à compressão curvas típicas para CR0 e CR1.24 58
Figura IV.4 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR0 210 AMB. 59
Figura IV.5 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR0 210 210 .. 59

Figura IV.6 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 110 AMB 59
Figura IV.7 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 210 AMB 60
Figura IV.8 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 210 210 60
Figura IV.9 – Influência do reforço fibroso para a resistência à flexão 62
Figura IV.10 – Resistência à flexão curvas típicas para CR0 e CR1.24 63
Figura IV.11 – Índices de Tenacidade segundo a Norma Belga *NBN 15 238* 65
Figura IV.12 – Modo de ruptura após ensaios de flexão para os CP`s do CR0 66
Figura IV.13 – Modo de ruptura após ensaios de flexão para os CP`s do CR1.24 67
Figura IV.14 – Ampliação do modo de ruptura após ensaios de flexão para a amostra CP4 do concreto CR1.24 210 AMB 67
Figura IV.15 – Influência do reforço fibroso para a resistência à tração direta 69
Figura IV.16 – Curvas típicas para resistência à tração dos CR0 e CR1.24 71
Figura IV.17 – Modo de ruptura após ensaios de tração para os CP`s do CR0 72
Figura IV.18 – Modo de ruptura após ensaios de tração para os CP`s do CR 1.24 72
Figura IV.19 – Ampliação do modo de ruptura após ensaios de tração para a amostra CP3 do concreto CR1.24 210 AMB 73
Figura IV.20 – Curvas típicas para temperatura da amostra versus alongamento 74
Figura V.1 – Curvas carga x deslocamento para DCR0 110 AMB 77
Figura V.2 – Curvas carga x deslocamento para DCR1.24 110 AMB 78
Figura V.3 – Curvas carga x deslocamento para DCR0 210 210 79
Figura V.4 – Curvas carga x deslocamento para DCR1.24 210 210 80
Figura V.5 – Aspecto dos discos após ensaio para cada um dos casos estudados 82
Figura V.6 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB 83
Figura V.7 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB 84
Figura V.8 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB com falha na solda . 85
Figura V.9 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB com falha na solda . 85
Figura V.10 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB 86
Figura V.11 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB 86
Figura V.12 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB com falha na solda 87
Figura V.13 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB com falha na solda 88
Figura V.14 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210 88
Figura V.15 – Corpo de prova após ensaio para GCR0 210 210 89

Figura V.16 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda. 90
Figura V.17 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 210 210 com falha na solda . 91
Figura V.18 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado 91
Figura V.19 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 210 210 que falham na solda com esticamento prolongado..... 92
Figura V.20 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 210 210 92
Figura V.21 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB 93
Figura V.22 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 210 210 com falha na solda 94
Figura V.23 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 210 210 com falha na solda 94
Figura V.24 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB – diâmetro 150 mm com falha na solda 95
Figura V.25 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB – diâmetro de 150 mm com falha na solda 95
Figura V.26 – Curva carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm 96
Figura V.27 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm 97
Figura V.28 – Curva carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm com rompimento na solda 98
Figura V.29 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 com rompimento na solda 98
Figura V.30 – Curvas carga versus deslocamento para o mesmo corpo de prova medido com a mesa da prensa e transdutores elétricos (LVDT´s)..... 99
Figura V.31 – Resultados experimentais para GCR0 e GCR1.24 100
Figura V.32 – Comparativo de resultados para corpos de prova GR1.24 110 AMB com diâmetros de 100 mm e 150 mm 102
Figura VI.1 – Geometria do Modelo com Grampo de Ancoragem 104
Figura VI.2 – Elementos HX24L e Q24IF [34] 104
Figura VI.3 – Ação do Grampo de Aço sob o Revestimento de Concreto Refratário .. 105
Figura VI.4 – Ruptura dos Corpos de Prova para Avaliar a Interface 106
Figura VI.5 - Geometria com indicação dos elementos utilizados em cada seção..... 107
Figura VI.6 – Etapas para a construção dos modelos 109
Figura VI.7 – *Linear Stress Cut-Off [34]* 112
Figura VI.8 – *Linear Tension Softening [34]* 112

Figura VI.9 – Lei de Comportamento da Interface obtida através de Retro-Análise.... 114
Figura VI.10 – Indicação do elemento 1500 no corpo de prova modelado 117
Figura VI.11 – Curva tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 110 AMB 118
Figura VI.12 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 110 AMB 119
Figura VI.13 – Curva tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 110 AMB com falha na solda..... 120
Figura VI.14 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 110 AMB com falha na solda..... 121
Figura VI.15 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 110 AMB 122
Figura VI.16 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR1.24 110 AMB 123
Figura VI.17 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 110 AMB com falha na solda..... 124
Figura VI.18 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR1.24 110 AMB com falha na solda..... 125
Figura VI.19 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210..... 126
Figura VI.20 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 210 210..... 127
Figura VI.21 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210 com falha na solda 128
Figura VI.22 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR0 210 210 com falha na solda..... 129
Figura VI.23 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado 130
Figura VI.24 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado..... 131
Figura VI.25 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 210 210 132
Figura VI.26 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR1.24 210 210 133
Figura VI.27 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 210 210 com falha na solda..... 134

Figura VI.28 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR1.24 210 210 com falha na solda..... 135
Figura VI.29 – Comparativo de curvas tensão versus deslocamento para GCR0 136
Figura VI.30 – Comparativo de curvas tensão versus deslocamento para GCR1.24.. 137

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Propriedades Químicas do Refratário Cekast 60 27
Tabela III.2 – Características físicas e mecânicas do concreto refratário Cekast 60 27
Tabela III.3 – Propriedades Químicas das Fibras Utilizadas 29
Tabela III.4 – Propriedades do Aço *ASTM A516* Grau 70 29
Tabela III.5 – Propriedades do Aço Inoxidável *ASTM* A479 tipo 304..... 31
Tabela IV.1 – Índice de Espalhamento..... 55
Tabela IV.2 – Resistência à compressão, ε_{pico}, E e tenacidade (média ± cv)..... 56
Tabela IV.3 – Resultados de flexão (média ± cv) 61
Tabela IV.4 – Índices de Tenacidade pela Norma Belga *NBN 15 238* (média ±cv) 64
Tabela IV.5 – Valores de resistência à tração, ε_{pico}, E e tenacidade (média ± cv)..... 68
Tabela IV.6 – Módulos de elasticidade para tração e compressão (média ± cv) 71
Tabela IV.7 – Valores de Δ de Temperatura da Amostra, Alongamento Máximo e α (média ± cv) 74
Tabela IV.8 – Resultados de porosidade, absorção de água e massa específica (média ± cv) 75
Tabela V.1 – Resultados para ensaios com corpos de prova para avaliar a interface aço e concreto refratário sem ancoragem (média e cv)..... 81
Tabela V.2 – Resultados para carga de decoesão e carga máxima para amostras utilizadas para avaliar a interface com grampo de ancoragem (média e cv)..... 100
Tabela VI.1 – Propriedades do Aço..... 110
Tabela VI.2 – Propriedades Estáticas Linear-Elásticas do Concreto Refratário..... 111
Tabela VI.3 – Propriedades Estáticas Não-Lineares do Concreto Refratário..... 113
Tabela VI.4 – Propriedades Estáticas Linear-Elásticas da Interface..... 114
Tabela VI.5 – Propriedades Estáticas Não-Lineares da Interface..... 116
Tabela VI.6 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 110 AMB 118
Tabela VI.7 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 110 AMB com falha na solda 120
Tabela VI.8 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 110 AMB 122
Tabela VI.9 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento..... 124
Tabela VI.10 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210 126
Tabela VI.11 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda 128

Tabela VI.12 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado 130
Tabela VI.13 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 210 210 132
Tabela VI.14 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 210 210 com falha na solda 134
Tabela VI.15 – Tamanho e Quantidade de Passos de Carga Utilizados 136

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – absorção de água

Al_2O_3 – óxido de alumínio

AMB - ambiente

ASTM - American Society for Testing and Materials

C – carbono

C_s – Coesão

Ca – cálcio

CaO – óxido de cálcio

CEKAST-60 – Concreto refratário aluminoso, classe 60% de Al_2O_3

CP – corpo de prova

Cr- cromo

CR – concreto refratário

CR0 – concreto refratário denso sem fibra

CR1,24 - concreto refratário denso com 1,24% de fibra de aço

CV – coeficiente de variação

D – disco de aço

E – módulo de elasticidade

EP – Esticamento prolongado

FCC - Fluidized Catalystic Cracking

f_c – resistência a compressão

Fe_2O_3 – óxido de ferro

FRP – Fiber Reinforced Plastics

FS – Falha na solda

f_t – resistência à tração

G – grampo de ancoragem

G_c – módulo de cisalhamento

G_f – energia de fratura

L – comprimento

L_0 – comprimento inicial da amostra

LVDT – transdutores elétricos

M_e – massa específica

Mn – magnésio

NBN B – norma belga

NBR – norma brasileira registrada

Ni – níquel

P – fósforo

P_r – porosidade

P_S – peso submerso

REVAP – Refinaria do Vale do Paraíba

RN – Rigidez Linear Normal

RT – Rigidez Linear Tangencial

S – enxofre

sc1– tensão de compressão correspondente à deformação axial εa1

sc2 – tensão de compressão correspondente a 40% da carga última

SIFCA – Slurry Infiltraded Fiber- Reiforced Castable

UCCF – Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido

UFCC – Unit of Fluidized Catalystic Cracking

α – coeficiente de dilatação térmica média

Δ – deslocamento

ΔL – variação do comprimento da amostra que foi o dado lido no experimento

ΔT – variação da temperatura da amostra

ε_{pico} – deformação de pico

ε – deformação de pico

εa1 – deformação axial de 0,000050

εa2 – deformação axial relativa à tensão sc2

σ – tensão

$\sigma_{lateral}$ – tensão lateral

Φ – ângulo de fricção

υ – coeficiente de Poisson

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÃO

Diversos equipamentos industriais utilizam concreto refratário como revestimento interno. Pode-se observar a aplicação de refratários em altos fornos nas siderúrgicas, em fornos elétricos nas metalúrgicas, em fornos rotativos na fabricação de cimento, em unidades de craqueamento fluido catalítico (UCCF), em refinarias de petróleo (apresentado na figura I.1) [1] e em outros tipos de equipamentos e indústrias.



Figura I.1 – Unidade de UCCF [1]

O concreto refratário, de forma geral, é um material utilizado para revestimento de vasos de equipamentos industriais que são empregados em processos realizados em altas temperaturas. A principal função do concreto refratário é reduzir, ao longo de sua espessura, elevadas temperaturas que no interior dos vasos podem ultrapassar a barreira dos 1000 °C [2].

Estes equipamentos possuem um enorme peso e altura, cuja estrutura é composta pelo aço que funciona como um esqueleto estrutural e pelo concreto refratário, que entra sem função explicitamente estrutural, e é responsável por reduzir a temperatura aos 200 °C suportados pelo aço carbono. O concreto refratário é aplicado em toda a superfície interna do equipamento e se adere ao costado de aço. Ancoragens de aço inox são utilizadas para garantir que a camada de concreto refratário fique aderida ao costado metálico. Existem ancoragens dos mais diversos tipos e a escolha dos modelos e dimensões mais adequados a uma determinada aplicação depende de fatores como a espessura da camada de refratário a ser aplicada ou o tipo de refratário a ser utilizado, dentre outros. A figura I.2 apresenta uma seção de regenerador de uma unidade de craqueamento catalítico fluido (UCCF), onde se pode observar o revestimento refratário, bem como os grampos de ancoragem.

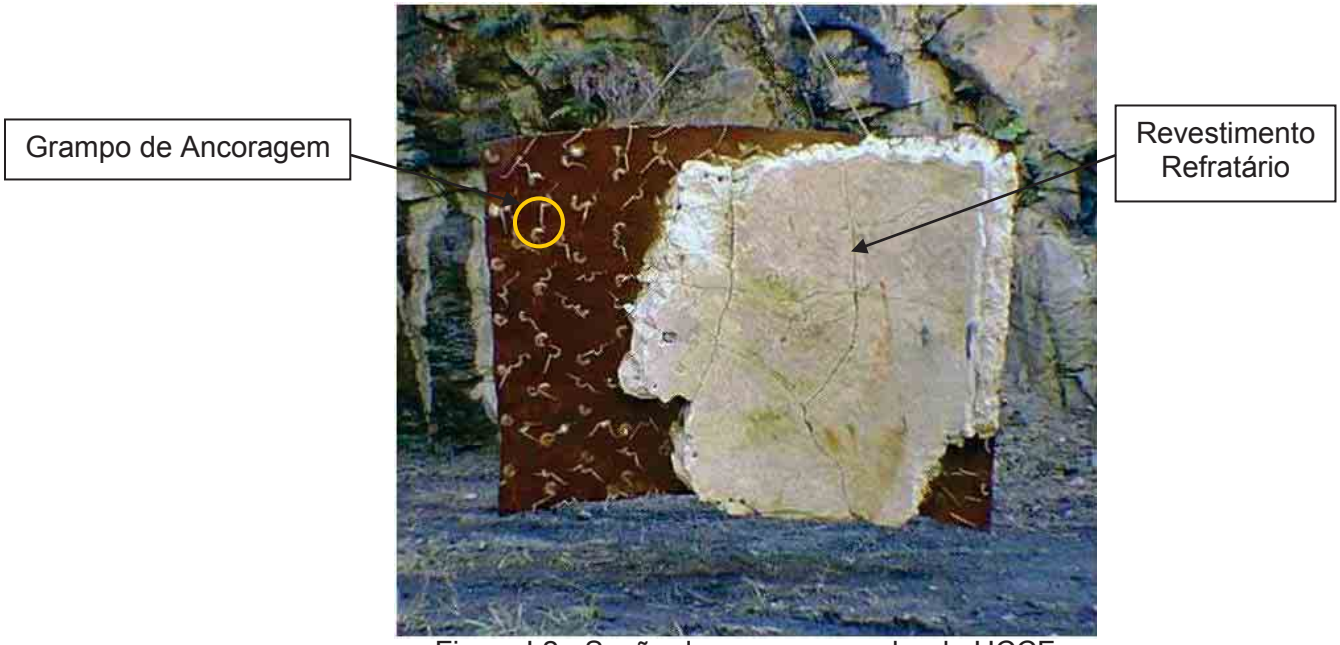


Figura I.2 - Seção de um regenerador de UCCF

Observando a figura I.3, verifica-se a interface do costado de aço com concreto refratário em um *riser* de UCCF e o posicionamento da ancoragem, feita por meio de grampos V. Deve-se salientar que, em geral, os *risers* trabalham na vertical, o que faz com que a ancoragem tenha um papel fundamental na sustentação do revestimento refratário.

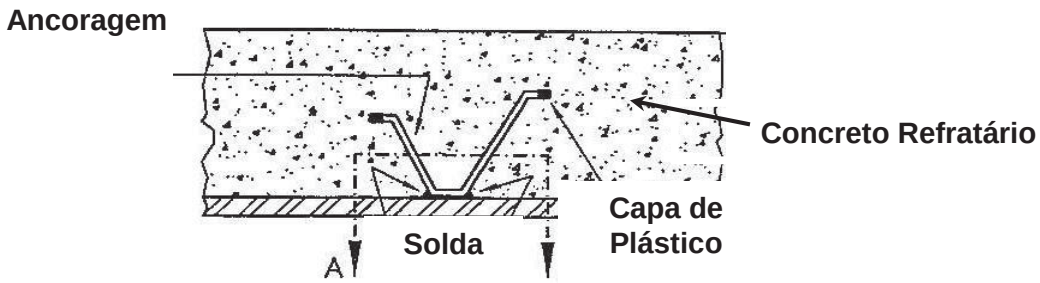


Figura I.3 – Ilustrativo da Interface Costado de Aço – Concreto Refratário em um *Riser*

A figura I.4 apresenta o mecanismo de formação de fissuras no concreto refratário no interior de uma UCCF, que se origina devido a tensões térmicas. Verifica-se que a superfície interna encontra-se à temperatura de aproximadamente 665° C enquanto a interface do costado metálico com o concreto refratário está a uma temperatura de 200° C a 210° C. Desta forma, o concreto refratário está submetido em suas extremidades a diferentes temperaturas, cuja média é de 430°C.

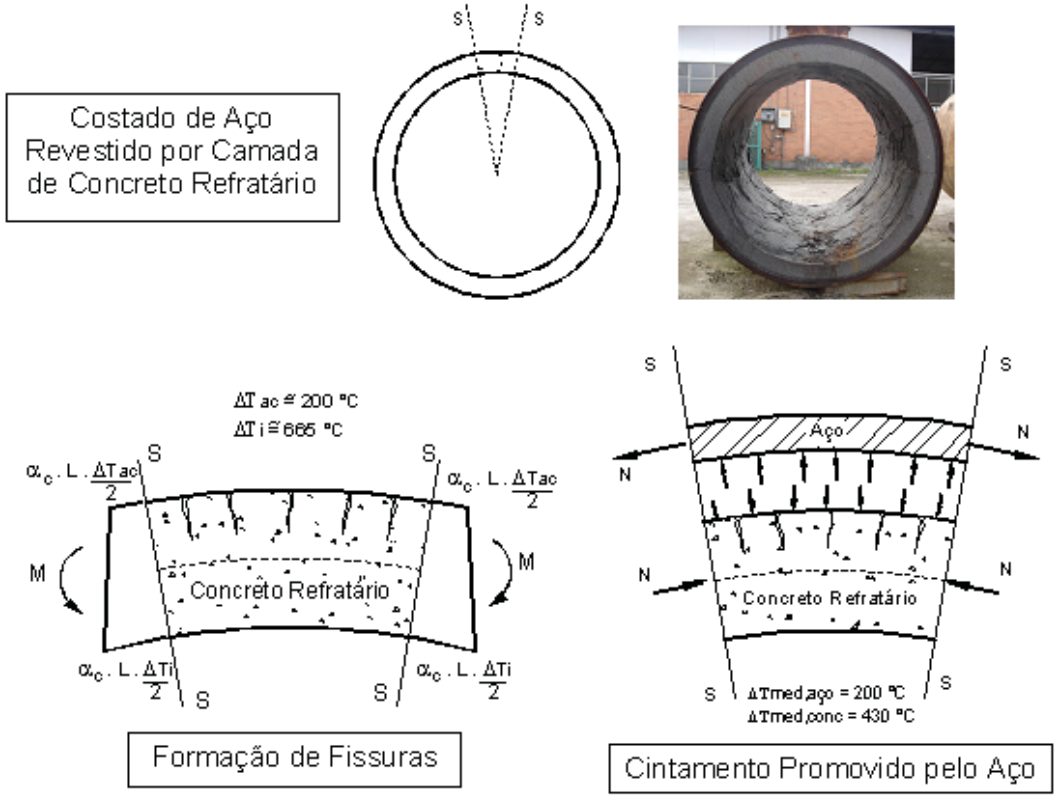


Figura I.4 – Mecanismo de Formação de Fissuras [25]

Neste cenário é que surge o interesse pelo estudo da interface costado metálico – concreto refratário, objeto deste trabalho. Conhecer o comportamento dessa interface é fundamental para o entendimento do que acontece nessa região de contato entre materiais. O conhecimento deste mecanismo irá, então, possibilitar uma melhoria na

modelagem, construção e otimização de equipamentos industriais, utilizadores do concreto refratário como revestimento.

Nesta tese, foram obtidos dados experimentais sobre o comportamento da interface costado metálico – concreto refratário com reforço de fibras de aço sob temperatura ambiente e também sob 210°C, que é a temperatura da interface encontrada em uma UCCF [25].

Para tal, foi desenvolvida uma montagem experimental que permite o estudo da interface a quente e a obtenção de parâmetros para o estabelecimento de modelos. Esta montagem emprega um teste de tração, mesmo sabendo que o descolamento do revestimento refratário, em relação ao costado metálico, provavelmente ocorre devido à tração e ao cisalhamento, pois os grampos de ancoragem são utilizados para evitar apenas os efeitos da tração.

Foram também desenvolvidos modelos numéricos macroscópicos, cujos parâmetros são obtidos através de retro-análise, utilizando-se os dados obtidos nos ensaios. Tais modelos foram testados com o uso do programa comercial *DIANA*. Para alimentar os modelos numéricos gerados para avaliar a interface entre o costado metálico e o concreto refratário, foi necessário, além dos dados experimentais obtidos com os ensaios para avaliar a interface costado metálico-concreto refratário, realizar a caracterização de concretos refratários a frio e a quente, sendo para tanto escolhida a temperatura de 210°C para os ensaios a quente, por representar a temperatura ao qual está submetida a interface.

As principais características de que o modelo necessita, conforme solicita o programa *DIANA* versão 9.2 utilizado para simular a ação da interface aço-concreto refratário, são: rigidez linear normal e rigidez linear tangencial, ambas utilizadas para prever o comportamento linear elástico da interface. Já para uma análise não-linear, as características necessárias dependem do modelo escolhido: de forma geral, serão necessários a resistência à tração da interface e dados da tensão versus deslocamento para o comportamento pós-fissuração da interface. Já do aço e do concreto, serão utilizados os valores de densidade, módulos de elasticidade e coeficientes de *Poisson*. Para a análise linear elástica e para a análise não-linear, serão utilizados modelos numéricos comumente empregados para o concreto que necessitam da resistência à compressão e tração de concretos refratários, dentre outros dados que serão informados no Capítulo VI desta tese, em que se descreve a análise numérica.

Para o aço, serão empregados dados provenientes da literatura e de fornecedores. Os dados de densidade, módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração, referentes ao concreto refratário, necessários para

alimentar os modelos numéricos, serão obtidos por meio de ensaios experimentais e os demais dados que se fizerem necessários, serão extraídos da literatura.

Já os dados necessários para a caracterização da interface serão obtidos por retro-análise dos resultados experimentais dos ensaios que serão realizados para avaliar a interface entre o costado metálico e o concreto refratário.

I.2 OBJETIVOS

Esse trabalho possui como principais objetivos:

- Obter resultados de ensaios mecânicos de resistência à compressão, flexão e tração direta realizados a frio (temperatura ambiente) e a quente (210°C) em concretos refratários com e sem fibras de aço, bem como resultados de ensaios para avaliar o alongamento durante o aquecimento em diferentes temperaturas e ensaios físicos para avaliar a porosidade, absorção de água e massa específica com a finalidade de alimentar modelos numéricos;
- Desenvolver montagem experimental inédita para avaliar a interface entre discos de aço com e sem ancoragem e concreto refratário com e sem fibras por meio de ensaios realizados à temperatura ambiente e também a 210°C, bem como realizar a análise de seus resultados;
- Apresentar modelos numéricos gerados com a finalidade de simular a interface aço – concreto refratário e seus principais resultados;
- Realizar comparação entre resultados experimentais e numéricos obtidos, a fim de avaliar a eficácia dos modelos desenvolvidos;

I.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho é composto por 7 (sete) capítulos, a saber:

Capítulo I – Introdução

O capítulo inicial tem como finalidades: esclarecer a motivação, os objetivos e como está organizado este trabalho de pesquisa.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo o objetivo será apresentar uma revisão bibliográfica sobre o que se conhece a respeito deste tema, mostrando qual sua importância e em que contexto se insere. Estudos recentes servirão de suporte para o entendimento dessa área de estudo e também para identificar a lacuna que se pretende preencher com este trabalho.

Capítulo III – Materiais e Métodos

Este capítulo tem como finalidade apresentar os materiais que foram utilizados no estudo experimental bem como detalhar toda a metodologia necessária para executar os experimentos.

Capítulo IV – Caracterização Experimental de Concretos Refratários

O capítulo IV irá apresentar os resultados dos ensaios mecânicos de compressão, flexão e tração direta realizados em concretos refratários com e sem fibras a frio e a quente bem como de ensaios de alongamento durante o aquecimento e de ensaios físicos para avaliar a porosidade, absorção de água e massa específica.

Capítulo V – Avaliação Experimental da Interface

Este capítulo tem como principal finalidade apresentar os resultados dos ensaios experimentais realizados para avaliar a interface aço – concreto refratário sob duas situações definidas: interface disco de aço sem ancoragem com concreto refratário e disco de aço com grampo de ancoragem soldado em sua base e concreto refratário. Serão apresentados resultados para estas duas situações realizados a frio e a quente.

Capítulo VI – Modelagem Numérica da Interface Costado Metálico - Refratário

Neste capítulo são gerados modelos numéricos com a finalidade de avaliar a interface costado metálico – concreto refratário. Para tanto, é utilizado o programa *DIANA* versão 9.2. Os modelos são alimentados com dados experimentais obtidos neste estudo, dados da literatura e de fabricantes. Na apresentação dos resultados numéricos é feito um comparativo com os resultados experimentais a fim de mostrar que as hipóteses empregadas na modelagem foram adequadas produzindo resultados coerentes com os experimentais.

Capítulo VII – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O capítulo final tem como objetivos apresentar as conclusões obtidas com este trabalho de tese, mostrando suas principais contribuições, bem como apresentar sugestões para trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos a partir deste.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada inicialmente uma breve revisão bibliográfica sobre o emprego dos refratários, explicando as diferenças entre tijolos e concreto refratário, bem como entre concreto comum e concreto refratário, e o uso de concretos refratários fibrosos. Por fim, serão mostrados trabalhos experimentais e numéricos que envolvem revestimentos refratários e sua ancoragem.

II.2 EMPREGO DOS REFRATÁRIOS

O emprego de refratários em equipamentos de processo durante o século XX foi, em geral, através do uso de tijolos refratários. Hodiernamente, cada vez mais ocorre o emprego do refratário sob a forma de concreto, tendo em vista diversas vantagens, cuja principal é a não formação de juntas por onde pode se iniciar um processo de corrosão [10].

Os refratários são amplamente utilizados nas indústrias para revestimento interno de equipamentos que estejam envolvidos em processos de produção a altas temperaturas. Pode-se encontrar exemplos típicos desse emprego em fornos rotativos nas fábricas de cimento (vide figura II.1), altos-fornos em siderúrgicas, soleiras de fornos elétricos (vide figura II.2) em indústrias metalúrgicas e em unidades de craqueamento catalítico fluido (UCCF) e em refinarias de petróleo, apenas para citar algumas aplicações.



Figura II.1 – Forno Rotativo [3]

Em todos estes equipamentos, os tijolos ou concreto refratário, empregados como revestimento interno, têm como finalidade reduzir a temperatura no costado do equipamento a um nível aceitável para que possa ser utilizado aço carbono (≅ 200 °C).



Figura II.2 – Forno Elétrico [4]

Devido à grande diversidade de aplicações, existem diferentes tipos de tijolos e de concretos refratários disponíveis no mercado. Os tijolos refratários (vide figura II.3) necessitam muitas vezes de serem fabricados em diferentes formas [4], pois precisam ser encaixados uns aos outros, a fim de constituir o revestimento interno dos vasos que se deseja proteger de altas temperaturas. Em geral, não existe adesão entre estes tijolos e o costado metálico.



Figura II.3 – Tijolos Refratários em diferentes formas [5]

A indústria que apresenta o maior consumo de refratários é a siderúrgica. Os diversos equipamentos, dentre eles os alto-fornos, empregados no processo de fabricação do aço fazem uso de diversos tipos de refratários que podem variar na

forma, devido à necessidade de revestir inteiramente o interior dos fornos, bem como no tipo do refratário empregado, que depende dentre outras características da temperatura ao qual o material a ser processado será submetido.

Os tijolos refratários apresentam como principais vantagens: possibilidade de estocagem por longos períodos e não necessitarem de preparo na hora da aplicação, uma vez que já estão prontos. Por outro lado, suas desvantagens principais são: a formação de juntas, a grande quantidade de tempo para a sua colocação e as diferentes formas e tamanhos para que possam se encaixar perfeitamente no costado dos equipamentos.

Os concretos refratários são produtos de fácil preparo e têm sido cada vez mais empregados devido ao reduzido tempo para sua aplicação (vide figura II.4) e diversidade de formas que podem ser obtidas. A principal desvantagem dos concretos refratários é o tempo de armazenamento limitado, devido à validade do material.



Figura II.4 – Aplicação de Concreto Refratário por Projeção Pneumática [9]

A indústria no século XXI está rumando para a troca dos tijolos refratários nos antigos equipamentos por concreto refratário, devido às vantagens já mencionadas [10]. Os novos equipamentos também estão sendo projetados, já considerando o emprego destes materiais mais modernos.

Os concretos refratários, em geral, precisam de ancoragens para obter uma adequada adesão aos costados dos equipamentos. Esta adesão é fundamental para o bom desempenho do concreto refratário e pode ser obtida de diferentes formas. A figura II.5 apresenta um tipo de ancoragem para refratários, muito utilizada em unidades de UCCF, conhecida como malha hexagonal ou *hexsteel.*



Figura II.5 – Malha Hexagonal [6]

Outra forma muito utilizada para se obter ancoragem, é através de grampos, como pode ser observado na figura II.6.

	
Grampo V tipo I	Grampo Y
	
Grampo U	Grampo Tridente

Figura II.6 – Tipos de ancoragem de refratários [6]

Em geral, os revestimentos refratários precisam ser substituídos em paradas de manutenção programadas, devido ao desgaste que ocorre ao longo de seu uso ou mesmo em manutenções de emergência, que podem ocorrer devido ao seu

desprendimento por falhas na ancoragem, desgaste prematuro dos refratários, entre outros possíveis problemas possíveis de ocorrer durante a operação do equipamento.

Nas unidades de craqueamento catalítico fluido existentes em refinarias de petróleo, monitoram-se, de forma constante, possíveis desprendimentos de revestimentos refratários, através de uma tinta termo-sensível de cor verde que reveste o costado destes vasos. Por meio da figura II.7, que é uma ampliação da figura I.1, é possível ver que existem áreas esbranquiçadas sobre a superfície do costado do vaso separador da UCCF. Esta alteração de cor significa que nestas regiões o revestimento refratário não está sendo eficiente tendo a temperatura no costado se elevado acima da temperatura limite de operação.

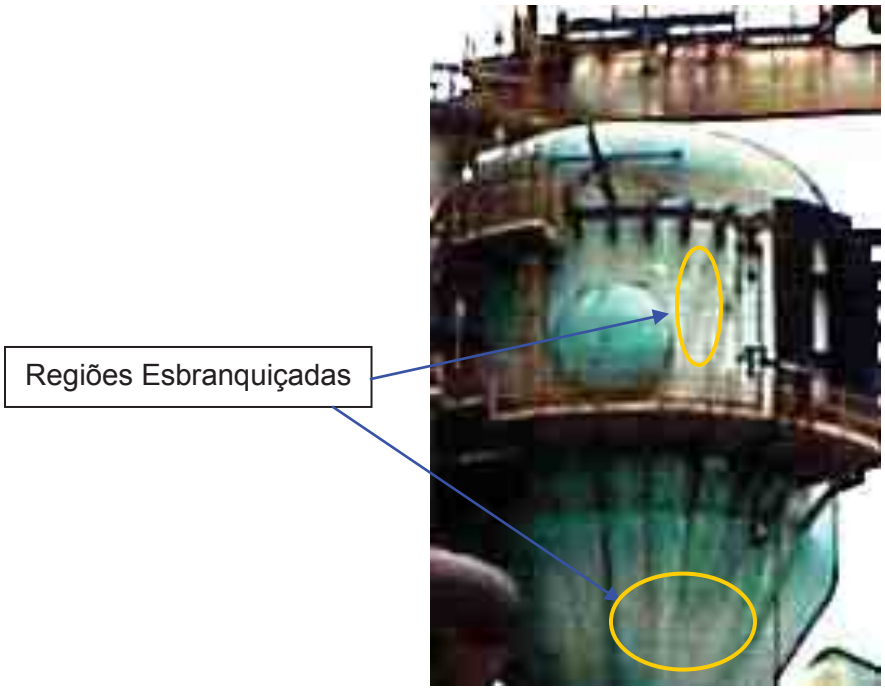


Figura II.7 – Alteração de Cor do Costado do Reator de UCCF [1]

II.3 CONCRETO COMUM E CONCRETO REFRATÁRIO

Uma primeira questão que se pretende esclarecer é sobre a diferença entre um concreto comum produzido a partir de um cimento *Portland* comum e um concreto refratário que é preparado, em geral, a partir do cimento cálcio aluminoso. Os concretos refratários devem suportar elevadas temperaturas, como as empregadas em uma UCCF em torno de 600°C, e ataques de substâncias químicas, como coque, que pode ser formado no interior de uma UCCF, que não são a condição normal de trabalho de um concreto comum produzido com cimento *Portland*.

Como conseqüência da diferente composição dos concretos refratários em relação ao concreto produzido com cimento *Portland,* altera-se o tempo de cura. Em geral, os concretos refratários curam em um tempo bastante curto, podendo em vinte e quatro horas ser atingida cerca de 80% da sua resistência final, enquanto que o concreto comum leva 28 dias para obter cura equivalente [7]. Esta diferença no tempo de cura se torna bastante importante na redução do tempo de uma parada de manutenção.

Para sua produção, de forma geral, utiliza-se o cimento cálcio aluminoso. No entanto, existem alguns tipos de cimento *Portland* [7] que podem ser utilizados para a produção de concretos refratários, como o cimento *Portland* adicionado de escória granulada de alto forno ou o cimento *Portland* adicionado de pozzolanas. O cimento cálcio aluminoso é normalmente classificado em três categorias: baixa pureza, intermediária pureza e alta pureza.

Como qualquer outro tipo de concreto, sua composição, em geral, é de um meio aglomerante (cimento + água) e agregados. Os agregados para a produção de concreto refratário mais utilizados [7] são: chamotas (subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico), agregados com alto teor de alumina (possuem mais de 45% de Al_2O_3), magnésia e dolomita sinterizadas, cromita, carbeto de silício e fosterita. No trabalho de Almeida [11], encontra-se uma descrição mais detalhada destes agregados, cujas especificações podem ser encontradas no documento da *ACI* [2].

Estes materiais, quando misturados ao cimento cálcio aluminoso mais água, formam uma massa de concreto adequada para uma determinada aplicação e pronta para uso. A seleção apropriada do tipo e granulometria dos agregados é essencial para obtenção das propriedades refratárias desejadas em uma aplicação específica que podem ser obtidas na referência [2].

O processo de seleção de um concreto refratário para uma aplicação específica depende dos requisitos operacionais do equipamento onde se deseja utilizá-lo. Devem ser levadas em consideração diversas variáveis. Dentre elas, destacam-se: a temperatura de trabalho, o ataque de substâncias químicas, a durabilidade desejada e o método de aplicação. Existem concretos leves ou densos, isolantes ou antierosivos, apenas para citar alguns dos tipos mais conhecidos e utilizados.

II.4 CONCRETOS REFRATÁRIOS FIBROSOS

Concretos fibrosos produzidos a partir de cimento *Portland* vêm sendo bastante pesquisados nos últimos anos porque tornam menos frágil o comportamento dos concretos conferindo ductilidade através da introdução de fibras. As fibras são

responsáveis também por maior durabilidade, resistência à tração na flexão e cargas de impacto. Diversos tipos de reforços podem ser utilizados como fibras de aço, fibras de vidro, fibras de carbono e fibras naturais.

Poucas referências são encontradas na bibliografia sobre a utilização de concretos fibrosos para refratários. Em Almeida [11], podem ser encontrados resultados de ensaios mecânicos para avaliar a resistência à compressão e a resistência à flexão, que foram realizados a frio e a quente, bem como ensaios físicos para avaliar: massa específica, porosidade aparente, resistência à erosão e choque térmico. Os resultados obtidos indicaram que em todas as situações de ensaio a adição de fibras de aço proporcionou benefícios à resistência à compressão, à resistência à flexão e à tenacidade dos concretos. Verificou-se, ainda, que a exposição à temperatura de 600ºC reduziu a resistência dos concretos refratários, possivelmente devido à degradação da matriz nesta temperatura.

A referência [12] é um trabalho contendo ensaios realizados com o intuito de estudar a resistência à compressão e a resistência à flexão de concreto refratário auto-adensável fibroso com adição de 0,7% e 1,0% de fibras em volume. Os corpos de prova foram submetidos a temperaturas de queima de 110°C e 650°C e ensaiados à temperatura ambiente. Os resultados dos ensaios mecânicos mostram que o concreto refratário, quando submetido à temperatura de queima de 110°C, possui resistência última com um comportamento mais dúctil do que quando submetido à temperatura de 650°C. Além disso, observa-se que a adição de reforço fibroso proporcionou um incremento da tenacidade.

Já o trabalho da referência [13] busca avaliar a resistência de um concreto refratário auto-adensável com e sem fibras, queimado em duas temperaturas distintas 110°C e 650°C, e ensaiado à temperatura ambiente sob a ação de cargas de impacto. Para tanto, foi utilizado um dispositivo conhecido como barra *Hopkinson* modificada (vide figura II.8) que possibilitou a aquisição de dados referentes à resistência a cargas de impacto das amostras de concreto refratário testadas. A fim de possibilitar uma comparação do mesmo material, quando submetido à ação de cargas estáticas, foram também realizados ensaios de compressão com e sem fibras. Foram utilizados reforços com fibras de aço inoxidável, que foram adicionados ao concreto refratário em volumes de 0,7% e 1,0%.

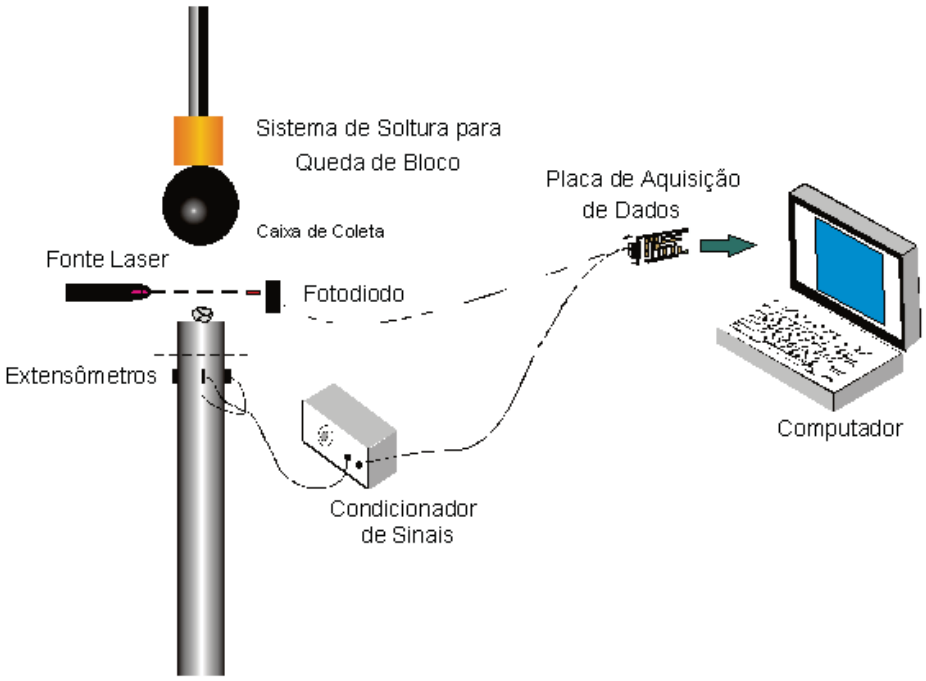


Figura II.8 – Montagem experimental com Barra *Hopkinson* Modificada [13]

Os resultados obtidos mostraram que o reforço de fibras de aço inox aumentou tanto a resistência última, como os valores de tenacidade para corpos de prova ensaiados à compressão estática e também sob à ação de carga de impacto (vide figura II.9). As amostras de concreto refratário, queimadas a 650°C, apresentaram resultados com valores menores de resistência última, tanto para ensaios de compressão estática, quanto para os ensaios dinâmicos, quando comparados aos ensaios realizados com as amostras queimadas à temperatura de 110°C.



(a) (b)

Figura II.9 – Comportamento da fratura obtida por impacto gerado através de Barra *Hopkinson* Modificada (a) amostra sem fibras (b) amostra com 1,0% de fibras em volume [13]

Um tipo especial de concreto refratário reforçado com alto teor de fibras que varia de 4 a 18%, em volume conhecido como *Slurry Infiltraded Fiber – Reiforced Castable (SIFCA)* [38], também merece ser mencionado, pois em concretos fibrosos convencionais a fração volumétrica é geralmente limitada em cerca de 2%.

O *SIFCA* é uma classe de compósitos produzidos com matriz cerâmica e fibras de aço. A matriz cerâmica é produzida com cimento cálcio aluminoso e os agregados podem ser óxido de alumínio, mulita, zircônio ou argila calcinada. O tamanho máximo de partícula dos agregados não alcança 2,5mm. A água é adicionada na mistura seca apenas para que ela adquira alguma consistência. As fibras utilizadas dependem da aplicação pretendida, sendo as mais empregadas as de aço inox *ASTM* A304.

O *SIFCA* normalmente é utilizado como um pré-moldado. Sua produção é realizada com uma técnica que é o inverso da tradicionalmente utilizada para os concretos fibrosos convencionais. As fibras são colocadas em uma forma e logo em seguida derrama-se a matriz, em forma de lama cimentícea dentro da forma, ou seja, a matriz é adicionada às fibras.

Devido ao grande conteúdo de fibras, o SIFCA possui propriedades únicas de resistência e tenacidade. Suas aplicações são diversas como, exemplificadamente, na produção de componentes estruturais para vários tipos de fornos industriais.

Deve-se ressaltar que barras de reforço em aço não são utilizadas em concretos refratários, tendo como razão principal a diferença dos coeficientes de dilatação térmica entre o aço e o concreto refratário [2,7], que são bastante distintos para a faixa de temperatura em que os refratários são comumente empregados.

Estudos sobre os concretos refratários fibrosos utilizados em unidades de UCCF, desenvolvidos por meio de projetos para a indústria do petróleo [39], têm apresentado resultados bastante positivos no que diz respeito ao incremento de resistência, aumento da durabilidade devido à redução na erosão, dentre outras vantagens. O aumento da vida útil dos concretos refratários é um fator muito importante para reduzir a necessidade da sua substituição frequente como é feita hoje, em paradas de manutenção que acontecem de quatro em quatro anos, aproximadamente, e também evitar a necessidade de paradas de emergência que são na verdade mais onerosas. Outras variáveis em estudo são o efeito que o coque possui quando penetra nos poros do concreto refratário e como a ancoragem perde eficiência possibilitando o desprendimento de partes do revestimento refratário.

II.5 MODELAGEM NUMÉRICA PARA REVESTIMENTOS REFRATÁRIOS

Recentemente, têm sido desenvolvidos trabalhos com o intuito de melhorar o desempenho dos revestimentos refratários em equipamentos industriais [19,20,21]. Para avaliar o comportamento destes revestimentos e sua eficiência em uma aplicação, tem-se optado por implementar modelos numéricos como ferramenta que permita

realizar simulações das situações em que os mesmos estarão submetidos [22,23,24]. Deve-se salientar que a pequena quantidade de trabalhos encontrados na literatura pode ter como explicação as patentes depositadas neste tema por pesquisadores e pelas indústrias que utilizam revestimentos refratários em seus processos.

O trabalho de Gasser *et al* [22] teve como principal finalidade estudar a predição de danos, gerados por tensões induzidas por gradientes térmicos, em revestimentos refratários aplicados em caldeiras alimentadas por carvão em termoelétricas. Para a análise, foram definidas três escalas para o problema, a saber: escala das âncoras, tubos e juntas (micro-escala), escala do painel com o conjunto de componentes (meso-escala) e escala da estrutura (macro-escala), conforme figuras II.10 e II.11.

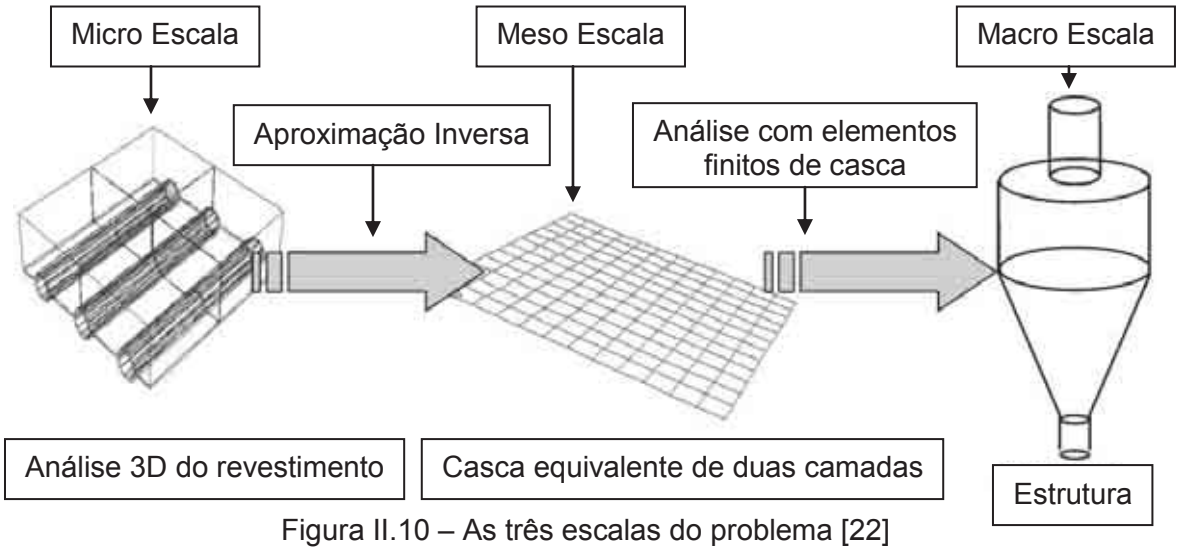


Figura II.10 – As três escalas do problema [22]

Modelos numéricos discretos foram gerados para a micro-escala, com elementos tridimensionais, e para a meso-escala, com elementos de casca, conforme mostram as figuras II.10 e II.11, cuja finalidade foi avaliar a fissuração do concreto refratário.

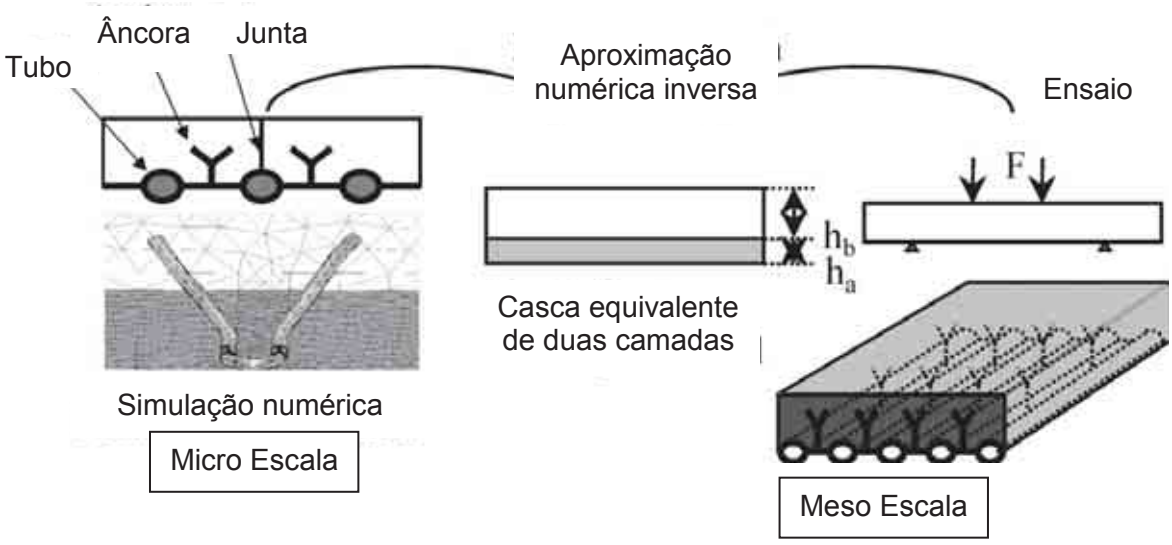


Figura II.11 – Detalhes da modelagem para micro e meso escalas [22]

Para validar o modelo proposto, foram realizados ensaios com painéis de refratário contendo uma ou duas âncoras [22] utilizando um forno especialmente construído para reproduzir as condições termomecânicas que podem ser encontradas nas paredes das caldeiras de termoelétricas, cuja face interna está a 900° C e a face externa a 350° C, com ciclo térmico mostrado na figura II.12. O medidor de emissão acústica empregado permite acompanhar o aparecimento e a abertura de fissuras em torno da âncora para obter a temperatura de primeira fissura e observar que o primeiro ciclo é o mais danoso para o revestimento refratário.

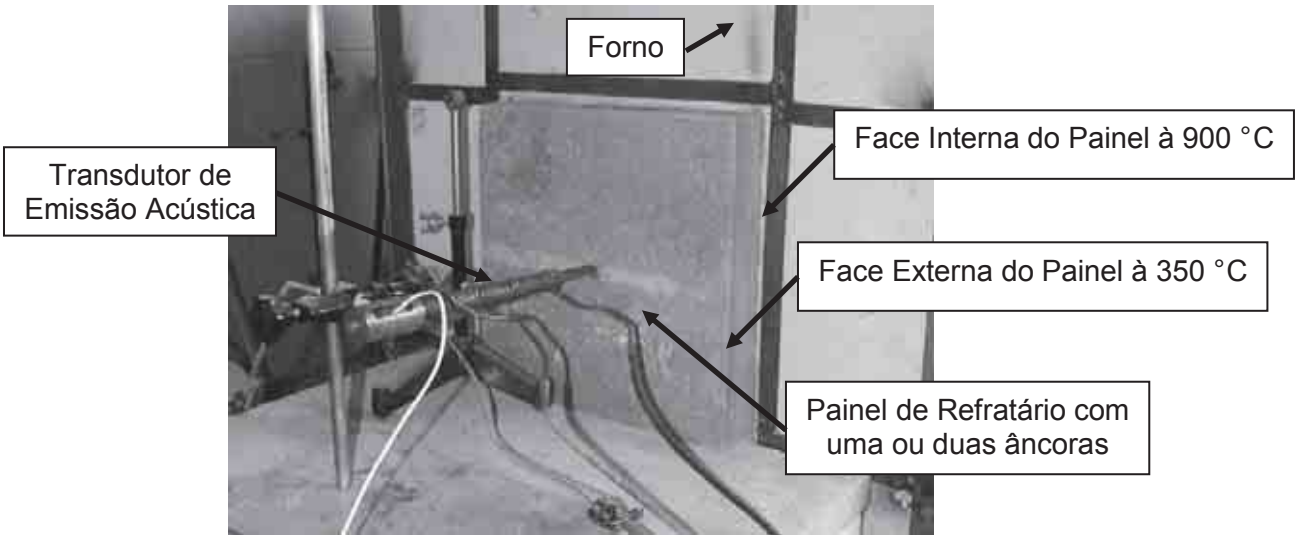


Figura II.12 – Dispositivo experimental para avaliar ciclo térmico com transdutor de emissão acústica [22]

Contudo, o ensaio realizado não permitiu quantificar o valor do dano. Desta forma, foram realizados ensaios de arrancamento, conforme figura II.13, com esta finalidade. Estes testes foram realizados em temperatura ambiente e possibilitaram obter a perda de rigidez (que reflete o nível de dano) de um painel já submetido a um carregamento térmico.



Figura II.13 – Teste de Arrancamento [22]

A figura II.14 mostra a análise do dano produzido em um painel revestido com refratário e com duas âncoras.

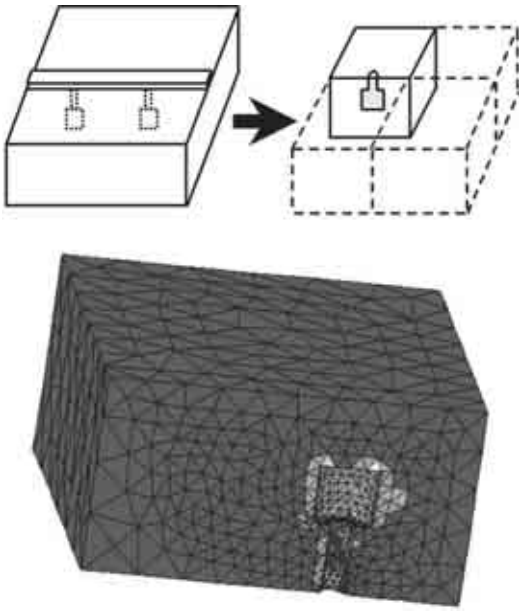


Figura II.14 – Análise do dano em um painel revestido com refratário com duas âncoras (um quarto do painel) [22]

Para calibrar os modelos numéricos propostos, foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos em temperatura ambiente com um painel de refratário contendo doze tubos com âncoras, conforme montagem experimental mostrada na figura II.15, a fim de reproduzir as condições mecânicas a que o revestimento refratário estava submetido, cujos dados foram utilizados para realizar aproximação inversa, além de outros ensaios para caracterizar os tubos metálicos que compõem as paredes onde o refratário foi aplicado.



Figura II.15 – Ensaio de Flexão de 4 pontos com painel de refratário (1,2 metro de comprimento [22]

Na referência [22], o estudo realizado gerou resultados que apontam elevadas tensões no revestimento refratário, provavelmente, devido ao gradiente de temperatura a que o mesmo foi exposto bem como pela diferença dos coeficientes de expansão térmica entre os tubos de aço, as ancoragens e o concreto refratário do qual é feito o revestimento.

Já nos trabalhos das referências [23,24], os autores reconhecem que os modelos implementados ainda precisam ser melhorados, pois não foi considerada a influência da interface entre o aço e o concreto refratário. A introdução destes dados produzirá resultados mais próximos da realidade. Os autores dos trabalhos das referências [23,24] também admitem que os ensaios de flexão realizados foram utilizados para obter dados a respeito da tração, devido à dificuldade em realizar testes de tração direta, que seriam os mais recomendados para o estudo em questão.

É importante ressaltar que os trabalhos [22,23,24] são dos mesmos autores e como os três trabalhos são muito parecidos e sobre o mesmo tema, optou-se por se apresentar os resultados obtidos no trabalho da referência [22] por estarem mais claros e apresentados de forma mais objetiva.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as características dos materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova bem como o processo de produção dos mesmos. Serão ainda apresentadas a metodologia empregada nos ensaios mecânicos de compressão, flexão e tração direta, ensaios para avaliar o alongamento durante o aquecimento, ensaios físicos para avaliar porosidade, absorção de água e massa específica. Por fim, será apresentada a metodologia para avaliar a interface entre discos de aço com e sem grampos de ancoragem e concreto refratário.

III.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica sobre revestimentos refratários, observa-se que os ensaios realizados para a caracterização mecânica destes têm sido em temperatura ambiente. Tendo em vista que esta classe de materiais é utilizada em elevadas temperaturas, torna-se extremamente útil obter o seu comportamento na temperatura real de emprego. Diante desta constatação, o programa experimental desta tese foi elaborado com a finalidade de realizar a caracterização mecânica de concretos refratários com ensaios realizados também a quente.

Além disso, para o caso específico proposto, do estudo da interface entre o costado metálico e o concreto refratário em unidades de craqueamento catalítico fluido, é importante salientar que este equipamento possui várias partes onde são aplicados concretos refratários diferentes e, além disso, também possuem distintos tipos de ancoragem.

Foram escolhidos os *risers* como objeto de estudo, pois estes estão submetidos às condições mais críticas dentre as partes de uma UCCF. Através destas seções passa todo o petróleo que é processado em uma UCCF. O concreto refratário aplicado no interior dos *risers* é denso e fibroso devido à erosão a que este deve estar preparado para suportar. Além disso, o costado metálico dos *risers* possui a menor espessura dentre todas as partes exteriores de uma UCCF.

O programa experimental foi idealizado com base na necessidade de fornecer dados a serem utilizados na modelagem numérica da interface costado metálico e concreto refratário. Para tanto, foi estudada a influência da adição de fibras de aço inoxidável em matriz de concreto refratário denso sobre propriedades reológicas, mecânicas e físicas. Como o material a ser estudado possui características refratárias, as temperaturas foram também variadas a fim de se conhecer este material sob diferentes condições térmicas utilizando a temperatura de interesse já definida.

Foram preparadas duas misturas de concreto refratário. A primeira a partir da matriz refratária somente e a segunda a partir da matriz refratária com adição de 1,24% em volume de fibras de aço inoxidável.

A avaliação das propriedades reológicas foi realizada com a mesa de consistência padrão com ensaios realizados logo após a produção das duas misturas de concreto refratário.

Para cada uma dessas misturas os corpos de prova foram submetidos a duas temperaturas diferentes 110°C e 210°C.

Para a caracterização mecânica dos concretos refratários, foram programados ensaios de compressão, flexão e tração direta, que foram realizados a frio e a quente. Para estes ensaios, particularmente, as amostras submetidas a 110°C foram ensaiadas apenas à temperatura ambiente, enquanto as submetidas a 210°C foram ensaiadas à temperatura ambiente e também a 210°C.

Para os ensaios físicos, ocorreram duas situações distintas. Os ensaios de alongamento durante o aquecimento que tiveram amostras submetidas a 110° C e 210° C foram realizados nestas mesmas temperaturas, respectivamente. Já os ensaios para avaliar porosidade, absorção de água e massa específica, tiveram seus corpos de prova submetidos às temperaturas de 110°C e 210°C, e foram ensaiados seguindo apenas um procedimento, conforme a norma ASTM C 20 – 00 [32], que prevê a fervura a 110°C como uma de suas etapas e finalmente diversas pesagens à temperatura ambiente.

Para a avaliação da interface, foram utilizados dois tipos de corpos de prova. O primeiro tipo é constituído de discos de aço moldados em conjunto com cilindros de concreto e o segundo tipo possui grampos de ancoragem soldados aos discos de aço e moldados em conjunto com cilindros de concreto, de forma que os grampos ficassem embebidos na massa de concreto. O detalhamento da confecção e o aspecto final destes corpos de prova serão mostrados ainda neste capítulo. Para cada tipo de corpo de prova descrito e para cada uma das misturas de concreto refratário, as amostras foram submetidas a duas diferentes temperaturas 110° C e 210° C: as amostras que

foram expostas à temperatura de 110°C e ensaiadas à temperatura ambiente e as amostras expostas à temperatura de 210°C e ensaiadas à temperatura de 210°C.

É importante salientar que foram produzidas algumas amostras especiais para avaliar o comportamento dos grampos de ancoragem para cilindros de concreto com 150mm de diâmetro, quando todos os demais corpos de prova possuem 100mm de diâmetro. Foi definida uma nomenclatura para os materiais produzidos utilizando os seguintes símbolos com seus respectivos significados:

CR – concreto refratário
D – discos de aço sem grampo de ancoragem
G – discos de aço com grampos de ancoragem
0 – ausência de fibras
1.24 – adição de 1,24% de fibras em volume
AMB – temperatura ambiente
110 – temperatura de 110 °C
210 – temperatura de 210 °C

Com os símbolos apresentados, foi elaborada a nomenclatura para todas as amostras utilizadas neste trabalho, que ficou com o seguinte aspecto:

(- , D ou G)CR(0 ou 1.24) YYY ZZZ

O primeiro dígito se refere ao tipo de amostra. Quando utilizadas para a caracterização, este é omitido. Quando se referem a amostras para avaliar a interface, será D ou G, conforme o tipo de corpo de prova utilizado. Em seguida, aparece o segundo e terceiro dígitos compostos pelas letras CR que foram padrão para todas as amostras seguida do tipo de mistura que pode ser 1.24 ou 0, conforme tenha sido usado fibras ou não. Logo após, vem o grupo YYY, que pode ser 110 ou 210, de acordo com a temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos durante sua secagem ou queima. Finalmente, o grupo ZZZ que indica a temperatura em que o ensaio foi realizado e pode ser AMB, 110 ou 210. Exemplo: um concreto refratário com 1.24% de fibras, queimado a 210 °C e ensaiado à temperatura ambiente, é denominado CR1.24 210 AMB.

Já um corpo de prova, com a nomenclatura GCR1.24 210 AMB, foi produzido para avaliar a interface entre o aço e o concreto refratário, com grampo de ancoragem no disco de aço e em concreto refratário fibroso com 1,24% de fibras em volume, tendo sido submetido à temperatura de 210 °C e ensaiado à temperatura ambiente.

Para todos os tipos de experimentos mencionados, foram ensaiadas no mínimo cinco amostras, com exceção dos ensaios para avaliar porosidade, absorção de água e massa específica e também para os ensaios realizados para avaliar interface com corpos de prova constituídos de cilindros de concreto com 150mm de diâmetro, que foram realizados com apenas três amostras.

Serão apresentados a seguir quadros que mostram o programa experimental em forma de diagramas, a fim de facilitar o entendimento de todos os ensaios que foram realizados ao longo deste trabalho, e sob quais condições os mesmos foram realizados.

A figura III.1 mostra o quadro geral de todos os ensaios para a caracterização dos concretos refratários, detalhando sob quais condições de temperatura as amostras serão submetidas antes e durante os ensaios. Já a figura III.2 apresenta os ensaios para avaliar a interface entre o aço e o concreto refratário levando em conta os dois tipos de amostras que serão utilizadas, bem como as temperaturas sob as quais serão submetidas antes e depois dos ensaios.

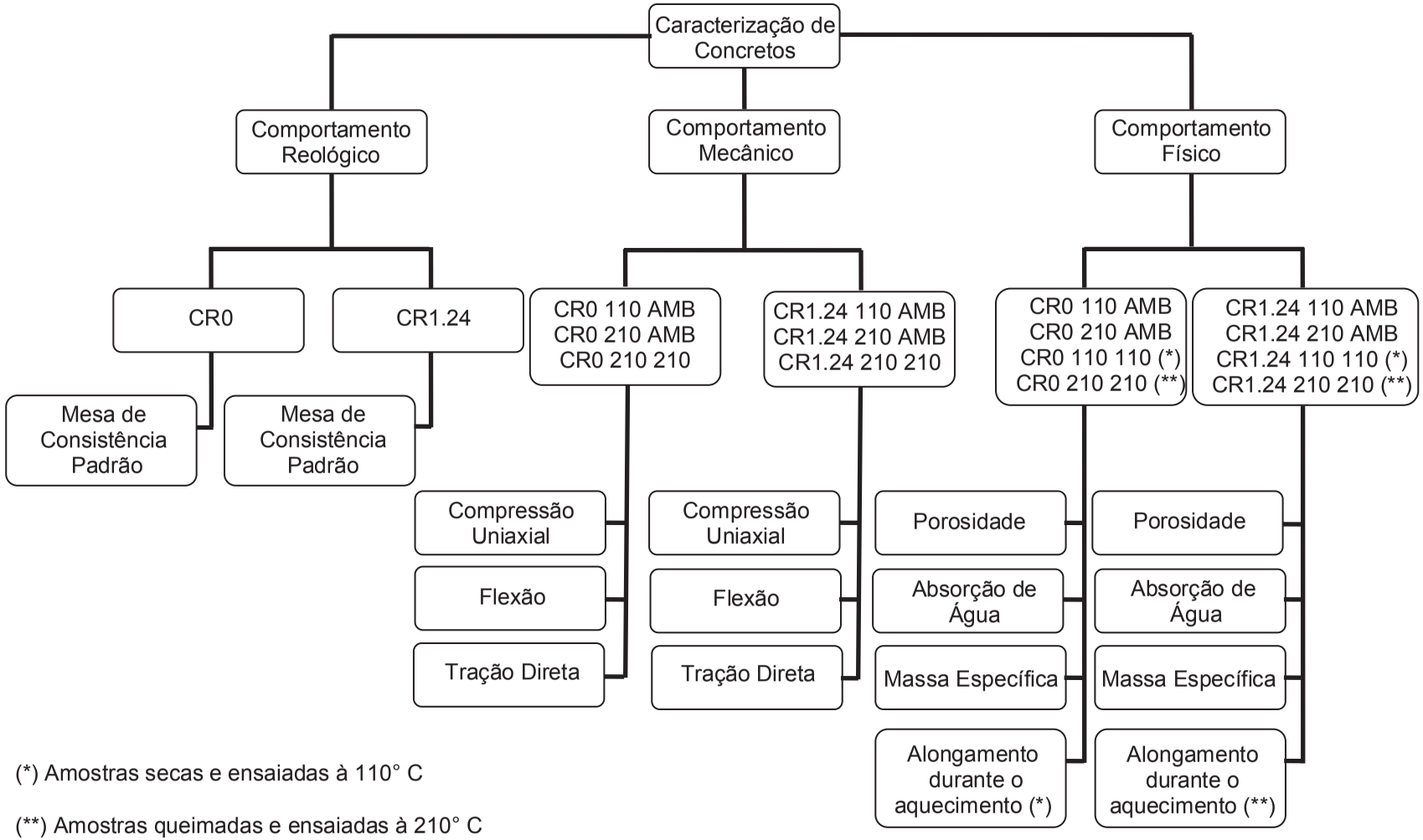
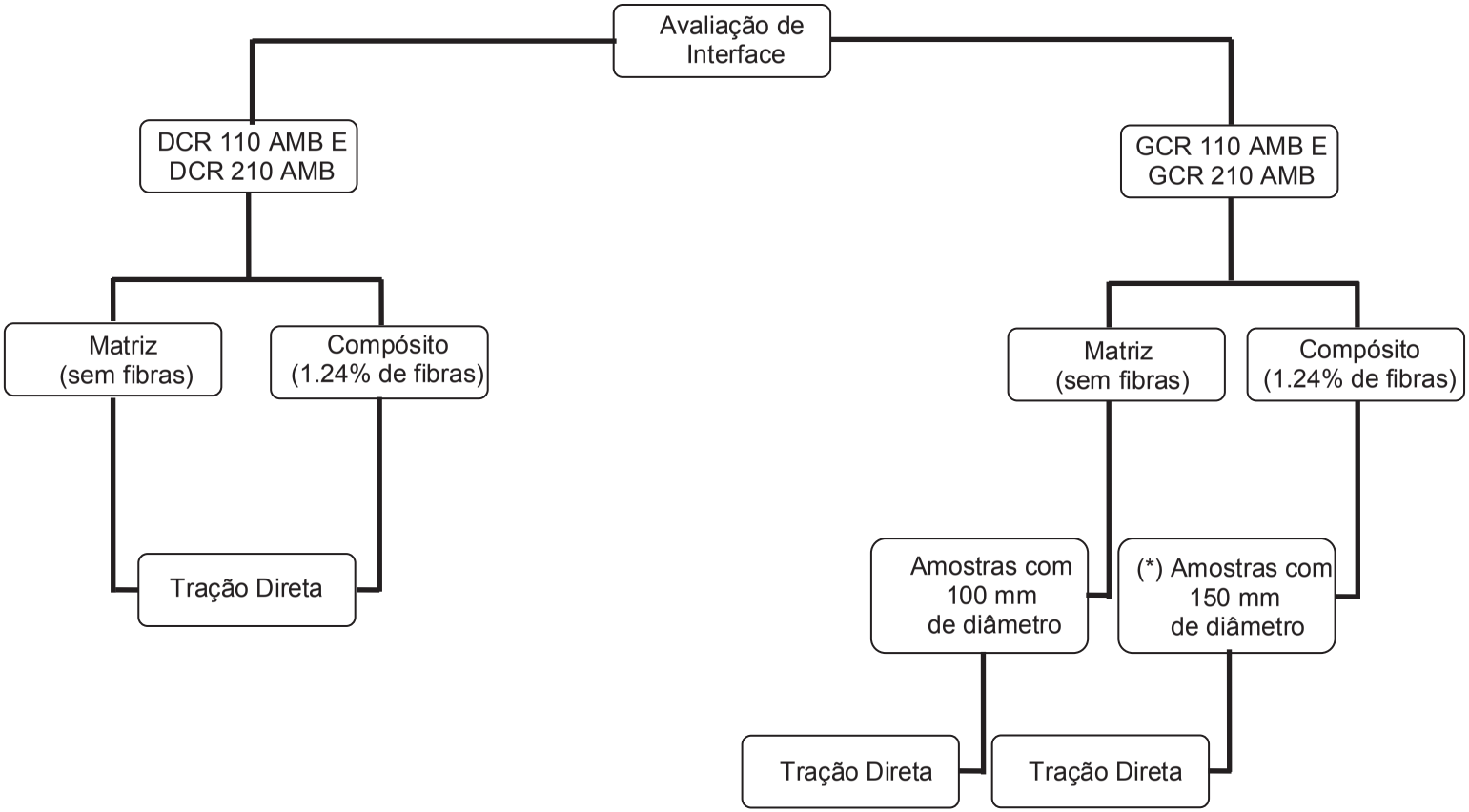


Figura III.1 – Diagrama geral dos ensaios realizados para a caracterização de concretos refratários



(*) Ensaios realizados apenas para GCR 110 AMB

Figura III.2 – Diagrama dos ensaios realizados para avaliar a interface

III.3 MATERIAIS

III.3.1 Concreto Refratário

O material escolhido foi um concreto refratário denso de uso comercial produzido pela Ikera denominado Cekast 60, que é o mesmo utilizado para revestimento de *risers* em unidades de craqueamento catalítico fluido (UCCF).

As propriedades químicas, físicas e mecânicas deste material são apresentadas nas tabelas III.1 e III.2.

Tabela III.1 – Propriedades Químicas do Refratário Cekast 60

Propriedades Químicas	Cekast-60 (%)
Al_2O_3	52.00
SiO_2	40.00
CaO	6.00
Fe_2O_3	1,50
TiO_2	2.50

Tabela III.2 – Características físicas e mecânicas do concreto refratário Cekast 60

Propriedades	***Especificação***
Densidade aparente após moldagem (g/cm³)	Mín. 2,25
Densidade aparente após 110ºC x 24h (g/cm³)	Mín. 2,20
Densidade aparente após 815ºC x 5h (g/cm³)	Mín. 2,10
Densidade aparente após 1400ºC x 5h (g/cm³)	Mín. 2,10
Variação linear dimensional após 815ºC x 5h (%)	-0,5 até 0,5
Variação linear dimensional após queima a 1400ºC x 5h (%)	-1,00 até 0,0
Condutividade térmica a 200ºC (W/m.K)	0,88
Condutividade térmica a 400ºC (W/m.K)	1,01
Condutividade térmica a 600ºC (W/m.K)	1,05
Condutividade térmica a 800ºC (W/m.K)	1,14
Condutividade térmica a 1000ºC (W/m.K)	1,20
Massa específica após moldagem (g/cm³)	> 2,25
Massa específica após secagem a 110ºC x 24h (g/cm³)	> 2,20
Resistência à erosão após queima a 815ºC x 5h (cm³)	Máx. 20,00
Resistência à compressão a temperatura ambiente após 110ºC x 24h (MPa)	Mín. 50,00
Resistência à compressão a temperatura ambiente após 815ºC x 5h (MPa)	Mín. 40,00
Resistência à compressão a temperatura ambiente após queima a 1400ºC x 5h (MPa)	Mín. 55,00

Na figura III.3 é apresentada a curva granulométrica do material CEKAST-60 utilizado neste trabalho, onde pode-se observar que 80% das partículas são inferiores a 2000μm e 60% inferiores a 1000μm.

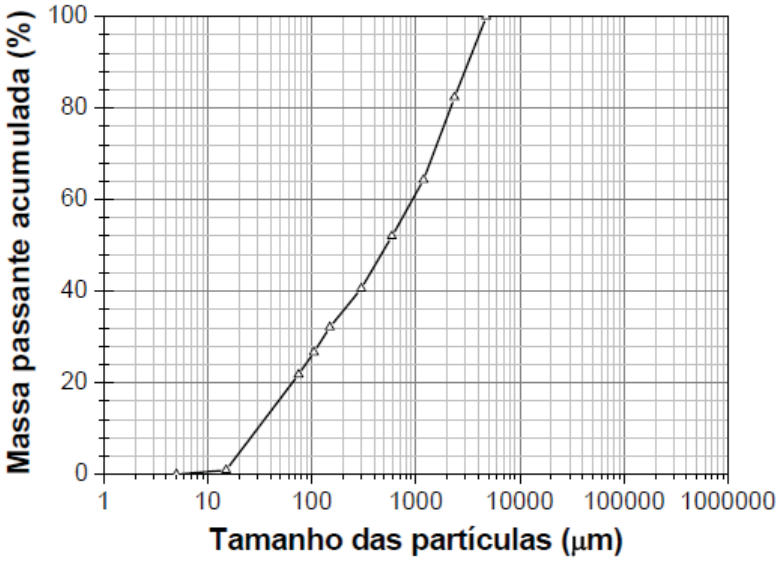


Figura III.3 – Curva Granulométrica do Concreto Refratário (Cekast-60)

III.3.2 Fibras de Aço

A fibra de aço inox utilizada é de uso comercial produzido pela empresa Aços Di Martino. Esta fibra, vide figura III.4, possui comprimento de 25mm e diâmetro de 0.51mm, o que corresponde a uma razão de aspecto de 49. No trabalho de Almeida [11], ensaios de tração direta realizados à temperatura ambiente para avaliar a resistência de fibras não-queimadas e queimadas à temperatura de 600° C obtiveram como resultados respectivamente os valores de 1174,5 MPa e 1182,06 MPa, mostrando que não ocorre mudança significativa da resistência à tração da fibra, quando submetida a temperaturas elevadas.



Figura III.4 – Fibras de aço inox

Tabela III.3 – Propriedades Químicas das Fibras Utilizadas

Propriedades Químicas	Fibra de Aço Inoxidável (%)
C	0.051
Si	0.394
Mn	1.562
P	0.029
S	0.003
Cr	25.462
Ni	19.439

III.3.3 Discos de Aço

Para a confecção dos corpos de prova que serão utilizados para avaliar a interface existente entre o aço e o concreto refratário foram também utilizados discos de aço (vide figura III.5) preparados a partir do aço *ASTM A*516 Grau 70, cujas características de interesse são apresentadas na tabela III.4. O material é o mesmo utilizado nos costados de UCCF, e possui espessura de 12,7 mm, exatamente a mesma dos tubos *riser* que são encontrados na maioria da refinarias brasileiras. Estas seções estão entre as que possuem a menor espessura de chapa de aço em toda a UCCF e que também recebem concreto refratário denso em sua superfície interna.



Figura III.5 – Disco de aço

Tabela III.4 – Propriedades do Aço *ASTM A516* Grau 70

Propriedades	Valor
Densidade	7800 Kg/m^3
Módulo de Elasticidade	224 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3

Os dados de densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* foram obtidos junto ao fornecedor [35].

III.3.4 Grampos de Ancoragem

Para avaliar a interface aço-concreto refratário, o grampo escolhido foi o conhecido como V tipo 1 (vide figura III.6), cujas especificações estão disponíveis na norma N1728, revisão H da Petrobras. De acordo com esta norma existem diversos tamanhos possíveis para este tipo de grampo que variam de acordo com a espessura da camada de concreto refratário que se deseja ancorar.

A escolha do tamanho do grampo para a confecção do corpo de prova teve como principal fator as dimensões finais que deveriam ser adequadas para realizar o ensaio no equipamento de que se dispunha.

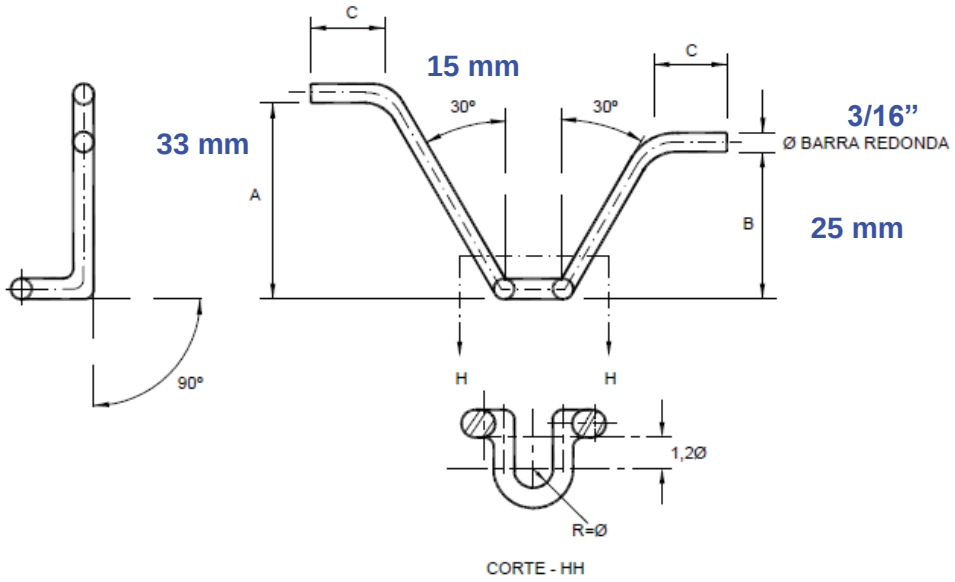


Figura III.6 – Grampo V tipo 1 utilizado nas amostras para avaliar a interface [33]

Levando em conta estes fatores, conforme a norma N1728, revisão H da Petrobras, o grampo de ancoragem escolhido foi o com as seguintes dimensões:

A = 33 mm
B = 25 mm
C = 15 mm

Diâmetro (Ø) da Barra Redonda = 3/16” ou 4,76 mm

O grampo é fabricado com aço inoxidável *ASTM* A479 tipo 304, cujas características se encontram na tabela III.5 e foram obtidas com o fornecedor do grampo de ancoragem, a empresa Giusti LTDA.

Tabela III.5 – Propriedades do Aço Inoxidável *ASTM* A479 tipo 304

Propriedades	Valor
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3

III.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO REFRATÁRIO

A seguir, serão descritas as etapas necessárias para a confecção dos corpos de prova de concreto refratário que foram utilizados para realizar os ensaios. Serão detalhadas as operações de moldagem, secagem e queima.

III.4.1 Moldagem

A produção do concreto refratário foi realizada no laboratório de estruturas do Departamento de Engenharia Civil da COPPE – UFRJ. Todas as moldagens foram realizadas em um misturador planetário, como pode ser visto na figura III.7.



Figura III.7 – Misturador Planetário e Aspecto do Concreto Refratário em seu Interior

As proporções das misturas seguiram recomendações do fabricante que eram 11 litros de água para cada 100 kg de Cekast-60. Para o processamento, o material seco foi, inicialmente, misturado por um minuto. Em seguida, foi realizada lentamente a adição total da água, com o misturador em movimento, e o material foi processado por mais 5 minutos para garantir uma distribuição homogênea da água por todo o produto. As fibras de aço inox foram adicionadas à mistura dentro deste tempo de 5 minutos. Estando pronto o concreto, foi feita a moldagem em três camadas, sendo realizado o adensamento em mesa vibratória com o tempo de 30 segundos. Ao término da moldagem, iniciou-se imediatamente o período da cura.

III.4.2 Cura, Secagem e Queima

O concreto foi curado por 24 horas em uma câmara úmida com 100% de umidade e 23 ^{o}C de temperatura, vide figura III.8.



Figura III.8 – Câmara Úmida [11]

Para realizar a secagem e a queima dos corpos de prova de concreto refratário foi utilizado um forno tipo mufla computadorizado. A figura III.9 apresenta uma ilustração do forno descrito.



Figura III.9 – Forno Mufla Computadorizado

Todos os corpos de prova produzidos foram secos a 110°C. Metade deles foi queimada a uma temperatura de 210°C, que é a mesma temperatura à qual está submetida a interface entre o aço e o concreto refratário em *risers* de UCCF. O aquecimento inicial que constitui a operação de secagem foi realizado a uma taxa de 22°C/h até 110°C e mantido constante por 24 horas. Para a queima dos corpos de prova a 210°C, foi realizada, em primeiro lugar, a secagem a 110°C. Logo em seguida, realizou-se o aquecimento a uma taxa de 40°C/h até 210°C e se manteve o corpo de prova nesta isoterma por 6 horas. As figuras III.10 e III.11 mostram a evolução da temperatura com o tempo recomendadas pelo fabricante para secagem e queima, respectivamente, operações estas realizadas em amostras de concreto refratário nas temperaturas de 110 °C e 210 °C, respectivamente.

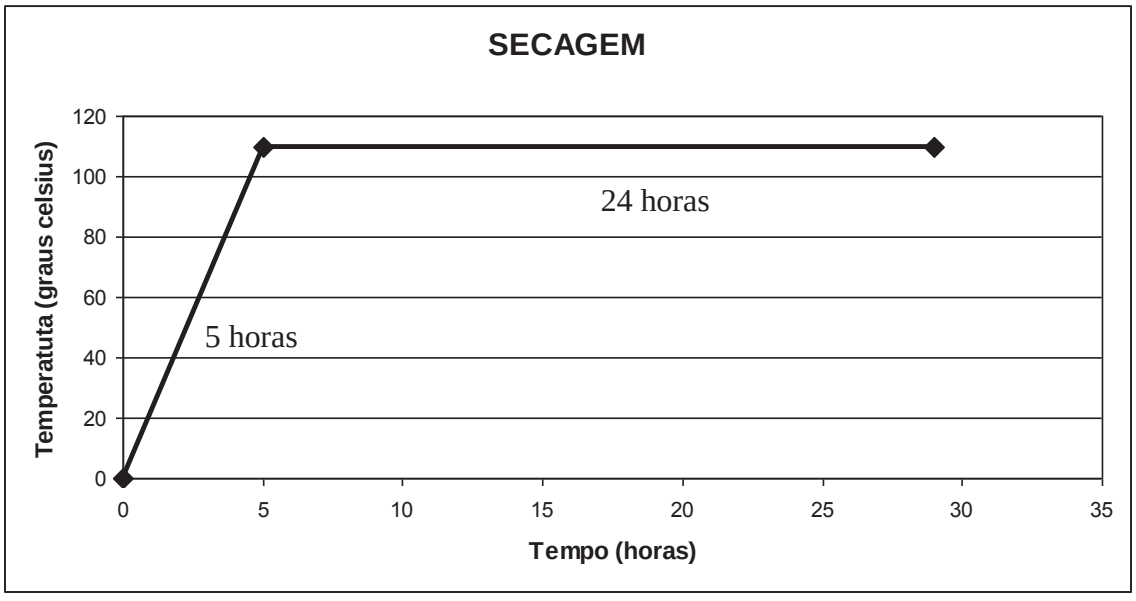


Figura III.10 – Temperatura x tempo para secagem de refratários

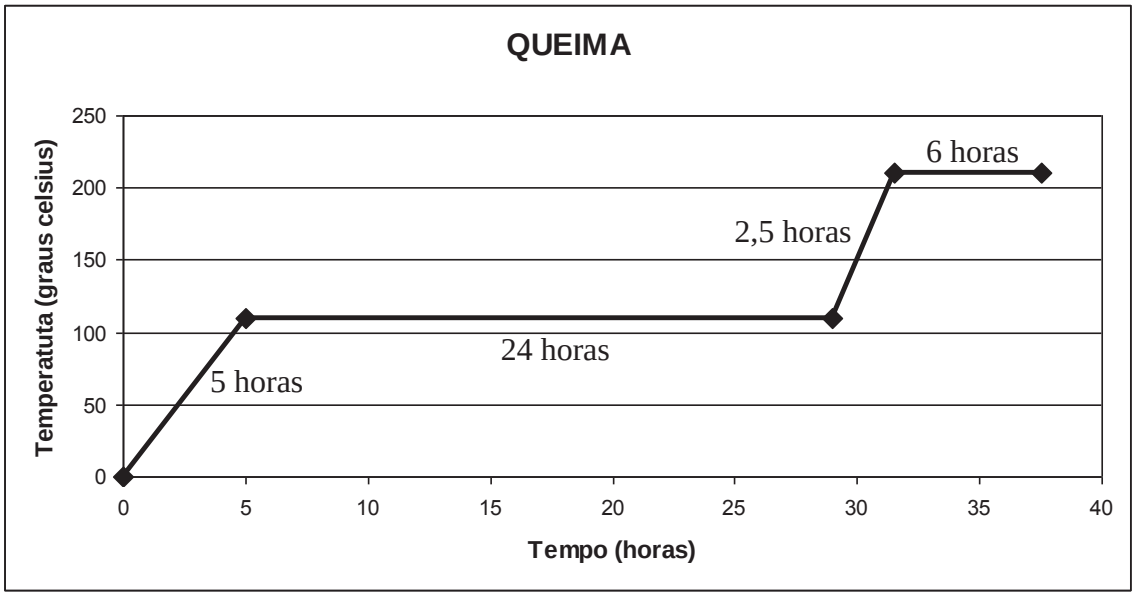


Figura III.11 – Temperatura x tempo para queima de refratários

Após a secagem e queima, os corpos de prova foram mantidos em uma estufa, à temperatura de 110°C, até serem ensaiados. Além da função de armazenamento, a estufa também foi utilizada para realizar a secagem dos corpos de prova até a temperatura de 110ºC. Já a queima a 210°C, foi realizada com o emprego do forno mufla computadorizado, mostrado na figura III.9.

III.5 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE REFRATÁRIOS

Nesta seção, serão descritas as metodologias utilizadas para a execução dos ensaios experimentais necessários para realizar a caracterização de concretos refratários, bem como para avaliar a interface entre o aço e o concreto refratário.

III.5.1 Ensaio de Reologia

III.5.1.1 Ensaio da Mesa de Consistência Padrão

Após a moldagem do concreto foi avaliado o índice de espalhamento, de acordo com a NBR 7215, de 1996 [26], através de uma mesa de consistência padrão, apresentada na figura III.12, que foi o ensaio realizado para verificar a reologia do material estudado.



Figura III.12 – Mesa de Consistência Padrão

III.5.2 Ensaios Mecânicos

O concreto refratário foi submetido a ensaios estáticos de compressão, flexão e tração direta a frio e a quente. As amostras secas à 110°C foram ensaiadas apenas à temperatura ambiente. Já as que foram queimadas a 210°C, foram ensaiadas à temperatura ambiente e também à temperatura de 210°C. Todos estes ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos do LABEST – COPPE/UFRJ. Para realizar estes experimentos, foi utilizada uma prensa da *Shimadzu*, modelo EH-F EM300K1-070-0A, com capacidade máxima de 30ton, conforme mostra figura III.13.



Figura III.13 – Prensa *Shimadzu* EH-F EM300K1-070-0A

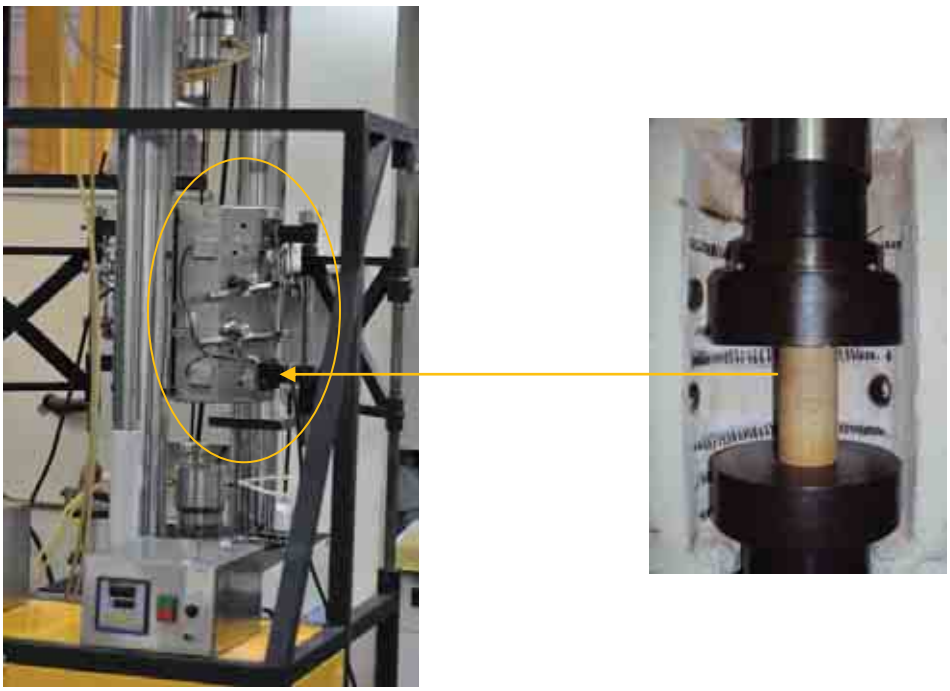


Figura III.14 - Forno utilizado para ensaios de compressão a quente

Os ensaios a quente foram realizados com fornos acoplados à prensa. Os fornos utilizados eram de dimensões distintas devido à diferença de tamanho das amostras para cada um dos ensaios. Para os ensaios de compressão foi usado o forno da figura III.14. Já para os ensaios de flexão, tração e também para os ensaios para avaliar a interface costado de aço-concreto refratário, foi utilizado o forno da figura III.15.

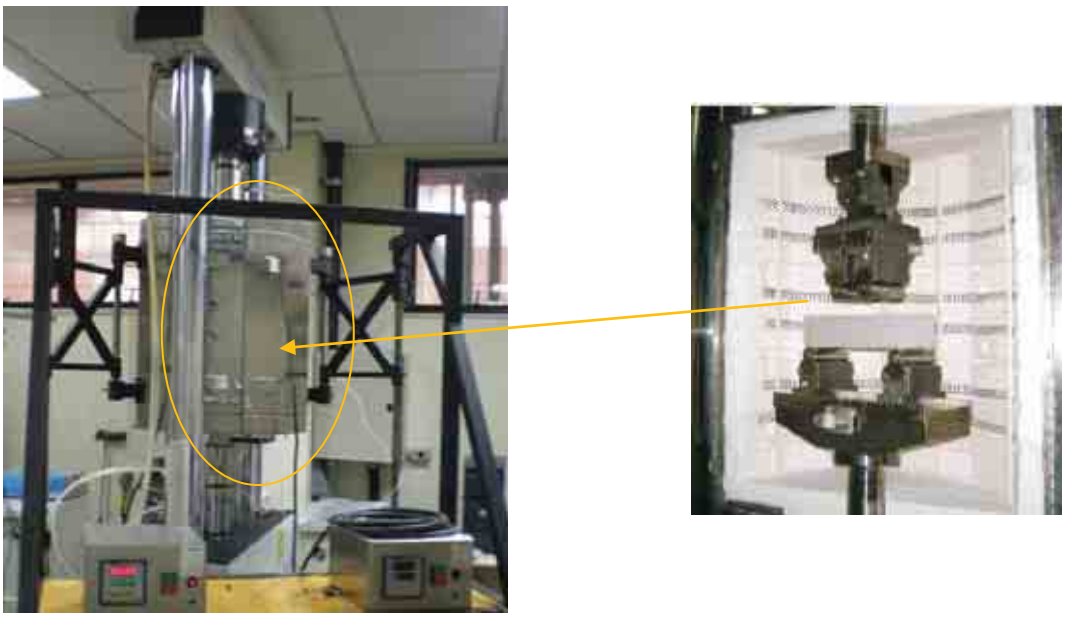


Figura III.15 - Forno utilizado para ensaios de flexão, tração e avaliação de interface a quente [27]

Os fornos foram ligados a controladores, a fim de programar a temperatura à qual a amostra deveria ser aquecida e a rampa de aquecimento que seria adotada. Para todos os ensaios, foi utilizada uma rampa de aquecimento de 4°C por minuto [11], para evitar choque térmico.

III.5.2.1 Ensaio de Compressão

Os ensaios de compressão estática foram realizados na prensa *Shimadzu*, modelo EH-F EM300K1-070-0A, apresentada anteriormente.

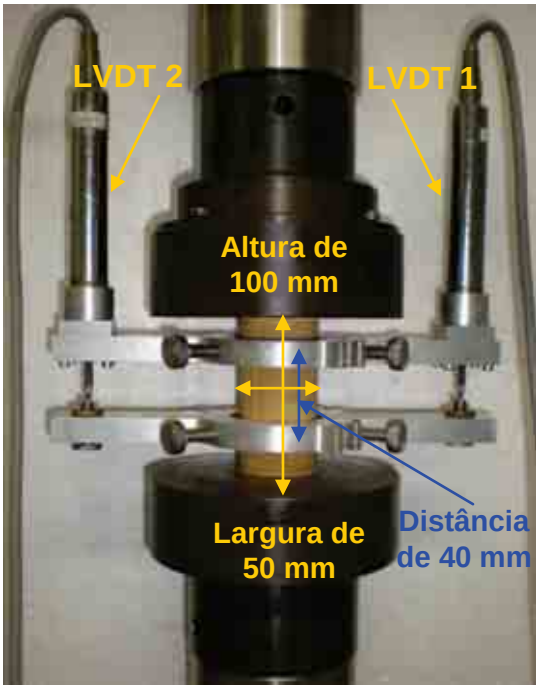


Figura III.16 – Ensaio de compressão a frio

Os testes foram realizados a uma velocidade do travessão de 0,1mm/min. As deflexões foram medidas por dois transdutores elétricos (LVDT), conforme figura III.16 para os ensaios a frio e, para o ensaio a quente, não foram utilizados LVDT´s, conforme figura III.17. Para cada uma das misturas produzidas, foram realizados 10 ensaios à temperatura ambiente e 5 ensaios a quente, ou seja, quinze ensaios por mistura.

As amostras utilizadas foram cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para os ensaios a frio e a quente. A distância entre os anéis que prendiam os LVDT`s nos ensaios a frio era de 40 mm. As cargas e as correspondentes deflexões (nos ensaios a frio) foram gravadas com um sistema de aquisição que realizava uma

leitura por segundo. Para determinar as resistências à compressão a frio foi utilizada a norma NBR 11222 [28].

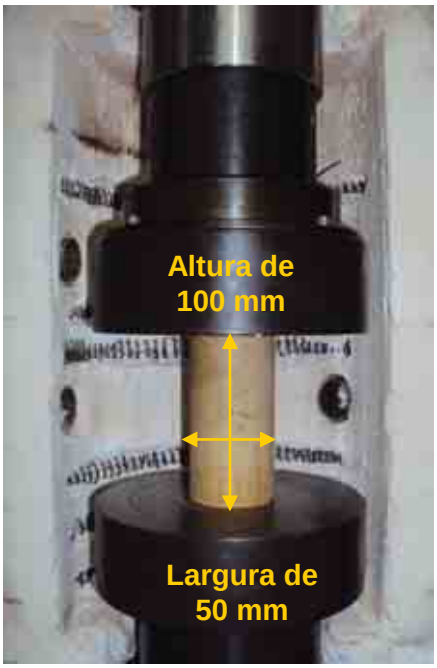


Figura III.17 – Ensaio de compressão a quente

O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado utilizando o módulo secante para uma tensão igual a 40% da tensão limite da curva tensão x deformação conforme a *ASTM C469*, 2002 [29]. A expressão III.1 foi utilizada com esta finalidade:

$$E = (sc2 - sc1) / (\varepsilon a2 - \varepsilon a1) \qquad \text{(III.1)}$$

onde,

E é o módulo de elasticidade;

sc2 é a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

sc1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial εa1;

εa1 é a deformação axial de 0,000050;

εa2 é a deformação axial relativa à tensão sc2.

As deformações à quente foram obtidas a partir das medições do deslocamento do travessão e ajustadas com o auxílio de dados obtidos para os ensaios realizados a frio. Este ajuste foi feito através de fatores de multiplicação obtidos entre o deslocamento medido para os transdutores elétricos e o deslocamento proporcionado pelo travessão nos ensaios a frio. Estes fatores de multiplicação foram aplicados aos dados obtidos para os ensaios à quente e assim foram produzidas curvas: tensão versus deformação para os ensaios sob estas condições. O módulo de elasticidade das amostras ensaiadas a quente (210 ºC) não foi calculado. A tenacidade foi calculada

considerando a área sob a curva carga versus deslocamento e obtida em KJ/m^2 para um deslocamento do LVDT de 0,12 mm.

III.5.2.2 Ensaio de Flexão

Os testes de flexão foram também executados com o uso da prensa *Shimadzu*, modelo EH-F EM300K1-070-0A. Os ensaios de flexão foram executados com uma velocidade do travessão de 0,1 mm/min. Os espécimes possuíam dimensões nominais de 50 mm x 50 mm x 228 mm (largura x espessura x comprimento) e foram testados sob flexão (180 mm de distância entre apoios inferiores) como mostrado nas figuras III.18 e III.19. Pode-se observar também nestas figuras a distância entre os apoios superiores que é de 60 mm.

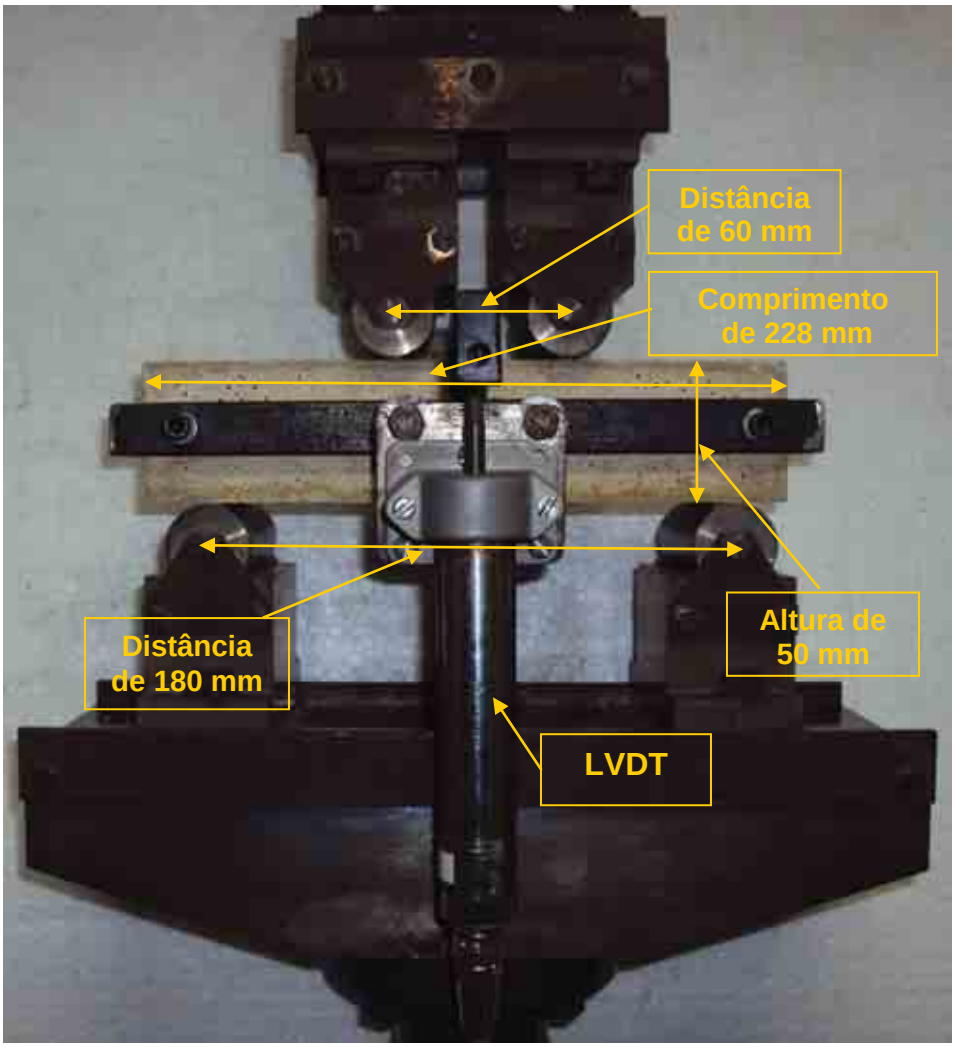


Figura III.18 – Ensaio de Flexão a frio

Foram realizados testes com amostras com e sem fibra, a frio e a quente totalizando 15 ensaios por mistura sendo 10 a frio e 5 a quente. As deflexões no vão central, para os ensaios a frio, foram medidas usando um LVDT e um sistema de aquisição de dados que foram os mesmos utilizados para os testes de compressão.

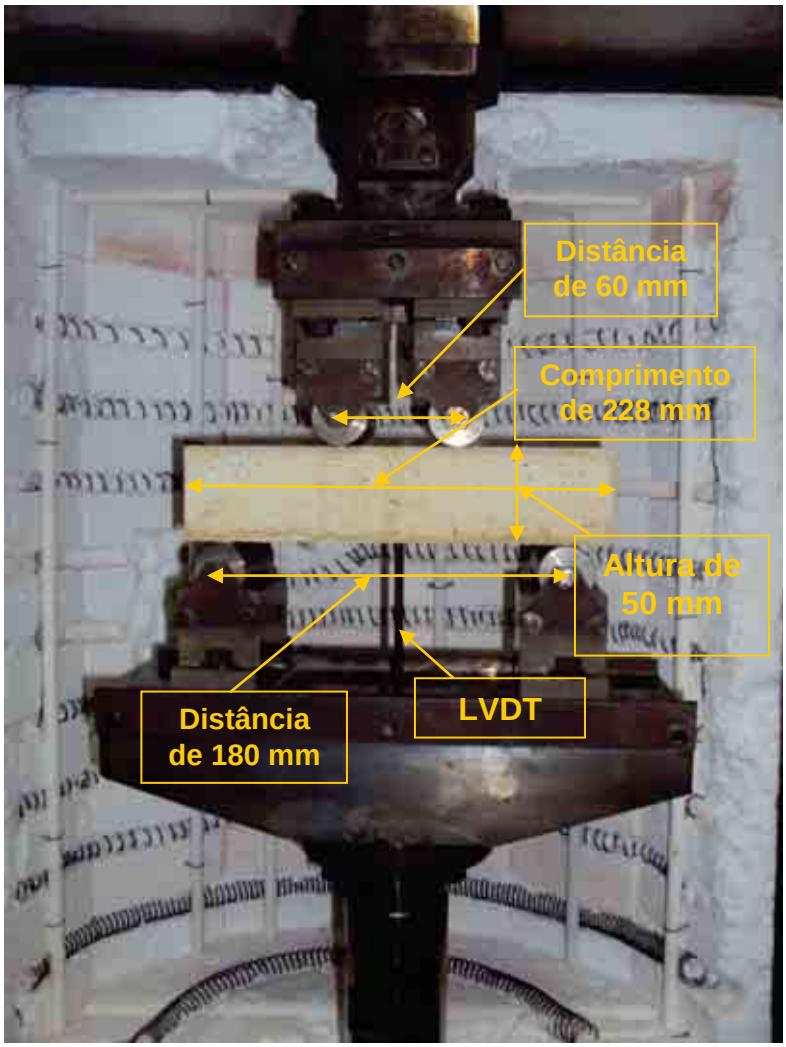


Figura III.19 – Ensaio de Flexão a quente

Já para os ensaios a quente o LVDT utilizado foi adequado para este tipo de teste, conforme figura III.19, empregando o mesmo sistema de aquisição de dados dos ensaios a frio.

Foram obtidas as resistências à flexão para primeira fissura e pós-fissuração através do emprego da norma NBR 9642 [30] e utilizada a fórmula:

$$\sigma = Fc.1000/bd^2 \qquad \text{(III.2)}$$

onde F é a carga em KN, c é a distância em mm entre apoios, b é a largura em mm e d a espessura em mm do corpo de prova. Além destas é calculada a tenacidade na

flexão a partir da área sob a curva carga versus deslocamento até uma deflexão pós-pico correspondente a 40% da carga de pico [40] e também calculados índices de tenacidades segundo a Norma Belga *NBN B15 238* [36].

III.5.2.3 Ensaio de Tração

Foram realizados vários testes iniciais até se chegar à montagem final utilizada para realizar os ensaios de tração. Inicialmente, foram testadas garras convencionais empregadas em ensaios de tração direta. Contudo, como o objetivo deste trabalho era realizar ensaios a altas temperaturas foram desenvolvidas garras especiais que atendessem a este requisito, conforme figura III.20.



Figura III.20 – Garras utilizadas para ensaio de tração direta

Foram confeccionados em cada uma das garras 4 furos de 1/2" polegada de diâmetro de forma a transpassar a base das garras no sentido axial. Estes orifícios foram feitos para a passagem de pinos dos corpos de prova, a seguir apresentados vide figura III.21, possibilitando prendê-los através de suas extremidades e assim a carga aplicada passou somente a solicitar a amostra na sua direção axial.

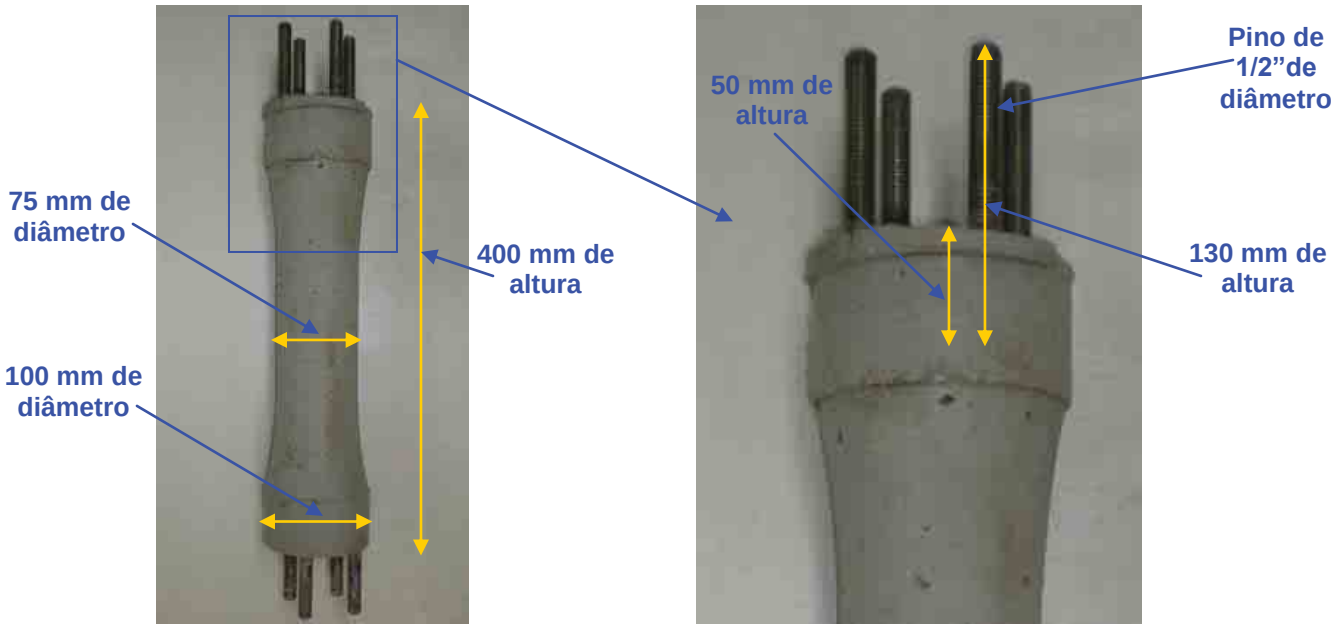


Figura III.21 – Corpos de prova utilizados para ensaio de tração direta

Para confeccionar os corpos de prova foram preparados moldes conforme figuras III.22 e III.23. Informações sobre a geometria e partes do molde (redutor de seção) obtidos no trabalho de Velasco [31] serviram como base para elaborar a amostra utilizada nestes ensaios. Deve-se ressaltar que a garra empregada para realizar a tração direta nesse trabalho, e as demais existentes não podiam ser utilizadas, uma vez que não eram adequadas para realizar ensaios a quente. Para realizar o ensaio de tração com a garra desenvolvida foi necessário produzir amostras com quatro pinos preparados a partir de barras roscadas de aço inox *ASTM* A479 tipo 304. Estes pinos possuíam 1/2” polegada de diâmetro e 130 mm de comprimento e foram inseridos 50 mm no interior do concreto em cada extremidade da amostra apresentada na figura III.21. Na figura III.22 observa-se base e luva utilizadas para posicionar os pinos durante a moldagem das amostras.

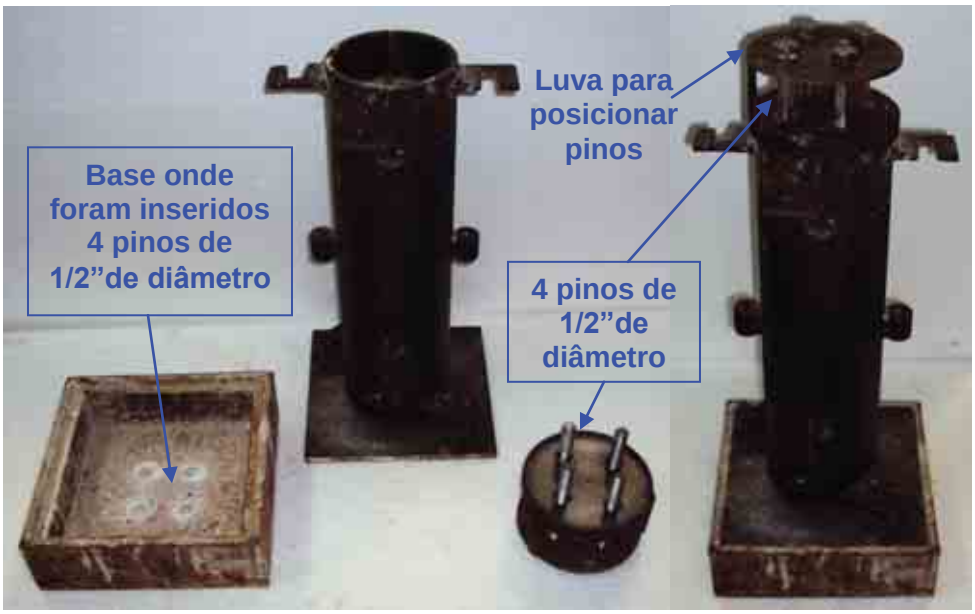


Figura III.22 – Molde para ensaio de tração

Na figura III.23 é possível observar o interior do molde que possui um redutor de seção a fim de possibilitar a confecção do corpo de prova no formato desejado.



Figura III.23 – Detalhe do interior do corpo de prova utilizado para tração

Os testes de tração direta foram realizados com o travessão avançando a uma velocidade de 0,1 mm/min, segundo a montagem apresentada na figura III.24. Os espécimes possuíam dimensões nominais de 100 mm x 75 mm x 400 mm, conforme figura III.21 (diâmetro máximo x diâmetro mínimo – seção central x comprimento). Este formato de corpo de prova teve como finalidade induzir o rompimento do corpo de prova na seção transversal de menor diâmetro que por sua vez foi a região instrumentada com LVDT´s.

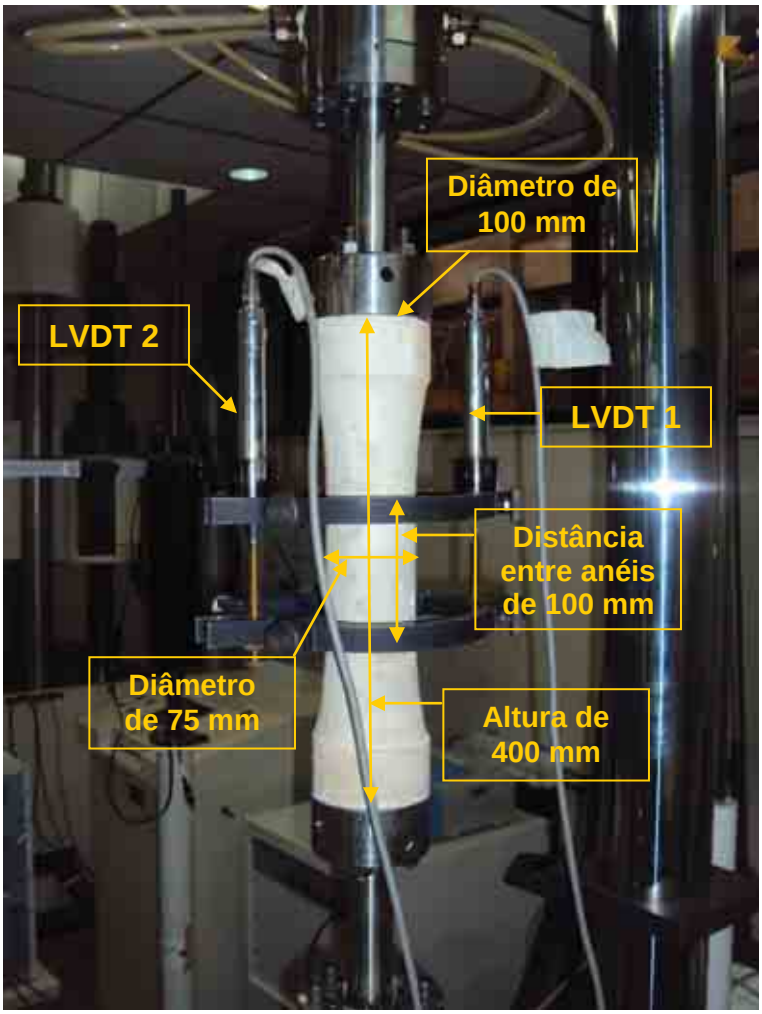


Figura III.24 – Montagem Experimental do Ensaio de Tração a Frio

Foram executados ensaios com amostras de concreto com fibras e sem fibras, a frio e a quente, totalizando 15 ensaios por mistura, sendo 10 ensaios a frio e 5 ensaios a quente. As deformações no vão central, para os ensaios a frio, foram medidas utilizando dois transdutores elétricos e um sistema de aquisição de dados que foram os mesmos utilizados para os testes de compressão. O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado utilizando o módulo secante para uma tensão igual a 40% da tensão limite da curva tensão x deformação, variando de 5 μS até a deformação correspondente a essa tensão estipulada. Deve-se ressaltar que a única diferença entre a forma de cálculo do módulo de elasticidade sob compressão e a tração foi a deformação inicial utilizada. O objetivo foi selecionar a região da curva tensão x deformação que se manteve linear. A tenacidade foi calculada considerando a área sob a curva carga versus deslocamento e obtida em KJ/m^2. Para as amostras de CR0, foi considerada a área sob a curva até sua ruptura e, para as amostras de CR1.24, o cálculo foi realizado considerando um deslocamento do LVDT de 0,01 mm.

Os ensaios a quente foram realizados com a montagem experimental mostrada na figura III.25. As deformações a quente foram obtidas a partir das medições do deslocamento do travessão e ajustadas com o auxílio de dados obtidos para os ensaios realizados a frio. Este ajuste foi feito através de fatores de multiplicação obtidos entre o deslocamento medido para os transdutores elétricos e o deslocamento proporcionado pelo travessão nos ensaios a frio. Estes fatores de multiplicação foram aplicados aos dados obtidos para os ensaios a quente e assim foram produzidas curvas: tensão versus deformação para os ensaios sob estas condições. O módulo de elasticidade das amostras ensaiadas a quente (210 ºC) não foi calculado.



Figura III.25 – Montagem experimental do ensaio de tração a quente

III.5.3 Ensaios Físicos

III.5.3.1 Ensaio de Alongamento durante o Aquecimento

Os testes para avaliar o alongamento durante o aquecimento foram realizados com o equipamento apresentado nas figuras III.27 e II.28. As amostras utilizadas,

conforme pode-se ver pela figura III.26, eram prismáticas e possuíam dimensões de 25 x 25 x 255 mm.

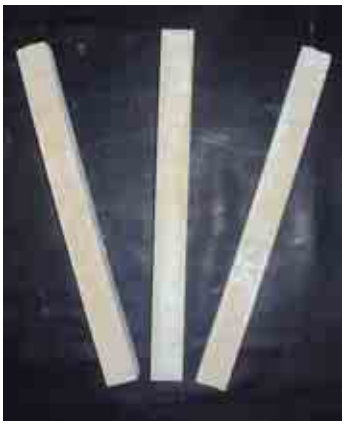


Figura III.26 – Corpos de prova para ensaios de alongamento durante o aquecimento

Inicialmente, os corpos de prova foram introduzidos no forno, e em seguida aquecidos até a temperatura de ensaio. Sensores de temperatura monitoravam a temperatura da amostra e do forno. O ensaio só era iniciado quando as temperaturas do forno e da amostra se igualavam.

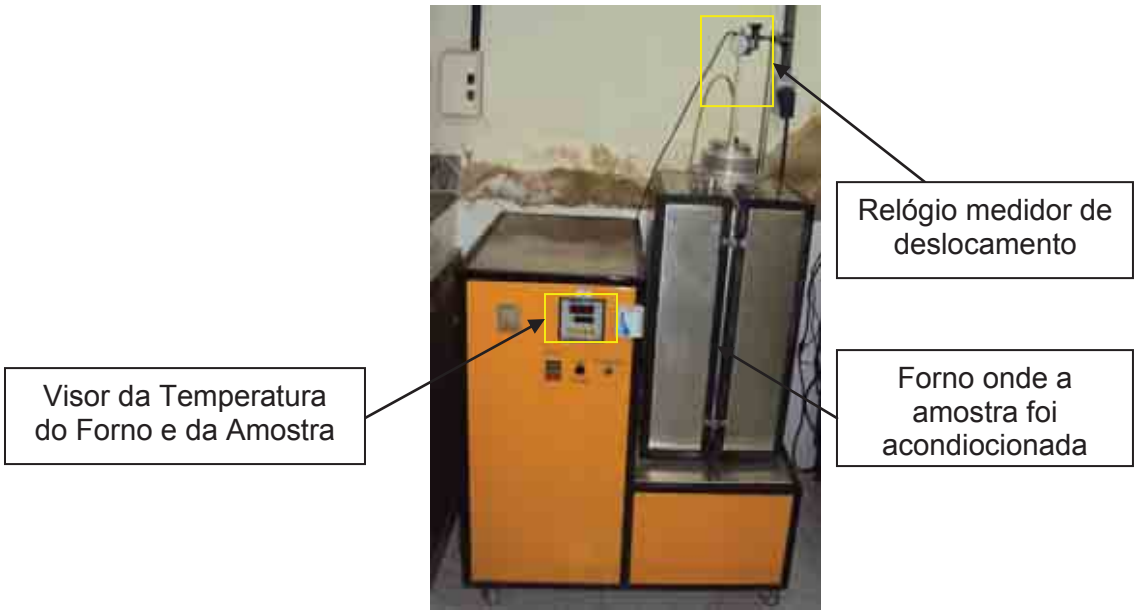


Figura III.27 – Equipamento para ensaio de alongamento durante o aquecimento

Após as temperaturas do forno e da amostra se igualarem, aguardava-se cerca de quinze minutos para que se estabilizar a medida do deslocamento linear da amostra. Os dados obtidos foram a variação de temperatura da amostra e do forno, bem como o alongamento durante o aquecimento.

Conhecendo o alongamento durante o aquecimento, foi calculado o coeficiente de dilatação térmica linear α com a expressão: $\alpha = \Delta L/(L_0 * \Delta T)$ (III.3), sendo ΔL o alongamento durante o aquecimento das amostras, L_0 o comprimento inicial e ΔT a variação de temperatura das amostras.



Figura III.28 – Interior do forno onde a amostra foi colocada para o ensaio de alongamento durante o aquecimento

III.5.3.2 Ensaio de Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica

Os ensaios de porosidade, absorção de água e massa específica utilizaram ao todo doze corpos de prova, sendo 6 (seis) preparados com concreto refratário sem fibras e 6 (seis) com adição, em volume, de 1.24% de fibras de aço. Estes corpos de prova eram cúbicos com arestas de 50 mm.

Após sua fabricação, seguiram-se as seguintes etapas:

1) Desmoldagem e armazenamento em uma câmara úmida;
2) Secagem de seis CP´s à 110 °C (sendo três sem fibras e três com fibras) e queima de outros seis à 210 °C (sendo três sem fibras e três com fibras);
3) Após a secagem ou queima, acondicionamento em uma estufa com temperatura constante de 110 °C;

Desta forma, os CP´s passaram por todas estas etapas antes de serem testados. Os procedimentos para realização dos ensaios e avaliação dos resultados produzidos se pautaram na norma *ASTM C 20 – 00* [32].

De acordo com esta norma, em primeiro lugar, os CP´s foram pesados logo após saírem da estufa, ou seja a 110 °C. Depois, seguiram para a operação de saturação, que consiste em manter as amostras em água fervente durante 2 (duas) horas. Esta operação foi realizada com os CP´s completamente imersos na água, sem que os mesmos entrassem em contato direto com a chapa que aquece o recipiente. A figura III.29 mostra como foi realizada esta etapa do ensaio.



Figura III.29 – Corpos de prova em água fervente

A etapa a seguir consistiu no resfriamento das espécimes. Os mesmos continuaram imersos em água, no recipiente onde foi feita a fervura, em uma sala de temperatura controlada e permaneceram assim por um período de 12 (doze) horas antes de se realizar a pesagem.

A próxima etapa, conforme a norma adotada, foi a pesagem com os CP`s submersos e após suspensos. Este procedimento foi realizado com o auxílio de uma balança acoplada a um cesto, onde o CP foi acondicionado, conforme apresenta a figura III.30. Este cesto foi inserido em um recipiente com água. Desta forma, realizou-se a pesagem em suspenso, de acordo com o que é solicitado pela norma.



Figura III.30 – Aparato para pesagem submersa dos CP´s

A última etapa deste ensaio foi uma pesagem da amostra saturada. Para realizar este procedimento foi retirado o excesso de água de sua superfície com uma toalha de algodão. Uma vez secos, os CP´s foram pesados, obtendo-se assim o peso saturado.

De posse dos pesos a 110 °C (D), submerso (P_S) e peso saturado (W), foram realizados cálculos com estes dados, para cada uma das composições de refratários ensaiadas, a saber: sem fibras (CR0) e com 1,24 % de volume de fibras (CR1.24).

Para se obterem os valores de porosidade, absorção de água e massa específica, foram calculadas as seguintes variáveis: V (volume), P_r (porosidade), A (absorção de água), e T (massa específica aparente). As fórmulas para estas variáveis utilizadas foram:

$$V = W - P_S \quad \text{(III.4)}$$

$$P_r,\% = [(W-D)/V] \times 100 \quad \text{(III.5)}$$

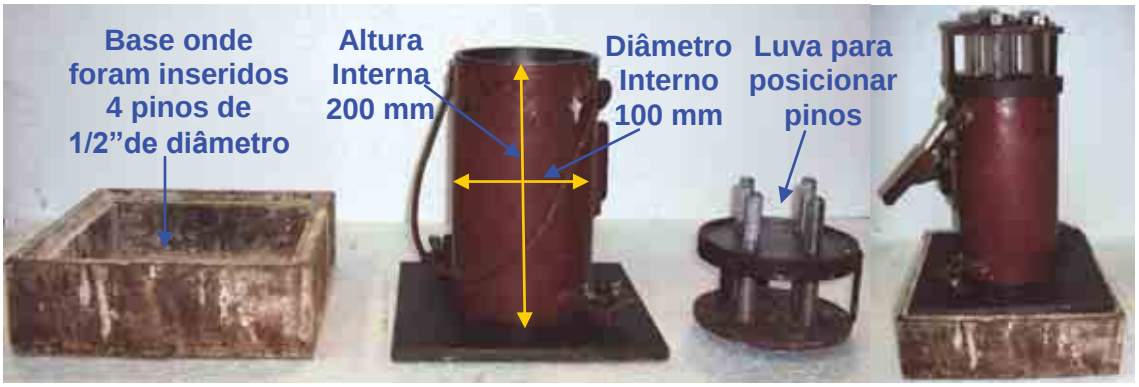
$$A,\% = [W-D)/D] \times 100 \quad \text{(III.6)}$$

$$T = D/(D-P_S) \quad \text{(III.7)}$$

III.6 ENSAIOS PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA DA INTERFACE DISCO DE AÇO E CONCRETO REFRATÁRIO

Os ensaios para avaliar a resistência da interface disco de aço e concreto refratário foram realizados por meio de ensaios de tração direta, utilizando-se,

portanto, as mesmas garras especiais desenvolvidas para caracterização do concreto refratário, quando submetido a um esforço de tração.



(a) (b) (c) (d)

Figura III.31 – Molde para ensaio de interface com diâmetro de 100 mm

Foram construídos moldes, vide figura III.31, para produzir amostras para avaliar a interface disco de aço com e sem grampo de ancoragem e concreto refratário. A figura III.31 (d) mostra a montagem final do molde com 100 mm de diâmetro interno e 200 mm de altura interna, como se observa na figura III.31 (b), e as figuras III.31 (a) e (c) apresentam base e luva utilizadas para posicionar pinos a serem inseridos na amostra.

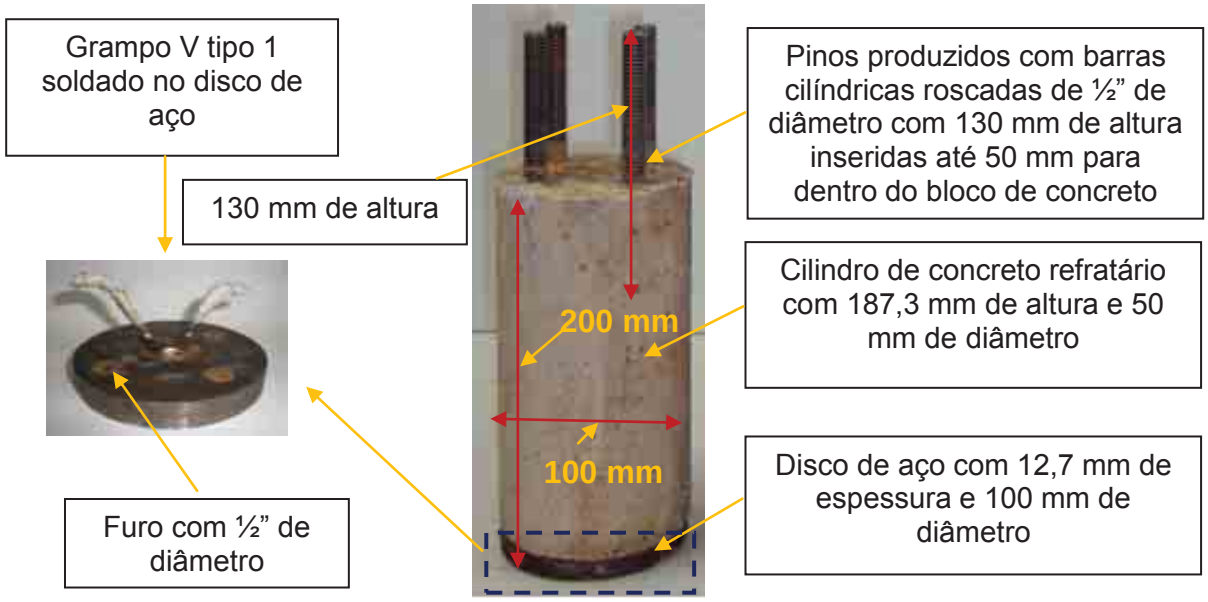


Figura III.32 – Dimensões do Corpo de Prova de 100 mm de diâmetro e geometria do sistema disco - grampo

A figura III.32 mostra o aspecto final das amostras produzidas para avaliar a interface disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário com 100 mm de diâmetro. O disco utilizado possuía diâmetro foi de 100 mm, espessura de 12,7 mm, e o material utilizado foi o aço estrutural A516 grau 70. Já o grampo foi o V de tipo I com

dimensões previstas conforme a norma N1728 – revisão H da Petrobras [33] e apresentadas na figura III.6. Os grampos de aço inox foram soldados nos discos de aço e, em seguida, foi enrolada uma fita crepe com duas voltas nos grampos ficando com o aspecto que pode ser observado na figura III.32. Esta fita tem como finalidade gerar um espaço que surge após a queima da amostra entre os grampos e o concreto refratário, a fim de possibilitar a dilatação dos grampos de aço inox sem que o concreto refratário fissure. Isto poderia ocorrer, pois o aço inox e o concreto refratário apresentam dilatações diferentes quando submetidos à temperatura de 210°C. Cabe ressaltar que este procedimento foi adotado em conformidade com o que é feito na aplicação de concreto refratário em UCCF no Brasil. Esta nova peça constituída de disco e grampo foi colocada no fundo dos moldes, a fim de serem preparados os corpos de prova. Salienta-se que foram feitos quatro furos de 1/2 polegada de diâmetro cada nos discos de aço para inserção das barras roscadas similares às que foram embebidas no concreto refratário, com a finalidade de viabilizar o encaixe dos corpos de prova nas garras.

Foram também preparados corpos de prova de 150 mm de diâmetro, apresentados na figura III.34, com grampo de ancoragem para se medir sua aderência à chapa metálica, cujo molde é apresentado na figura III.33, a fim de estudar o comportamento da interface e a influência do diâmetro. Estas amostras foram produzidas com discos de aço e grampos de aço inox exatamente idênticos aos utilizados para os corpos de prova com 100 mm de diâmetro.

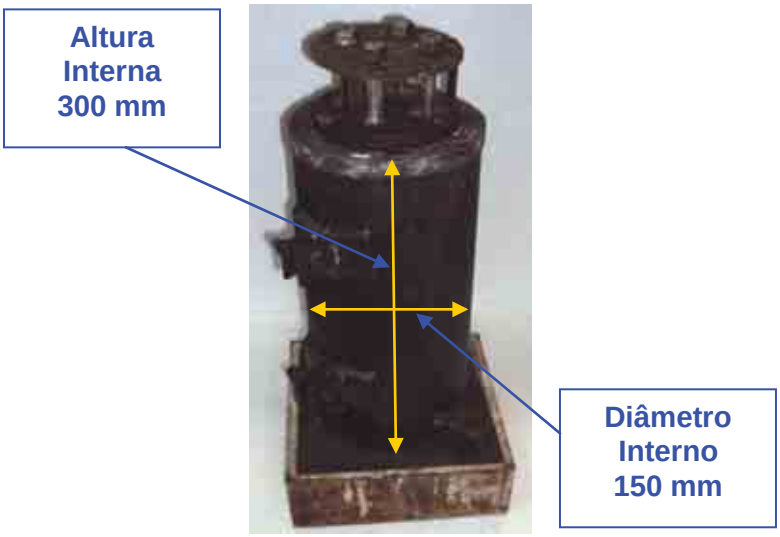


Figura III.33 – Molde para ensaio de interface com diâmetro de 150 mm

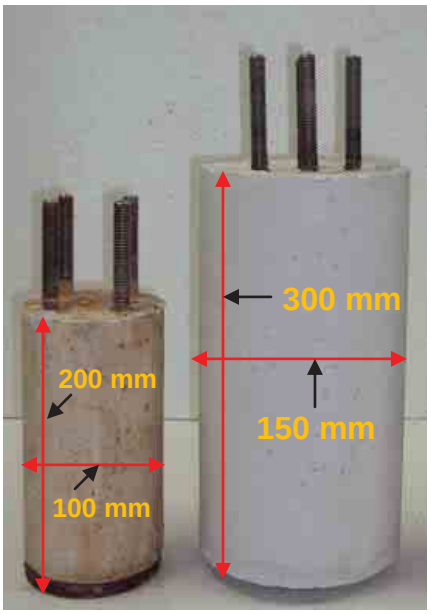


Figura III.34 – Corpos de Prova com diâmetros de 100 mm e 150 mm

As figuras III.35 e III.36 mostram as montagens experimentais realizadas com a prensa *Shimadzu*, modelo EH-F EM300K1-070-0A, utilizadas para o ensaio de aderência entre disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário em temperatura ambiente e a 210 °C, respectivamente.

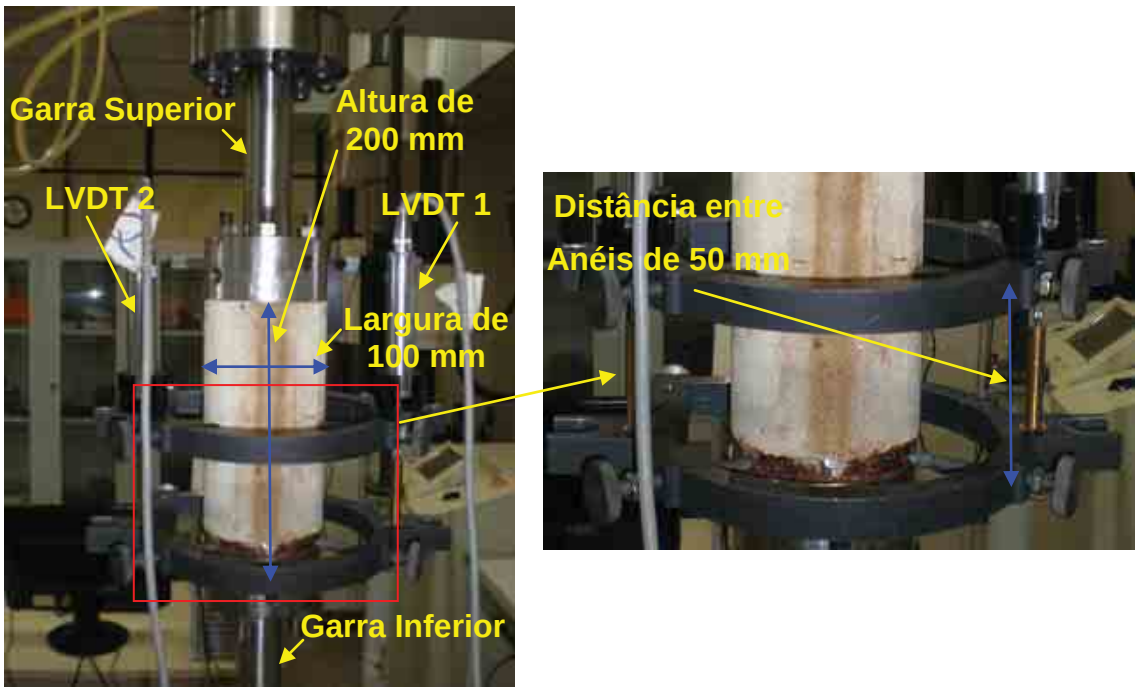


Figura III.35 – Montagem final para avaliar a interface disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário a frio

Através da figura III.35 é possível verificar que a montagem final utilizada foi dotada de dois LVDT´s presos a dois anéis com distância de separação de 50 mm posicionados com o objetivo de medir o deslocamento entre o disco de aço e o cilindro de concreto refratário.

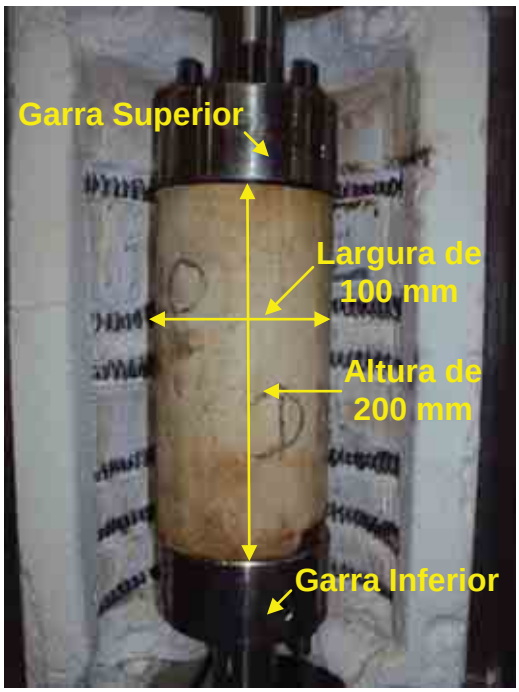


Figura III.36 – Montagem final para avaliar a interface disco de aço com e sem ancoragem e concreto refratário a quente

Inicialmente, o corpo de prova foi preso nas garras superior e inferior da montagem experimental em questão. Nesta etapa, é importante destacar que o procedimento teve que ser realizado com extremo cuidado para as amostras sem grampos de ancoragem, pois a interface formada entre o concreto refratário e os discos de aço é muito frágil rompendo-se facilmente apenas com esta operação. Foram perdidos muitos corpos de prova nesta operação até se adquirir a sensibilidade necessária para saber dosar a força necessária para a montagem sem a perda da amostra. Após a colocação do espécime na posição para realizar o ensaio a frio, foram fixados dois anéis em sua superfície, sendo um no disco de aço e outro, no bloco de concreto, com uma distância entre eles de 50 mm. Os testes foram realizados com o travessão avançando a uma velocidade de 0,3 mm/min, como mostrado na figura III.35. Para o ensaio a quente, não foram colocados estes anéis, devido à impossibilidade de se utilizar LVDT`s, conforme se observa na figura III.36, mas a velocidade de avanço do travessão foi a mesma que para os ensaios a frio.

Para aquisição dos dados experimentais, visualização e conversão dos dados obtidos, foram utilizados, respectivamente, os programas *GLUON TESTING* e *GLUON DATA PROCESSING* disponíveis na prensa *Shimadzu*.

O deslocamento medido para os ensaios a frio foi obtido pelo deslocamento do travessão e também através dos transdutores elétricos. Por meio destas medidas, foi obtido um fator de correlação entre os valores gerados pelo travessão e para os transdutores elétricos. Para os ensaios a quente, a medida do deslocamento foi apenas realizada com o travessão e se utilizou o fator de correlação obtido anteriormente para se obter os valores do deslocamento corrigido.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRATÁRIOS

IV.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados resultados das propriedades reológicas, mecânicas e físicas dos concretos refratários obtidas de ensaios feitos com amostras fibrosas ou não, a frio e a quente, cuja finalidade foi obter dados experimentais para alimentar modelos numéricos para avaliar a interface aço - concreto refratário.

IV.2 CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRATÁRIOS

IV.2.1 Propriedades Reológicas

IV.2.1.1 Ensaio de Reologia

Os resultados médios obtidos para os espalhamentos de composições formadas apenas da matriz, ou de compósitos, são apresentados na tabela IV.1. Verifica-se que, para o CR1.24, o espalhamento apresentou trabalhabilidade menor do que para o CR0. Na figura IV.1, observa-se o resultado de um espalhamento realizado para uma moldagem de CR0. Para ambas as misturas, a trabalhabilidade mostrou-se adequada para confecção das amostras por vibração, segundo normas do fabricante.

Tabela IV.1 – Índice de Espalhamento

Composição	***Espalhamento (mm)***
CR0	240
CR1.24	200



Figura IV.1 – Espalhamento para mistura CR0

IV.2.2 Propriedades Mecânicas

IV.2.2.1 Comportamento Tensão – Deformação na Compressão

Os resultados dos ensaios de compressão são apresentados para cinco diferentes situações, a saber: CR0 110 AMB, CR0 210 AMB, CR1.24 110 AMB, CR1.24 210 AMB e CR1.24 210 210. Cabe salientar que também foi estudado o concreto CR0 210 210; no entanto, os resultados obtidos foram inconsistentes. Os resultados para todas as amostras são apresentados no anexo no final deste trabalho.

Para as situações estudadas são apresentadas: uma tabela que contêm os valores para a resistência à compressão, deformação de pico (ε_{pico}), módulo de elasticidade (E) e tenacidade em KJ/m^2, curvas de tensão versus deformação comparativas para mostrar a influência do reforço fibroso e da temperatura de queima das amostras e de realização dos ensaios e, por fim, fotos mostrando o modo de fratura dos corpos de prova, após a realização dos ensaios. Para o concreto CR0 110 AMB, os corpos de prova ficaram esfacelados. Assim sendo, não foi apresentada foto das amostras após o ensaio como foi feito para as demais situações.

A seguir, é apresentada a tabela IV.2, que traz os resultados obtidos para a resistência à compressão, a deformação de pico e o módulo de elasticidade para cada uma das situações de estudo. São apresentados os valores médios obtidos seguidos entre parênteses do coeficiente de variação.

Tabela IV.2 – Resistência à compressão, ε_{pico}, E e tenacidade (média ± cv)

Concretos	Resistência à Compressão (MPa)	ε_{pico} (μS)	E (GPa)	Tenacidade (KJ/m^2)
CR0 110 AMB	58,9 (0,45)	3284 (2,47)	27,5 (2,13)	2,16 (5,34)
CR0 210 AMB	59,7 (5,48)	2835 (8,41)	29,2 (10,1)	2,21 (9,71)
CR1.24 110 AMB	60,8 (6,85)	3123 (3,76)	26,8 (6,40)	2,20 (24,3)
CR1.24 210 AMB	61,0 (7,30)	3489 (6,34)	28,3 (5,15)	2,34 (5,21)
CR1.24 210 210	60,6 (5,61)	2897 (5,44)	_____	_____

Observa-se que o reforço fibroso aumentou a resistência à compressão dos concretos quando comparados a sua matriz. Já para o módulo de elasticidade, ocorreu o inverso, pois a adição de fibras resultou em uma redução em seu valor, quando comparado aos resultados obtidos para amostras produzidas apenas com sua matriz.

O concreto refratário reforçado com 1,24% de fibras de aço, sujeito a 210 °C e ensaiado à temperatura ambiente (CR1.24 210 AMB), apresentou a mais alta

resistência média: 61,0 MPa (vide tabela IV.2). Isto representa um acréscimo de 2,18%, quando comparado ao CR0 210 AMB. Caso a comparação seja feita entre o CR1.24 110 AMB, cuja resistência máxima foi de 60,8 MPa e sua matriz, CR0 110 AMB, o acréscimo proporcionado pelas fibras na resistência foi de 3,23%. No entanto, utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à compressão não sofreu variações estatisticamente significativas com a adição de fibras. A figura IV.2 apresenta curvas tensão – deformação, em que se pode observar a influência do reforço fibroso mais facilmente. São feitas comparações de amostras submetidas sob as mesmas condições, diferindo apenas com respeito à adição de fibras.

A temperatura até 210°C não exerce influência significativa sobre o comportamento da resistência à compressão de concretos refratários. Quando comparados os resultados dos testes realizados para o CR0 110 AMB e o CR0 210 AMB, verifica-se uma diferença de apenas 1,35% entre os valores de resistência à compressão obtidos. Já os valores obtidos para os CR1.24 110 AMB, CR1.24 210 AMB e CR1.24 210 210 são, respectivamente, de 60,8 MPa, 61,0 MPa e 60,6 MPa, representando uma diferença máxima de 0,66%. No entanto, utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à compressão não sofreu variações estatisticamente significativas com a variação da temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos antes e após o ensaio.

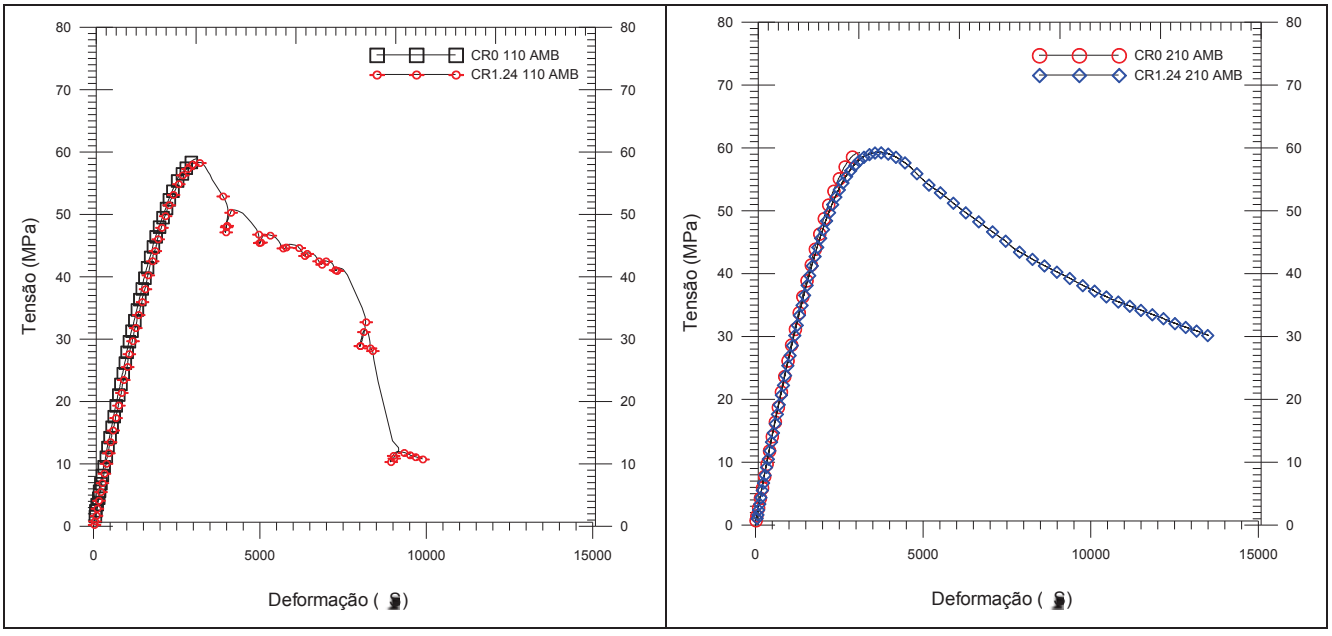


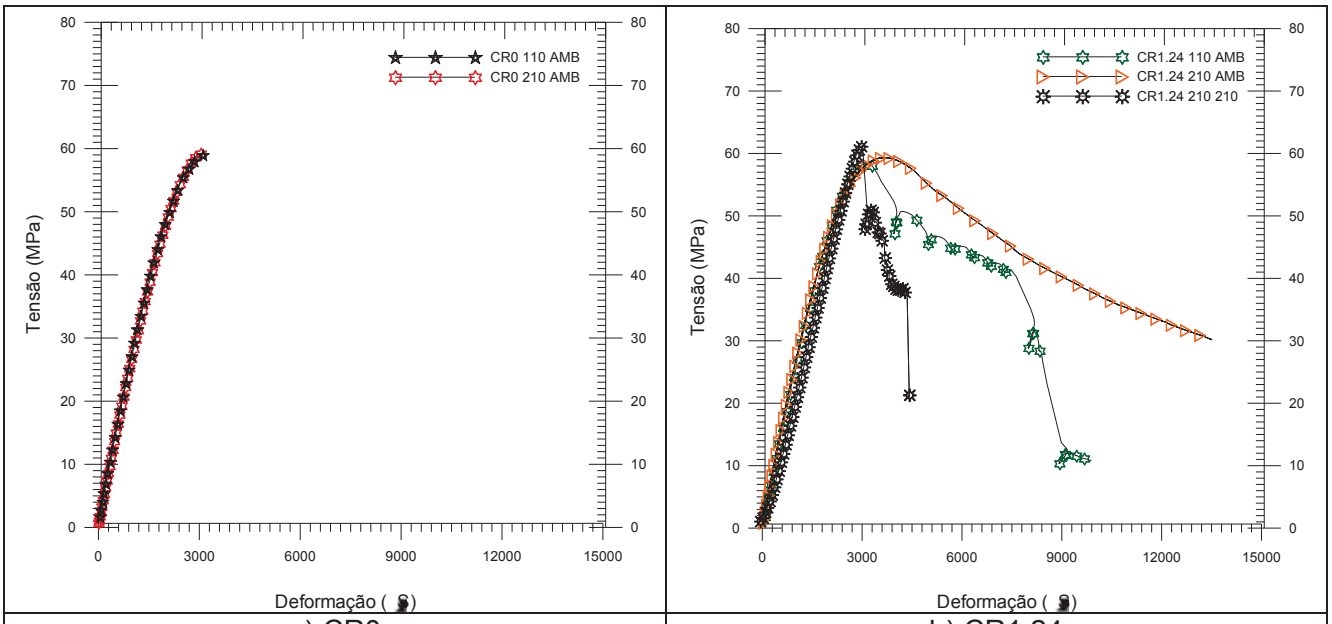
Figura IV.2 – Influência do reforço fibroso no comportamento σ x ε na compressão

Com relação ao módulo de elasticidade, o reforço de fibras de aço gerou um decréscimo de valor desta característica para todas as situações de ensaio. O CR0 210 AMB obteve o mais elevado módulo de elasticidade com o valor máximo médio de 29,2

GPa, representando, assim, um decréscimo de 3,08 %, sobre o módulo de elasticidade do CR1.24 210 AMB, sendo que ambos foram ensaiados à temperatura ambiente. Por fim, houve um decréscimo do módulo de elasticidade do CR0 110 AMB, que foi 27,5 GPa, para o do CR1.24 110 AMB, que foi de 26,8 GPa. Contudo, utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que o módulo de elasticidade não sofreu variações estatisticamente significativas com a variação de temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos antes e após o ensaio e com a adição de fibras.

Comparando os valores de tenacidade apresentados na tabela IV.2, utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a tenacidade não sofreu variações estatisticamente significativas com a adição de fibras e com a variação de temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos antes e após o ensaio. É importante salientar que a tenacidade foi calculada apenas para o deslocamento de 0,12 mm. Caso fosse feita uma comparação da tenacidade para amostras com fibras e sem fibras, ou mesmo para amostras com a mesma composição, mas que fossem submetidas a diferentes condições de temperatura em outros valores de deslocamento poderiam ser encontrados resultados diferentes dos que foram apresentados.

São apresentadas as figuras IV.3 a e b, que mostram curvas típicas para cada um dos casos de estudo realizados para o CR0 e o CR1.24, que facilitam a análise do efeito da temperatura.



a) CR0 b) CR1.24

Figura IV.3 – Resistência à compressão curvas típicas para CR0 e CR1.24



Figura IV.4 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR0 210 AMB

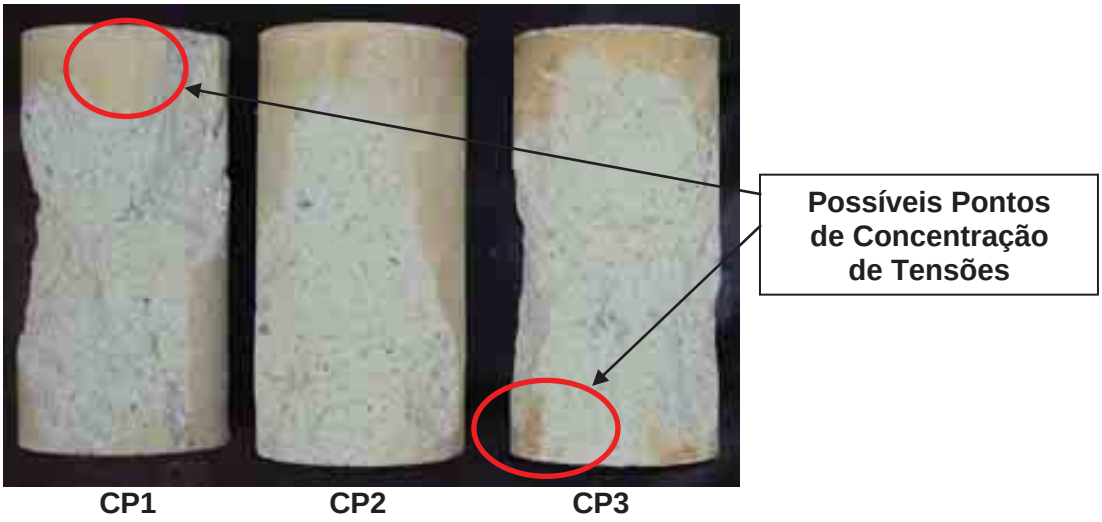


Figura IV.5 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR0 210 210

Através das figuras IV.4 e IV.5, observa-se o modo de fratura dos CP`s da mistura CR0. As amostras de CR0 210 210, cujos resultados foram excluídos por não terem sido satisfatórios, provavelmente sofreram concentração de tensões.



Figura IV.6 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 110 AMB



CP1 **CP2** **CP3** **CP4** **CP5**

Figura IV.7 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 210 AMB



CP1 **CP2** **CP3** **CP4** **CP5**

Figura IV.8 – Modo de fratura após ensaios de compressão dos CP´s CR1.24 210 210

É interessante observar a diferença entre o modo de fratura das amostras com reforço fibroso apresentadas nas figuras IV.6, IV.7 e IV.8 e as amostras sem reforço fibroso apresentadas na figura IV.4. Verifica-se que a adição de fibras proporcionou a geração de múltiplas fissuras, enquanto que as amostras sem fibras rompem de modo cisalhante ou colunar.

IV.2.2.2 Ensaio de Flexão

Os resultados dos ensaios de flexão são apresentados para seis diferentes situações, a saber: CR0 110 AMB, CR0 210 AMB, CR0 210 210, CR1.24 110 AMB, CR1.24 210 AMB e CR1.24 210 210. Os resultados para todas as amostras são apresentados no anexo no final deste trabalho.

Para as situações estudadas são apresentadas: uma tabela que contêm os valores para a resistência de primeira fissura, resistência na pós-fissuração e tenacidade, curvas de carga versus deslocamento comparativas para mostrar a

influência do reforço fibroso e da temperatura de queima das amostras e temperatura de realização do ensaio, e por fim fotos mostrando o modo de fratura dos corpos de prova após a realização dos ensaios. Para as amostras com fibras são apresentados os índices de tenacidade segundo a Norma Belga *NBN 15 238* [36].

A seguir, é apresentada a tabela IV.3, que traz os resultados para os ensaios à flexão com os dados obtidos para resistência de primeira fissura, resistência na pós-fissuração e tenacidade. São apresentados os valores médios obtidos seguidos entre parênteses do coeficiente de variação.

Tabela IV.3 – Resultados de flexão (média ± cv)

Formulação	Resistência de Primeira Fissura (MPa)	Resistência na Pós-Fissuração (MPa)	Tenacidade (KJ/m^2)
CR0 110 AMB	7,32 (8,94)	7,32 (8,94)	0,028 (23,3)
CR0 210 AMB	7,81 (4,38)	7,81 (4,38)	0,063 (13,2)
CR0 210 210	7,30 (5,73)	7,30 (5,73)	0,056 (24,3)
CR1.24 110 AMB	11,2 (8,46)	16,4 (7,07)	11,3 (20,0)
CR1.24 210 AMB	8,51 (4,12)	12,2 (7,01)	5,67 (7,64)
CR1.24 210 210	7,81 (10,7)	10,1 (8,33)	3,89 (21,1)

A figura IV.9 apresenta curvas típicas de carga versus deslocamento para ensaios à flexão que permite uma fácil visualização da influência do reforço fibroso para cada situação de ensaio.

Pode-se observar, dos resultados apresentados para os ensaios de quatro pontos para flexão, como se pode ver na tabela IV.3, que, para uma mesma temperatura, a adição de reforço fibroso aumentou a resistência e a tenacidade após a fissuração. Para compósitos secos a 110 °C, um incremento na resistência e na tenacidade, aproximadamente de 2,24 vezes e 404 vezes, respectivamente, foram observados quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras foram comparados com sua matriz e ensaiados à temperatura ambiente. Quando a temperatura de queima foi de 210 °C, com os ensaios realizados em temperatura ambiente, a resistência e a tenacidade na pós-fissuração cresceram, aproximadamente 1,56 vez e 90 vezes, quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras são comparados com sua matriz. Por fim, para os corpos de prova queimados à temperatura de 210 °C e ensaiados a esta mesma temperatura, ocorreu um incremento na resistência e na tenacidade, aproximadamente de 38,4 % e 69,5 vezes, respectivamente, quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras foram comparados com sua matriz.

Utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à flexão e a tenacidade sofreram variações estatisticamente significativas com a adição de reforço fibroso.

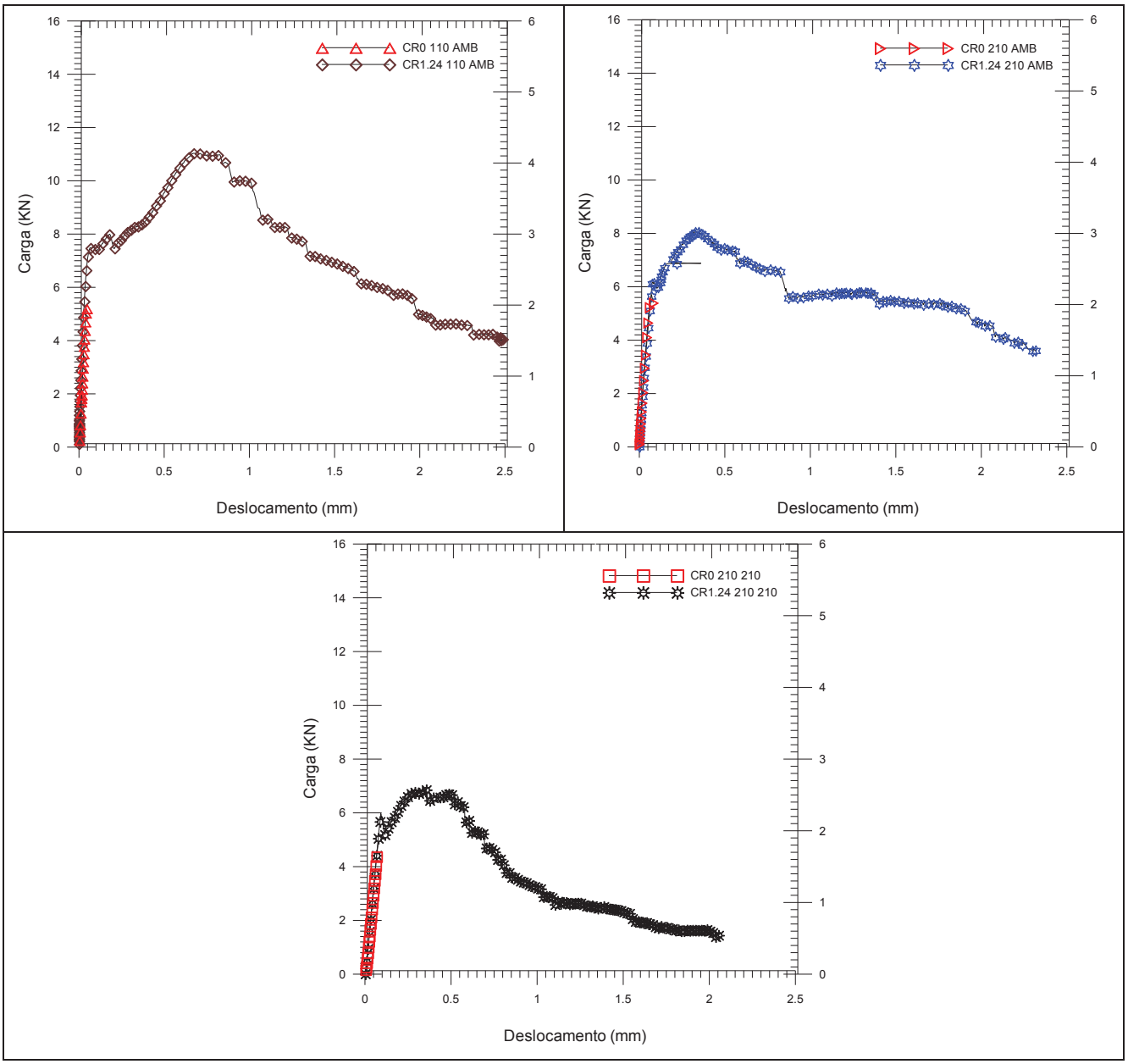
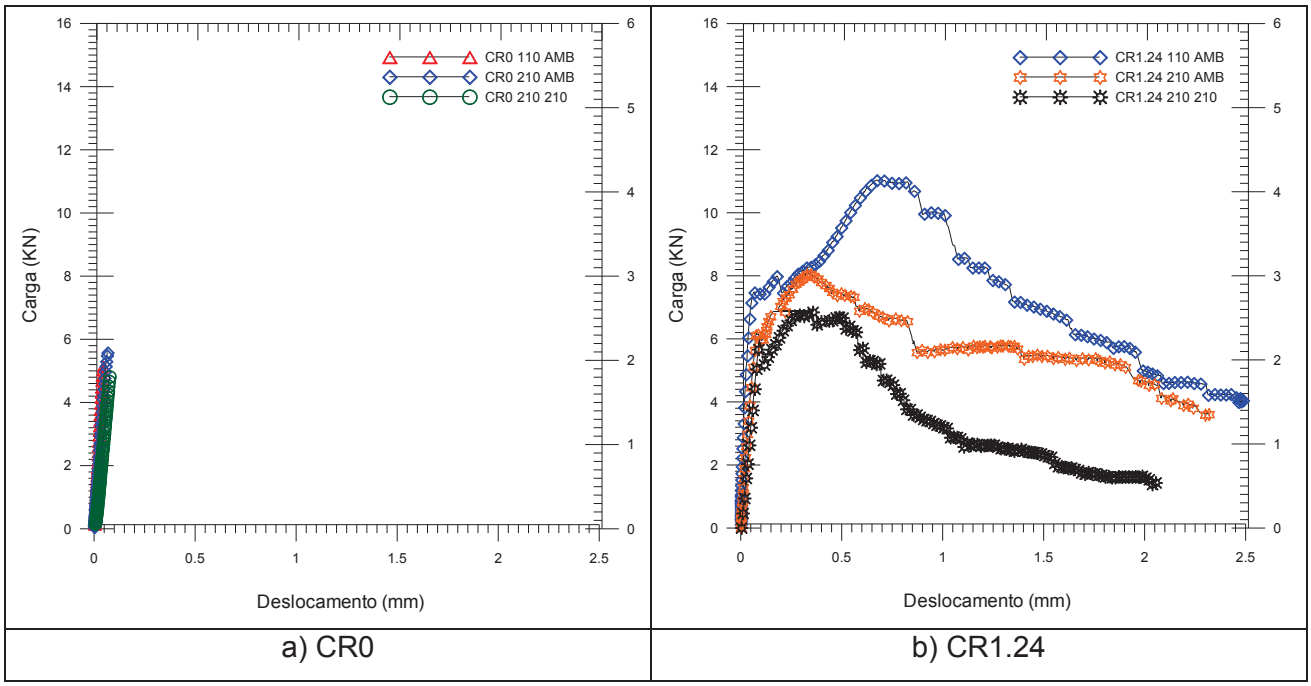


Figura IV.9 – Influência do reforço fibroso para a resistência à flexão

Já as curvas típicas carga versus deslocamento, apresentadas para CR0 e CR1.24, separadamente, nas figuras IV.10 a e b, possibilitam, de forma fácil, uma visualização do efeito da temperatura.



a) CR0 b) CR1.24

Figura IV.10 – Resistência à flexão - curvas típicas para CR0 e CR1.24

A variação da temperatura de secagem e queima e de execução de ensaio desempenham um importante papel nas resistências e na tenacidade na flexão em concretos refratários. Quando a temperatura de queima foi estabelecida em 210 °C, e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, foi observado um decréscimo na resistência, e na tenacidade para primeira fissura e na pós-fissuração. Por exemplo, compósitos reforçados com 1,24 % de fibras, queimados a 210 °C e ensaiados à temperatura ambiente (CR1.24 210 AMB), apresentam um decréscimo de 25,6 % na resistência de pós-fissuração e 49,8 % na tenacidade, quando comparados a outros secos a 110 °C e ensaiados à temperatura ambiente (CR1.24 110 AMB), reforçados com o mesmo volume de fibras. Quando a comparação é realizada com amostras queimadas e ensaiadas a 210 °C (CR1.24 210 210), o decréscimo é ainda mais severo como acontece para os compósitos reforçados com 1.24 %, de fibras que apresentam um decréscimo de 38,4 %, na resistência de pós-fissuração, e 65,6 % na tenacidade, quando comparados a outros secos a 110 °C reforçados com o mesmo volume de fibras (CR1.24 110 AMB). Novamente, este decréscimo na resistência e tenacidade a 210 °C, tanto para os ensaios realizados à temperatura ambiente como para aqueles realizados a 210 °C, indica uma possível degradação na matriz. Através dos dados apresentados na tabela IV.3, pode-se constatar também que a razão entre a resistência na pós-fissuração e a resistência de primeira fissura é quase a mesma para os ensaios realizados à temperatura ambiente com valores de 1,46 para o CR1.24 110 AMB e de 1,43 para o CR1.24 210 AMB. Contudo, ocorre um decréscimo deste valor para 1,29,

quando os ensaios são realizados a quente para o CR1.24 210 210. Utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à flexão e a tenacidade sofreram variações estatisticamente não significativas, com a variação da temperatura ao qual os corpos de prova da mistura CR0 foram submetidos antes e após o ensaio, e variações significativas com a variação da temperatura ao qual os corpos de prova da mistura CR1.24 foram submetidos antes e após o ensaio.

A seguir, serão apresentados índices de tenacidade, sob o formato de tabela e de gráfico, que são dados que complementam a informação fornecida pela tenacidade. Por meio desta, é possível conhecer a capacidade de absorção de energia de um determinado material. Com estes índices de tenacidade, pode-se avaliar o formato das curvas carga versus deslocamento. Estes índices são adimensionais e obtidos através da divisão dos valores de carga em um determinado deslocamento pela carga de primeira fissura. A tabela IV.4 apresenta valores médios e coeficientes de variação obtidos para os índices de tenacidade calculados a partir da Norma Belga *NBN B 15 238* [36] para as amostras com concreto refratário fibroso – CR1.24 110 AMB, CR1.24 210 AMB e CR1.24 210 210.

Tabela IV.4 – Índices de Tenacidade pela Norma Belga *NBN 15 238* (média ±cv)

	Índices de tenacidade para os concretos fibrosos		
Deslocamentos	CR1.24 110 AMB	CR1.24 210 AMB	CR1.24 210 210
0.25 mm	1,14 (10,7)	1,30 (10,7)	1,17 (15,9)
0.50 mm	1,38 (16,7)	1,40 (11,4)	1,17 (26,4)
0.75 mm	1,44 (12,5)	1,33 (14,0)	0,94 (31,8)
1.00 mm	1,34 (13,1)	1,20 (16,5)	0,78 (44,9)
1.25 mm	1,21 (22,2)	1,13 (12,1)	0,65 (53,9)
1.50 mm	1,03 (26,7)	1,05 (10,9)	0,55 (52,1)
1.75 mm	0,92 (24,0)	0,99 (9,2)	0,37 (59,9)

Os índices de tenacidade segundo a Norma Belga foram calculados para os deslocamentos de 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm, 1.25 mm, 1.50 mm e 1.75 mm. A tabela IV.4 apresenta os valores médios obtidos e seus respectivos coeficientes de variação. A figura IV.11 apresenta os mesmos dados da tabela IV.4, sob a forma de gráficos de barra, a fim de facilitar a análise e possibilitar algumas comparações.

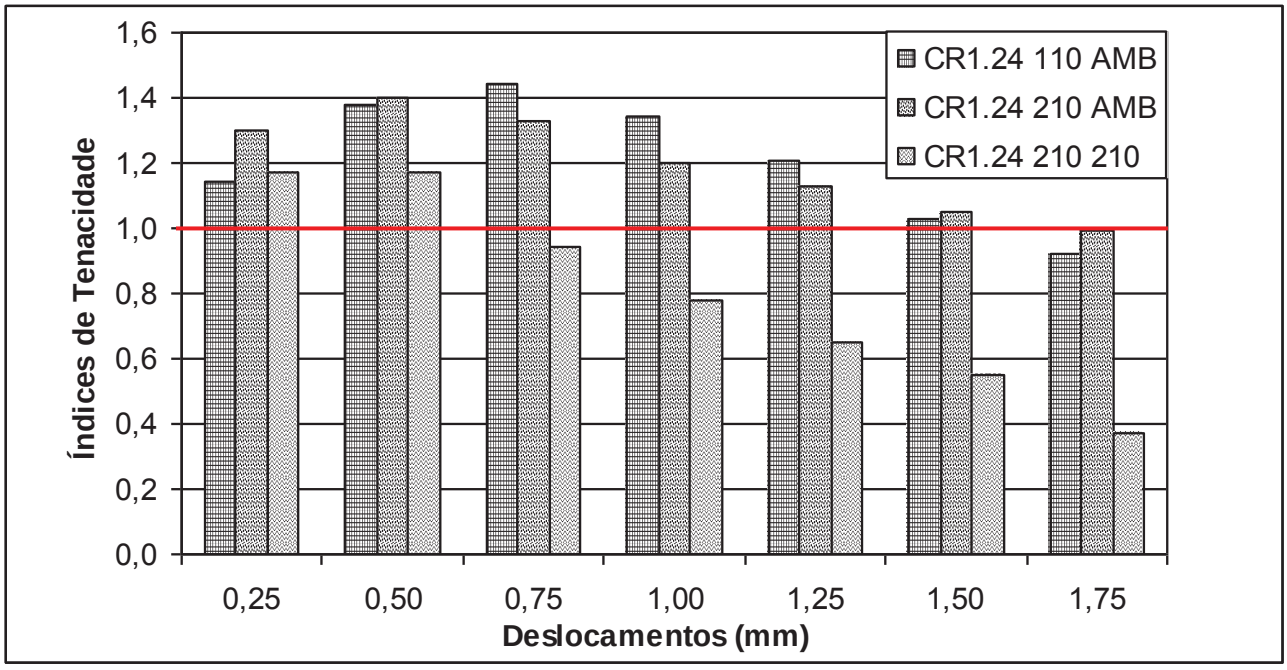


Figura IV.11 – Índices de Tenacidade segundo a Norma Belga *NBN 15 238*

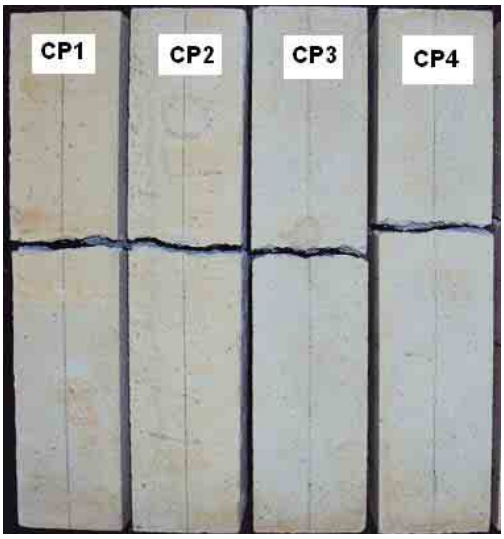
Pode-se, através destes índices adimensionais, obter o formato das curvas. Os corpos de prova de CR1.24 110 AMB e de CR1.24 210 AMB sofrem endurecimento nos trechos de 0,25 a 0,75 e 0,25 a 0,50, respectivamente.

A figura IV.11 indica um comportamento de amolecimento a partir de 0,75 mm para o concreto CR1.24 em todas as temperaturas ao qual foi queimado e ensaiado. É interessante observar também que o CR1.24 110 AMB e o CR1.24 210 AMB apresentaram uma maior capacidade de carga pós primeira fissura quando comparados ao CR1.24 210 210. Verifica-se, a partir dos dados mostrados na tabela IV.4 e figura IV.11, que o CR1.24 110 AMB e CR1.24 210 AMB apresentam nos deslocamentos 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm e 1,75 mm um amolecimento mais suave quando comparados ao CR1.24 210 210.

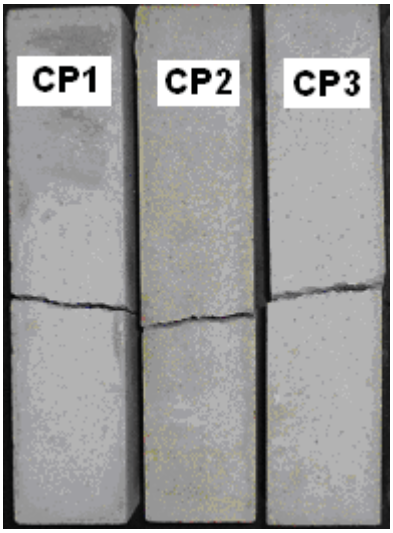
Conclui-se ainda que o concreto queimado e ensaiado à temperatura de 210 °C (CR1.24 210 210) apresentou um trecho muito pequeno de endurecimento diferindo desta forma em relação aos concretos CR1.24 110 AMB e CR1.24 210 AMB. Este comportamento divergente apresentado para o CR1.24 210 210 pode ter como causa um possível descolamento das fibras de aço no interior do concreto refratário fibroso quando submetido a 210° C. Este descolamento caso tenha ocorrido pode ter como causa a diferença dos coeficientes de dilatação térmica para estes materiais nesta temperatura.



CR0 110 AMB



CR0 210 AMB



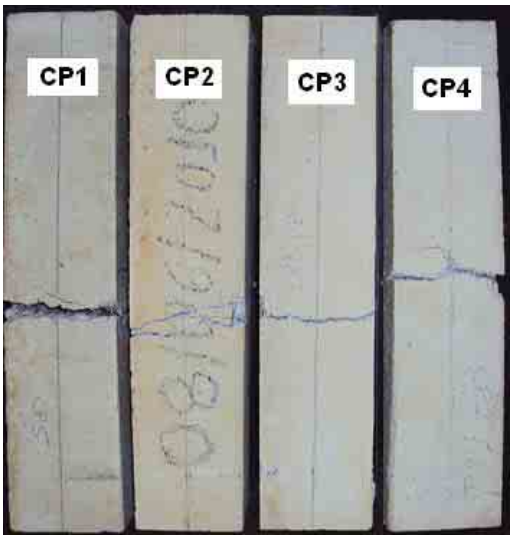
CR0 210 210

Figura IV.12 – Modo de ruptura após ensaios de flexão para os CP`s do CR0
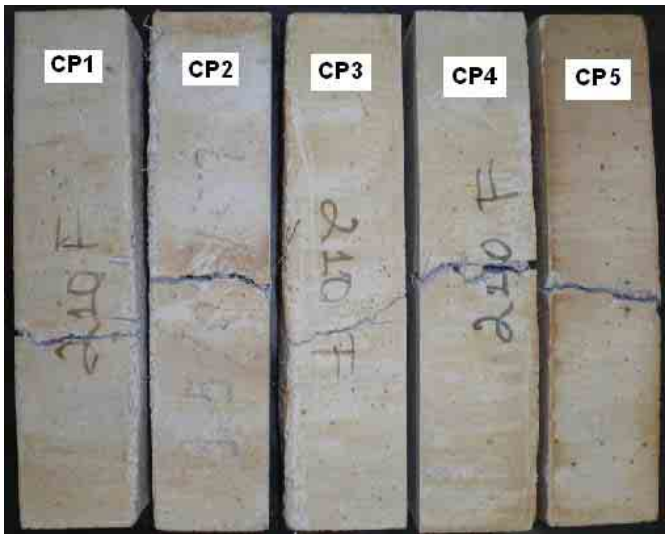
Nas figura IV.12, observa-se para as amostras do CR0, o modo de ruptura que é do tipo frágil com apenas uma fissura ao longo da seção transversal da amostra. Já para os corpos de prova do CR1.24, apresentadas nas figuras IV.13, ocorre uma modificação do modo de fratura devido à adição de fibras. Observa-se a formação de mais de uma fissura e também a costura realizada pelas fibras como é mostrado na figura IV.14. Com isso, verifica-se o ganho obtido na pós-fissuração com o uso de fibras.



CR1.24 110 AMB



CR1.24 210 AMB



CR1.24 210 210

Figura IV.13 – Modo de ruptura após ensaios de flexão para os CP`s do CR1.24

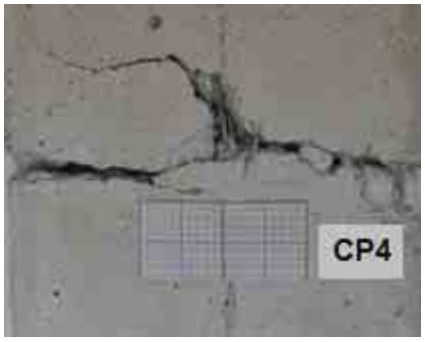


Figura IV.14 – Ampliação do modo de ruptura após ensaios de flexão para a amostra CP4 do concreto CR1.24 210 AMB

IV.2.2.3 Ensaio de Tração Direta

Os resultados dos ensaios de tração são apresentados para seis diferentes situações, a saber: CR0 110 AMB, CR0 210 AMB, CR0 210 210, CR1.24 110 AMB, CR1.24 210 AMB e CR1.24 210 210. Os resultados para todas as amostras são apresentados no anexo no final deste trabalho.

Para as situações estudadas são apresentadas: uma tabela com os valores para a resistência à tração, módulo de elasticidade e tenacidade, curvas tensão versus deformação comparativas para mostrar a influência do reforço fibroso e da temperatura de queima das amostras e temperatura de realização dos ensaios e, por fim, fotos mostrando o modo de fratura dos corpos de prova após a realização dos ensaios.

A seguir, é apresentada a tabela IV.5, com os valores obtidos para resistência à tração, deformação de pico (ε_{pico}), módulo de elasticidade (E) e tenacidade para cada uma das situações de estudo. São apresentados os valores médios obtidos seguidos entre parênteses do coeficiente de variação.

Tabela IV.5 – Valores de resistência à tração, ε_{pico}, E e tenacidade (média ± cv)

Concretos	Resistência à Tração (MPa)	ε_{pico} (μS)	E (GPa)	Tenacidade (KJ/m^2)
CR0 110 AMB	3,56 (5,25)	105 (6,74)	32,5 (3,23)	0,0025 (28,3)
CR0 210 AMB	3,51 (6,17)	140 (13,6)	23,0 (3,77)	0,0079 (5,01)
CR0 210 210	3,68 (4,90)	_____	_____	_____
CR1.24 110 AMB	4,81 (6,94)	129 (10,9)	32,5 (3,62)	0,0120 (15,1)
CR1.24 210 AMB	5,09 (14,9)	166 (14,2)	25,7 (15,0)	0,0053 (21,7)
CR1.24 210 210	3,87 (9,37)	_____	_____	_____

A figura IV.15 apresenta curvas típicas de tensão versus deformação para tração que permite fácil visualização para cada tipo de ensaio realizado. Observa-se, pela tabela IV.5, que para uma mesma temperatura o incremento de reforço fibroso aumentou a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Para compósitos secos a 110 °C (CR1.24 110 AMB), um incremento na resistência, aproximadamente de 35,1 %, foi observado quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras são comparados com sua matriz e ensaiados à temperatura ambiente (CR0 110 AMB). O módulo de elasticidade médio não sofreu variação de valor. Quando a temperatura de queima foi de 210 °C, e os ensaios realizados em temperatura ambiente (CR1.24 210 AMB), a resistência à tração e o módulo de elasticidade na pós-fissuração cresceram, aproximadamente 45,0 % e

11,7 %, respectivamente, quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras são comparados com sua matriz. Por fim, para as amostras queimados à temperatura de 210 °C, e ensaiadas a esta mesma temperatura (CR1.24 210 210), ocorreu um incremento na resistência e no módulo de elasticidade, aproximadamente de 5,16 % e 10,8 %, respectivamente, quando os compósitos reforçados por 1,24 % de fibras são comparados com sua matriz. Utilizando a análise ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à tração e módulo de elasticidade sofreram variações estatisticamente significativas com a adição de reforço fibroso com exceção para quando o módulo de elasticidade do CR1.24 110 AMB e CR0 110 AMB são comparados pois, para este caso, as variações são estatisticamente não significativas. Já a tenacidade, sofreu variações estatisticamente significativas com a adição de reforço fibroso, exceto quando comparados CR1.24 210 AMB e o CR0 210 AMB.

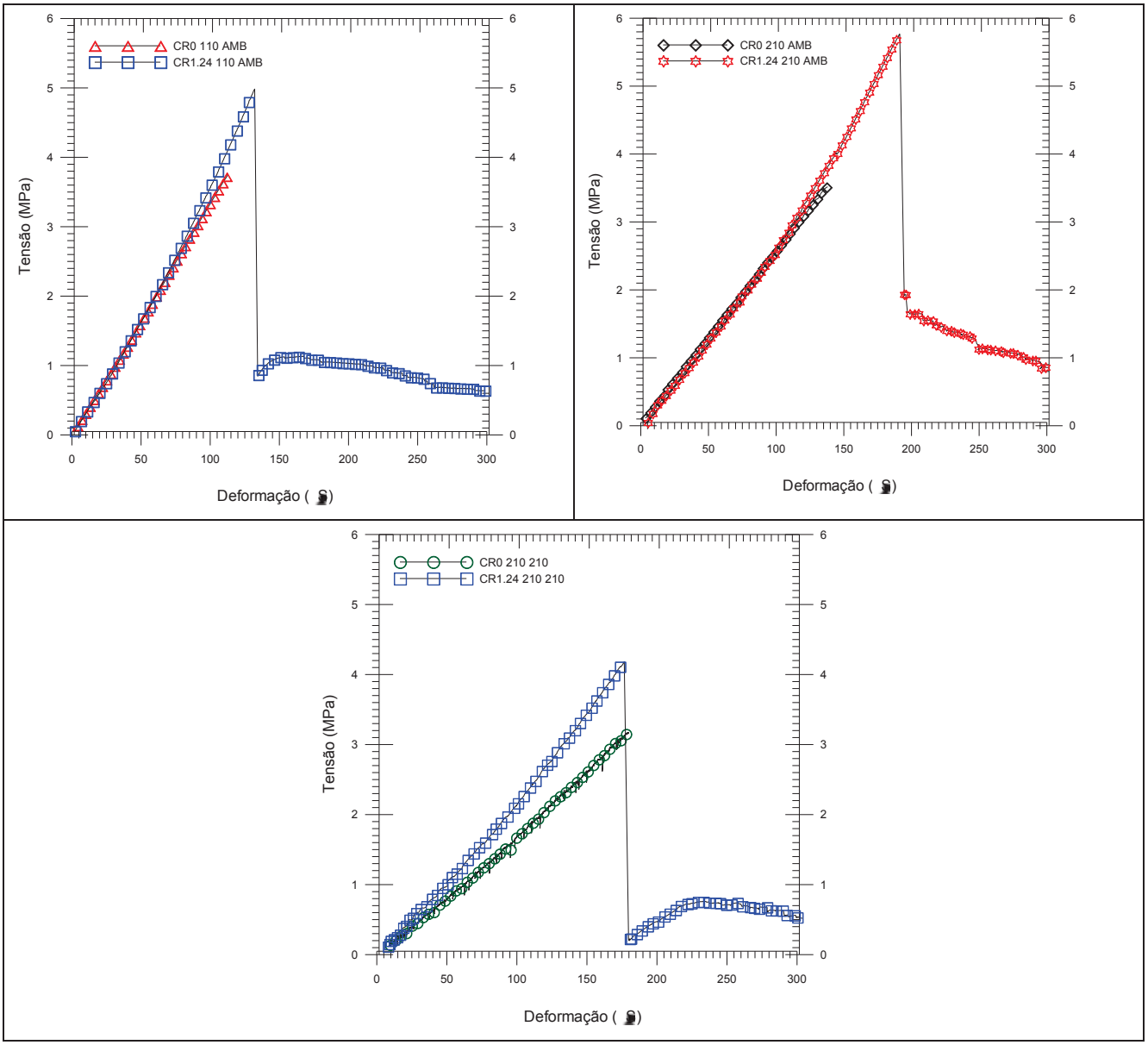
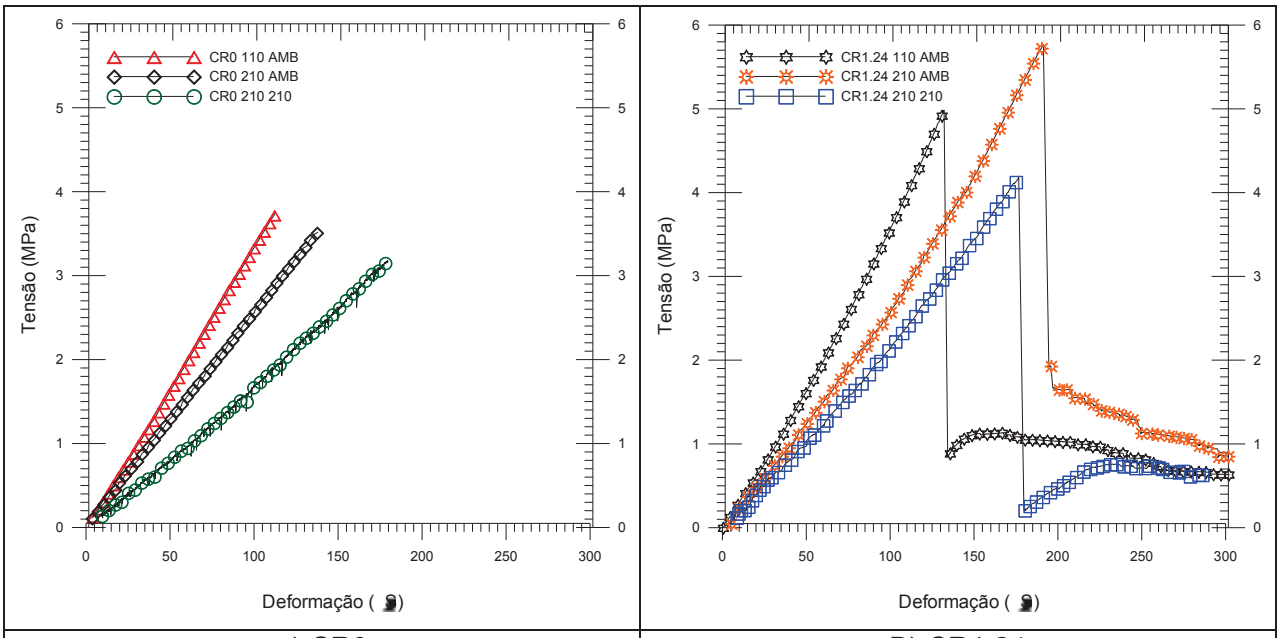


Figura IV.15 – Influência do reforço fibroso para a resistência à tração direta

São também apresentadas as figuras IV.16 a e b, que mostram os resultados obtidos para resistência à tração do CR0 e do CR1.24, sob todas as condições de ensaio. Estas curvas tensão versus deformação permitem verificar mais facilmente o efeito produzido pela variação na temperatura de secagem ou queima dos concretos refratários, bem como da temperatura em que o ensaio foi realizado.

Quando a análise é feita para uma mesma mistura, avaliando apenas o efeito da temperatura, observa-se, por exemplo, que para o concreto refratário com reforço fibroso de 1,24% em volume, a maior resistência média à tração direta é de 5,09 MPa, obtida quando as amostras são queimadas à temperatura de 210 °C e ensaiadas à temperatura ambiente (CR1.24 210 AMB). Para as amostras secas à temperatura de 110 °C, e ensaiadas à temperatura ambiente (CR1.24 110 AMB), observa-se um decréscimo de 5,50 %, e para as amostras queimadas à temperatura de 210 °C e ensaiadas também à temperatura de 210 °C (CR1.24 210 210), o decréscimo é de 24,0%, ambos em relação à maior resistência à tração observada. As amostras queimadas à temperatura de 210 °C e ensaiadas em temperatura ambiente (CR1.24 210 AMB) e de 210 °C (CR1.24 210 210) apresentam, respectivamente, decréscimo de 20,9% e de 33,5%, quando comparados ao maior módulo de elasticidade obtido. Utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a resistência à flexão não sofreu variações estatisticamente significativas com a alteração da temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos antes e após os ensaios, com exceção do concreto CR1.24 210 210, quando comparado ao concreto CR1.24 210 AMB. Para o módulo de elasticidade, suas variações são estatisticamente significativas com a mudança de temperatura sob os mesmos parâmetros da análise ANOVA. Por fim, realizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a tenacidade sofreu variações estatisticamente significativas com a alteração da temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos antes e após os ensaios.



a) CR0 B) CR1.24

Figura IV.16 – Curvas típicas para resistência à tração dos CR0 e CR1.24

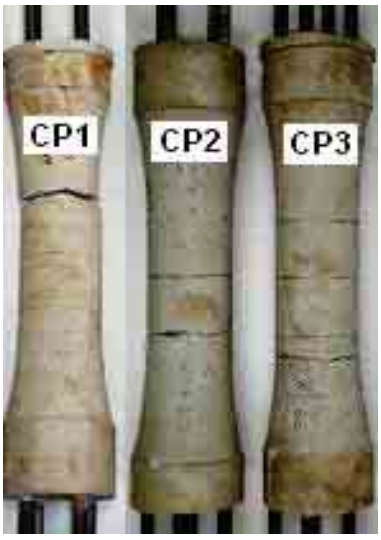
A tabela IV.6 apresenta os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade nos ensaios de tração juntamente com os dados obtidos para os ensaios de compressão, a fim de facilitar a comparação entre eles.

Tabela IV.6 – Módulos de elasticidade para tração e compressão (média ± cv)

Concretos	Módulo de Elasticidade para Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade para Compressão (GPa)
CR0 110 AMB	32,5 (3,23)	27,5 (2,13)
CR0 210 AMB	23,0 (3,77)	29,2 (10,1)
CR1.24 110 AMB	32,5 (3,62)	26,8 (6,40)
CR1.24 210 AMB	25,7 (15,0)	28,3 (5,15)

Realizando um comparativo dos valores médios da tabela IV.6, pode-se inferir que os módulos de elasticidade sob tração são 18,2% e 21,3% maiores que os obtidos sob compressão para as amostras de CR0 110 AMB e CR1.24 110 AMB, respectivamente. A adição de fibras não teve quase influência sobre os valores do módulo de elasticidade para a tração e compressão nestas condições de ensaio. Já para as amostras de CR0 210 AMB, o valor médio do módulo de elasticidade obtido para a compressão é 21,2% maior do que para a tração. Utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que os módulos de elasticidade à tração sob as mesmas condições de temperatura sofreram variações estatisticamente

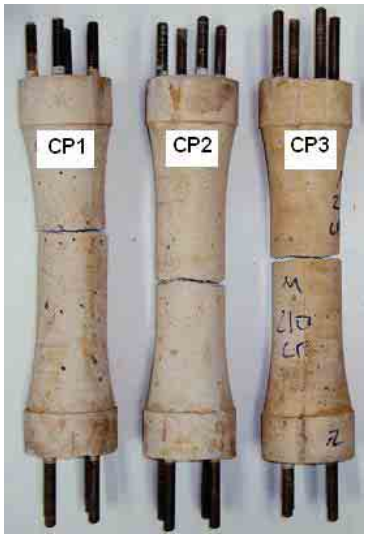
significativas quando comparados aos módulos de elasticidade à compressão com exceção do caso em que se compara os módulos de elasticidade sob compressão e tração para o concreto CR1.24 210 AMB.



CR0 110 AMB



CR0 210 AMB



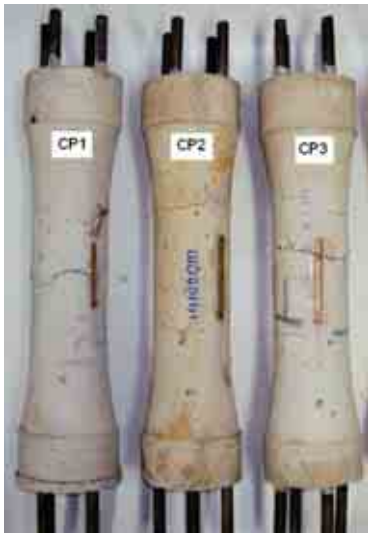
CR0 210 210

Figura IV.17 – Modo de ruptura após ensaios de tração para os CP`s do CR0

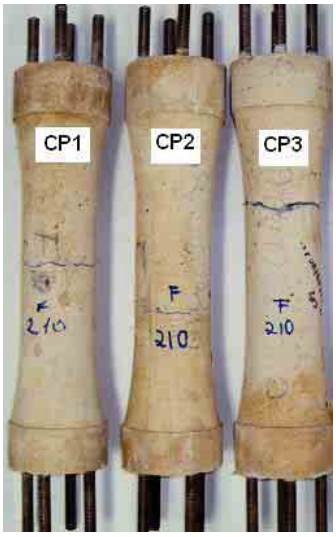
Das figuras IV.17, IV.18 e IV.19, pode-se verificar que o rompimento das amostras ocorreu na maioria das vezes no seu terço médio, mostrando, assim, a importância do formato do corpo de prova que tinha como intenção induzir o rompimento nesta região. Verifica-se que o modo de fratura para as amostras de CR0 apresentam uma única fissura no sentido transversal do corpo de prova. Já para os corpos de prova de CR1.24, o reforço fibroso proporcionou a formação de algumas fissuras, como pode-se verificar na figura IV.18.



CR1.24 110 AMB



CR1.24 210 AMB



CR1.24 210 210

Figura IV.18 – Modo de ruptura após ensaios de tração para os CP`s do CR 1.24



Figura IV.19 – Ampliação do modo de ruptura após ensaios de tração para a amostra CP3 do concreto CR1.24 210 AMB

IV.2.3 Propriedades Físicas

IV.2.3.1 Ensaio de Alongamento Durante o Aquecimento

Para possibilitar um melhor entendimento dos resultados obtidos foram construídas, separadamente, para cada uma das situações de ensaio curvas temperatura versus tempo para a evolução da temperatura do forno e temperatura da amostra e curvas de temperatura versus deslocamento para avaliar o alongamento durante o aquecimento das amostras.

Através das curvas de temperatura versus tempo para a evolução da temperatura do forno e temperatura da amostra, é possível verificar que a temperatura do forno sobe muito mais rapidamente que a da amostra, sendo necessário, portanto, aguardar que as duas temperaturas se igualem para realizar a medição do alongamento durante o aquecimento e, assim, com estes dados, calcula-se o coeficiente de dilatação linear média. Os resultados para todas as amostras são apresentados no anexo no final deste trabalho.

Já as curvas de temperatura da amostra versus deslocamento possibilitaram visualizar o alongamento durante o aquecimento das amostras quando submetidas a um determinado gradiente de temperatura (vide figura IV.20).

As curvas foram construídas com valores de deslocamento e temperatura obtidos a cada minuto de ensaio. Nos gráficos apresentados estão indicadas as temperaturas de 110 ºC e 210 ºC, em que se aguardou que as temperaturas se estabilizassem para realizar as medições finais para possibilitar o cálculo do coeficiente de dilatação térmico linear médio em cada uma dessas temperaturas.

Para facilitar a leitura dos gráficos e também a verificação dos cálculos realizados para o coeficiente de dilatação térmica linear médio são apresentados, após os gráficos produzidos para cada situação de ensaio, os valores para a variação de temperatura da amostra, deslocamento obtido e o coeficiente de dilatação térmica resultante para cada situação de ensaio.

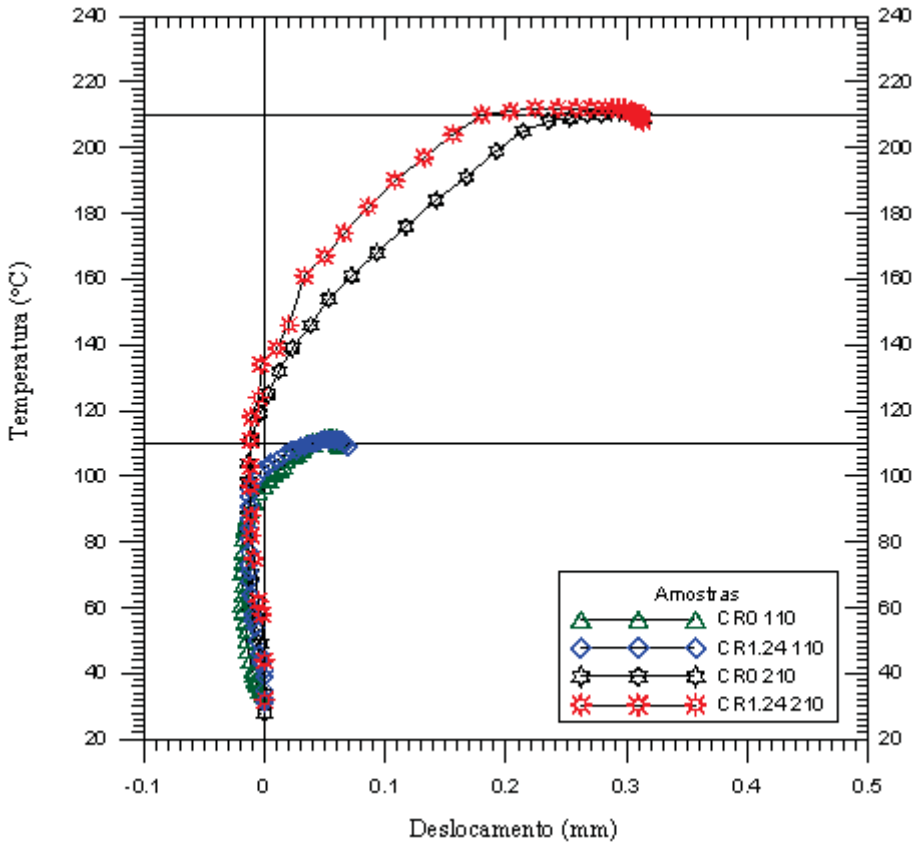


Figura IV.20 – Curvas típicas para temperatura da amostra versus alongamento

Tabela IV.7 – Valores de Δ de Temperatura da Amostra, Alongamento Máximo e α (média ± cv)

Formulação	Δ de Temperatura da Amostra	Alongamento Máximo (mm)	Coeficiente de Dilatação Térmica - α ($°C\ E10^{-6}$)
CR0 110 110	76 (3,32)	0,061 (12,1)	2,85 (13,0)
CR0 210 210	179 (2,32)	0,302 (4,40)	5,90 (3,02)
CR1.24 110 110	76 (3,41)	0,068 (11,3)	3,14 (14,0)
CR1.24 210 210	174 (3,42)	0,315 (7,71)	6,37 (8,48)

Dos dados obtidos, pode-se observar que a temperatura do forno evolui mais rapidamente do que a temperatura da amostra, sendo necessário aguardar um tempo aproximadamente de 15 minutos para que a amostra consiga alcançar a temperatura do forno. Após atingir a temperatura alvo, faz-se necessário, também, esperar aproximadamente mais alguns minutos até que a amostra obtenha seu máximo deslocamento. Para os ensaios apresentados, considerou-se estabilizada uma amostra que não variasse sua dimensão no tempo de dez minutos.

Utilizando a análise ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, com os resultados obtidos e apresentados na tabela IV.7 verificou-se que o alongamento máximo sofreu variações estatisticamente não significativas com a adição de reforço fibroso para as temperaturas de 110 ºC e 210 ºC.

Pode-se verificar que o deslocamento obtido para as amostras ensaiadas para a temperatura de 210 ºC é de 4,5 a 5 vezes maior do que para as amostras ensaiadas para a temperatura de 110 ºC. Como conseqüência, obtêm-se um valor de coeficiente de dilatação térmica médio cerca de 2 vezes maior para as temperaturas de 210 ºC em relação as amostras ensaiadas para a temperatura de 110 ºC.

IV.2.3.2 Ensaio de Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica

Os valores médios e os coeficientes de variação (em %) entre parênteses para a porosidade, absorção de água e massa específica obtidos para as amostras das misturas CR0 e CR1.24, são apresentados na tabela IV.8. Os resultados para todas as amostras são apresentados no anexo no final deste trabalho.

Tabela IV.8 – Resultados de porosidade, absorção de água e massa específica (média ± cv)

Formulação	Porosidade	Absorção de Água	Massa Específica (g/cm^3)
CR0 110 AMB	21,7 (3,42)	9,74 (3,98)	2,84 (0,54)
CR0 210 AMB	19,8 (0,15)	8,78 (0,13)	2,82 (0,20)
CR1.24 110 AMB	19,8 (1,72)	8,55 (2,00)	2,89 (0,35)
CR1.24 210 AMB	20,6 (2,83)	8,91 (2,92)	2,90 (0,87)

Utilizando a análise ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, com os resultados obtidos e apresentados na tabela IV.8, verificou-se que a porosidade sofreu

variações estatisticamente não-significativas, com a adição de reforço fibroso e variação de temperatura a que as amostras foram submetidas de 110 ºC e 210 ºC, com exceção quando comparadas às amostras de CR0 e quando submetidas a diferentes temperaturas, e das amostras de CR0 e CR1.24, ambas tendo sido submetidas à temperatura de 110 ºC.

Sob as mesmas condições de análise, verificou-se que a absorção de água sofreu variações estatisticamente não-significativas com a adição de reforço fibroso e variação de temperatura a que as amostras foram submetidas de 110 ºC e 210 ºC, com exceção quando comparadas às amostras de CR0 110 e CR0 210, CR0 110 e CR1.24 110 e também CR0 110 e CR 1.24 210.

Por fim, fazendo a análise ANOVA para a massa específica, verificou-se que esta sofreu variações estatisticamente significativas com a adição de reforço fibroso e variação de temperatura a que as amostras foram submetidas de 110 ºC e 210 ºC, com exceção quando comparadas às amostras de CR0 110 e CR0 210 e também CR1.24 110 e CR 1.24 210.

CAPÍTULO V

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INTERFACE

V.1 RESULTADOS PARA A INTERFACE SEM ANCORAGEM

Serão apresentados nesta seção os resultados dos ensaios de aderência realizados com as misturas CR0 e CR1.24 à temperatura ambiente e à temperatura de 210 ºC.

São apresentadas curvas carga versus deslocamento e uma tabela com os dados dos picos de carga e valores de tensão correspondentes obtidos para as amostras ensaiadas. Por fim, são apresentadas fotos do aspecto dos discos de aço após a execução dos ensaios. A figura V.1 apresenta os resultados obtidos para o DCR0 110 AMB a figura V.2 apresenta os resultados obtidos para o DCR1.24 110 AMB.

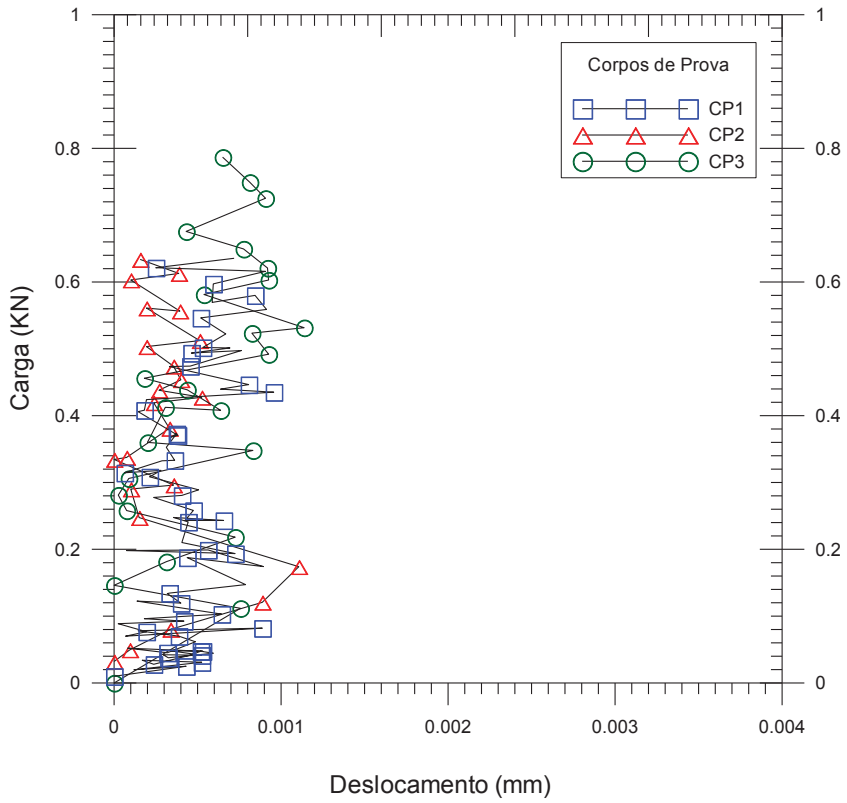


Figura V.1 – Curvas carga x deslocamento para DCR0 110 AMB

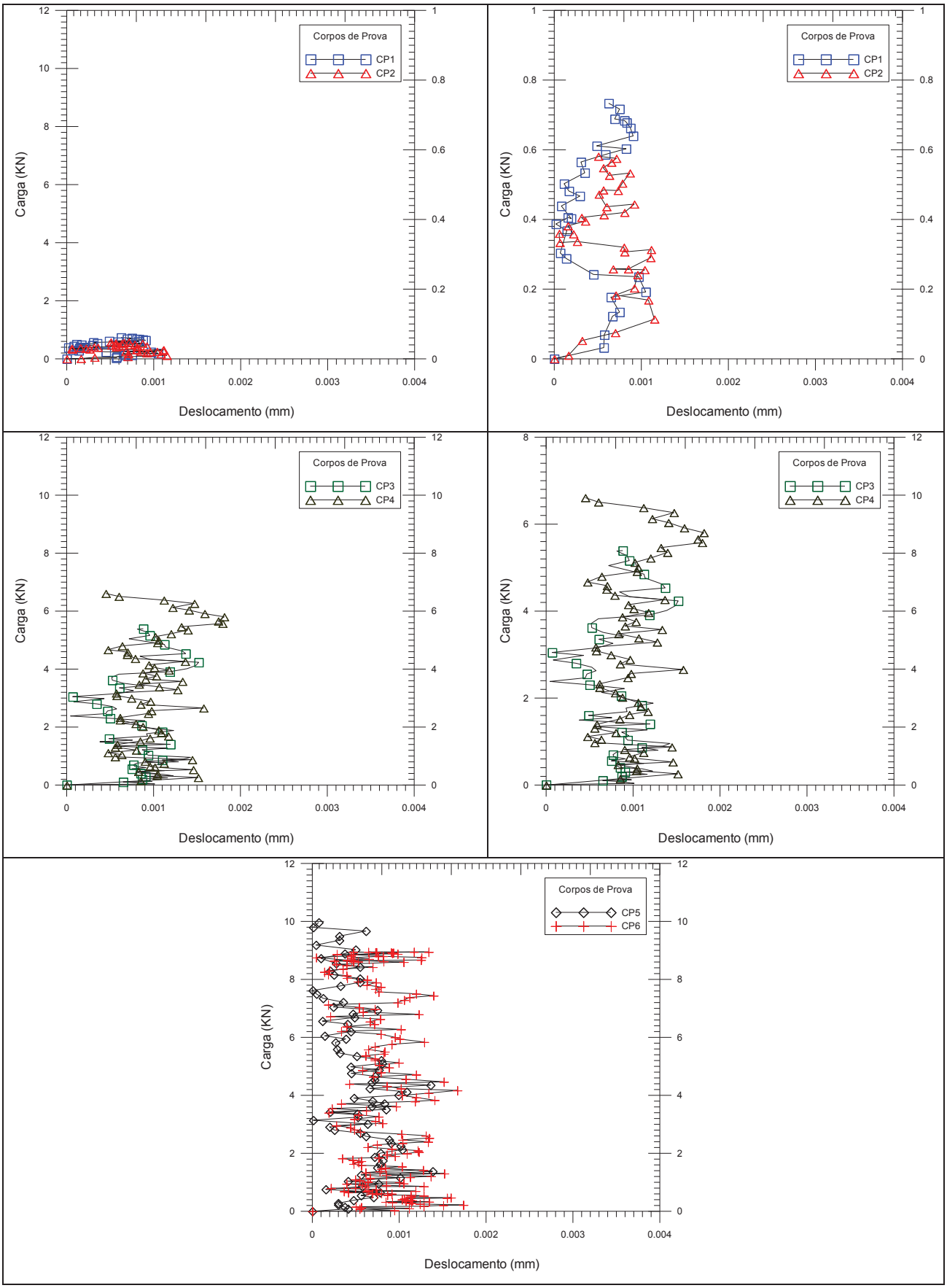


Figura V.2 – Curvas carga x deslocamento para DCR1.24 110 AMB

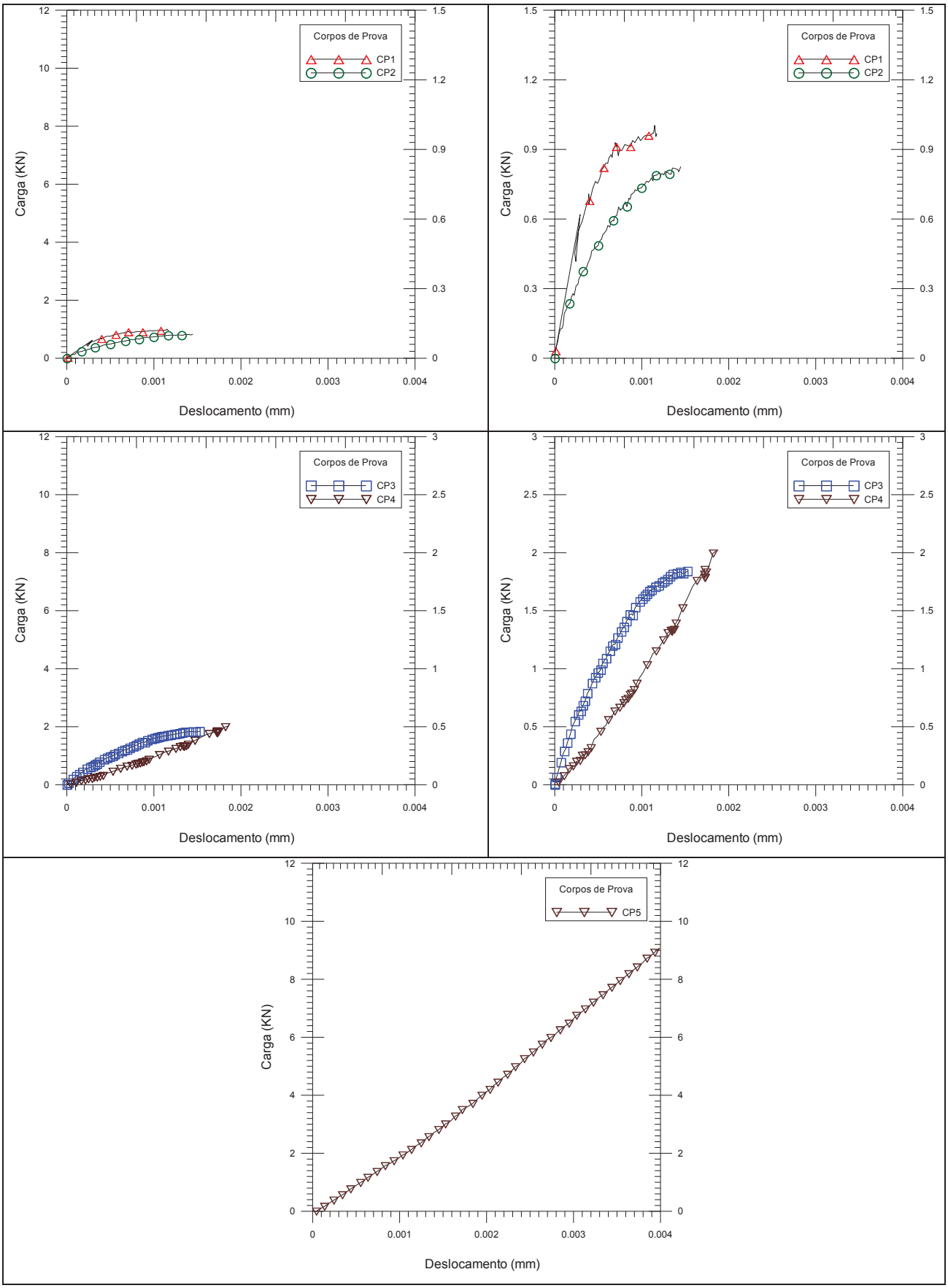


Figura V.3 – Curvas carga x deslocamento para DCR0 210 210

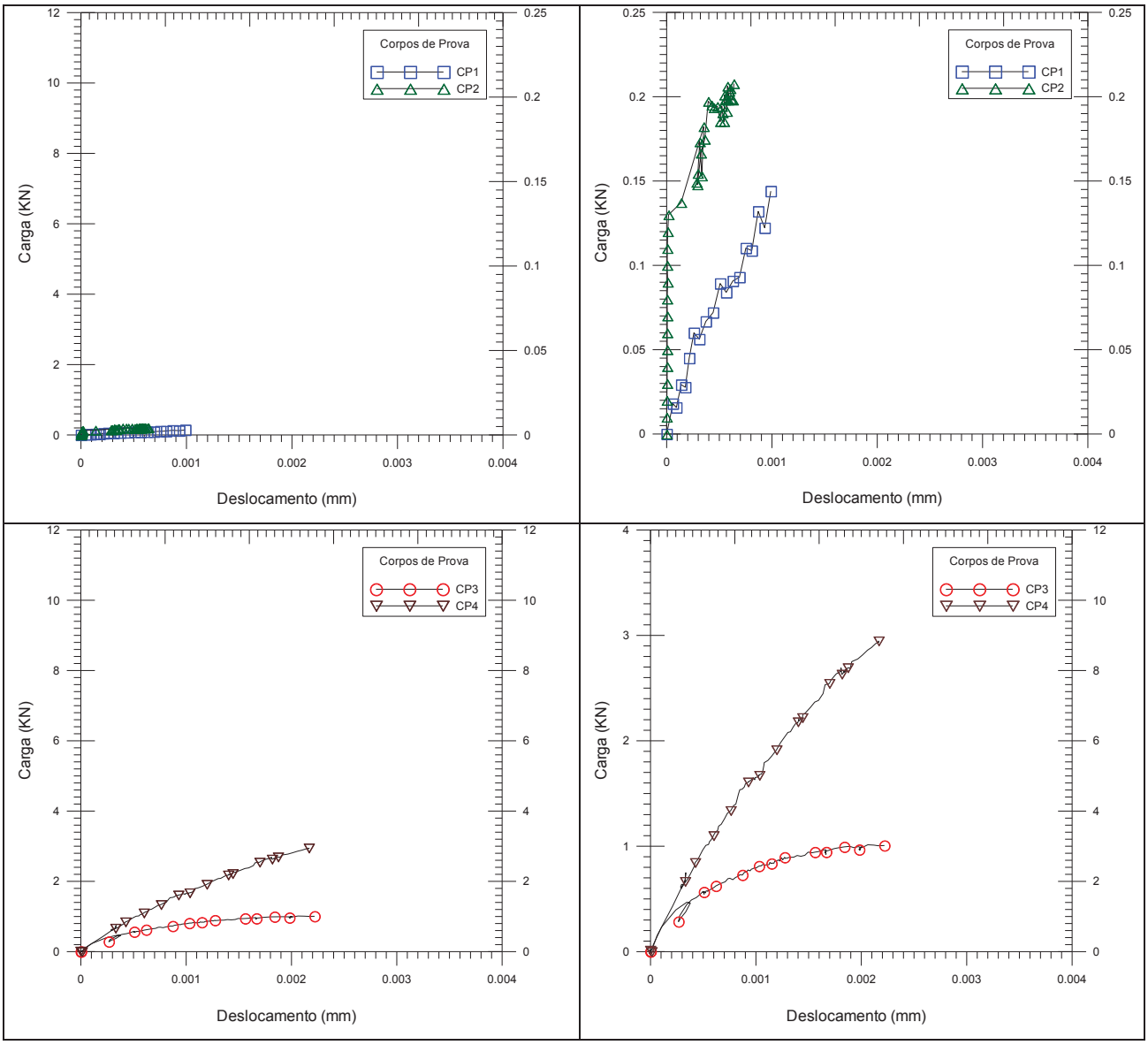


Figura V.4 – Curvas carga x deslocamento para DCR1.24 210 210

A tabela V.1 apresenta os valores de pico obtidos para carga e tensão para cada uma das situações de ensaio ao qual foram submetidas às amostras utilizadas para avaliar a interface entre o disco de aço e o concreto refratário sem grampo de ancoragem.

Tabela V.1 – Resultados para ensaios com corpos de prova para avaliar a interface aço e concreto refratário sem ancoragem (média e cv)

Corpos de Prova	Carga Máxima (KN)	Tensão Máxima no Concreto (MPa)
DCR0 110 AMB	0,69 (13,05)	0,09 (13,05)
DCR0 210 210	1,62 (33,61)	0,21 (33,61)
DCR1.24 110 AMB	5,35 (63,42)	0,68 (63,42)
DCR1.24 210 210	0,61 (92,74)	0,08 (92,74)

Através da tabela V.1, pode-se verificar que os resultados obtidos considerando todas as situações de estudo para avaliar a interface entre discos de aço e concreto refratário sem grampos de ancoragem apresentam uma grande dispersão. Devido a esta característica, para o cálculo da média e do coeficiente de variação, foram retirados os valores de carga maior e menor para todos os casos de estudo, com exceção do DCR0 110 AMB, que obteve valores com dispersão menor. A possível explicação que pode justificar esta variação abrupta de valores de carga está na regularidade da superfície do disco de aço. Assim sendo, para discos de aço de superfície mais rugosa, podem ser obtidos valores de carga maiores do que quando a superfície for lisa.

A situação em que pode se identificar de forma clara a grande dispersão de resultados foi para as amostras preparadas com fibras de aço e independente da temperatura. Já para as amostras com concreto refratário constituído apenas da matriz verifica-se que, para temperatura ambiente, todos os valores de carga obtidos foram abaixo de 1 KN.

Cabe ressaltar que os valores muito próximos de zero foram muito difíceis de serem medidos. A montagem das amostras teve que ser realizada com bastante cuidado, pois o disco de aço se soltava do cilindro de concreto com extrema facilidade.

Pode-se observar pelas curvas carga versus deslocamento que os valores para o deslocamento medido são da ordem de milésimos de milímetros.

Em suma, os corpos de prova nesta situação mostram de forma notória a necessidade de grampos de ancoragem a fim de possibilitar a aderência do concreto refratário ao costado de equipamentos onde os mesmos possam ser aplicados.

Será apresentada a seguir a figura V.5 com o aspecto dos discos de aço após a realização dos ensaios para cada uma das situações de estudo propostas.

		
DCR0 110 AMB – CP3	DCR1.24 110 AMB – CP1	DCR1.24 110 AMB – CP3
		
DCR1.24 110 AMB – CP5	DCR0 210 210 – CP1	DCR0 210 210 – CP4
		
DCR0 210 210 – CP5	DCR1.24 210 210 – CP1	DCR1.24 210 210 – CP4

Figura V.5 – Aspecto dos discos após ensaio para cada um dos casos estudados

Da figura V.5, observa-se que quanto maior a aderência do concreto à superfície metálica do disco, maior é a quantidade de partículas de concreto que ficam incrustadas no disco após o rompimento da interface. Provavelmente, estes foram os pontos de maior contato entre o disco de aço e o concreto refratário e após o rompimento da interface ficaram aderidas ao disco facilitando enxergar essa região. Desta forma, a observação do aspecto dos discos após o rompimento da interface pode indicar a ordem de grandeza que possuía a interface entre o concreto refratário e os discos de aço. Deve-se salientar que este parâmetro não é determinante, mas apenas um indicativo observado durante os ensaios.

A informação mais importante que pode ser extraída dos ensaios realizados com as amostras preparadas apenas com os discos de aço e os cilindros de concreto refratário sem ancoragem, é que o deslocamento da interface é praticamente nulo para esta situação, tendo em vista que o deslocamento para todos os testes realizados é praticamente zero. Assim sendo, pode-se concluir que, sem grampo de ancoragem, praticamente não existe influência da interface para as amostras constituídas de discos de aço e concreto refratário, quando submetidas à temperatura de 110 ºC e ensaiados em temperatura ambiente ou quando queimadas e ensaiadas à temperatura de 210 ºC.

V.2 RESULTADOS PARA A INTERFACE COM ANCORAGEM

Serão apresentados a seguir os resultados experimentais para os ensaios realizados para avaliar a interface entre o disco de aço com ancoragem e o concreto refratário.

É importante salientar que, para cada tipo de corpo de prova, são apresentados os resultados obtidos para quando o grampo trabalha corretamente, isto é, sem apresentar falha na solda entre o grampo e o disco de aço, e também são mostrados os casos onde a solda entre grampo e disco falha.

São apresentadas curvas carga versus deslocamento, fotos mostrando o estado dos corpos de prova e das ancoragens após os ensaios, e por fim, tabelas contendo os valores médios com seus respectivos coeficientes de variação para as cargas de decoesão (descolamento do disco de aço e concreto refratário) e cargas máximas obtidas durante os ensaios.

V.2.1 Resultados para GCR0 110 AMB

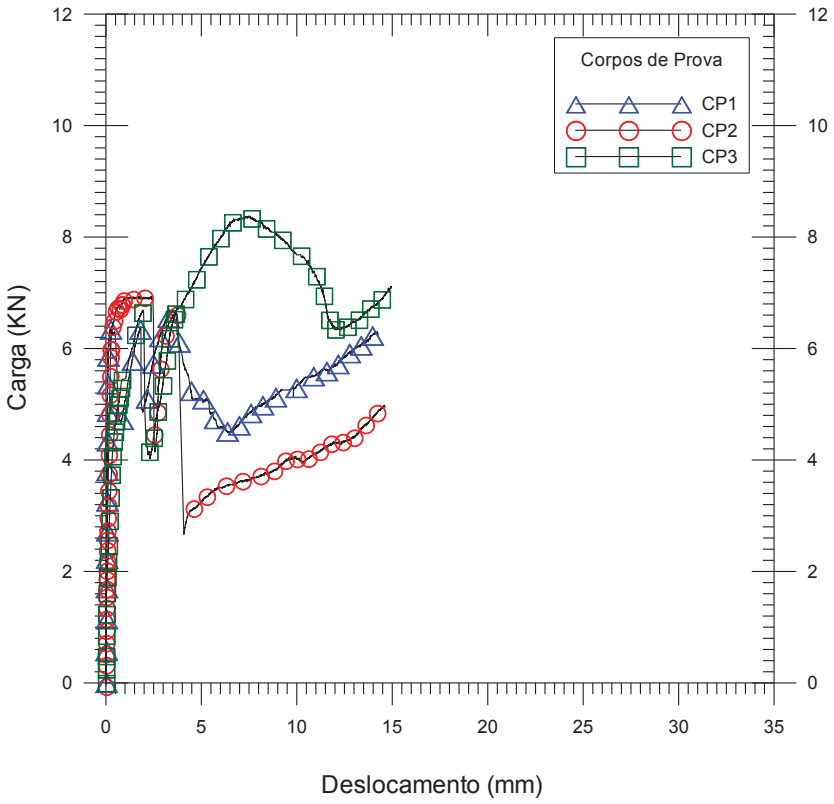


Figura V.6 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB



CP´s 1 e 2



CP 3

Resultado A



Ampliação CP's 1 e 2

Figura V.7 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB

Os resultados apresentados na figura V.6 têm como características mais significativas: o esticamento parcial do grampo, sem falha na solda, com o fraturamento do concreto refratário na região em torno do grampo de ancoragem. Na figura V.7, observa-se que para os dois corpos de prova apresentados uma das hastes do grampo de ancoragem permanece presa ao concreto. O deslocamento máximo onde ocorreu a ruptura das amostras com queda abrupta de carga e conseqüente desprendimento do grampo de ancoragem em uma de suas hastes foi em torno de 15 mm.

V.2.2 Amostras de GCR0 110 AMB com Falha na Solda

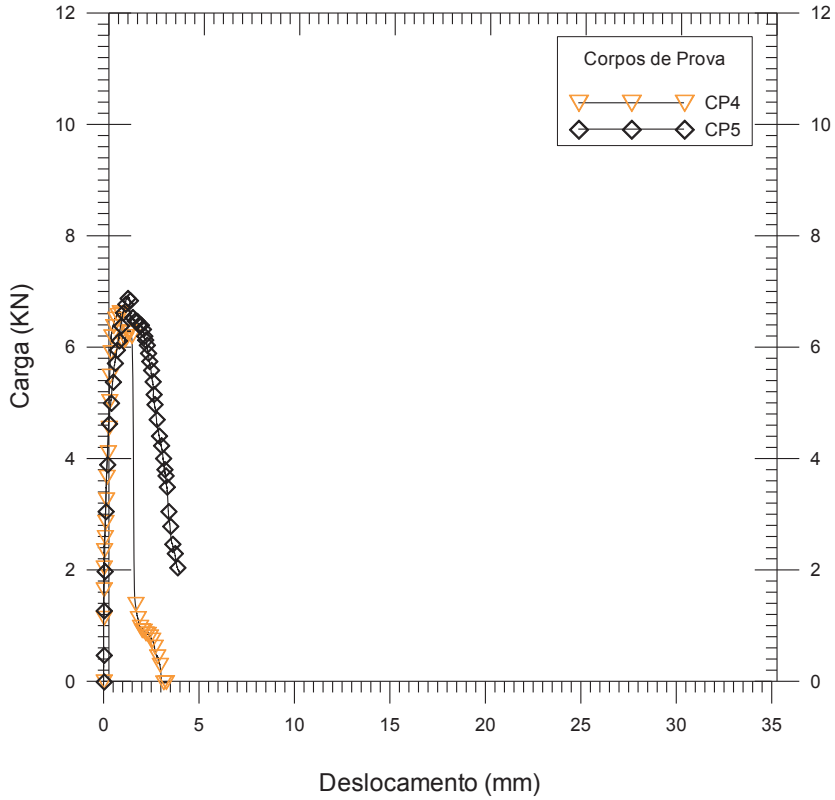


Figura V.8 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB com falha na solda



CP4	CP5	Ampliação CP4
Resultado Tipo B		

Figura V.9 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB com falha na solda

Para o GCR0 110 AMB, foram ensaiados corpos de prova que apresentaram falha na solda, cuja característica mais significativa é o fato do grampo não ter sido mobilizado. Na figura V.9, pode ser observado corpo de prova que falhou na solda. A falha ocorreu em torno de 3,5 mm de deslocamento do travessão com queda abrupta da carga, conforme se observa na figura V.8.

V.2.3 Resultados para GCR1.24 110 AMB

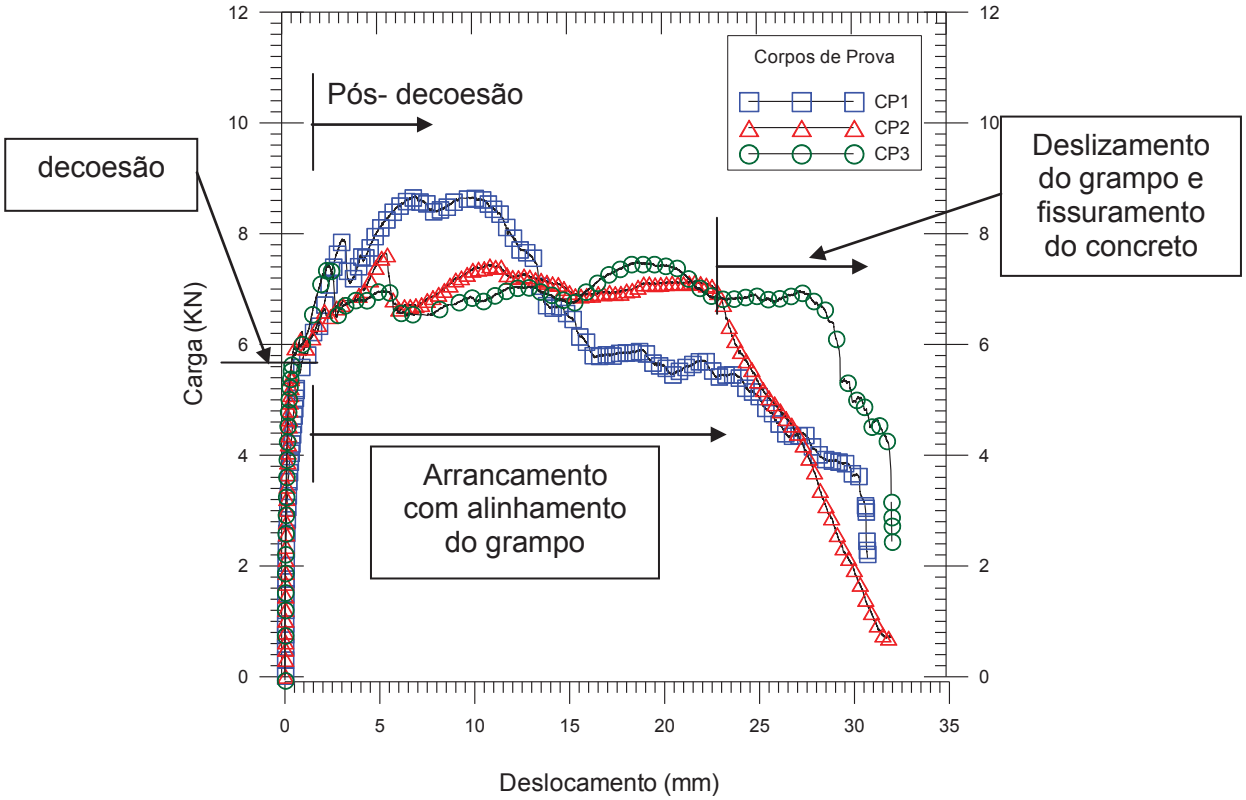


Figura V.10 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB



Figura V.11 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB

As amostras ensaiadas tiveram como principal característica um esticamento muito grande do grampo sem descolamento completo do interior do concreto refratário como se observa na figura V.11. Na figura V.10, verifica-se que o deslocamento

máximo até a carga cair até valores em torno de 2 KN ou menores foi de 30 a 35 mm. Além disso, deve-se ressaltar que o reforço fibroso proporcionou um incremento de energia significativo, uma vez que não ocorreu rompimento do concreto e com isso foi possível um maior aproveitamento da adesão proporcionada pelo grampo de ancoragem. Na figura V.11, também são indicados os fenômenos que surgem durante o ensaio realizado para o GCR1.24 110 AMB e as respectivas regiões onde ocorrem.

V.2.4 Amostras para GCR1.24 110 AMB com Falha na Solda

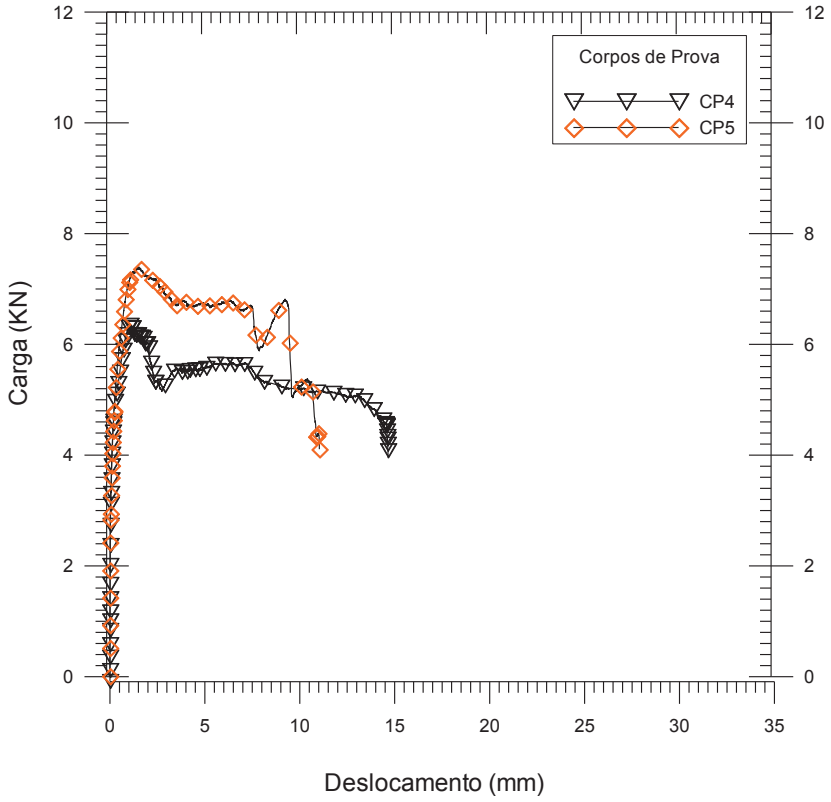


Figura V.12 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB com falha na solda



Figura V.13 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB com falha na solda

As amostras que falharam na solda apresentam um esticamento parcial do grampo como se verifica na figura V.13. Observa-se, também, que o grampo foi extraído do cilindro de concreto e colado novamente ao disco, para se ter uma idéia da sua forma final após ensaio. O deslocamento máximo até a carga cair abruptamente variou de 11 a 14,5 mm, segundo as curvas carga versus deslocamento da figura V.12.

V.2.5 Resultados para GCR0 210 210

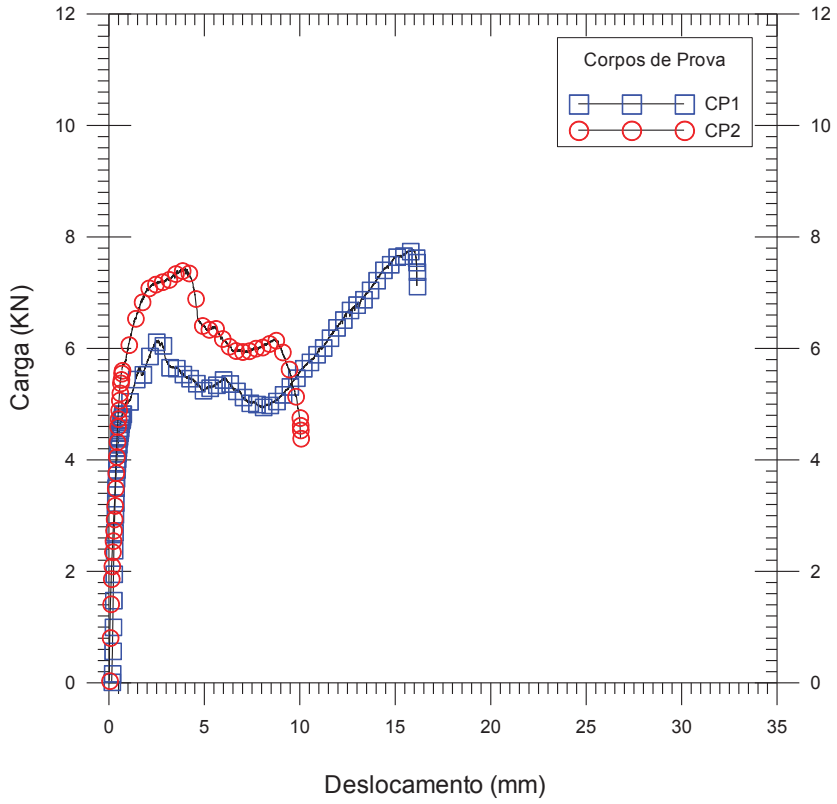
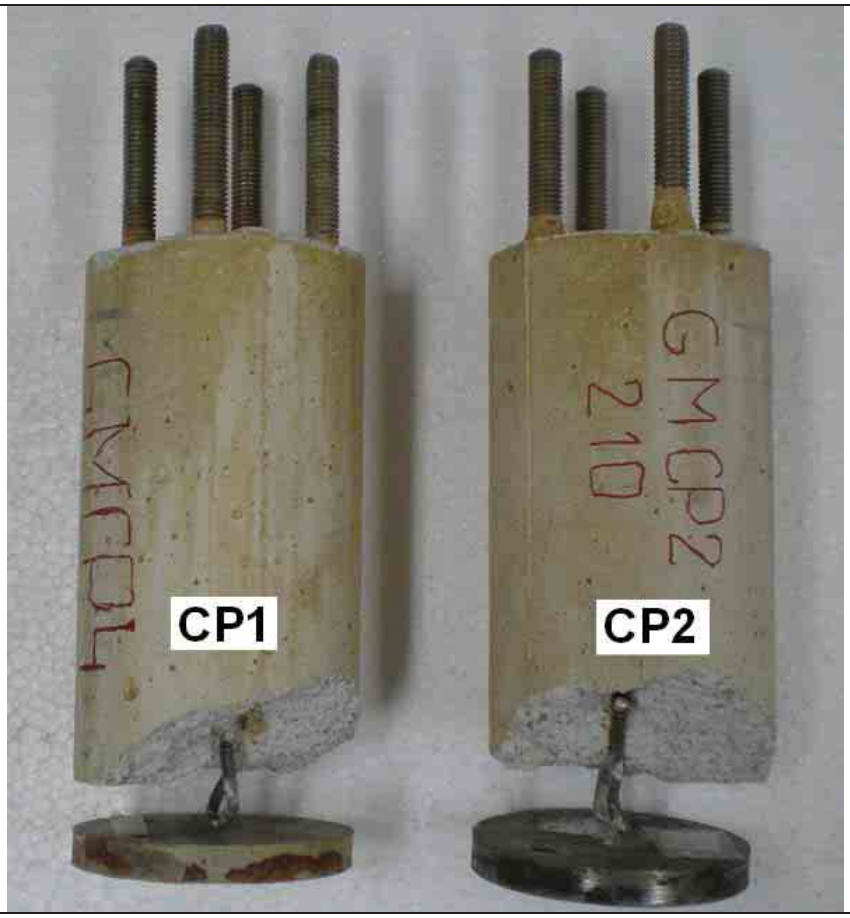


Figura V.14 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210



CP1 e CP2



Ampliação CP1



Ampliação CP2

Figura V.15 – Corpo de prova após ensaio para GCR0 210 210

As amostras de GCR0 210 210 tiveram um comportamento similar ao observado para as amostras de GCR0 110 AMB. As características mais significativas foram o esticamento parcial do grampo, sem rompimento na solda, com o fraturamento do concreto refratário na região em torno do grampo de ancoragem. Na figura V.15, observa-se que para os dois corpos de prova apresentados, uma das hastes do

grampo de ancoragem ainda permaneceu presa ao concreto. O deslocamento máximo onde ocorreu a ruptura das amostras e conseqüente desprendimento do grampo de ancoragem em uma de suas hastes foi em torno do intervalo de 10 a 16 mm de deslocamento do travessão, como se verifica na curva carga versus deslocamento apresentada na figura V.14.

V.2.6 Amostras para GCR0 210 210 com Falha na Solda

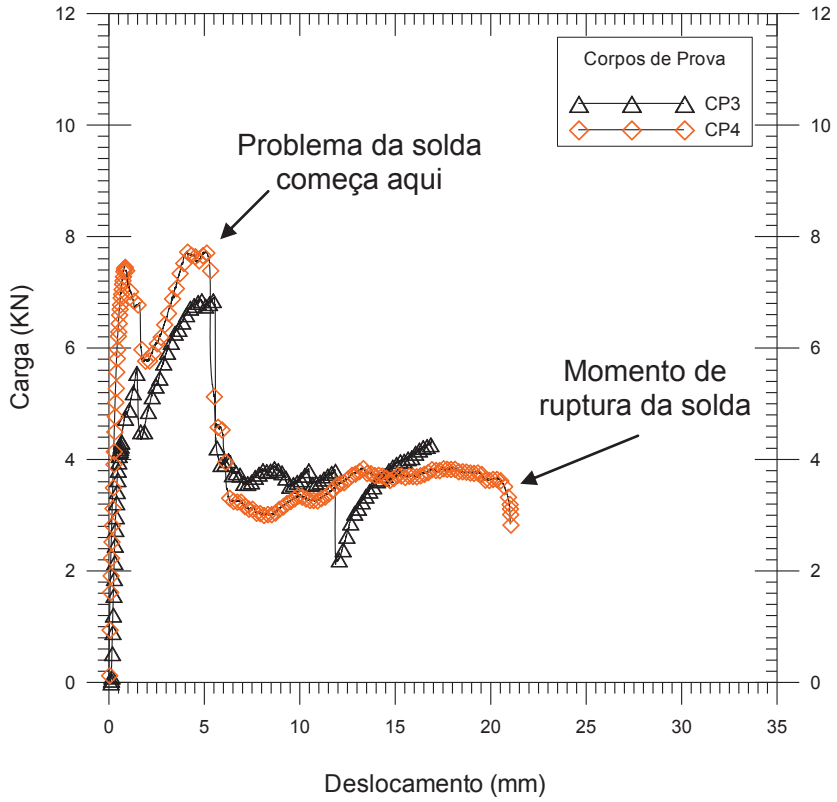


Figura V.16 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda

Os corpos de prova do GCR0 210 210 que falharam na solda são mostrados na figura V.17 e apresentam deslocamento máximo em torno de 21 mm, como se verifica na figura V.16. Além disso, são também mostrados na figura V.16 o momento em que se inicia o problema da solda e onde ocorre sua ruptura.



Figura V.17 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 210 210 com falha na solda

V.2.7 Amostras para GCR0 210 210 com Falha na Solda e Grande Esticamento

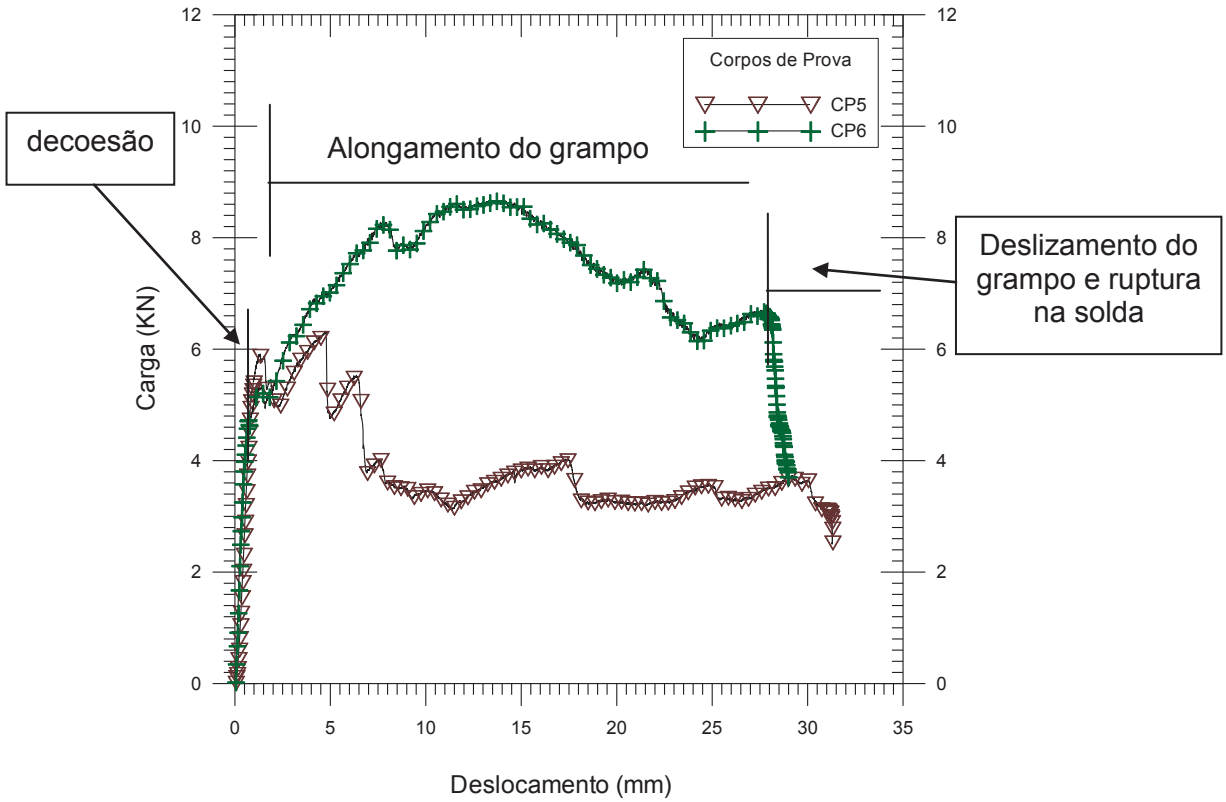


Figura V.18 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado







CP5 e CP6	Ampliação CP5	Ampliação CP6

Figura V.19 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 210 210 que falham na solda com esticamento prolongado

As amostras apresentadas na figura V.19 possuem um grande esticamento do grampo com falha na solda para um deslocamento de 30 mm, conforme figura V.18, valor este superior aos demais resultados obtidos quando ocorre falha na solda.

V.2.8 Resultados para GCR1.24 210 210

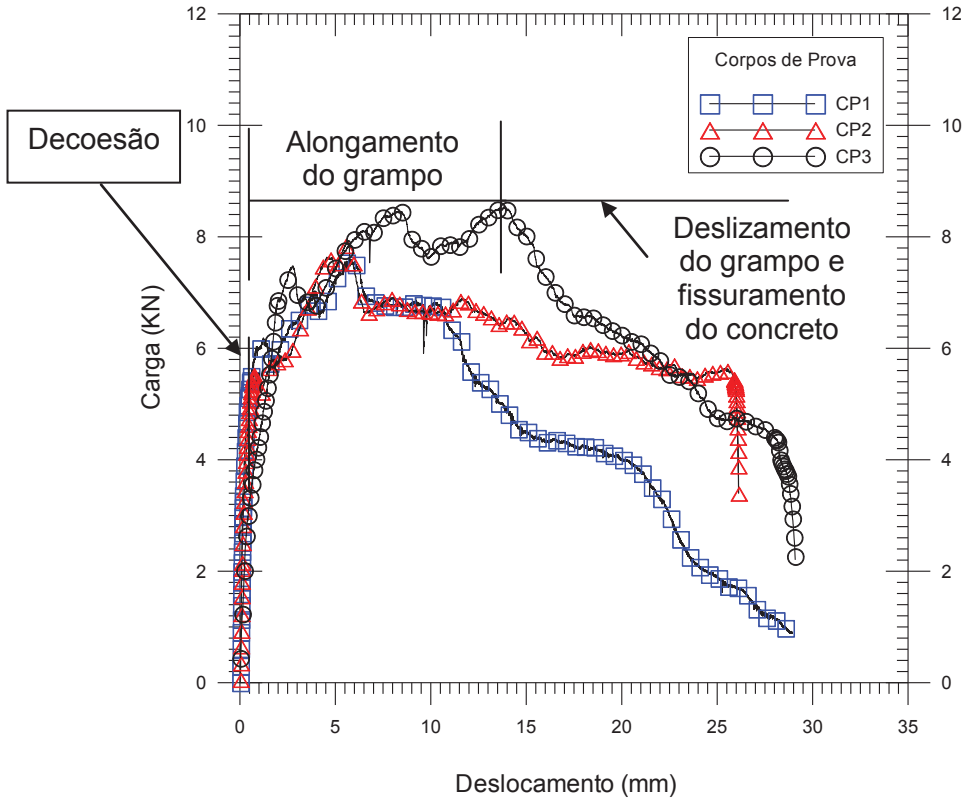
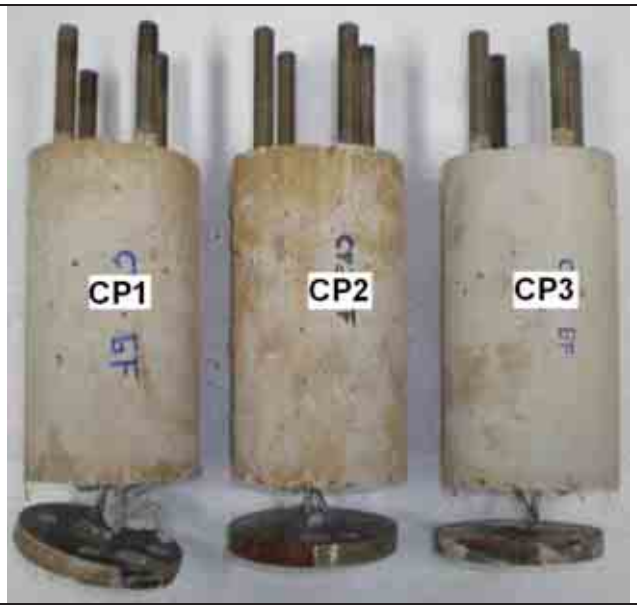


Figura V.20 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 210 210



CP1, CP2 e CP3



Ampliação CP1



Ampliação CP2



Ampliação CP3

Figura V.21 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB

Os corpos de prova ensaiados para o GCR1.24 210 210 apresentam um esticamento muito grande do grampo de ancoragem e o não rompimento do grampo de ancoragem, mas uma fissuração muito grande na sua interface com o concreto refratário como pode ser verificado na figura V.21. O deslocamento máximo obtido até a carga cair foi em torno de 27 a 30 mm de deslocamento do travessão como observado na figura V.20. São apresentados também os fenômenos que ocorrem durante o ensaio bem como as regiões em que cada um deles acontece.

V.2.9 Amostras para GCR1.24 210 210 com Falha na Solda

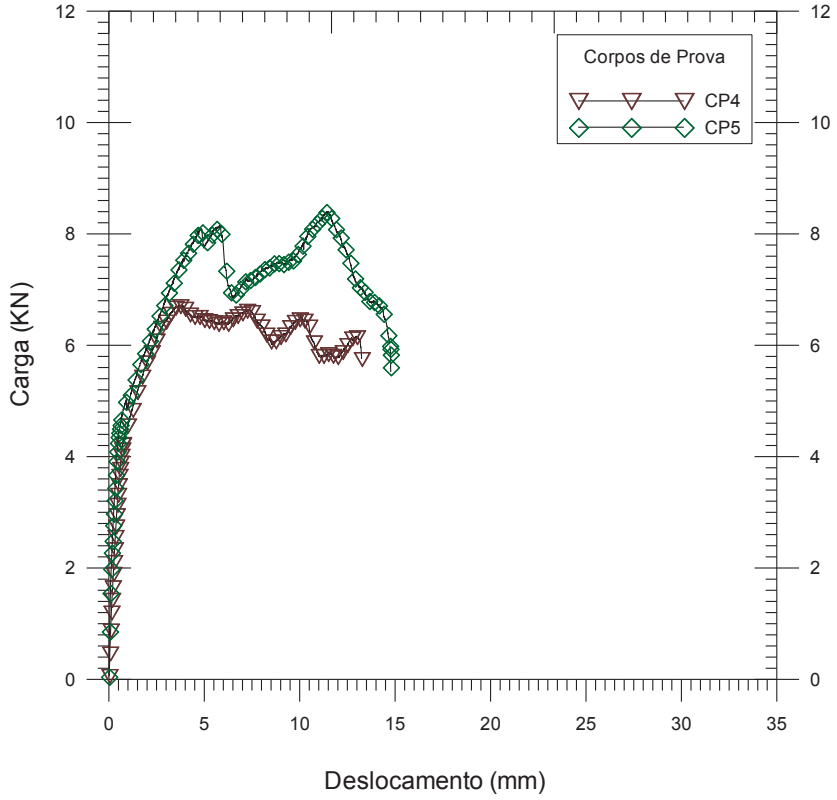
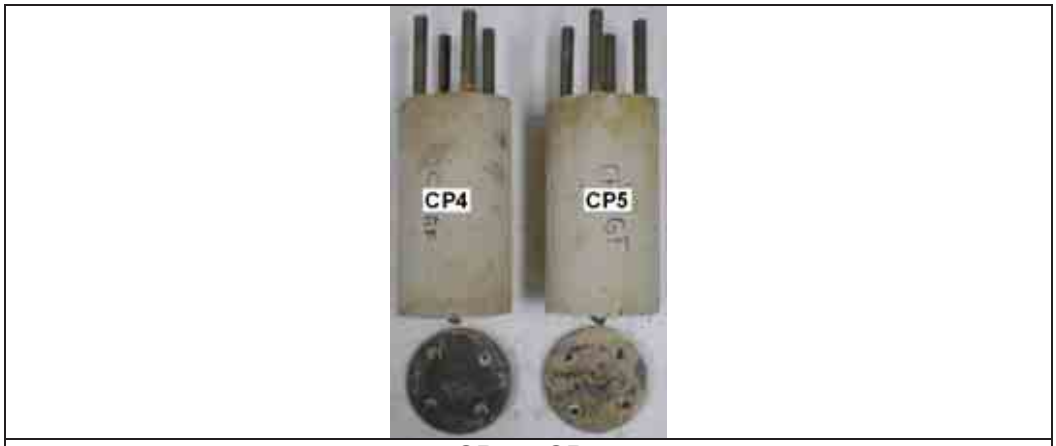
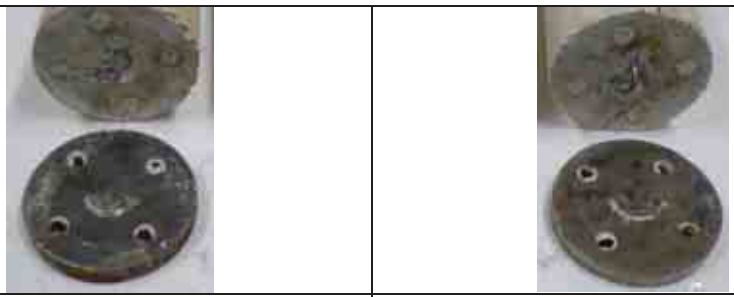


Figura V.22 – Curvas carga x deslocamento para GCR1.24 210 210 com falha na solda



CP4 e CP5



Vista da Interface CP4 | Vista da Interface CP5

Figura V.23 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 210 210 com falha na solda

As amostras que apresentaram falha na solda, mostradas na figura V.23, tiveram como característica principal o esticamento parcial do grampo. A ruptura da solda ocorreu no intervalo de 13 a 15 mm de deslocamento como pode ser observado na figura V.22 ocasionando uma queda abrupta da carga.

V.2.10 Amostras para GCR0 110 AMB com 150 mm de diâmetro e Falha na Solda

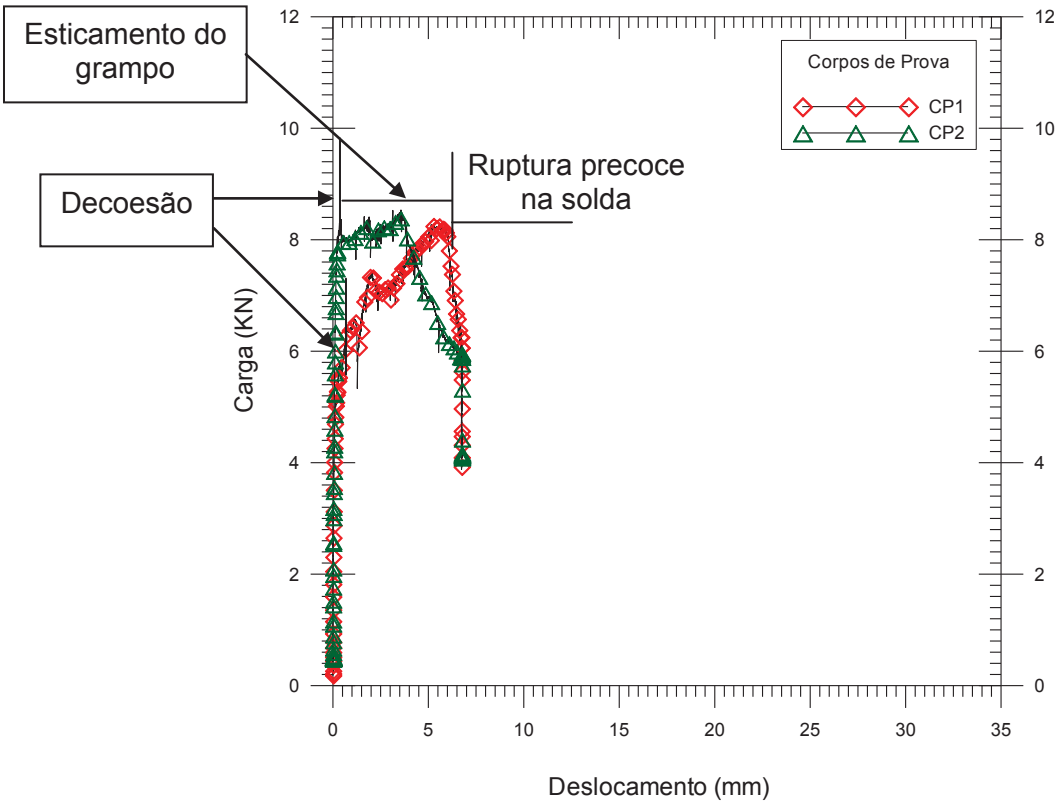


Figura V.24 – Curvas carga x deslocamento para GCR0 110 AMB – diâmetro 150 mm com falha na solda



CP1 e CP2	Vista da Interface CP1	Vista da Interface CP2

Figura V.25 – Corpos de prova após ensaio para GCR0 110 AMB – diâmetro de 150 mm com falha na solda

Não foram obtidos resultados satisfatórios para GCR1.24 110 AMB com grampo de 150 mm de diâmetro. São apresentadas curvas carga versus deslocamento na figura V.24 para os ensaios realizados. Observa-se três etapas culminando na falha na solda. Inicialmente, ocorre a decoesão; em seguida, o grampo estica e, por fim, a solda falha e, desta forma, a carga decai abruptamente em torno de 7 mm de deslocamento.

V.2.11 Resultado para GCR1.24 110 AMB com 150 mm de diâmetro

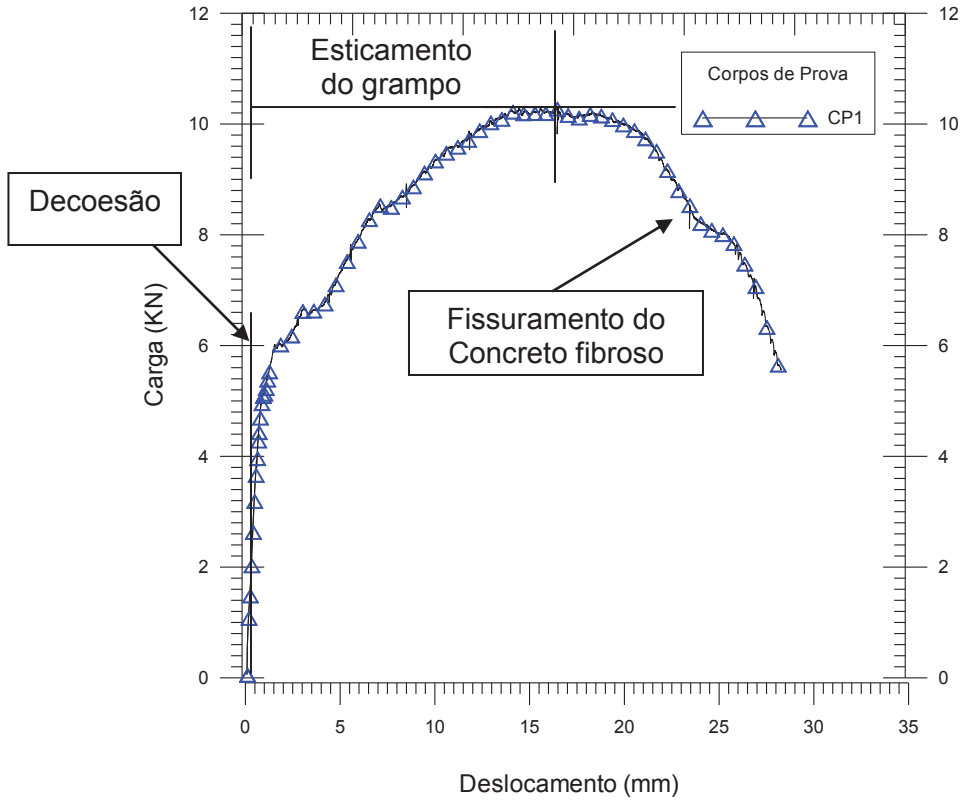
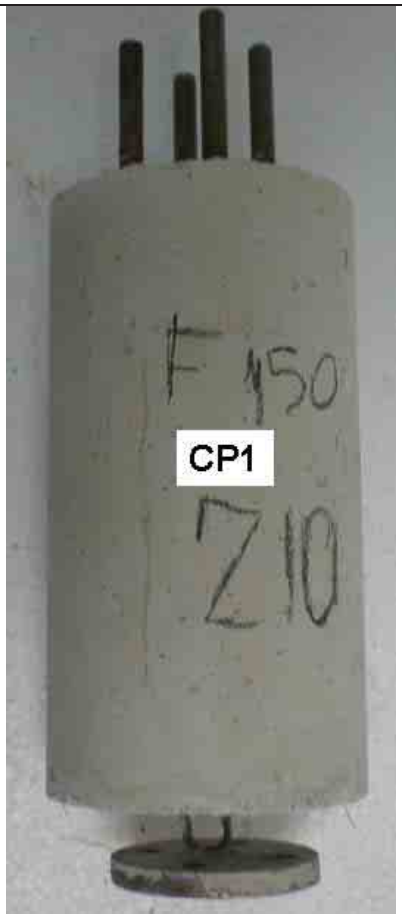


Figura V.26 – Curva carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm

A figura V.26 apresenta a curva carga versus deslocamento para a única amostra de GCR 1.24 110 AMB com 150 mm de diâmetro, que apresenta resultado em que o grampo de ancoragem foi mobilizado. Verifica-se que a carga máxima obtida é superior a 10 KN, valor muito superior aos encontrados para os demais ensaios apresentados em que o diâmetro do corpo de prova é de 100 mm. Um outro aspecto que merece destaque é a forma da curva que se assemelha a uma parábola, diferenciando-se das demais formas de curva carga versus deslocamento, apresentadas anteriormente para corpos de prova com 100 mm de diâmetro. A figura V.27 apresenta o aspecto do corpo de prova de GCR1.24 110 AMB com diâmetro de 150 mm após a realização do ensaio. O grampo de ancoragem foi extraído para que

fosse possível verificar o seu aspecto. Observa-se que ambos os braços foram esticados e ficaram com comprimentos aproximados de 53 mm e 58 mm de altura. Por fim, observa-se o aspecto da interface grampo ancoragem e cilindro de concreto refratário na superfície do concreto. É possível observar a fissuração ocorrida nesta região, bem como o trabalho desenvolvido pelo reforço fibroso. O grampo de ancoragem deslizou no interior do concreto, mas continuou preso ao mesmo, tendo em vista suas extremidades não terem sido alinhadas completamente.



CP1



Aspecto da ancoragem antes e depois do ensaio



Comprimento final da ancoragem



Vista da Interface CP1



Aspecto da fissuração em torno da base da ancoragem

Figura V.27 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm

V.2.12 Amostra para GCR1.24 110 AMB com 150 mm de diâmetro e Falha na Solda

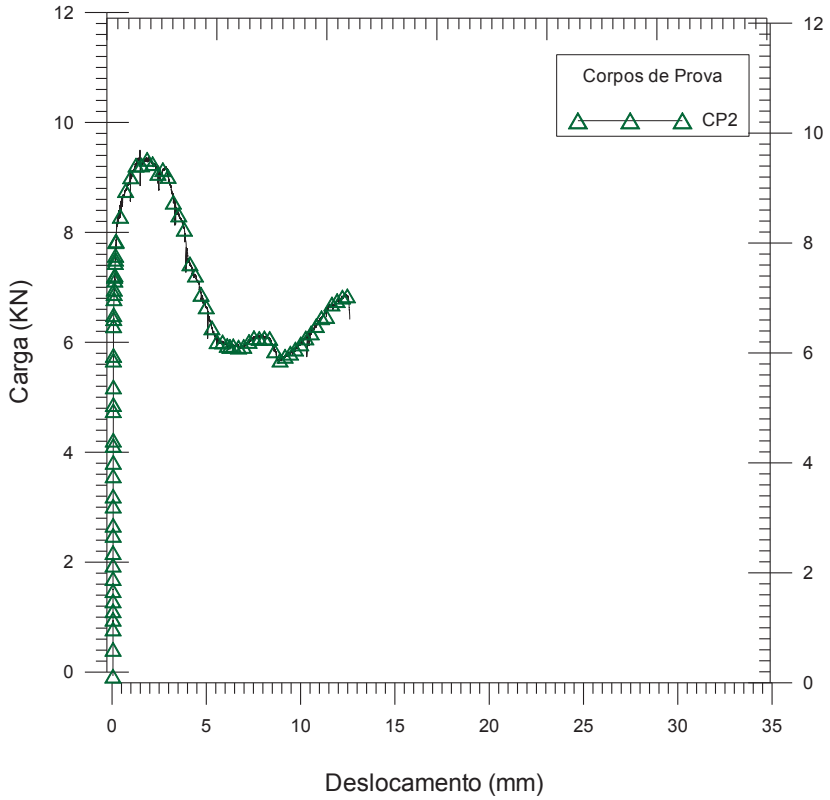


Figura V.28 – Curva carga x deslocamento para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 mm com rompimento na solda



CP2	Vista da Interface CP2

Figura V.29 – Corpo de prova após ensaio para GCR1.24 110 AMB – diâmetro 150 com rompimento na solda

É apresentada curva carga versus deslocamento na figura V.28 para o corpo de prova que falhou na solda em torno de 13 mm de deslocamento, provocando um decaimento abrupto de carga. A figura V.29 mostra a falha ocorrida na solda do corpo de prova para GCR1.24 110 AMB.

V.2.13 Comparativos entre os Resultados Obtidos para Interface com Ancoragem

Para a amostra de GCR1.24 110 AMB, pode-se observar através da figura V.30, a pequena diferença entre os resultados obtidos para o deslocamento através do travessão (mesa) e para os transdutores elétricos. Observa-se uma diferença muito sutil ocorrida ao longo das curvas carga versus deslocamento ao qual às amostras foram submetidas. Desta forma, para os resultados obtidos com as amostras ensaiadas a quente, não foi empregado o fator de correlação que é muito próximo da unidade.

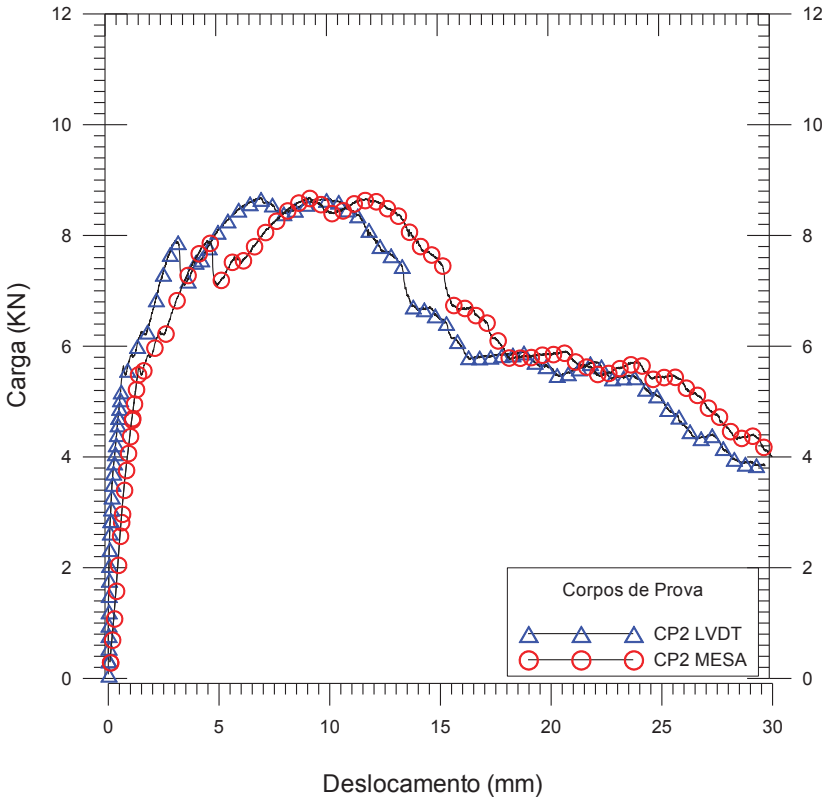


Figura V.30 – Curvas carga versus deslocamento para o mesmo corpo de prova medido com a mesa da prensa e transdutores elétricos (LVDT´s)

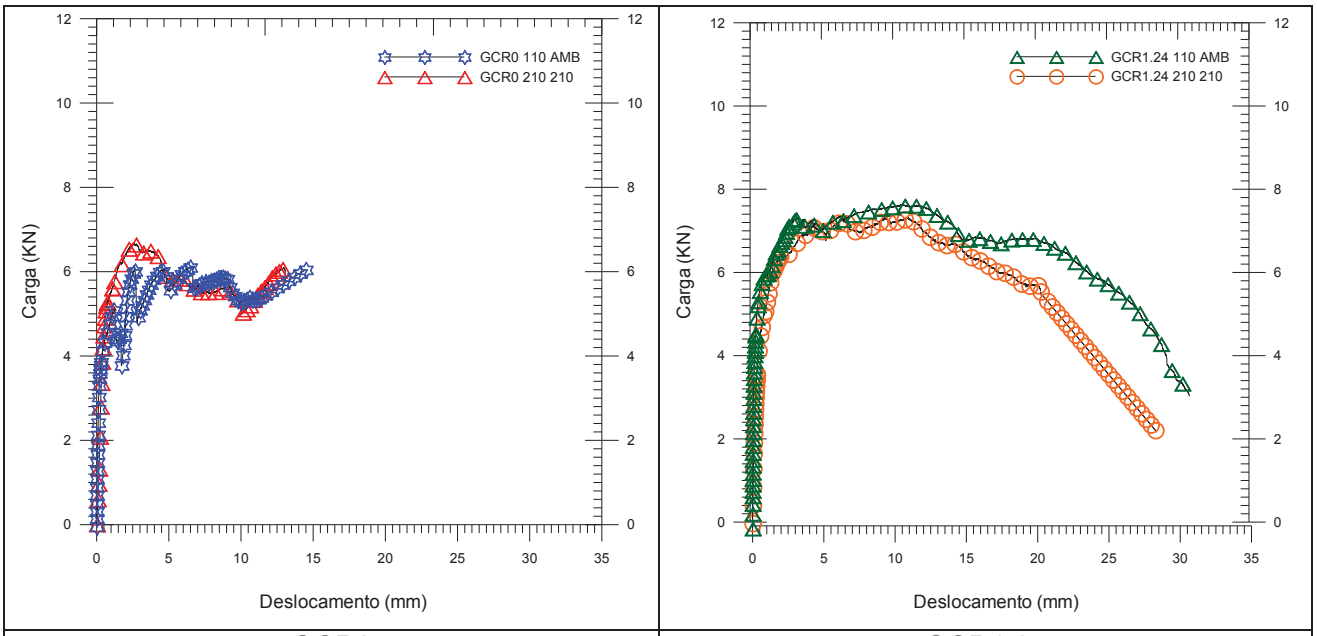
É apresentada a tabela V.2 com os resultados para a carga de decoesão e carga máxima obtidas para todos os ensaios realizados com os corpos de prova para avaliar a interface aço e concreto refratário com grampos de ancoragem.

Tabela V.2 – Resultados para carga de decoesão e carga máxima para amostras utilizadas para avaliar a interface com grampo de ancoragem (média e cv)

Corpos de Prova	Carga de Decoesão (KN)	Carga Máxima (KN)
GCR0 110 AMB	6,15 (10,6)	7,33 (12,4)
GCR0 210 210	5,00 (2,83)	7,61 (3,16)
GCR1.24 110 AMB	5,37 (2,85)	7,94 (8,26)
GCR1.24 210 210	4,80 (22,1)	8,03 (5,95)
GCR1.24 110 AMB – D150	5,20 (****)	10,3 (****)

Na tabela V.2, verifica-se que a carga de decoesão tem valores médios variando de 4,80 KN a 6,15 KN. Isto representa uma pequena variação desta característica o que, de certa forma, é esperado, tendo em vista que esta carga representa o valor máximo alcançado dentro do trecho com comportamento linear-elástico. Verifica-se ainda que esta característica é muito influenciada pela resistência que possui o grampo de ancoragem, pois para ensaios de corpos de prova sem ancoragem foram obtidos valores muito próximos de zero.

Os gráficos apresentados nas figura V.31 mostram curvas típicas carga versus deslocamento de amostras com e sem fibras ensaiados a frio e a 210° C utilizadas para avaliar a interface.



GCR0 | GCR1.24

Figura V.31 – Resultados experimentais para GCR0 e GCR1.24

As curvas apresentadas na figura V.31 mostram que ocorreu apenas uma pequena variação entre o GCR0 110 AMB e o GCR0 210 210. A carga máxima obtida para o GCR0 210 210 foi apenas 3,82% maior que para o GCR0 110 AMB conforme pode-se verificar pela tabela V.2. Os deslocamentos máximos alcançados até o rompimento dos corpos de prova não ultrapassou os 15 mm para as duas situações de estudo. Para os corpos de prova com concreto fibroso verifica-se que os deslocamentos finais obtidos são muito próximos para os dois casos estudados com valores que ultrapassam os 30 mm. É importante salientar que os corpos de prova com concreto fibroso se caracterizam por não se romperam ficando o grampo de ancoragem preso ao cilindro de concreto até a carga cair a níveis muito baixos. Verifica-se que o valor máximo obtido para o GCR1.24 210 210 foi de 8,01 KN que foi 0,99% maior que para o GCR 110 AMB. Utilizando a análise estatística ANOVA, ao nível de 5% de probabilidade, verificou-se que a carga máxima sofreu variações estatisticamente não significativas com a adição de reforço fibroso e variação de temperatura.

Sobre o grampo de ancoragem foi mostrado que o carregamento na tração produz um esticamento que irá variar para concretos com e sem fibras. Os concretos fibrosos proporcionam um melhor desempenho do grampo que irá esticar muito mais do que para corpos de prova produzidos com concreto sem fibra. Para estas amostras, em geral, o concreto falha antes soltando uma das pernas do grampo atingindo um esticamento bem menor. Os grampos com esticamento parcial chegaram a esta forma com um deslocamento do travessão de 10 a 15 mm. Para o grampo com deslocamento máximo foram obtidos deslocamentos do travessão de 25 a 35 mm.

É importante salientar que a falha na solda do grampo é algo que acontece também no dia-a-dia das unidades de craqueamento catalítico fluido e, assim sendo, o surgimento deste tipo de situação torna os resultados obtidos experimentalmente em laboratório muito próximos aos que acontecem na realidade.

Com relação aos corpos de prova com diâmetro de 150 mm foi possível apenas realizar uma investigação inicial, tendo em vista que estes ensaios não faziam parte do escopo inicial do programa experimental. Na figura V.32, são apresentadas curvas (carga versus deslocamento) para corpos de prova de 100 mm e 150 mm de diâmetro, ensaiados sob tração direta.

Pode-se observar que o resultado obtido para o corpo de prova de 150 mm de diâmetro apresenta carga máxima, maior que para o corpo de prova que possui 100 mm de diâmetro. Com respeito à evolução da carga com o deslocamento, as curvas apresentam um aspecto bem diferente. Para o corpo de prova com 150 mm de diâmetro, a forma da curva se aproxima a de uma parábola, sendo possível identificar um pico de carga máxima com certa facilidade. Já para o corpo de prova de 100 mm de

diâmetro, a curva atinge um valor máximo e depois fica oscilando em torno deste valor, ao longo do deslocamento, formando um plator que se estende até o esticamento completo do grampo por volta dos 30 mm de deslocamento. A partir deste ponto, foi observado que a carga inicia sua queda para as duas situações. Provavelmente, este declínio ocorre neste deslocamento tendo em vista o grampo atingir o seu deslocamento máximo entre 30 e 35 mm.

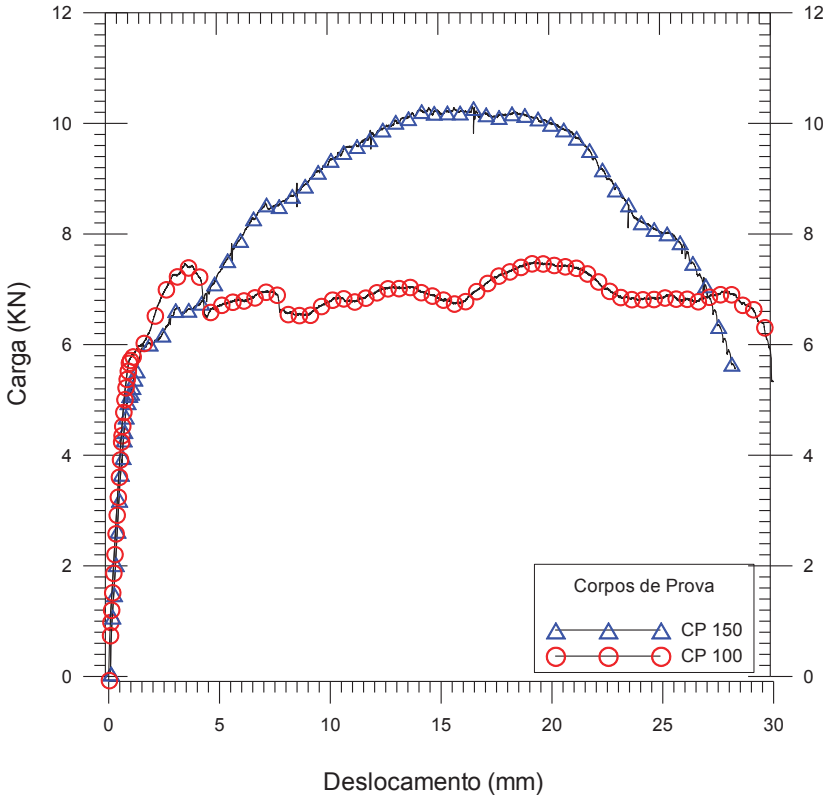


Figura V.32 – Comparativo de resultados para corpos de prova GR1.24 110 AMB com diâmetros de 100 mm e 150 mm

CAPÍTULO VI

MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERFACE

VI.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade apresentar os modelos numéricos desenvolvidos com a finalidade de avaliar a interface aço – concreto refratário, os resultados obtidos com os modelos gerados e uma comparação destes resultados com os que foram obtidos experimentalmente.

VI.2 GERAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

Nesta seção, serão apresentados os passos necessários para a elaboração dos modelos numéricos para a interface aço – concreto refratário. Para tanto, foram desenvolvidos modelos numéricos utilizando o programa *DIANA* versão 9.2. Os modelos gerados são para todos os tipos de resultados obtidos experimentalmente com os casos de estudo que possuíam grampos de ancoragem e limitados aos corpos de prova com diâmetro de 100 mm.

VI.2.1 Idealização do Modelo

Inicialmente, optou-se por um modelo de características mais locais, onde o grampo era modelado por elementos finitos, como pode-se ver pela figura VI.1, cujos elementos utilizados são apresentados na figura VI.2. Tal modelo, além de demandar um grande esforço de lançamento da malha, demandava o conhecimento de leis de comportamento locais, cujos ensaios para sua determinação seriam de grande complexidade.

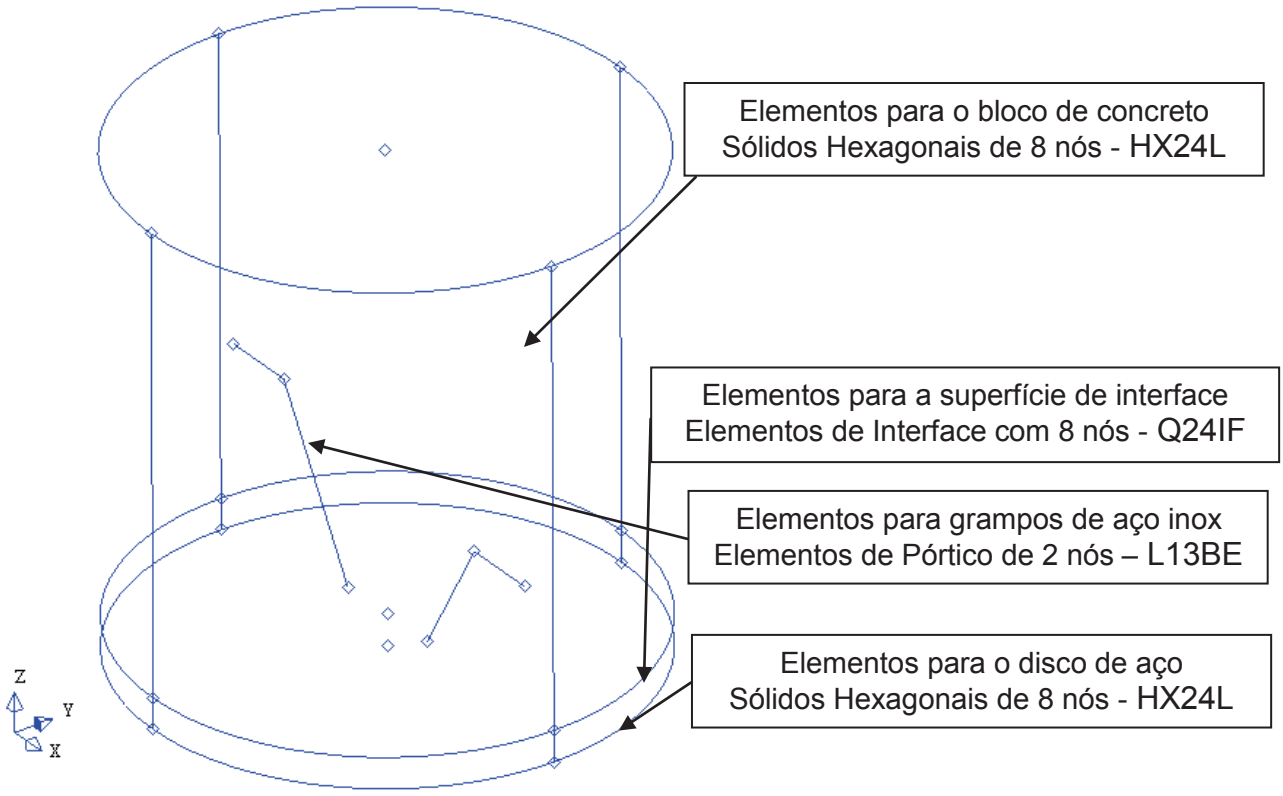


Figura VI.1 – Geometria do Modelo com Grampo de Ancoragem

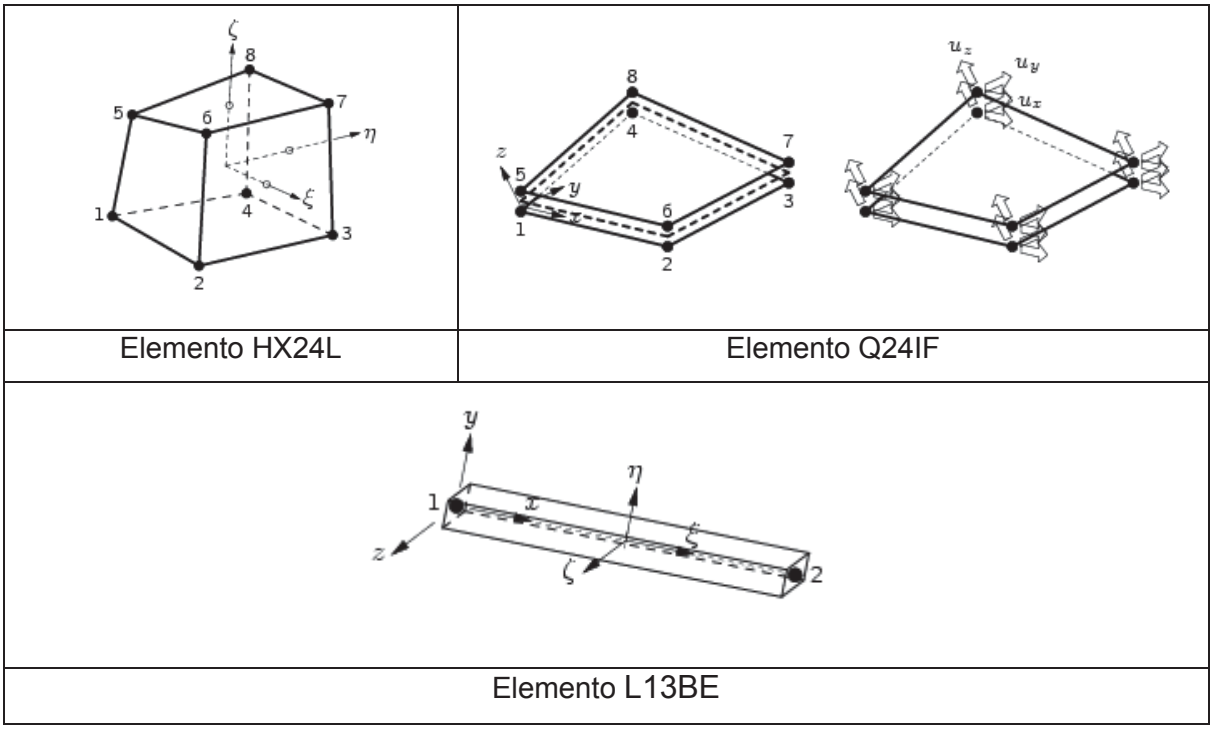


Figura VI.2 – Elementos HX24L, Q24IF e L13BE [34]

Este comportamento pode ser explicado, inicialmente, pela figura VI.3, onde são mostrados os possíveis mecanismos de transferência de tensões entre os diversos materiais (aço e concreto) e estruturas (grampo, concreto e costado) que compõem o sistema refratário.

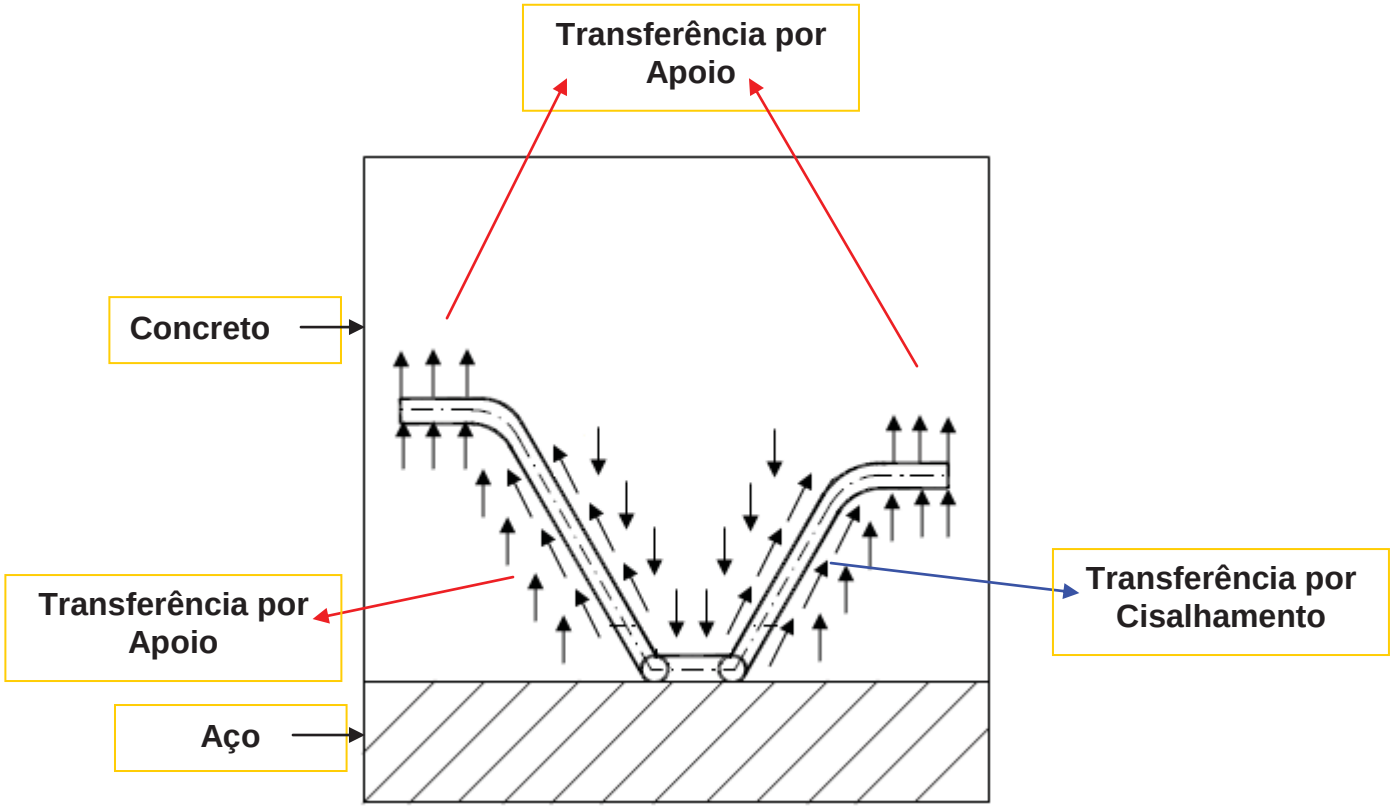


Figura VI.3 – Ação do Grampo de Aço sob o Revestimento de Concreto Refratário

A figura VI.4 indica hipóteses de mecanismos de ruptura induzidos pelas tensões de interface. A modelagem local necessitaria conhecer leis de comportamento que permitissem introduzir os diversos fenômenos considerados nas figuras VI.3 e VI.4.

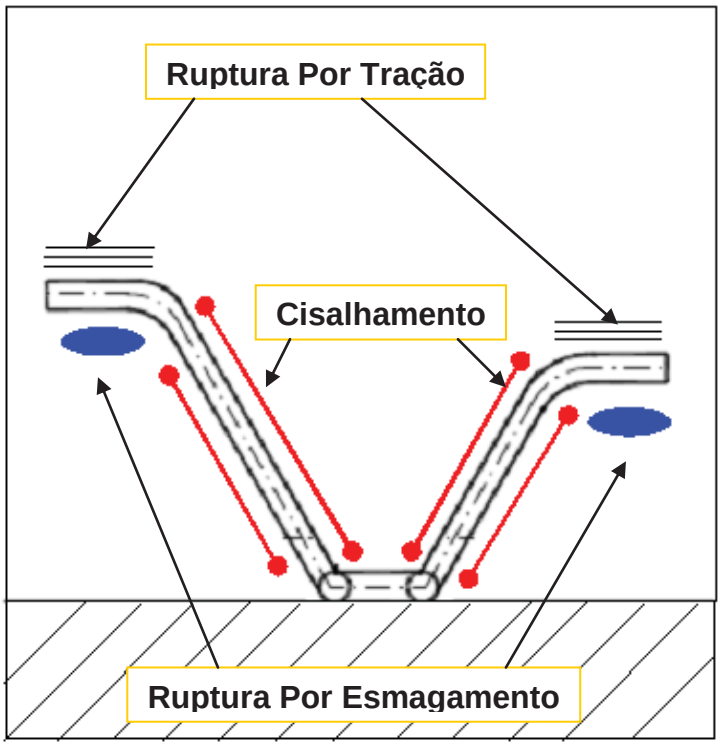


Figura VI.4 – Ruptura dos Corpos de Prova para Avaliar a Interface

Tendo em vista a dificuldade de serem obtidas experimentalmente leis locais, uma estratégia para conhecer tais leis de comportamento seria a realização de ensaios similares aos apresentados nos capítulos anteriores desta tese. Seria então realizado um procedimento de análise inversa para determinação dos diversos parâmetros envolvidos. No fundo este procedimento consistiria na utilização de resultados experimentais macroscópicos para a obtenção de leis (macroscópicas), cuja aplicação seria limitada às características dos ensaios para os quais seriam determinadas.

Sendo assim, tendo em vista, a dificuldade (e não generalidade) da obtenção das leis de comportamento, decidiu-se pelo desenvolvimento de uma modelagem de cunho macroscópico visando às aplicações em engenharia.

Tal modelo considera a região do grampo e do concreto adjacente representados por um elemento finito de interface situado entre o costado e o refratário, elemento este que tem uma lei de comportamento do tipo fissuração capaz de reproduzir o comportamento macroscópico observado nos ensaios realizados. O comportamento do grampo foi inserido dentro da interface possibilitando a geração de um modelo numérico simples e de fácil manuseio.

Desta forma, verifica-se que o comportamento da interface inicialmente idealizado através de um modelo mecânico microscópico apresentado nas figuras VI.3 e VI.4 não é utilizado para a geração do modelo numérico.

VI.2.2 Geometria

O passo inicial para a elaboração do modelo foi à definição da sua geometria. Para tanto, foi construído um cilindro que possui em sua base um disco de aço com 100 mm de diâmetro e 12,7 mm de espessura. Em seguida foi colocado por cima deste disco um bloco de concreto que possuía o mesmo diâmetro de 100 mm e altura de 187,3 mm de forma que a altura final do corpo de prova totalizou 200 mm. Quando for abordada a lei do comportamento da interface, será discutido como esta foi representada no modelo numérico e qual o papel exercido pela ancoragem. A figura VI.5 apresenta a geometria do modelo gerado, indicando quais foram os tipos de elementos utilizados para o concreto, aço e interface.

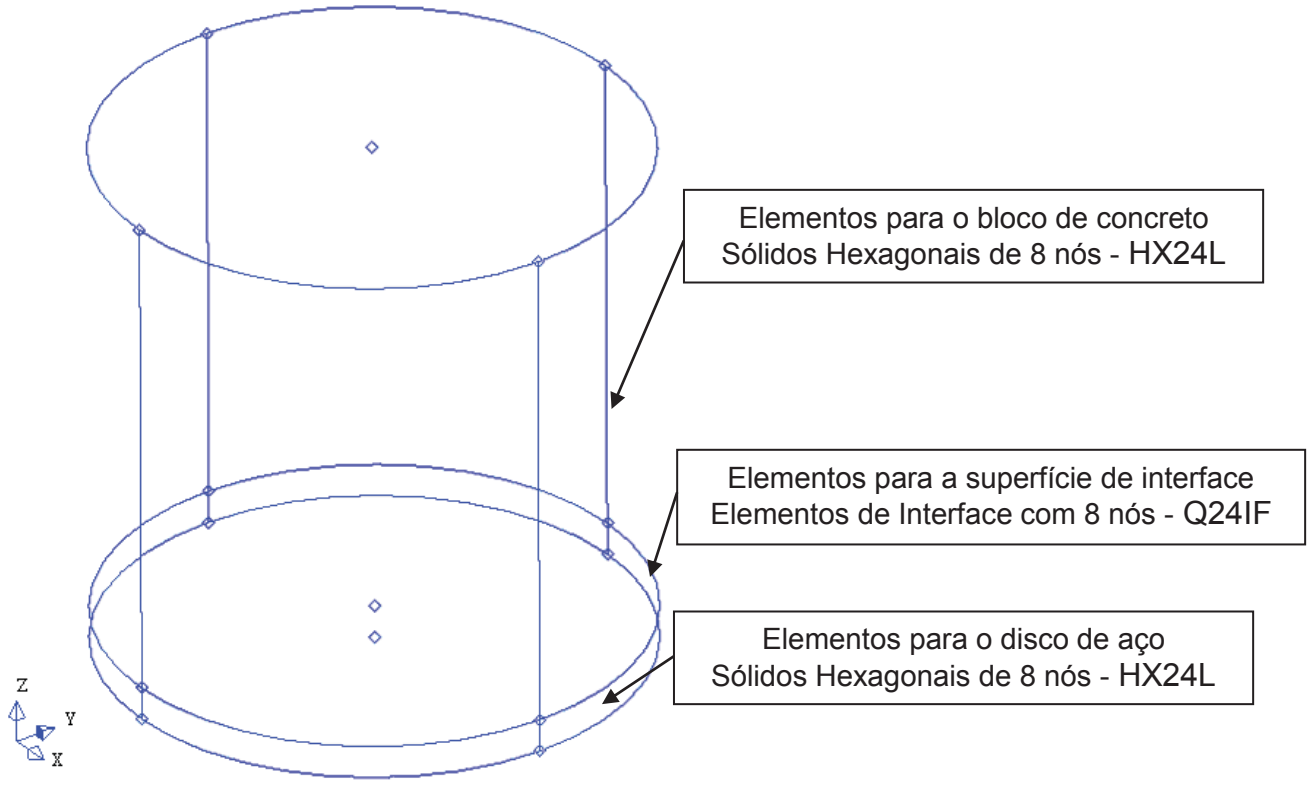


Figura VI.5 - Geometria com indicação dos elementos utilizados em cada seção

VI.2.3 Malha, Restrições e Carregamento

Todos os modelos numéricos que serão apresentados neste capítulo terão as mesmas características de geometria, restrições e carregamento unitário. Deve-se ressaltar que são introduzidas diferentes características para o comportamento do

concreto e da interface em cada caso de estudo. Já o aço permanece com as mesmas características para todos os modelos produzidos. Para cada modelo específico gerado é apresentado o seu resultado numérico em conjunto com o resultado experimental equivalente obtido. Isto foi feito com o objetivo de indicar a eficiência dos modelos na geração de resultados o mais próximo quanto possível dos obtidos experimentalmente.

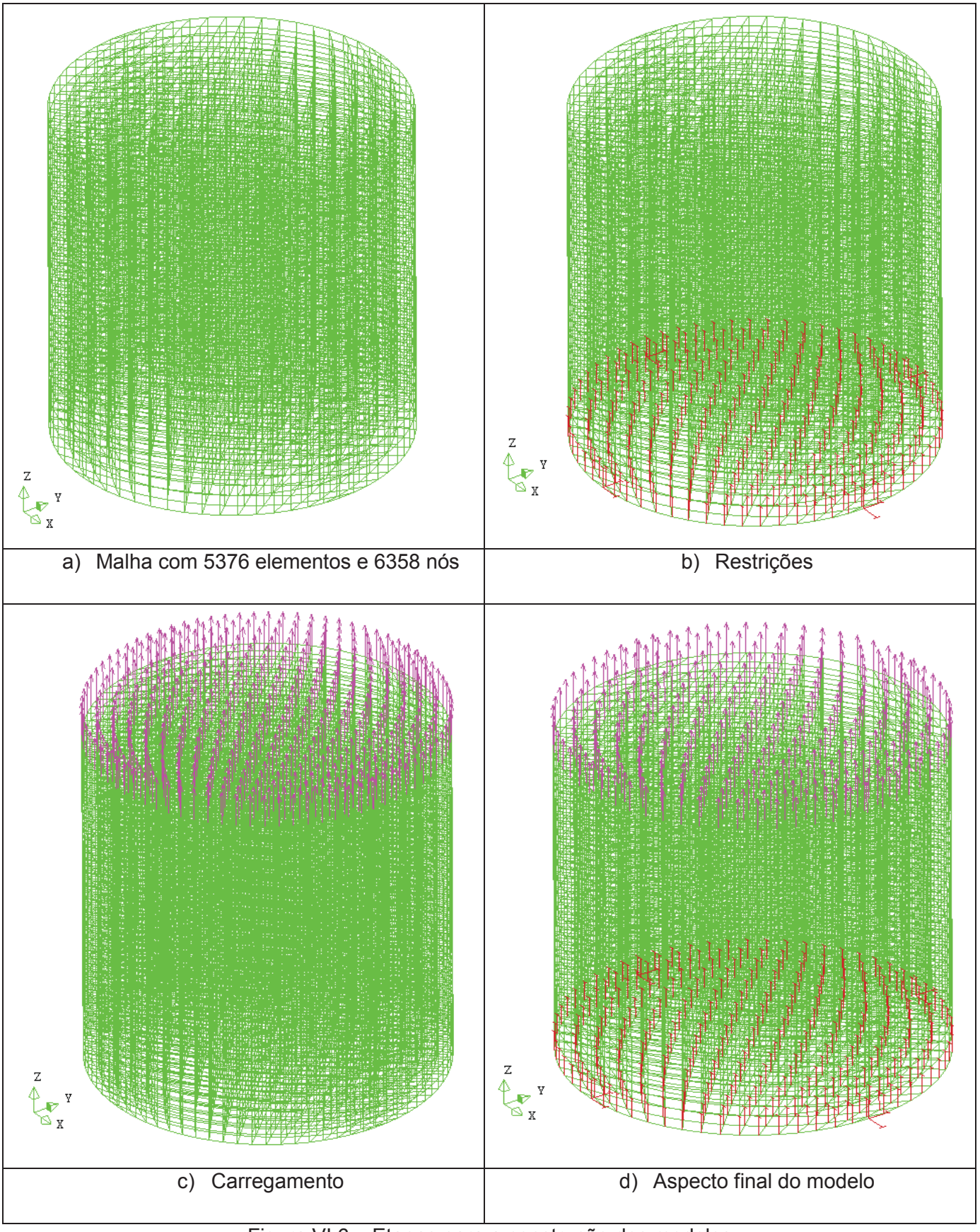
São apresentadas: a malha utilizada para a construção dos modelos numéricos, as restrições atribuídas, bem como o carregamento utilizado. A figura VI.6 mostra cada uma destas etapas nas letras a, b e c e também mostra o aspecto final do modelo gerado em d.

Cada uma destas variáveis serão descritas ao longo desta seção, a fim de mostrar como foram definidas e implementadas no programa *DIANA*.

Foram geradas malhas, a partir da alteração do tamanho da aresta dos elementos, com diferentes quantidades que variaram de 1815 até 10400 elementos. Dentre as malhas testadas, optou-se por trabalhar com a de 5376 elementos, conforme figura VI.6 a, pois, levando em consideração o custo computacional e o erro produzido no teste de convergência, esta foi a que obteve o melhor desempenho. Os erros obtidos para a tensão e a deformação foram menores que 6%, quando comparados a cálculos teóricos. O valor da aresta para cada um dos elementos desta malha é de 6 mm.

As condições de contorno foram impostas à superfície da base do corpo de prova, que foi restrita com relação à translação no eixo Z, bem como foram restritos com relação à translação quatro pontos também pertencentes à base nos eixos X, Y e Z, com a finalidade de evitar movimento de corpo rígido. Estas condições de contorno podem ser visualizadas através da figura VI.6 b.

O carregamento imposto foi do tipo deslocamento por ser o mais adequado para simular um ensaio de tração direta, sendo aplicado na superfície superior do corpo de prova na região onde o material é concreto, como pode ser visto na figura VI.6 c.



a) Malha com 5376 elementos e 6358 nós

b) Restrições

c) Carregamento

d) Aspecto final do modelo

Figura VI.6 – Etapas para a construção dos modelos

Para a análise linear o valor do carregamento foi imposto diretamente através do módulo *IDIANA*, responsável pela geração e visualização de modelos. Já para a análise não-linear, foi adotado valor unitário de carga no módulo *IDIANA* e o carregamento imposto com passos de carga selecionados com o módulo *DIANA_W*. Assim, a magnitude da carga aplicada ao corpo de prova foi obtida pela multiplicação do valor unitário definido no *IDIANA* pelo passo de carga definido pelo *DIANA_W*.

Estes passos de carga, definidos em termos de deslocamento, são empregados de forma diferente nos casos estudados conforme a necessidade específica de cada um. Portanto, o tamanho e a quantidade de passos de carga utilizados poderão variar a cada simulação realizada.

VI.2.4 Leis de Comportamento dos Materiais

Serão descritas, a seguir, as leis de comportamento adotadas para cada um dos materiais utilizados na elaboração do modelo numérico.

III.6.1.1 Lei de Comportamento do Aço

As características do aço são as mesmas dos que compõem o costado metálico dos *risers* de UCCF, que utiliza o aço estrutural 516 grau 70, cujos dados utilizados para implementação dos modelos foram obtidos através de seu fornecedor [36]. A espessura de 12,7 mm ou 0,5 pol, para o costado metálico empregada na modelagem numérica, teve como finalidade simular os mesmos valores encontrados na maioria dos *risers* das refinarias brasileiras. A tabela VI.1 apresenta os dados utilizados para definir as propriedades deste aço. O aço foi considerado como sendo elástico-linear.

Tabela VI.1 – Propriedades do Aço

Propriedade	**Valor**
Densidade ($\rho_{aço}$) do Aço	7800 kg/m^3
Módulo de Elasticidade do Aço ($E_{aço}$)	224 GPa
Coeficiente de Poisson ($\nu_{aço}$)	0,3

III.6.1.2 Lei de Comportamento do Concreto

Os dados utilizados para o concreto refratário foram valores obtidos em parte através de ensaios de caracterização experimental ou, quando não foi possível, utilizaram-se dados da literatura.

A tabela VI.2 apresenta os dados experimentais utilizados para a massa específica e para o módulo de elasticidade que foram obtidos da caracterização realizada para o concreto refratário apresentada no capítulo IV deste trabalho. Os dados para os valores do módulo de elasticidade foram extraídos a partir dos resultados médios obtidos para os ensaios de tração e compressão. Foi obtida a média entre os valores do módulo de elasticidade para compressão e tração em que ambos possuíam coeficiente de variação abaixo de 10,0%. Quando o valor para o módulo de elasticidade à compressão ou à tração possuísse coeficiente de variação acima de 10,0%, tomou-se apenas o valor com coeficiente de variação abaixo de 10,0 %. Para os corpos de prova de GCR0 210 210 e GCR1.24 210 210, foram utilizados, respectivamente, os valores obtidos para as misturas CR0 210 AMB e CR1.24 210 AMB, uma vez que não foram obtidos os módulos de elasticidade a quente. Outra característica utilizada, foi o coeficiente de Poisson, no valor de 0.2 para todos os tipos de corpo de prova apresentados, dado este obtido através da literatura [2].

Tabela VI.2 – Propriedades Estáticas Linear-Elásticas do Concreto Refratário

	Propriedades do Concreto Refratário	
Corpos de Prova	Massa Específica ($\rho_{refratário}$) (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade ($E_{refratário}$) (GPa)
GCR0 110 AMB	2,84	30,0
GCR0 210 210	2,82	23,0
GCR1.24 110 AMB	2,89	29,7
GCR1.24 210 210	2,90	28,3

Foram também fornecidos dados a fim de prever o comportamento do concreto refratário na pós-fissuração. Para tanto, a seleção no *DIANA* seguiu as seguintes etapas no modelo *Static Nonlinearity*:

1) A categoria de material selecionado foi o *Concrete and Brittle Material*;

2) A fissuração foi considerada como *Multi-Directional Fixed Cracking*;

3) O critério adotado para a fissuração foi o *Linear Stress Cut-Off* (ver figura VI.7). Através desta opção considera-se que uma fissura surge se a maior tensão principal de tração exceder o mínimo de f_t (resistência à tração) e $f_t = (1+\sigma_{lateral} / f_c)$. Onde f_c é a resistência à compressão e $\sigma_{lateral}$ é a tensão lateral principal.

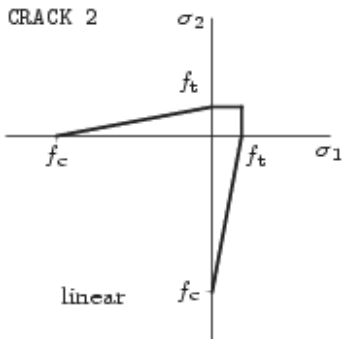


Figura VI.7 – *Linear Stress Cut-Off [34]*

4) Foi adotada a lei de comportamento *Linear Tension Softening* (ver figura VI.8).

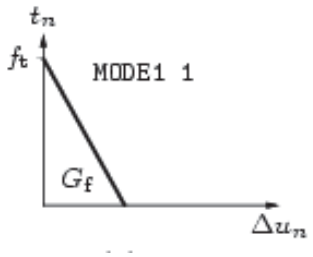


Figura VI.8 – *Linear Tension Softening [34]*

5) *A* opção selecionada para interromper a simulação foi a *Ultimate strain based*. Este critério adota a última deformação fornecida como o valor onde ocorrerá a parada da curva tensão versus deslocamento do material;

6) A retenção do cisalhamento adotada foi a *Constant Shear Retention*. Devido ao fissuramento do material a rigidez ao cisalhamento é usualmente reduzida. Esta redução é geralmente conhecida como retenção ao cisalhamento. O programa *DIANA* oferece duas opções pré-definidas para a retenção ao cisalhamento: *full shear retention* e *constant shear retention*.

7) O Modelo de plasticidade adotado foi o *Drucker-Prager;*

8) O tipo de plasticidade selecionada foi a *Ideal Plasticity;*

Da mesma forma que ocorreu para as propriedades lineares-elásticas, alguns dados foram obtidos através de dados experimentais e outros fornecidos pela literatura. Na tabela VI.3, são apresentados estes dados, onde: resistência à compressão, resistência à tração e a última deformação do diagrama são dados obtidos de dados

experimentais. Já os demais dados fornecidos, foram obtidos junto à literatura fornecida em anexo com o manual do programa *DIANA* [34].

Tabela VI.3 – Propriedades Estáticas Não-Lineares do Concreto Refratário

Propriedade	**Tipo de Corpo de Prova**			
	GCR0 110 AMB	GCR0 210 210	GCR1.24 110 AMB	GCR1.24 210 210
Resistência à Tração (MPa)	3,56	3,68	4,81	3,87
Resistência à Compressão (MPa)	58,9	59,7	60,8	60,6
Ultima Deformação do Diagrama (mm)	3 a 15	13 a 30	12 a 32	14 a 29
Cte de Retenção ao Cisalhamento	0,50	0,50	0,50	0,50
Coesão (MPa)	16,7	14,2	17,6	17,5
Seno (ângulo de fricção)	0,17	0,17	0,17	0,17
Seno (ângulo de dilatância)	0,17	0,17	0,17	0,17

Os dados para a resistência à compressão e resistência à tração foram extraídos dos resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados para a caracterização mecânica do concreto refratário que está apresentada no capítulo IV deste trabalho. Deve-se salientar que o valor de resistência à compressão utilizado para GCR0 210 210 foi o obtido para a mistura CR0 210 AMB, uma vez que os resultados para GCR0 210 210 não foram obtidos. Para a última deformação no diagrama é informada a faixa de valores, que foi utilizada tendo em vista que, dependendo do caso que se deseja simular, este valor deve ser alterado. Para a constante de retenção ao cisalhamento, o *DIANA* sugere adotar um valor entre 0 e 1. Desta forma, optou-se por utilizar 0,5.

A coesão mencionada na tabela VI.3 é calculada através da expressão:

$$C_s = f_c\,(1-\text{sen}\,\Phi)/(2\cos\Phi) \qquad \text{(VI.1)}$$

onde,

C_s = Coesão

f_c = Resistência à Compressão

Φ = Ângulo de Fricção

O *DIANA* considera, para plasticidade associativa, os ângulos de fricção e dilatância como os mesmos e sugere como valor usual para o concreto 10° [34]. Cabe ressaltar que as rupturas obtidas foram todas na região da interface, o que indica que

para os elementos de concreto os dados mais significativos são aqueles relativos à região linear-elástica.

III.6.1.3 Lei de Comportamento da Interface

A lei de comportamento da interface será produzida por meio de retro-análise através dos valores das variáveis: rigidez linear normal (RN), rigidez linear tangencial (RT) e resistência à tração da interface que definem o trecho linear elástico e dados de tensão versus deslocamento para pós-fissuração da interface para compor esta parte da curva assumindo o aspecto mostrado na figura VI.9.

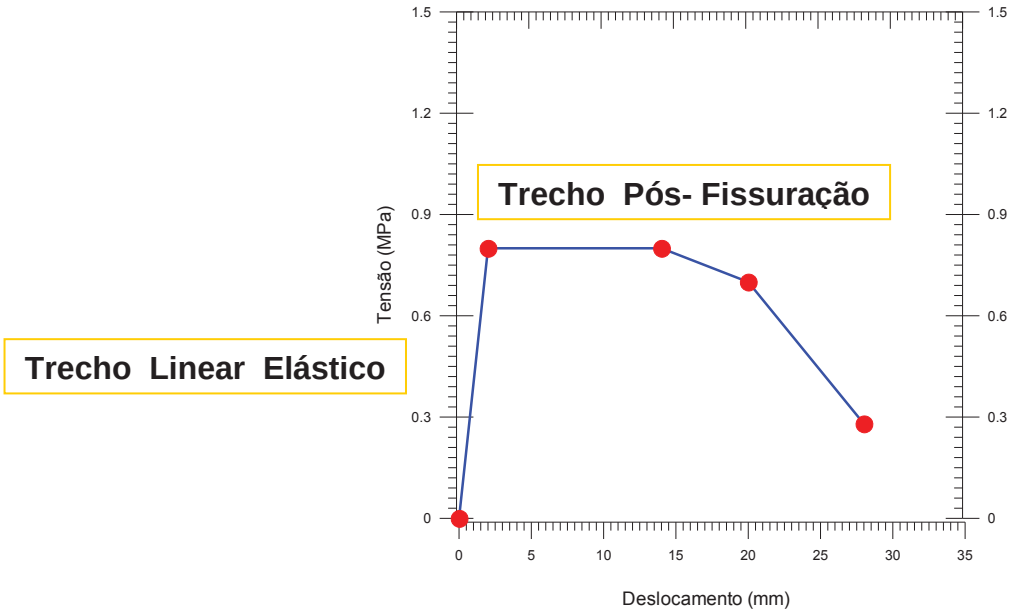


Figura VI.9 – Lei de Comportamento da Interface obtida através de Retro-Análise

As propriedades utilizadas são apresentadas nas tabelas VI.4 e VI.5. É importante salientar que, para cada tipo de corpo de prova e temperatura de ensaio, foram utilizados dados diferentes como entrada para a modelagem numérica. Esses dados foram obtidos através de análise inversa com base nos resultados experimentais obtidos.

Tabela VI.4 – Propriedades Estáticas Linear-Elásticas da Interface

Propriedade	**Valor**
Rigidez Linear Normal (RN)	Ajustado para cada Situação
Rigidez Linear Tangencial (RT)	Ajustado para cada Situação

Para realizar análise linear estrutural em elementos de interface, é requerido como dado de entrada a rigidez linear. A rigidez linear normal estabelece a relação entre a tensão normal e o deslocamento normal relativo, onde RN ≥ 0. Já a rigidez linear tangencial, estabelece a relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo promovido pelo cisalhamento, onde RT > 0. A dimensão do módulo de rigidez linear é dada pela força por área e por comprimento, isto é, tensão por comprimento, por exemplo, N/m^3. Estes valores foram sendo ajustados através de análise inversa de forma que a curva tensão versus deslocamento numérica gerasse uma curva carga versus deslocamento experimental mais próxima o possível da numérica. Deve-se ressaltar que os valores de RN e RT são diretamente proporcionais aos valores do módulo de elasticidade E e ao módulo de cisalhamento G_c. Desta forma, como E e G_c estão relacionados pela expressão:

$$G_c = E/2(1+\upsilon) \qquad \text{(VI.2)}$$

onde υ é o coeficiente de Poisson

Portanto, conclui-se através da expressão VI.2 que o valor de RT será sempre uma fração de RN. Deve ser ressaltado que nestas análises não foi utilizada nenhuma técnica específica de análise inversa com uma métrica para avaliação dos resultados e um procedimento para minimização desta métrica. Desta forma, os procedimentos utilizados nesta tese, que foram baseados na experiência e observação, têm o objetivo inicial de verificar a factibilidade do modelo macroscópico desenvolvido. Em futuros trabalhos, será utilizado o procedimento desenvolvido por Silvoso *et al* [37].

Para se obterem os resultados numéricos para cada uma das situações encontradas, são apresentados também os dados de entrada que se fazem necessários, conforme a tabela VI.5 que são: a resistência à tração da interface e a curva tensão versus deslocamento para a interface na pós-fissuração. Para todas as simulações realizadas, o comportamento na pós-fissuração para a interface foi considerado multilinear com o comportamento similar ao apresentando na figura VI.9.

O modelo não-linear da interface foi gerado utilizando-se fissuração discreta e possui as seguintes características:

1) A categoria de material selecionado foi *Interface*;

2) Para simular a fissuração discreta foi selecionado o aspecto *Cracking*;

3) O comportamento pós-fissuração foi o *Multi-linear Tension Softening*;

4) Para o modo de descarregamento ou recarregamento foi adotada a opção *Secant Mode I unloading* que é a opção padrão do *DIANA*. Esta opção fornece, toda vez que ocorrer um descarregamento ou recarregamento, a rigidez do regime linear elástico adotado. O manual do *DIANA* [34] sugere adotar esta opção para quando se trabalha com modelos do tipo *linear tension softening*;

5) Foi adotado o *Constant Zero Stiffiness after Crack* como critério de cisalhamento no estágio de desenvolvimento da fissura. Selecionando esta opção, o módulo de cisalhamento após a fissura é considerado nulo, conforme é apresentado na tabela IV.5.

Tabela VI.5 – Propriedades Estáticas Não-Lineares da Interface

Propriedade	**Valor**
Resistência à Tração da Interface	Para cada caso de estudo foi utilizado um valor
Módulo de Cisalhamento	Valor nulo
Diagrama de Tensão x Deslocamento	Vide Tabelas e Figuras Correspondentes

Para cada caso estudado, foi atribuído um valor para a resistência à tração da interface de acordo com os resultados experimentais disponíveis bem como foram utilizados como dados de entrada com base em uma análise inversa diagramas de tensão versus deslocamento para cada tipo de ensaio realizado.

VI.2.5 Geração de Resultados

Para a produção dos resultados numéricos, foram executadas análises lineares e não-lineares que tiveram como intuito realizar diversos testes para avaliar o funcionamento dos modelos implementados.

As análises não-lineares utilizaram passos de carga que foram ajustados através do módulo de análise *DIANA_W.* Como método de iteração foi escolhido o da secante, que foi utilizado para todas as análises. O número de iterações foi limitado a vinte e cinco. O processo foi controlado através das normas de força, deslocamento e energia. Foram selecionadas as três normas e, quando se atingia a tolerância para, pelo menos, uma delas, passava-se para o passo seguinte.

Os resultados gerados foram curvas carga versus deslocamento para o corpo de prova. A fim de facilitar a análise e possibilitar uma comparação com os resultados experimentais foi escolhido um elemento, conforme apresentado na figura VI.10, que fosse o mesmo para todos os resultados produzidos.

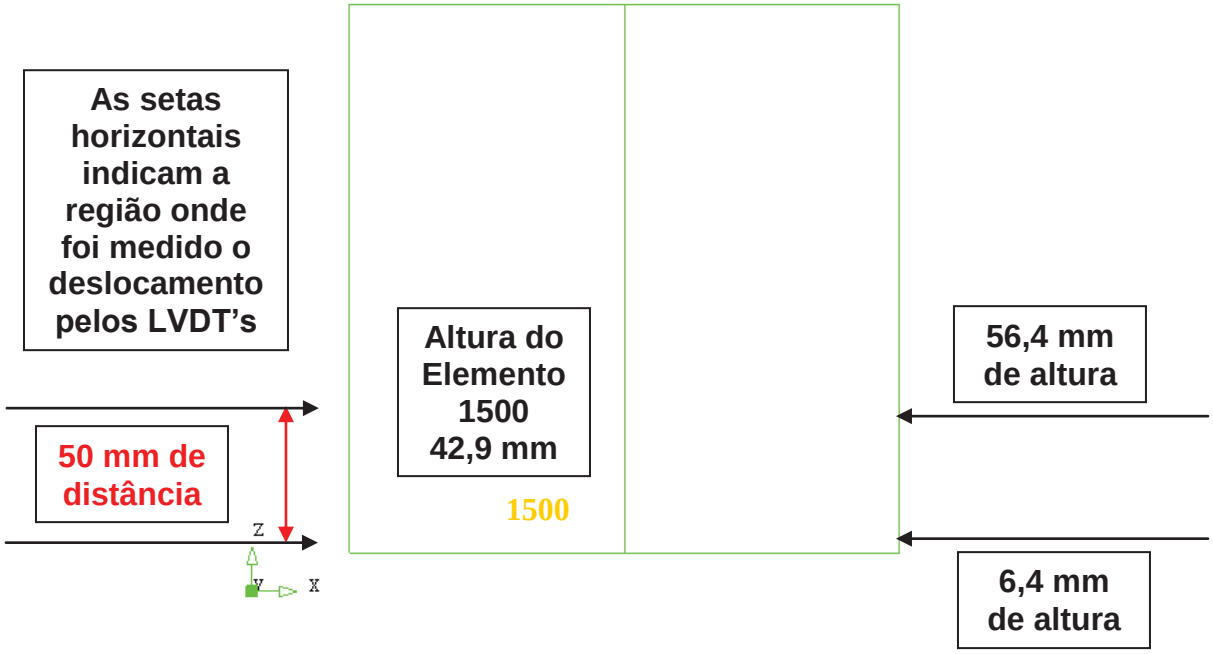


Figura VI.10 – Indicação do elemento 1500 no corpo de prova modelado

Pelo o que se pode observar, através da figura VI.10, o elemento 1500 escolhido para gerar os resultados numéricos, pertence à região de atuação dos LVDT´s, possibilitando uma comparação direta dos resultados numéricos com os experimentais. Deve-se salientar que foram verificados os valores de tensão em outros elementos nesta região e todos apresentaram valores exatamente iguais.

Para simular este comportamento, foram inseridos dados de entrada que foram sendo ajustados através de análise inversa, a fim de produzir resultados numéricos o mais próximo possível dos resultados experimentais.

Ao final de cada tipo de resultado que foi gerado, é feito um comparativo direto entre as curvas médias geradas através dos resultados experimentais e o resultado numérico obtido. Para os corpos de prova com diâmetro de 150 mm, não foram realizadas simulações numéricas.

VI.3 RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

A seguir, são apresentados os resultados produzidos para cada situação de ensaio referente às amostras com grampos de ancoragem e 100 mm de diâmetro.

VI.4.1 Resultado para GCR0 110 AMB

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,60 MPa para resistência à tração da interface e para o RN o valor de 6,0 e+08 N/m^3. A tabela VI.6 apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.6 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 110 AMB

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,60	1,00
0,60	15,0

A figura VI.11 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

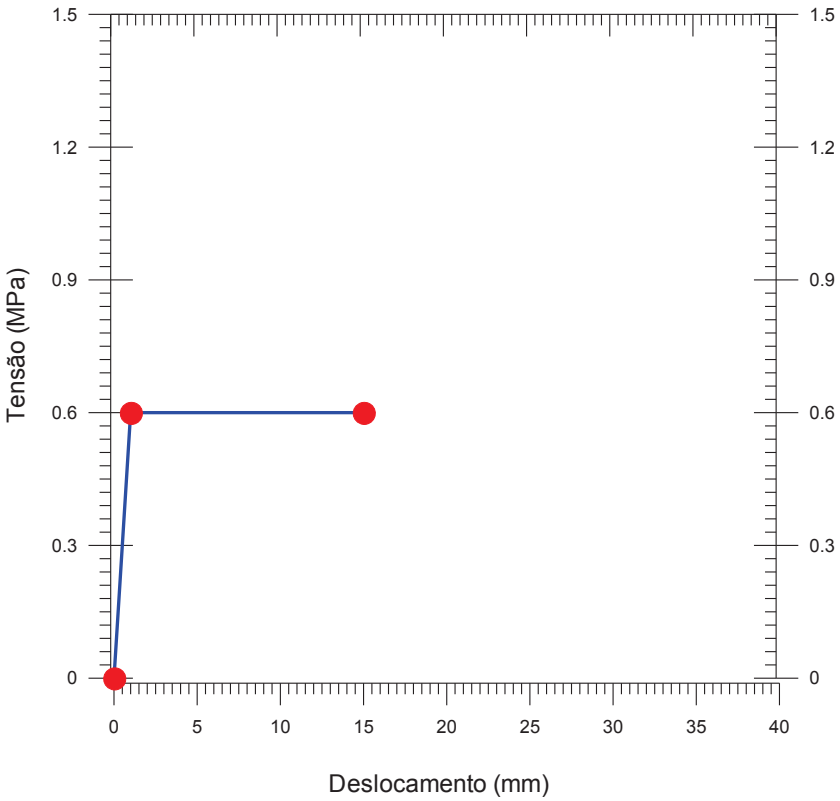


Figura VI.11 – Curva tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 110 AMB

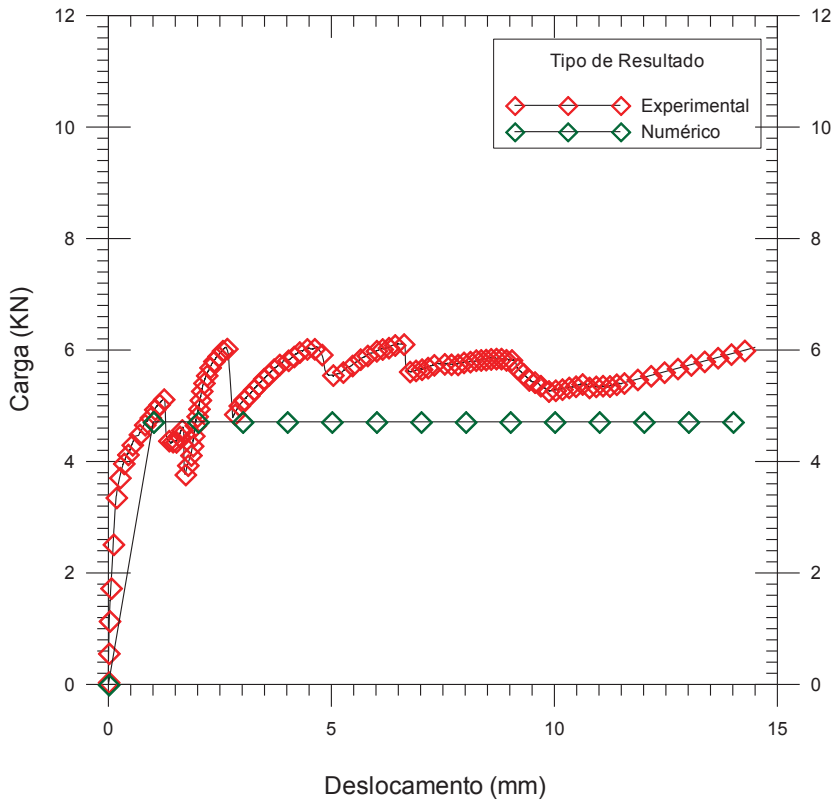


Figura VI.12 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 110 AMB

O comparativo apresentado na figura VI.12 foi feito com o resultado numérico produzido com as condições ora apresentadas e com a curva média gerada a partir dos resultados experimentais obtidos com os corpos de prova de GCR0 110 AMB. Verifica-se que a forma geral da curva experimental é complexa e que o resultado numérico é gerado com retas que mais se aproximam da curva experimental por baixo. Para gerar resultados numéricos mais próximos dos experimentais, seria necessário utilizar como dados de entrada no diagrama tensão versus deslocamento um número grande de pontos que faria com que a produção de curvas numéricas se tornasse muito demorada e complexa.

VI.4.2 Resultado para GCR0 110 AMB com falha na solda

Para realizar a simulação numérica foi utilizado o valor de 0,75 MPa para resistência à tração da interface e para o RN o valor de 1,1 e+09 N/m^3. A tabela VI.7 apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.7 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 110 AMB com falha na solda

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,75	0,7
0,75	1,8
0,45	1,9
0,20	3,4

A figura VI.13 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

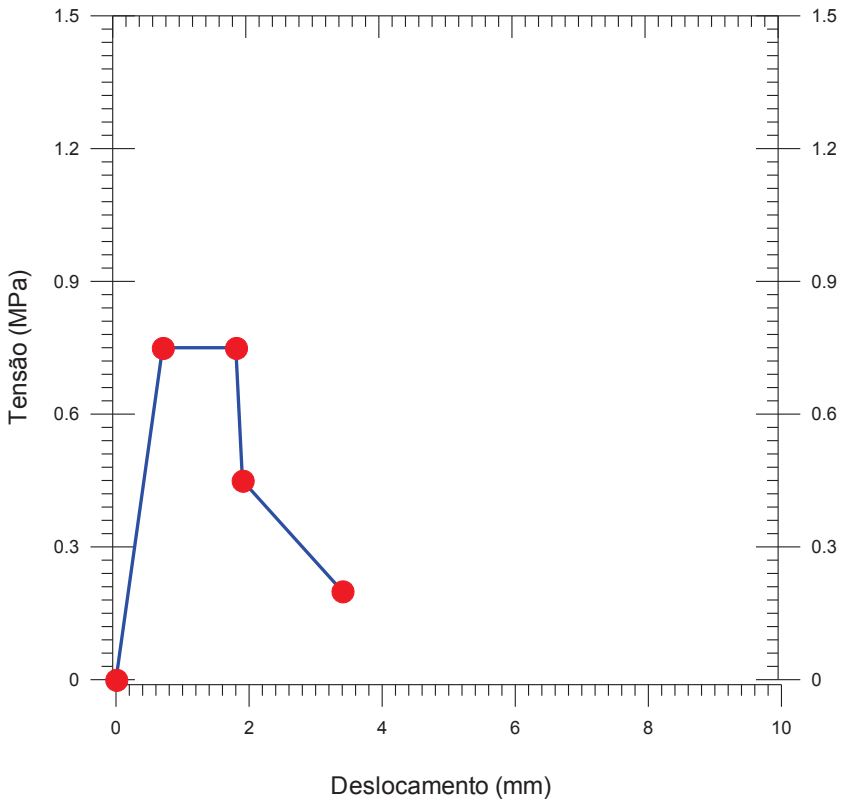


Figura VI.13 – Curva tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 110 AMB com falha na solda

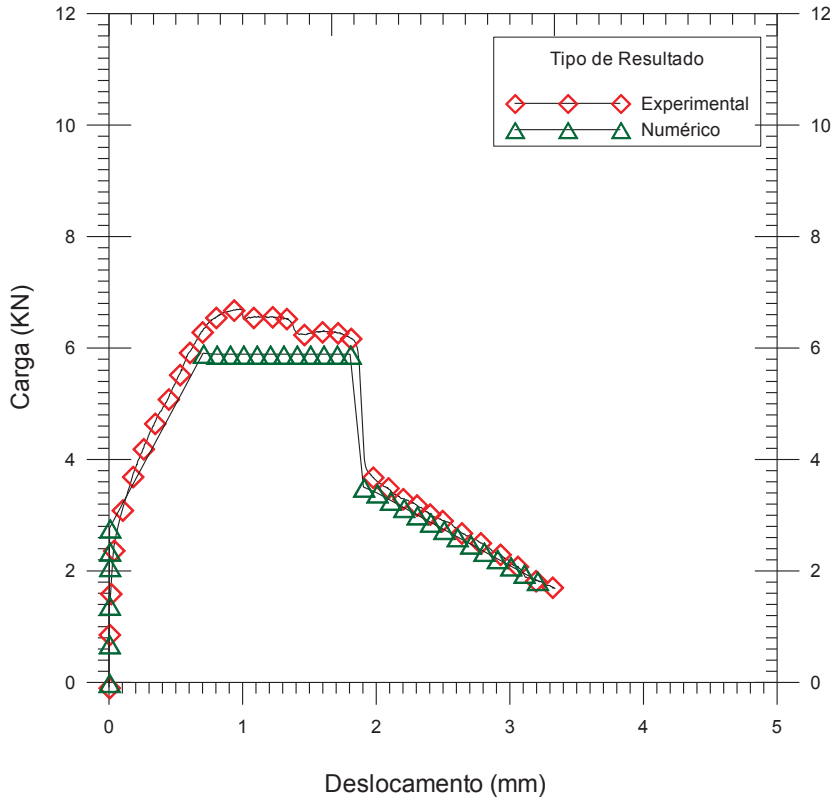


Figura VI.14 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 110 AMB com falha na solda

A forma geral da curva experimental, apresentada na figura VI.14, é próxima a uma parábola. O resultado obtido numericamente é bem próximo ao experimental ao longo de toda a curva tensão versus deslocamento com exceção do plator de tensão formado em 0,75 MPa na curva numérica. Nesta região, a curva experimental assume uma forma que exigiria mais pontos como dados de entrada para o comportamento multilinear apresentado pela interface, o que não é conveniente, como já explicado anteriormente.

VI.4.3 Resultado para GCR1.24 110 AMB

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,90 MPa para resistência à tração da interface e, para o RN, o valor de 3,6 e+08 N/m^3. A tabela VI.8 apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.8 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 110 AMB

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,90	2,50
0,90	13,5
0,80	22,0
0,35	31,0

A figura VI.15 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

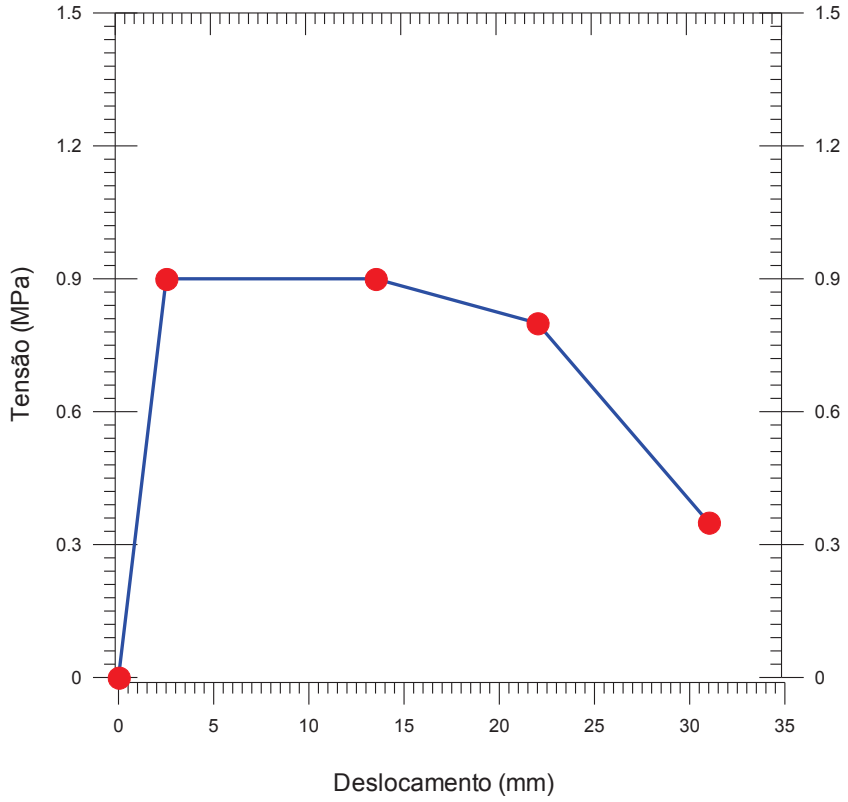


Figura VI.15 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 110 AMB

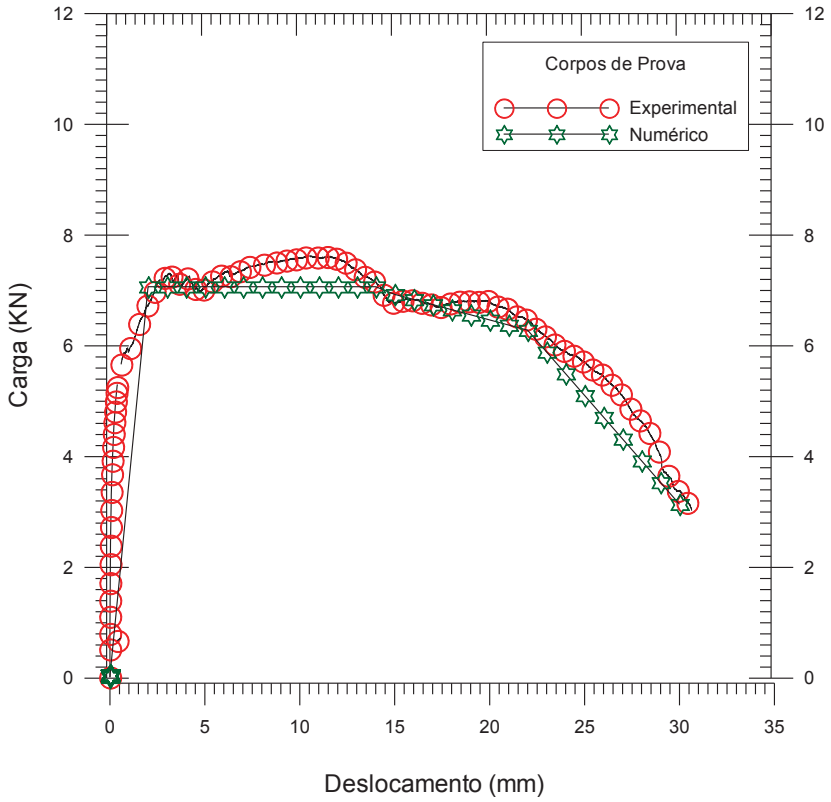


Figura VI.16 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR1.24 110 AMB

A curva experimental, conforme se observa na figura VI.16, apresenta uma região com comportamento linear até cerca de 1 mm, em seguida ocorre uma pequena elevação na tensão e a partir de 2,5 mm a tensão fica variando em torno de 0,9 MPa até 15 mm quando a tensão começa a cair levemente até cerca de 32 mm. O resultado obtido numericamente buscou acompanhar a curva experimental com o compromisso de manter a área sob a curva bem próxima do que foi observado no resultado experimental. A principal diferença entre os resultados experimental e numérico está na forma da curva numérica, que é formada por retas, enquanto a experimental tem o formato mais curvo, com pequenas elevações e depressões ao longo de sua extensão. Em vez da abordagem utilizada uma outra possibilidade seria utilizar mais pontos para descrever o comportamento multilinear da interface.

VI.4.4 Resultado para GCR1.24 110 AMB com falha na solda

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,85 MPa para resistência à tração da interface e para o RN o valor de 8,5 e+08 N/m^3. A tabela VI.9

apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.9 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,85	1,00
0,70	10,0
0,40	12,0

A figura VI.17 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

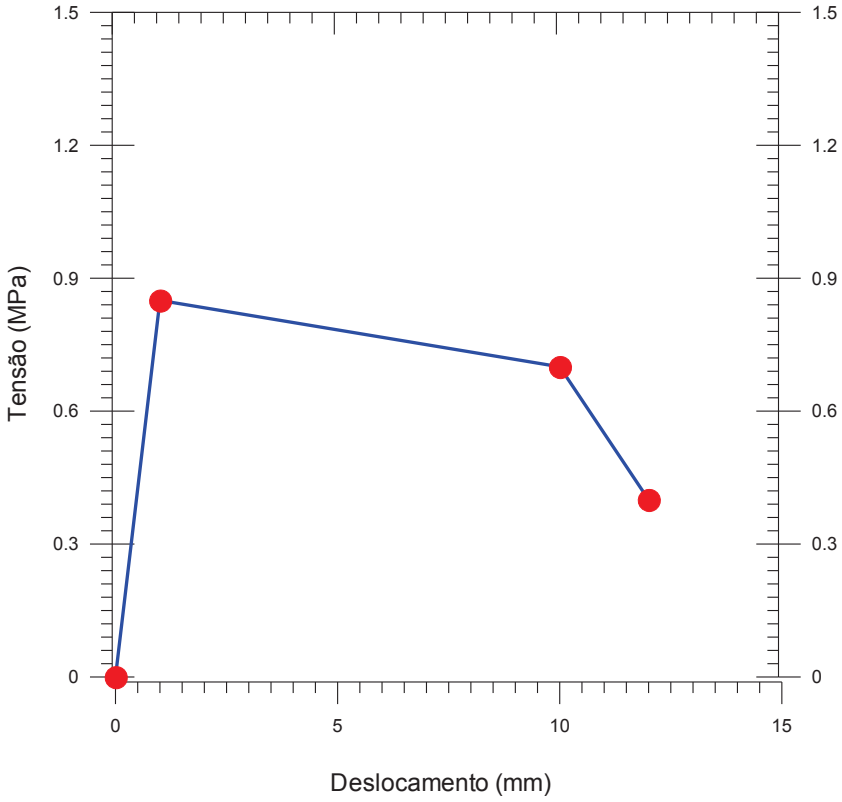


Figura VI.17 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 110 AMB com falha na solda

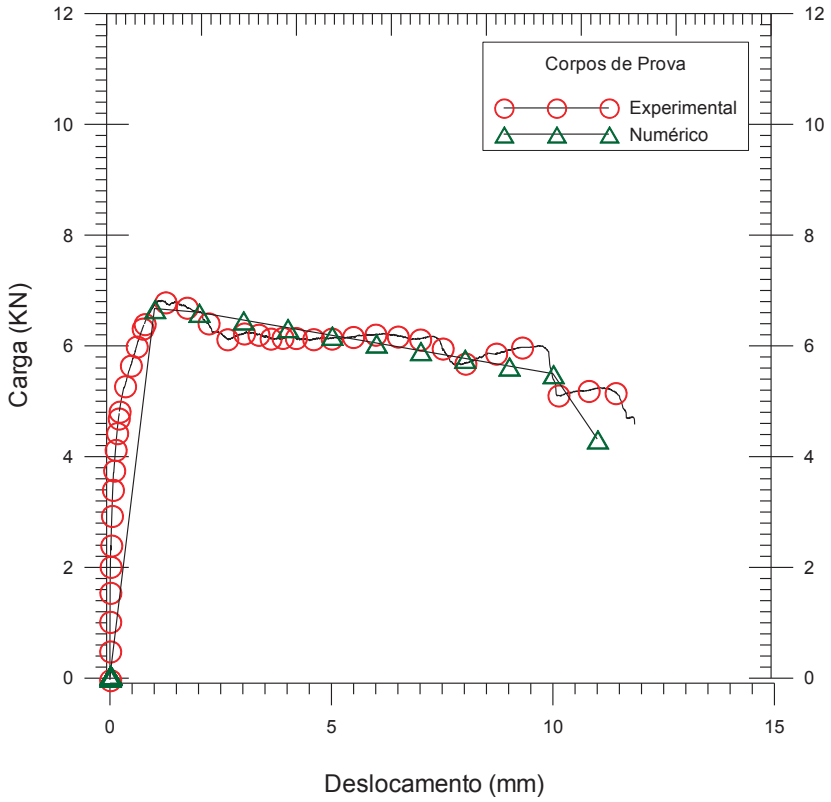


Figura VI.18 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR1.24 110 AMB com falha na solda

Como se pode observar na figura VI.18, a curva experimental apresenta uma região com comportamento linear até cerca de 2 mm, em seguida ocorre uma pequena elevação na tensão e um trecho onde a tensão começa a cair levemente até cerca de 13 mm, onde acontece uma queda abrupta da tensão devido à falha na solda. O resultado obtido numericamente buscou acompanhar a curva experimental o mais próximo possível, utilizando quatro pontos como dados de entrada para o comportamento multilinear da interface na pós-fissuração. Verifica-se que as duas curvas ficaram muito próximas com uma pequena diferença no trecho linear inicial da curva, em que se procurou manter as curvas próximas nos pontos de início e fim do trecho em reta e também no trecho final da queda de tensão.

VI.4.5 Resultado para GCR0 210 210

Para realizar a simulação numérica foi utilizado o valor de 0,75 MPa para resistência à tração da interface e para o RN o valor de 7,5 e+08 N/m^3. A tabela VI.10

apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.10 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,75	1,00
0,75	4,50
0,60	10,0
0,75	13,0

A figura VI.19, mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada, que foi produzida com os dados indicados acima.

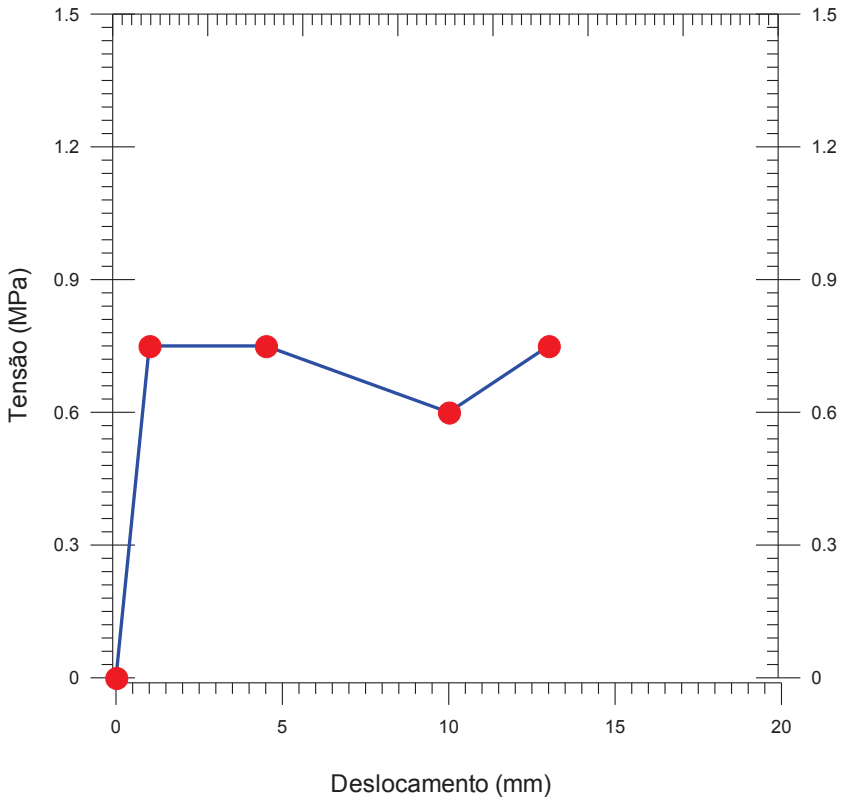


Figura VI.19 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210

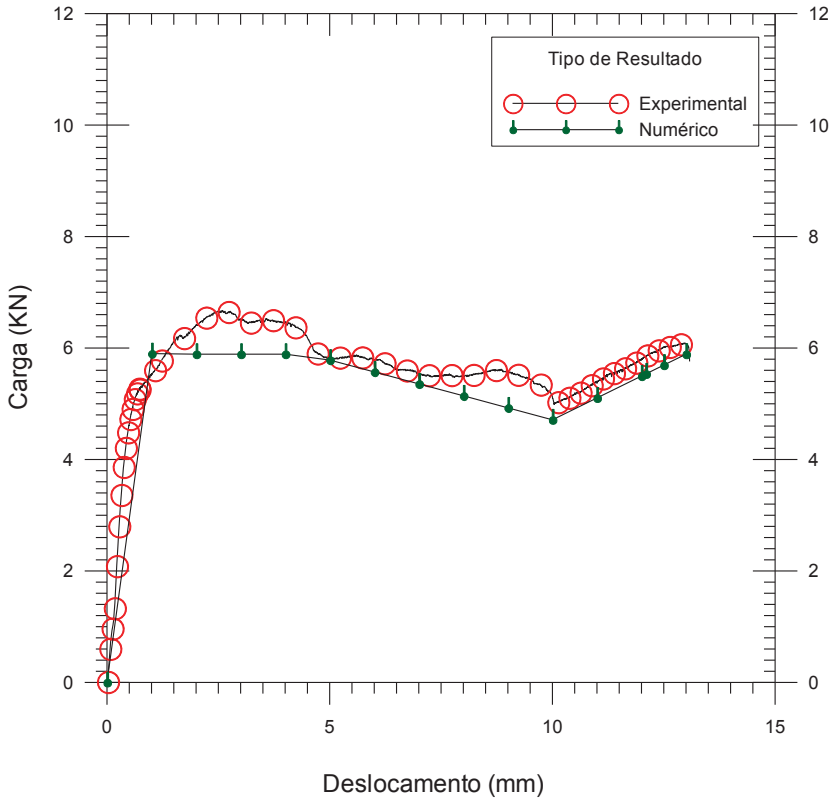


Figura VI.20 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para GCR0 210 210

O resultado da figura VI.20 mostra um comportamento até o momento não identificado experimentalmente com corpos de prova secos a 110 ° C e ensaiados à temperatura ambiente. No trecho final da curva ocorre aumento da tensão após trecho de queda. Verifica-se que a forma geral da curva experimental possui um trecho linear até cerca de 1 mm de deslocamento; em seguida, inicia-se um trecho curvo até se atingir a tensão máxima. A curva experimental a partir de 3 mm começa um trecho descendente, que pode se traduzir no esticamento do grampo com uma leve queda da tensão de valores da ordem de 0,90 MPa, até cerca de 0,70 MPa. Em torno de 10 mm de deslocamento, ocorre um aumento da tensão até sua queda abrupta em torno de 13,5 mm. Esta ocorre pelo rompimento do concreto na região em torno do grampo de ancoragem e o conseqüente desprendimento de um dos braços do grampo de ancoragem do cilindro de concreto. Verifica-se que as curvas experimentais e numéricas ficaram bem próximas, diferindo apenas na região da curva experimental, que vai de 3 mm até 10 mm, onde a curva numérica é aproximada por retas e por baixo da curva experimental.

VI.4.6 Resultado para GCR0 210 210 com falha na solda

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,75 MPa, para resistência à tração da interface e, para o RN, o valor de 7,5 e+08 N/m^3. A tabela VI.11 apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.11 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,75	1,00
0,75	5,00
0,40	6,00
0,40	19,0

A figura VI.21 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

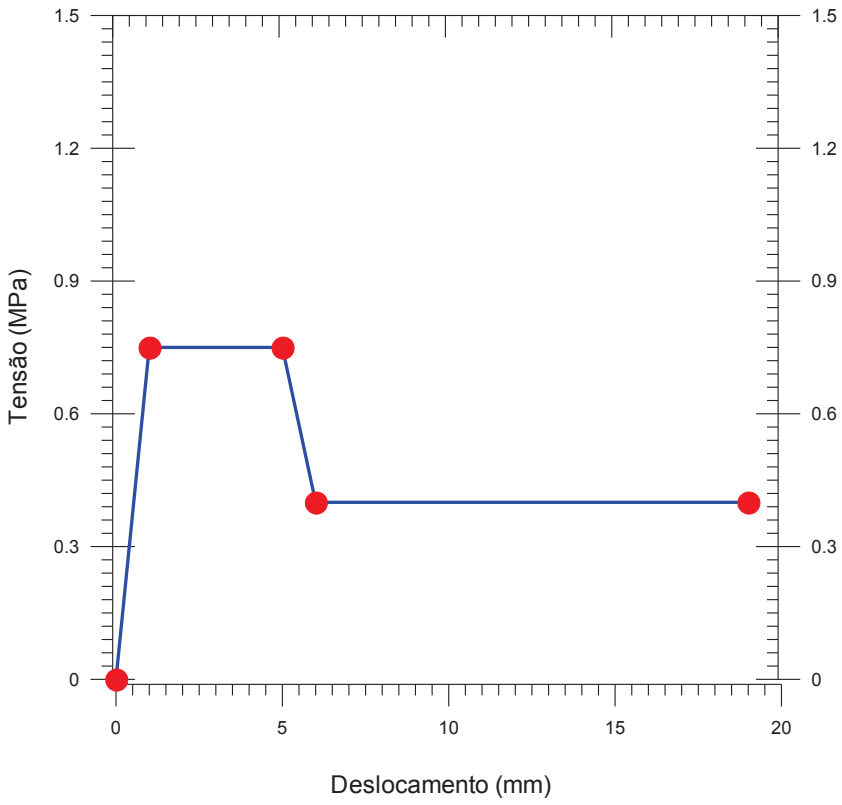


Figura VI.21 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210 com falha na solda

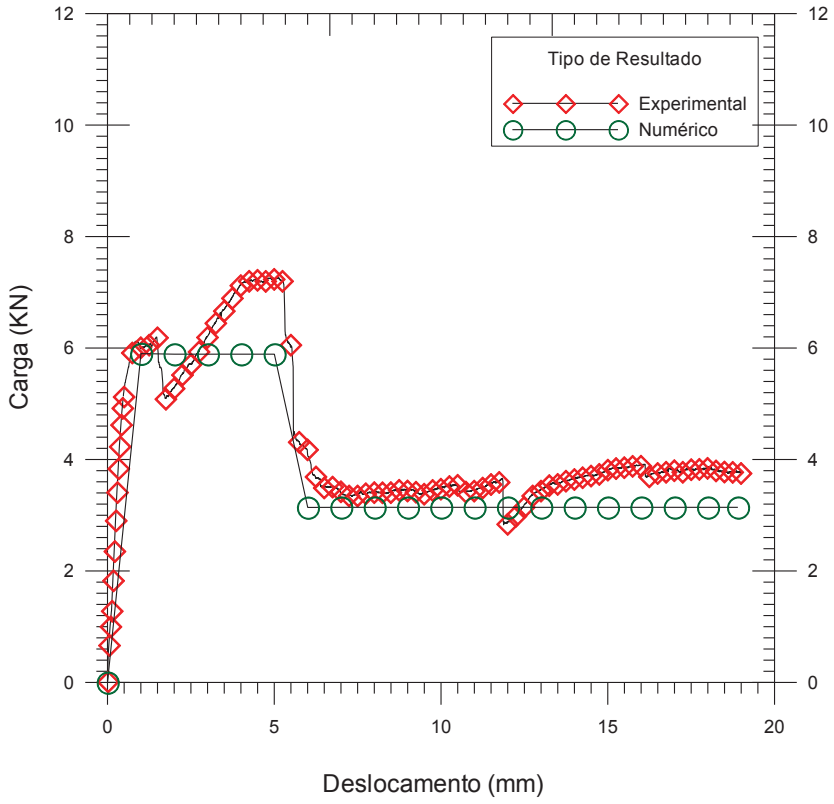


Figura VI.22 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR0 210 210 com falha na solda

Na figura VI.22, a curva experimental apresenta uma região com comportamento linear, até cerca de 1 mm; em seguida, ocorre uma pequena elevação na tensão, uma queda e uma nova elevação, até se atingir a tensão máxima em torno de 0,95 MPa. Após esta valor máximo alcançado, ocorre um declínio acentuado na tensão, formando-se um plator em torno de 0,5 MPa, até cerca de 19 mm de deslocamento. Como descrito, verifica-se que o comportamento apresentado é bastante complexo e, desta forma, busca-se gerar um resultado numérico com retas que se aproximem por baixo da curva obtida experimentalmente, ressaltando suas principais características mencionadas. Mais uma vez, foi feita a opção de simplificar o problema, com o objetivo de se ter um modelo de fácil utilização.

VI.4.7 Resultado para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,66 MPa para resistência à tração da interface e, para o RN, o valor de 6,6 e+08 N/m^3. A tabela VI.12

apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.12 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,66	1,00
0,66	20,0
0,63	28,0
0,20	30,0

A figura VI.23 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

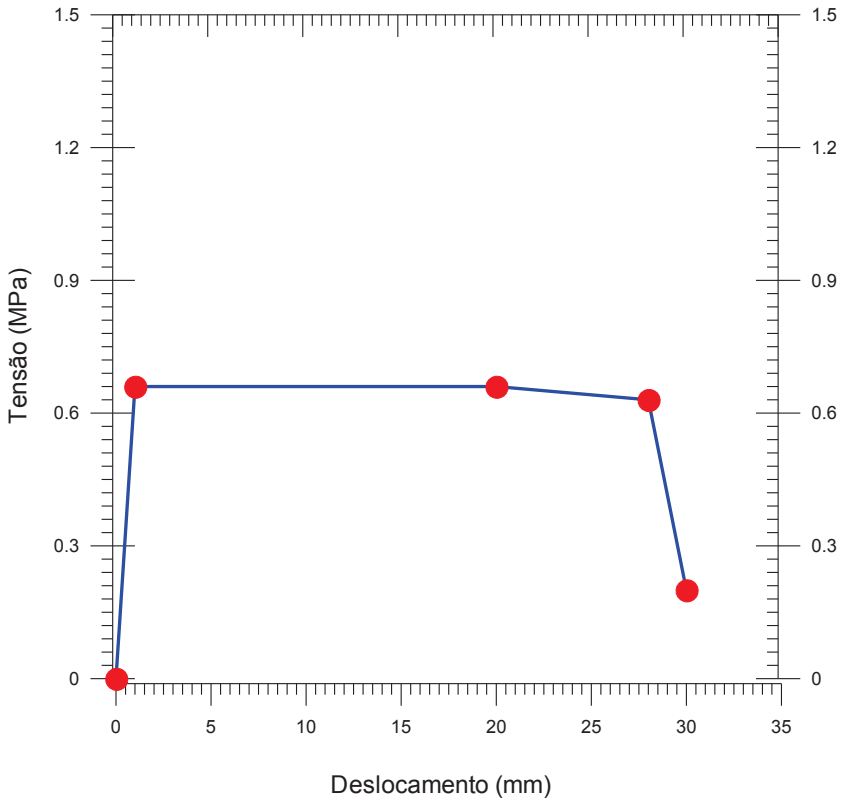


Figura VI.23 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado

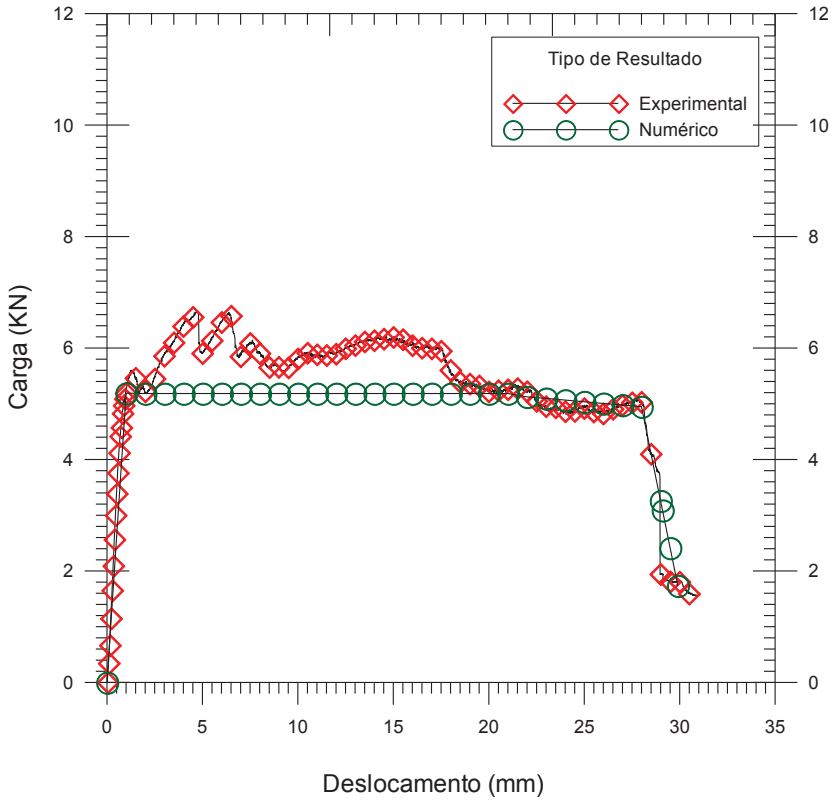


Figura VI.24 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR0 210 210 com falha na solda e esticamento prolongado

A curva experimental, apresentada na figura VI.24, possui uma região com comportamento linear até cerca de 1 mm; em seguida, ocorre uma pequena elevação na tensão e um trecho onde a tensão começa a cair levemente até cerca de 27 mm, em que acontece uma queda abrupta da tensão, devido ao rompimento na solda. O resultado obtido numericamente buscou acompanhar a curva experimental o mais próximo possível, utilizando 4 pontos como dados de entrada para o comportamento multilinear da interface na pós-fissuração. Verifica-se que as duas curvas ficaram próximas nos trechos inicial e final, com diferença no trecho, que vai de cerca de 1 mm até 20 mm de deslocamento, onde a curva experimental assume um comportamento muito complexo. Deve-se ressaltar, também, que a curva numérica foi aproximada da experimental por baixo neste trecho.

VI.4.8 Resultado para GCR1.24 210 210

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,80 MPa para resistência à tração da interface e, para o RN, o valor de 4,0 e+08 N/m^3. A tabela VI.13

apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.13 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 210 210

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,80	2,00
0,80	14,0
0,70	20,0
0,28	28,0

A figura VI.25 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

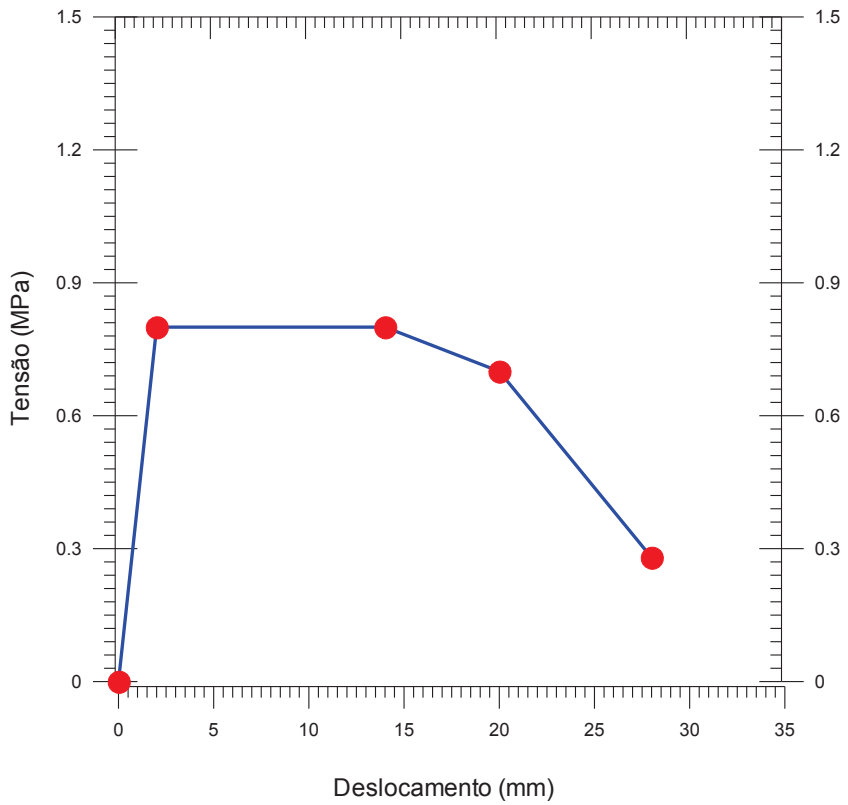


Figura VI.25 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 210 210

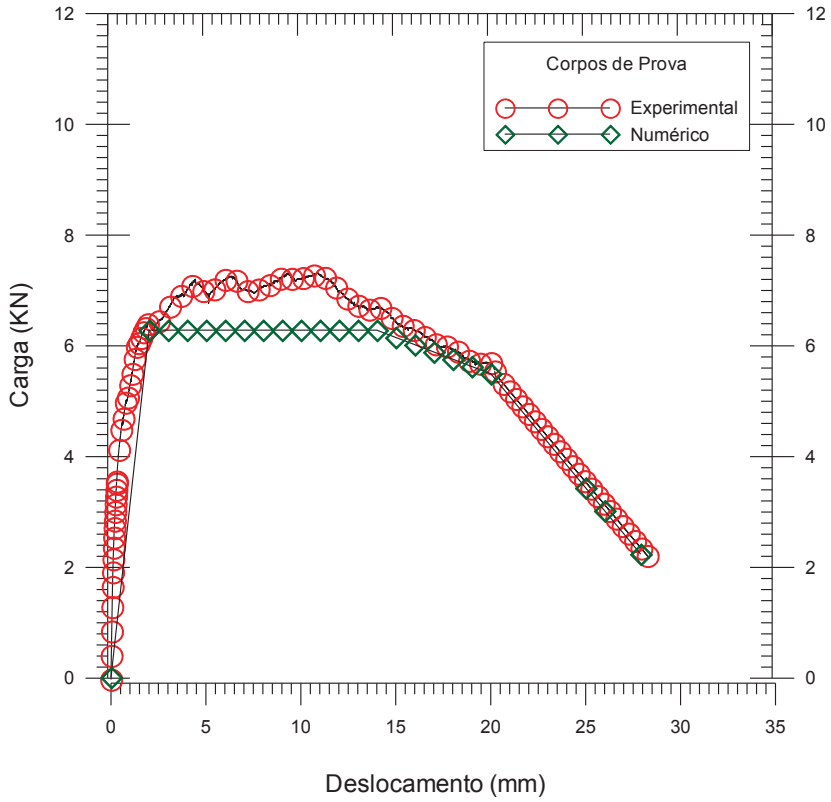


Figura VI.26 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR1.24 210 210

Através da figura VI.26, verifica-se que a curva experimental apresenta uma região com comportamento linear até cerca de 1 mm; em seguida, ocorre uma pequena elevação na tensão, até que esta se estabiliza em torno de 0,9 MPa no trecho de 5 a 11 mm. Após este trecho, a tensão começa a cair até cerca de 20 mm e, de forma mais intensa, a partir deste ponto, até cerca de 30 mm. O resultado obtido numericamente buscou acompanhar a curva experimental da melhor forma possível, o que foi conseguido com sucesso. A principal diferença que pode ser apontada é no trecho que vai de 1 mm até 11 mm, que foi aproximado para uma curva no resultado numérico em relação à curva média experimental. Para se gerar numericamente a elevação que ocorre na curva experimental, seria necessário o emprego da função *hardening.* Contudo, optou-se por não se utilizar esta função, com intuito de produzir um modelo mais simples e de fácil utilização.

VI.4.9 Resultado para GCR1.24 210 210 com falha na solda

Para realizar a simulação numérica, foi utilizado o valor de 0,85 MPa para resistência à tração da interface e, para o RN, o valor de 3,0 e+08 N/m^3. A tabela VI.14 apresenta os dados de entrada para tensão e deslocamento atribuídos para o comportamento pós-fissuração da interface.

Tabela VI.14 – Dados do diagrama tensão versus deslocamento para GCR1.24 210 210 com falha na solda

σ – tensão (MPa)	Δ - deslocamento (mm)
0,85	2,80
0,85	11,0
0,80	13,0

A figura VI.27 mostra o aspecto da curva tensão x deslocamento utilizada como dado de entrada que foi produzida com os dados indicados acima.

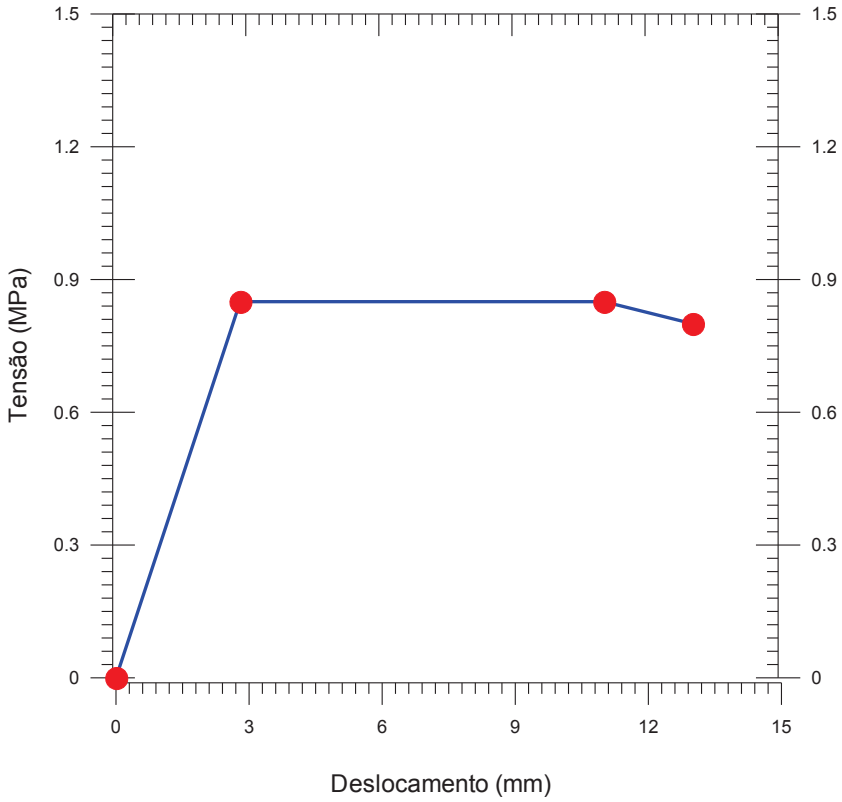


Figura VI.27 – Diagrama tensão x deslocamento da interface para simular os resultados experimentais obtidos para GCR1.24 210 210 com falha na solda

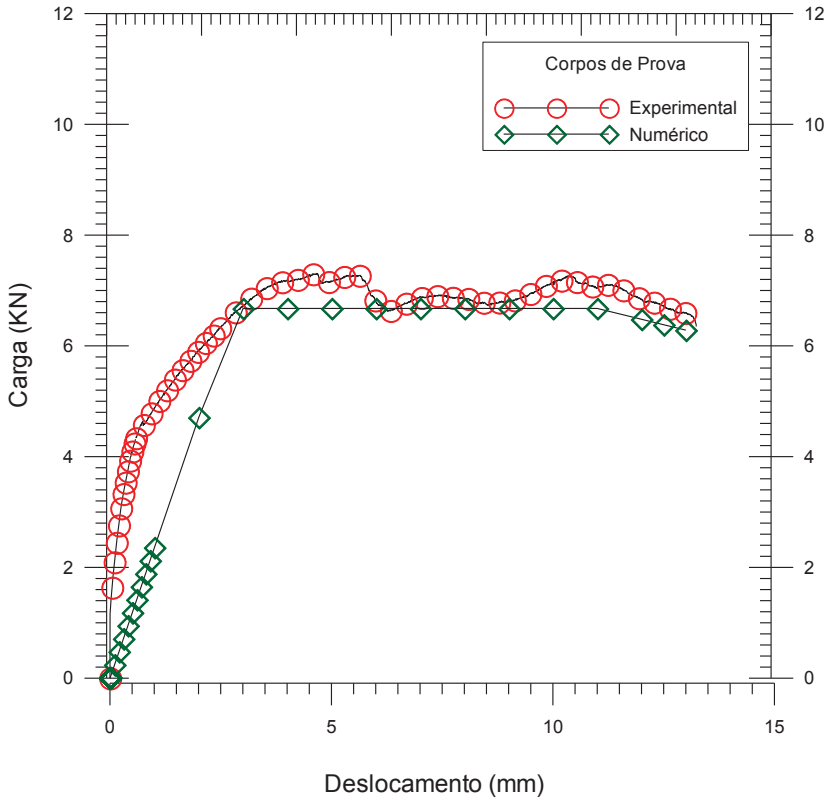


Figura VI.28 – Comparativo entre Resultado Experimental e Numérico para o GCR1.24 210 210 com falha na solda

A curva experimental da figura VI.28 apresenta uma região com comportamento linear do seu início até cerca de 1,5 mm; em seguida, ocorre uma elevação na tensão, até se atingir um valor máximo. A partir de 3 mm até 13 mm de deslocamento, a tensão oscila em torno de um plator com uma tensão média de 0,9 MPa até a falha na solda. O resultado numérico buscou acompanhar a curva experimental utilizando três pontos como dados de entrada para o comportamento multilinear da interface. As duas curvas ficaram próximas com uma diferença no trecho inicial da curva, onde se procurou uma aproximação por baixo. Desta forma, a inclinação da reta no trecho linear para as curvas ficou diferente, o que poderia ser melhorado com o emprego da função *hardening*. Além disso, seria necessário utilizar mais pontos para descrever o comportamento pós-fissuração da interface, pois o formato da curva experimental neste trecho se aproxima de uma parábola.

VI.4.10 Passos de carga utilizados para os modelos numéricos gerados

A tabela VI.15 apresenta o valor fornecido em metros, lembrando que a carga imposta é de deslocamento, e a quantidade de passos de carga utilizados para cada um dos modelos numéricos gerados. O tamanho, bem como a quantidade dos passos

adotados, foram definidos de forma a utilizar o suficiente para se obter resultados satisfatórios. As nomenclaturas FS e EP significam, respectivamente, falha na solda (FS) e esticamento prolongado (EP).

Tabela VI.15 – Tamanho e Quantidade de Passos de Carga Utilizados

Modelo	Tamanho dos passos de carga (m)						Total
	$1x10^{-6}$	$1x10^{-7}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-3}$	$7x10^{-4}$	$1x10^{-4}$	
GCR0 110 AMB	3	5	50	14	0	0	72
GCR0 110 AMB - FS	3	5	50	0	1	25	84
GCR1.24 110 AMB	3	5	50	30	0	0	88
GCR1.24 110 AMB – FS	3	5	50	12	0	0	70
GCR0 210 210	3	5	50	12	0	10	80
GCR0 210 210 – FS	3	5	50	18	0	9	85
GCR0 210 210 – FS com EP	3	5	50	29	0	9	96
GCR1.24 210 210	3	5	50	27	0	10	95
GCR1.24 210 210 – FS	3	5	50	12	0	10	80

VI.4.11 Comparativo das Curvas Tensão Versus Deslocamento

As figuras VI.29 e VI.30 apresentam um comparativo das curvas tensão – deslocamento utilizadas para descrever o comportamento multilinear da interface utilizadas como dados de entrada para gerar os resultados numéricos obtidos.

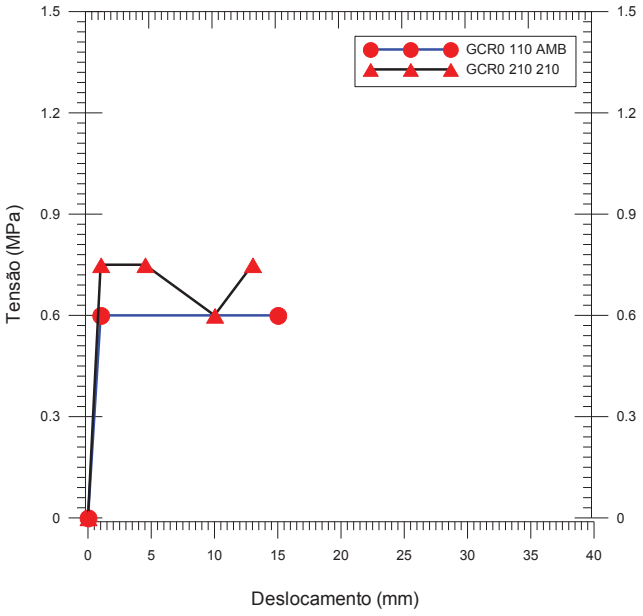


Figura VI.29 – Comparativo de curvas tensão versus deslocamento para GCR0

Verifica-se que as curvas tensão deslocamento foram aproximadas por retas nos trechos em que as curvas experimentais oscilaram. Uma outra observação importante é que se buscou produzir os resultados numéricos aproximando-se por baixo das curvas experimentais, de forma a não gerar resultados maiores em termos de tensão, em relação ao que foi obtido experimentalmente.

Para as curvas numéricas geradas, os valores de RN variaram de 3,0 e+08 N/m^3 a 1,1 e+09 N/m^3, conforme a inclinação do trecho linear obtida dos resultados experimentais. Verificou-se, ainda, que esta inclinação é função das características dos grampos; que, após o descolamento da interface, trabalham suportando a carga de tração aplicada ao corpo de prova.

A figura VI.30 apresenta as curvas tensão versus deslocamento para os corpos de prova produzidos com fibras de aço. Constata-se que a mudança de temperatura gerou uma variação da inclinação da reta, que se traduziu em uma modificação na característica linear elástica da interface.

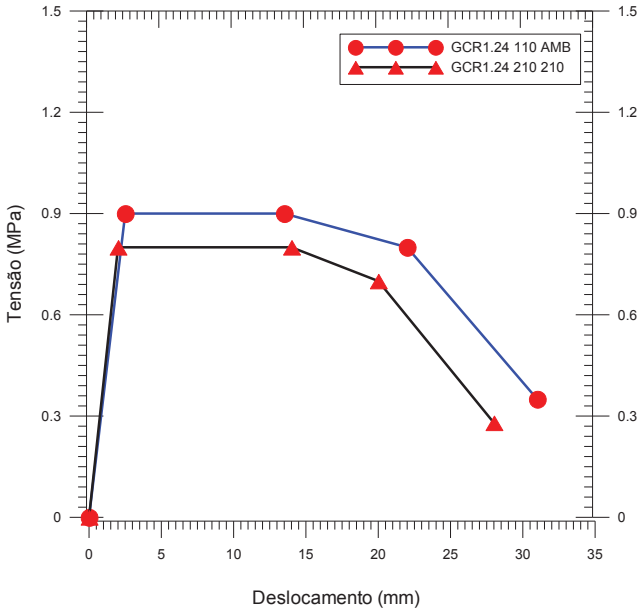


Figura VI.30 – Comparativo de curvas tensão versus deslocamento para GCR1.24

Das curvas tensão versus deslocamento, apresentadas nas figuras VI.29 e VI.30, a que se mostra mais adequada para uso para alimentar futuros modelos numéricos, foi a desenvolvida para o GCR1.24 210 210, pois esta é a condição que mais se aproxima da realidade encontrada na interface entre o costado de aço e o revestimento refratário em UCCF.

Verifica-se que os resultados numéricos, de maneira geral, ficaram muito próximos dos resultados experimentais obtidos. Buscou-se, em todas as simulações, utilizar curvas tensão versus deslocamento, que acompanhassem, na medida do possível, a inclinação do trecho linear, que aparece na maior parte dos resultados numéricos, gerando, conseqüentemente, resultados numéricos o mais próximo possível.

Devido à grande complexidade dos dados experimentais encontrados, optou-se por não se construir o grampo de ancoragem, como pode ser observado na geometria do modelo, mas introduzir na superfície de interface o comportamento encontrado nos experimentos realizados para avaliar o funcionamento da interface com grampo de ancoragem. Esta estratégia mostrou-se eficiente, pois além de simplificar o modelo numérico gerado conseguiu produzir resultados muito próximos aos obtidos através dos experimentos realizados como era o esperado.

Uma observação geral, que merece ser mencionada, e serve para todos os dados utilizados para compor o diagrama tensão versus deslocamento da interface na pós-fissuração, é que, para o comportamento multilinear não foi utilizado o *hardening* (enrijecimento) que, em alguns casos, principalmente para o trecho logo após o término da região linear, e antes do plator que costuma se formar para as tensões mais elevadas, poderia representar uma melhoria dos resultados numéricos para esta região. Por fim, outro meio de produzir resultados numéricos mais próximos dos experimentais obtidos seria introduzir um maior número de pares tensão deslocamento para descrever o comportamento multilinear da interface na pós-fissuração. Contudo, esta medida dificultaria bastante a obtenção de resultados numéricos com rapidez, uma vez que, para ajustar estes modelos, seria necessário, também, um maior número de passos de carga, tornando o modelo numérico mais pesado.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

VII.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas por meio deste trabalho podem ser resumidas nas mencionadas abaixo:

A caracterização mecânica realizada para o concreto refratário denso utilizado neste trabalho mostrou que a introdução de fibras de aço na matriz de concreto refratário proporcionou incremento na resistência à flexão e à tração direta. Contudo, para a resistência à compressão, as variações obtidas não foram estatisticamente significativas. Com relação ao módulo de elasticidade, observou-se que a introdução de fibras de aço não significou incremento no módulo de elasticidade para a compressão, mas, para a tração, ocorreu incremento. Para a resistência à compressão, flexão e tração, verificou-se que não ocorreu variação estatisticamente significativa para a temperatura sob o qual as amostras foram submetidas, antes e após os ensaios. Já o módulo de elasticidade, sofreu variações estatisticamente significativas para a tração e não teve alteração significativa para a compressão.

Os resultados experimentais para analisar a interface entre discos de aço e concreto refratário sem ancoragem mostraram que a adesão produzida na superfície de contato desses materiais depende da rugosidade dos discos de aço. Para discos com superfície lisa, a adesão tem valores muito próximos de zero. Nestes testes, apesar de terem sido obtidos resultados com o valor de carga algumas vezes elevado, não se obteve para as situações que foram estudadas deslocamentos representativos. Quase todos eles estão muito próximos a zero. Assim sendo, caso fosse eleita a tenacidade como uma característica que pode ser utilizada para comparação entre o desempenho da interface, nas mais variadas situações, observa-se que a introdução da ancoragem é o que de fato alterou este quadro.

Para os casos de estudos realizados com as amostras constituídas de disco de aço com ancoragem e cilindros de concreto refratário, observa-se que além das curvas carga versus deslocamento, para os resultados obtidos, quando o grampo desempenha o seu papel, conforme o esperado, são também apresentadas essas curvas para quando ocorre falha na solda, pois esta ocorreu com freqüência durante a realização dos ensaios. Para corpos de prova de GCR0 ensaiados a frio e a quente, observa-se

que ocorre o rompimento do corpo de prova no concreto com um esticamento parcial do grampo de ancoragem com deslocamentos da ordem de 15 mm. Para estes mesmos corpos de prova, caso ocorra falha na solda, verifica-se que o deslocamento apresenta uma grande variação de 3,5 a 30,0 mm.

Para os ensaios realizados com o GCR1.24, tanto a frio como a quente, observa-se que a adição de fibras proporcionou um melhor desempenho do grampo de ancoragem, pois o concreto não se rompe durante o ensaio, ficando apenas fissurado na região de contato do grampo com o concreto. Assim sendo, são obtidos deslocamentos da ordem de 25 a 35 mm. Quando se observa falha na solda para o GCR1.24, ensaiado tanto a frio como a quente, o deslocamento obtido varia de 10 a 15 mm.

Para a carga de decoesão, verifica-se que seus valores médios variaram de 4,80 KN a 6,15 KN, cujo significado representa o valor máximo alcançado dentro do trecho com comportamento linear-elástico. Com relação à carga máxima, verifica-se que não ocorreram variações significativas para todas as condições de ensaio estabelecidas. Além disso, observa-se que a adição de fibras proporcionou um melhor desempenho do grampo, pois o concreto passou apenas a fissurar em torno do grampo e não se romper como aconteceu para os corpos de prova preparados com a mistura sem fibras.

Quando a comparação foi feita levando em conta a temperatura a que as amostras foram submetidas antes e durante o ensaio, verifica-se que as amostras GCR0 210 210 e GCR1.24 210 210 obtiveram valores não significativos para os corpos de prova de GCR0 110 AMB e GCR1.24 110 AMB, respectivamente.

Os resultados apresentados para os modelos numéricos desenvolvidos para quando o grampo de ancoragem foi utilizado em corpos de prova de 100 mm de diâmetro ficaram bastante próximos dos resultados experimentais obtidos. É importante salientar que estes resultados foram obtidos considerando o comportamento da interface na pós-fissuração como multilinear com o uso de apenas poucos pontos como dados de entrada e utilizando uma estratégia de não modelar os grampos de ancoragem de forma explícita.

Estes resultados poderiam se tornar cada vez mais próximos dos experimentais à medida que fosse aumentado o número de pontos que descrevem o comportamento multilinear na pós-fissuração da interface, bem como se fosse empregado o *hardening* para algumas situações em que se observa o aumento da resistência na pós-fissuração. Contudo, deve-se avaliar se o ganho obtido compensa o custo computacional e o aumento da complexidade do modelo gerado.

VII.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros está o desenvolvimento de uma montagem experimental que possibilite realizar medição de deformações para ensaios realizados a quente. Esta configuração permitirá a obtenção do módulo de elasticidade, tanto à compressão como à tração, quando submetidos a temperaturas elevadas.

Outra necessidade é a realização de ensaios térmicos para avaliar a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica. Os valores destas características também poderiam ser utilizados para alimentar modelos numéricos que poderiam gerar novos resultados com a simples variação da temperatura ao qual o corpo de prova está submetido.

Além disso, com o intuito de melhor conhecer o comportamento das interfaces aço e concreto refratário em unidades de craqueamento catalítico fluido, podem-se realizar ensaios utilizando amostras com variados diâmetros, outros tipos de concreto refratário como, por exemplo, o isolante que é aplicado no costado do regenerador e, também, a avaliação de diferentes tipos de ancoragem, que são utilizados no interior de uma UCCF ou que venham a ser desenvolvidas.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho também podem servir de ponto de partida para se estudar a interface aço – concreto refratário existente em outros tipos de equipamentos industriais que possuam características similares às unidades de UCCF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ROMANO, G.Q., Modelagem Computacional do Impacto Gerado por Carga Explosiva na Remoção de Concreto Refratário Fibroso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

[2] American Concrete Institute, *Refractory Concrete – ACI 547R-79*, Detroit, 1983.

[3] Magnesita Refratário S.A. *On-line*. Disponível na Internet via WWW. URL: *http:// www.magnesita.com*. Consultado em 21 de Outubro de 2010.

[4] Camargo Correa Metais S.A. Visita realizada em suas instalações em Breu Branco – PA em 06 de outubro de 2004.

[5] Ibar – Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários. *On-Line.* Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.ibar.com.br.* Consultado em 23 de Outubro de 2010.

[6] Giusti & Cia. LTDA. *On-Line.* Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.giusti.com.br.* Consultado em 17 de Novembro de 2010.

[7] BAZÃNT, Z. P., KAPLAN, M. F., Concrete at High Temperatures – Material Properties and Mathematical Models. Great Britain, Longman, 1996.

[8] Isar Isolamentos Térmicos e Acústicos. *On-Line.* Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.isar.com.br.* Consultado em 23 de Outubro de 2010.

[9] Calorisol Isolamentos Térmicos – Refratários e Pintura Industrial. *On-Line.* Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.calorisol.com.* Consultado em 09 de Novembro de 2010.

[10] Na boca do Forno, a nova siderurgia. Edição Impressa 69 – Outubro de 2001. *On-Line*. Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.revistapesquisa.fapesp.br.* Consultado em 22 de Outubro de 2010.

[11] ALMEIDA, V.G.O., Caracterização Física e Mecânica à Altas Temperaturas de Concretos Refratários Reforçados com Fibras de Aço. Dissertação de Mestrado,

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

[12] ROMANO, G. Q., SILVA, F., TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R., BATTISTA, R.C.,*"Mechanical Characterization of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Refractory Concrete"* (SCC 2007), pp 881-886, Ghent, Belgiun, 2007

[13] ROMANO, G. Q., SILVA, F., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., FAIRBAIRN, E.M.R., BATTISTA, R.C., "*Impact Loading Behavior of Steel Fiber Reinforced Refractory Concrete Exposed to High Temperatures*" (CONSEC´07), pp 1259 - 1266, Tours, France, 2007.

[14] DESIR, J. M., Interface Aço Concreto: Reformulando os Modelos Constitutivo e Numérico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

[15] SOYLEV T. A., FRANÇOIS R., "*Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel"* Cement and Concrete Research, v.33, pp. 1407-1415, 2003.

[16] WALTER R., OSTERGAARD L., OLESEN J. F., STANG H., "*Wedge Splitting Test for a Steel-Concrete Interface"* Engineering Fracture Mechanics, v.72, pp. 2565-2583, 2005.

[17] JEONG Y. J., KIM H. Y., KOO H. B., KIM S. T., "*Steel-Concrete Interface Behavior and Analisys for Push-Out"* KSCE Journal of Civil Engineering. v.9, pp.119-124, 2005.

[18] BUYUKOZTURK O., GUNES O., KARACA E. "*Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites*" Construction and Building Materials, v.18, pp. 9-19, 2004.

[19] ANDRIEUX C. GABIS V., GASSER A., BOISSE P., REZAKHANLOU R., "*Castable Anchoring Optimization to Improve Service Life Of Refractory Lining*" (UNITECR'97), pp. 317-326, New Orleans, United States,1997

[20] ANDRIEUX C. BOISSE P., DUTHEILLET Y., GABIS V., GASSER A., ROUSSEAU J., "*Modeling and Design of an Anchored Refractory Lining*" (UNITECR'99), pp. 10-12, Berlin, Germany,1999

[21] ANDRIEUX C. BOISSE P., DUTHEILLET Y., GABIS V., GASSER A., ROUSSEAU J., "*Two Layer Composite Shell for Anchored Refractory Lining Computing*" (ICCM12), Paris, France,1999

[22] GASSER A., BOISSE P., ROUSSEAU, J., DUTHEILLET Y., "*Thermomechanical Behavior Analysis and Simulation of Steel/Refractory Composite Linings*" Composites Science and Technology, v.61, pp. 2095-2100, 2001.

[23] BOISSE P., GASSER A., POIRIER, J., ROUSSEAU, J., "*Simulations of Thermomechanical Behavior of Composite Refractory Linings*" Composites Part B: engineering, v.32, pp. 461-474, 2001.

[24] BOISSE P., GASSER A., ROUSSEAU, J., "*Computations of Refractory Lining Structures Under Thermal Loadings*" Advances in Engineering Software, v.33, pp. 487-496, 2002.

[25] FAIRBAIRN, E.M. R. (2008), "Modelagem de refratários em UCCF", comunicação pessoal.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, Determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro.

[27] Maitec – Fornos INTI. *On-Line.* Disponível na *Internet* via WWW. URL: *http://www.maitec.com.br.* Consultado em 09 de Novembro de 2010.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, Materiais 109 Refratários densos não-conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente: NBR 11222. Rio de Janeiro.

[29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002, Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson´s Ratio of Concrete in Compression: ASTM C-469. Philladelphia.

[30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999, Materiais Refratários – Determinação da resistência à flexão a quente: NBR 9642. Rio de Janeiro.

[31] VELASCO, R. V., Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

[32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000, *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brinck and Shapes by Boiling Water:* ASTM C 20 – 00. Philadephia.

[33] Norma para Concreto Refratário N1728 – Revisão H – Petrobras, 2002.

[34] DIANA, 2007. User's Manual Release 9.2, TNO Build and Construction Research, Netherlands, Lakerveld b.v.

[35] Usiminas, http://www.usiminas.com.br/produtos/, Belo Horizonte, acessado em 02/2009.

[36] NBN B 15 238 , 1992, *Essais des betons reforce des fibres – Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques*, Institute Belge de Normalisation (IBN), Brussels, Belgium, 9p.

[37] SILVOSO, M.M., FAIRBAIRN, E.M.R, TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, RIBEIRO F.L.B., Retroanálise do Comportamento Termo-Químico de Estruturas de Usinas Hidrelétricas Utilizando Algoritmos Genéticos (CILAMCE 2009), pp 1 -15, Búzios, Brasil, 2009.

[38] LANKARD. D.R., "*Manufacture of Sifca Composite Precast Shapes*" High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, pp 195-202, Mainz, Germany, 1991.

[39] TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R., Experimentação Modelos Mecânicos e Numéricos para Revestimentos Refratários em Unidades de Refino, Projeto COPPETEC – ANPETRO 10138 , 2009.

[40] Rilem Technical Committee 49 TFR. Testing methods for fiber reinforced cement based composites, Materiaux et Constructions 17 (1984).

ANEXO

(CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRATÁRIOS)

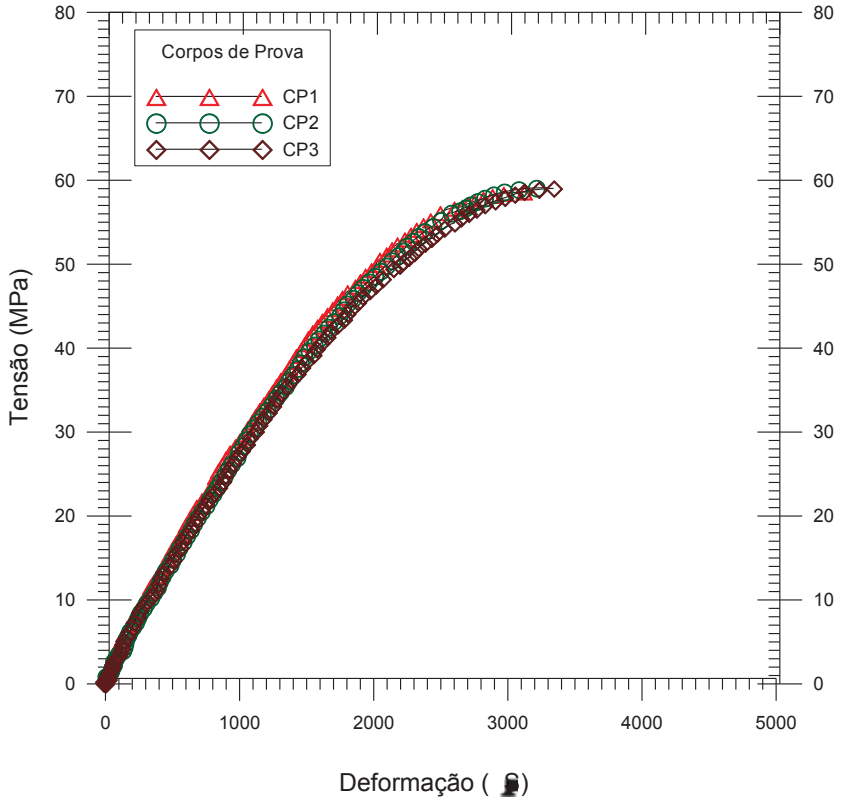


Figura anexo A 1 – Curvas σ – ε na compressão para o concreto CR0 110 AMB

Tabela anexo A 1 – Valores de resistência à compressão, ε_{pico} e E do CR0 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Resistência à compressão (MPa)	58,6	59,1	59,0	58,9	0,45
ε_{pico} (μS)	3200	3291	3362	3284	2,47
E (GPa)	27,9	27,7	26,8	27,5	2,13
Tenacidade (KJ/m^2)	2,25	2,20	2,03	2,16	5,34

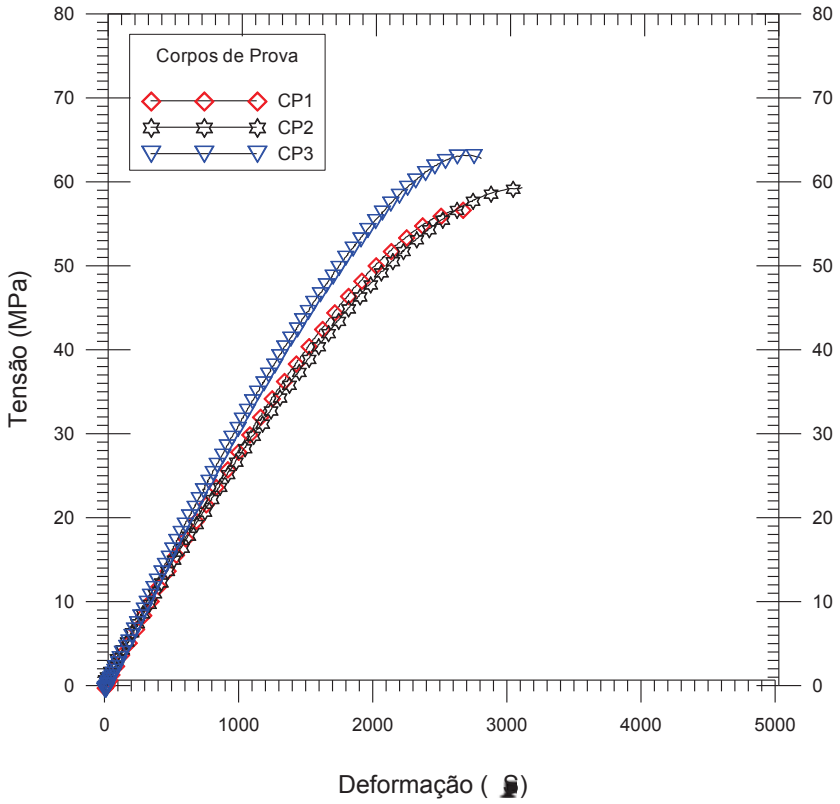


Figura anexo A 2 – Curvas σ – ε na compressão para o concreto CR0 210 AMB

Tabela anexo A 2 – Valores de resistência à compressão, ε_{pico} e E do CR0 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Resistência à compressão (MPa)	56,7	59,3	63,2	59,7	5,48
ε_{pico} (μS)	2669	3108	2727	2835	8,41
E (GPa)	28,6	26,6	32,4	29,2	10,1
Tenacidade (KJ/m^2)	2,00	2,43	2,21	2,21	9,71

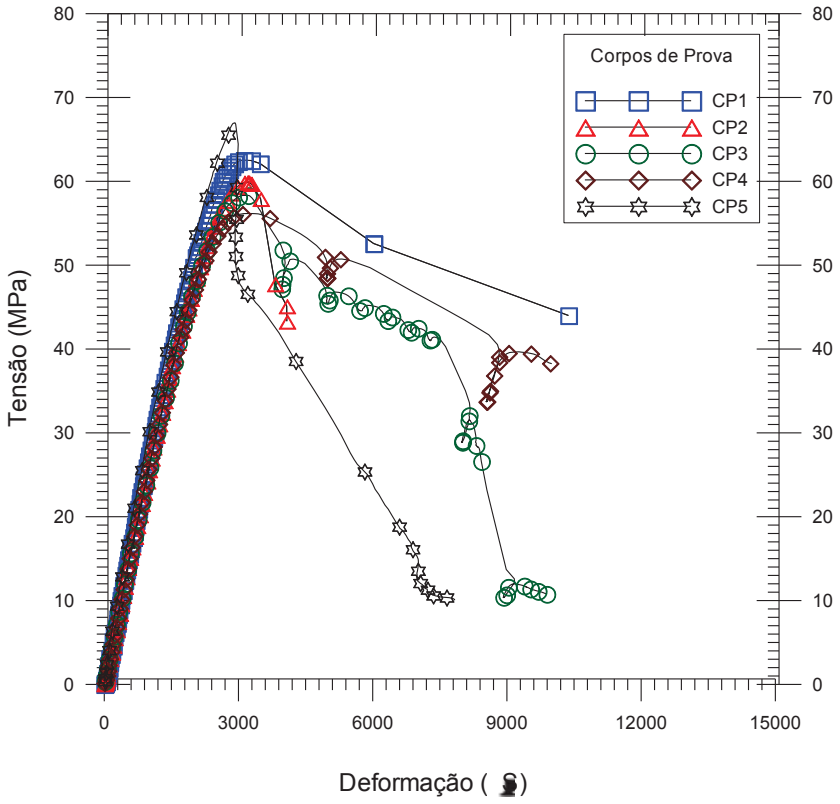


Figura anexo A 3 – Curvas σ – ε na compressão para o concreto CR1.24 110 AMB

Tabela anexo A 3 – Valores de resistência à compressão, ε_{pico} e E do CR1.24 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Resistência à compressão (MPa)	62,5	59,9	58,3	56,2	67,0	60,8	6,85
ε_{pico} (μS)	3121	3171	3193	3207	2921	3123	3,76
E (GPa)	25,2	26,3	26,2	26,8	29,7	26,8	6,40
Tenacidade (KJ/m^2)	2,21	2,07	1,43	2,91	2,37	2,20	24,3

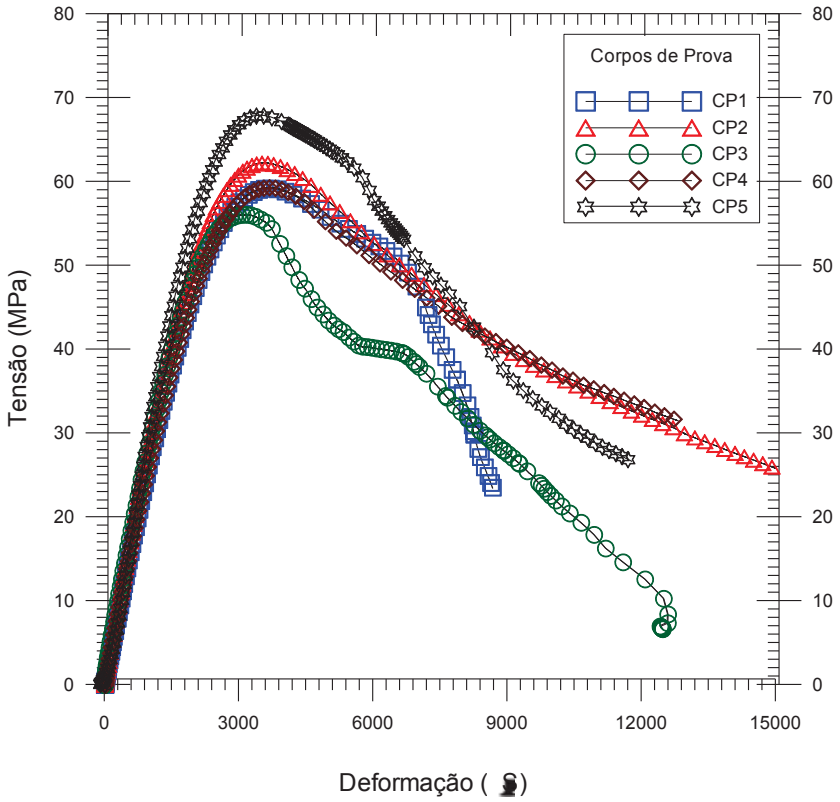


Figura anexo A 4 – Curvas σ – ε na compressão para o concreto CR1.24 210 AMB

Tabela anexo A 4 – Valores de resistência à compressão, ε_{pico} e E do CR1.24 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Resistência à compressão (MPa)	59,3	62,3	56,1	59,3	67,9	61,0	7,30
ε_{pico} (μS)	3650	3530	3119	3666	3479	3489	6,34
E (GPa)	26,6	29,2	28,4	27,0	30,1	28,3	5,15
Tenacidade (KJ/m^2)	2,19	2,39	2,48	2,24	2,41	2,34	5,21

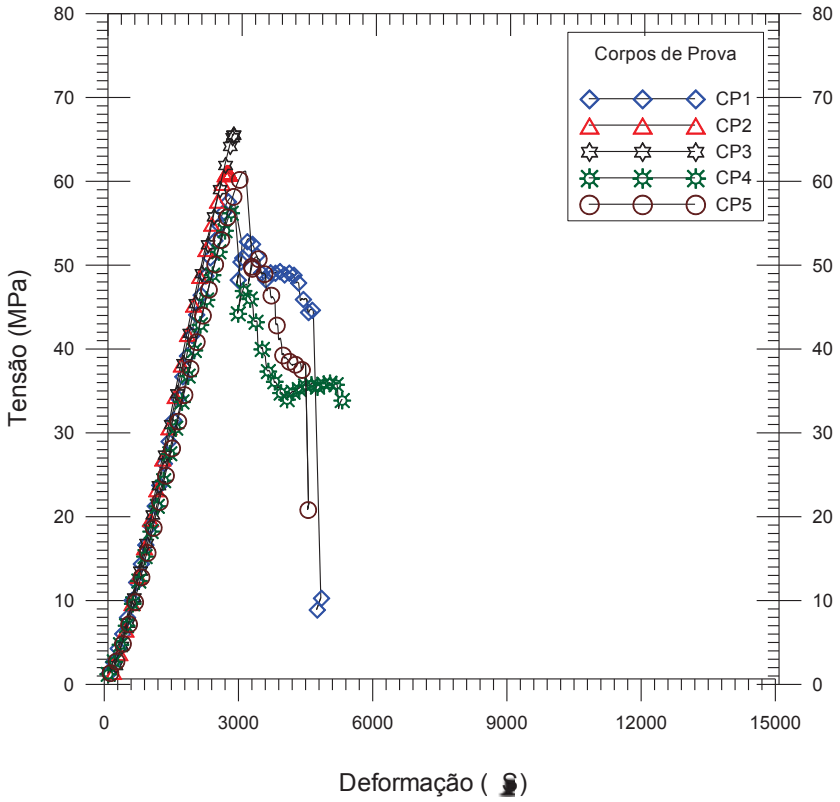


Figura anexo A 5 – Curvas σ – ε na compressão para o concreto CR1.24 210 210

Tabela anexo A 5 – Valores de resistência à compressão, ε_{pico} e E do CR1.24 210 210

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Resistência à compressão (MPa)	58,1	61,2	65,6	56,8	61,2	60,6	5,61
ε_{pico} (μS)	2856	2713	2875	2894	3149	2897	5,44

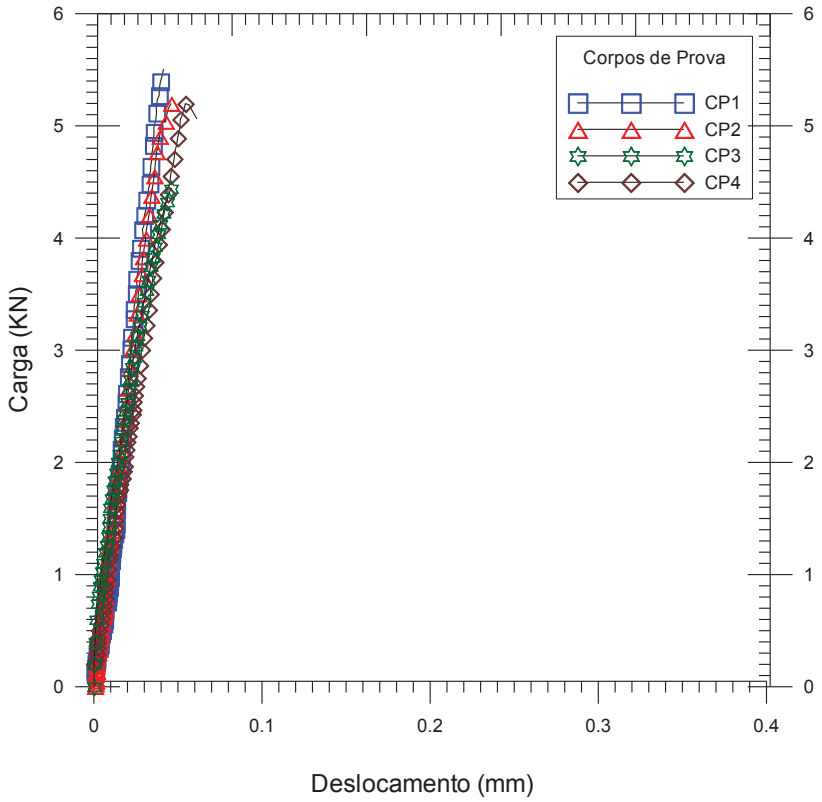


Figura anexo A 6 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR0 110 AMB

Tabela anexo A 6 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR0 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	7,93	7,49	6,39	7,48	7,32	8,94
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	7,93	7,49	6,39	7,48	7,32	8,94
Tenacidade (KJ/m^2)	0,023	0,027	0,026	0,038	0,028	23,3

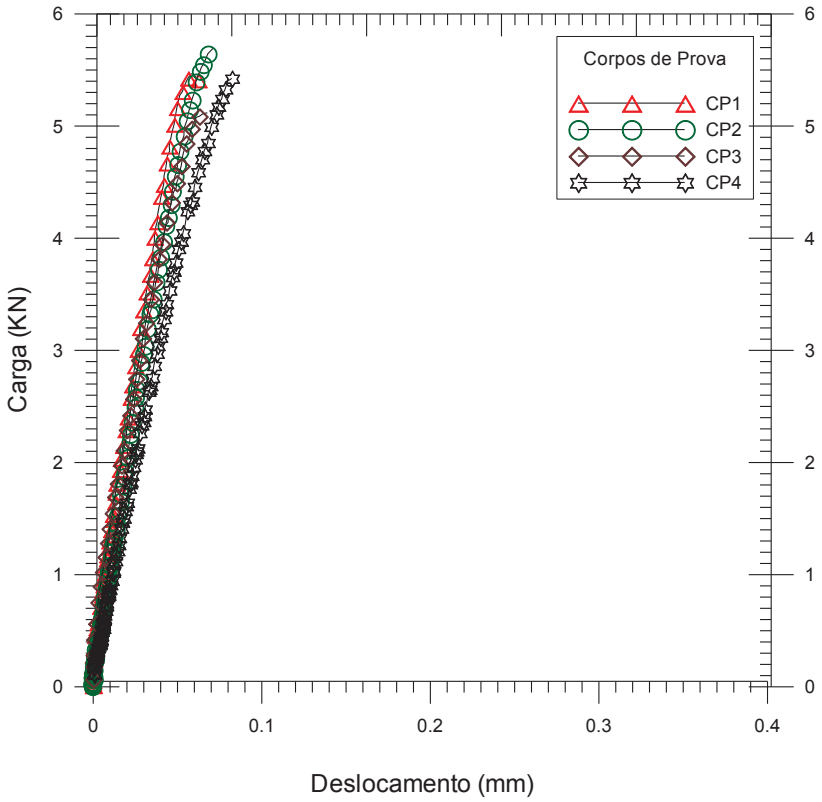


Figura anexo A 7 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR0 210 AMB

Tabela anexo A 7 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR0 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	7,88	8,20	7,37	7,78	7,81	4,38
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	7,88	8,20	7,37	7,78	7,81	4,38
Tenacidade (KJ/m^2)	0,062	0,072	0,052	0,065	0,063	13,2

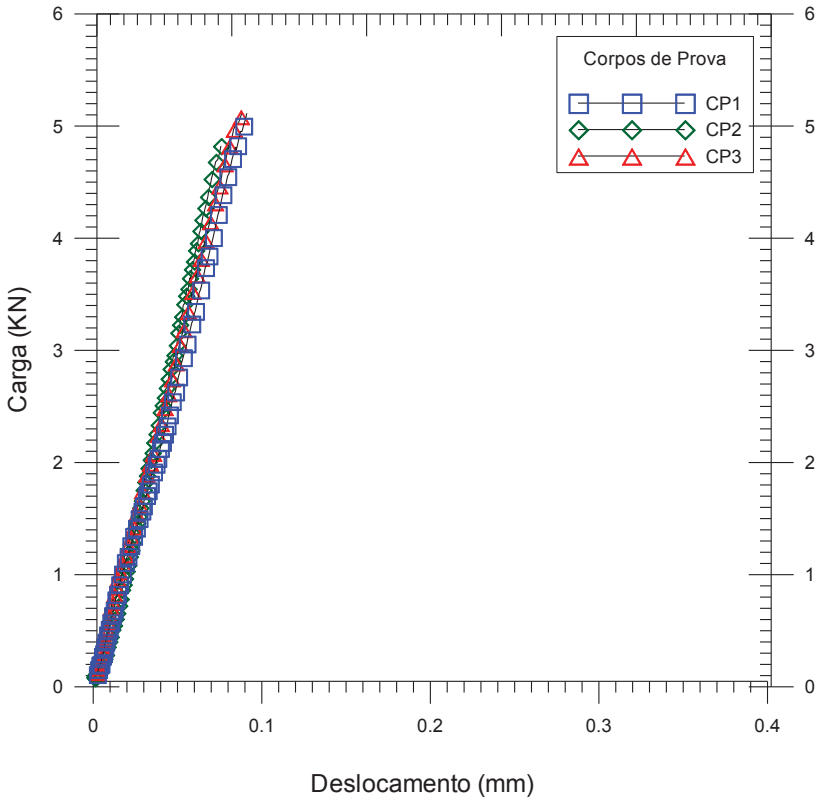


Figura anexo A 8 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR0 210 210

Tabela anexo A 8 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR0 210 210

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	7,20	6,94	7,76	7,30	5,73
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	7,20	6,94	7,76	7,30	5,73
Tenacidade (KJ/m^2)	0,070	0,043	0,055	0,056	24,3

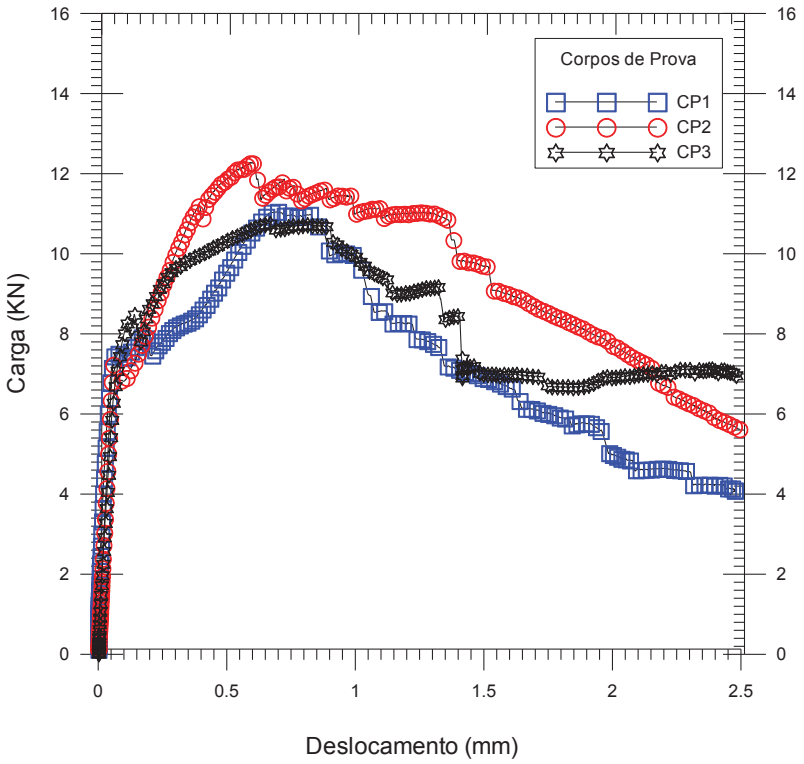


Figura anexo A 9 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR1.24 110 AMB

Tabela anexo A 9 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR1.24 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	10,8	10,4	12,2	11,2	8,46
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	15,9	17,7	15,5	16,4	7,07
Tenacidade (KJ/m^2)	8,81	12,1	13,2	11,3	20,0

Tabela anexo A 10 – Índices de Tenacidade pela Norma Belga para CR1.24 110 AMB

	Índices de tenacidade para cada amostra				
Relações entre Cargas P*	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
0.25 mm	1,04	1,27	1,09	1,14	10,7%
0.50 mm	1,27	1,64	1,22	1,38	16,7%
0.75 mm	1,46	1,62	1,26	1,44	12,5%
1.00 mm	1,32	1,52	1,17	1,34	13,1%
1.25 mm	1,05	1,52	1,07	1,21	22,2%
1.50 mm	0,92	1,34	0,82	1,03	26,7%
1.75 mm	0,80	1,18	0,79	0,92	24,0%
2.00 mm	0,66	1,07	0,82	0,85	24,0%
2,25 mm	0,61	0,89	0,84	0,78	18,7%
2,50 mm	0,55	0,78	0,80	0,71	19,7%

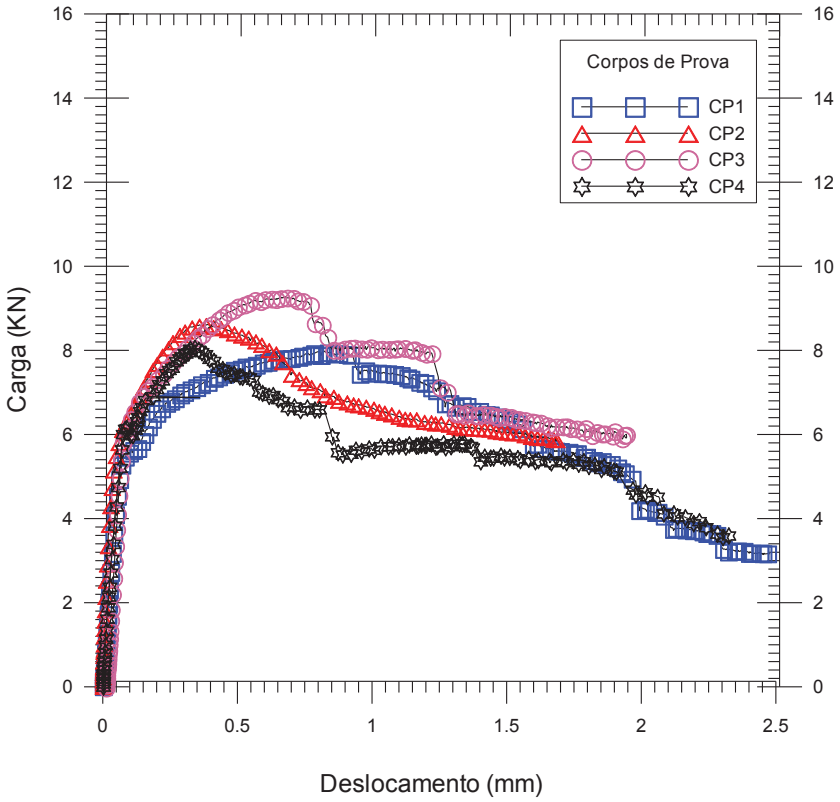


Figura anexo A 10 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR1.24 210 AMB

Tabela anexo A 11 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR1.24 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	8,14	8,30	8,69	8,90	8,51	4,12
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	11,5	12,4	13,4	11,6	12,2	7,01
Tenacidade (KJ/m^2)	6,15	5,15	5,86	5,51	5,67	7,64

Tabela anexo A 12 – Índices de Tenacidade pela Norma Belga para CR1.24 210 AMB

	Índices de tenacidade para cada amostra					
Deslocamentos	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	CV (%)
0.25 mm	1,20	1,51	1,27	1,23	1,30	10,7%
0.50 mm	1,34	1,56	1,49	1,20	1,40	11,4%
0.75 mm	1,40	1,34	1,52	1,07	1,33	14,0%
1.00 mm	1,33	1,23	1,33	0,91	1,20	16,5%
1.25 mm	1,25	1,17	1,17	0,93	1,13	12,1%
1.50 mm	1,13	1,13	1,06	0,89	1,05	10,9%
1.75 mm	0,98	1,09	1,02	0,87	0,99	9,2%

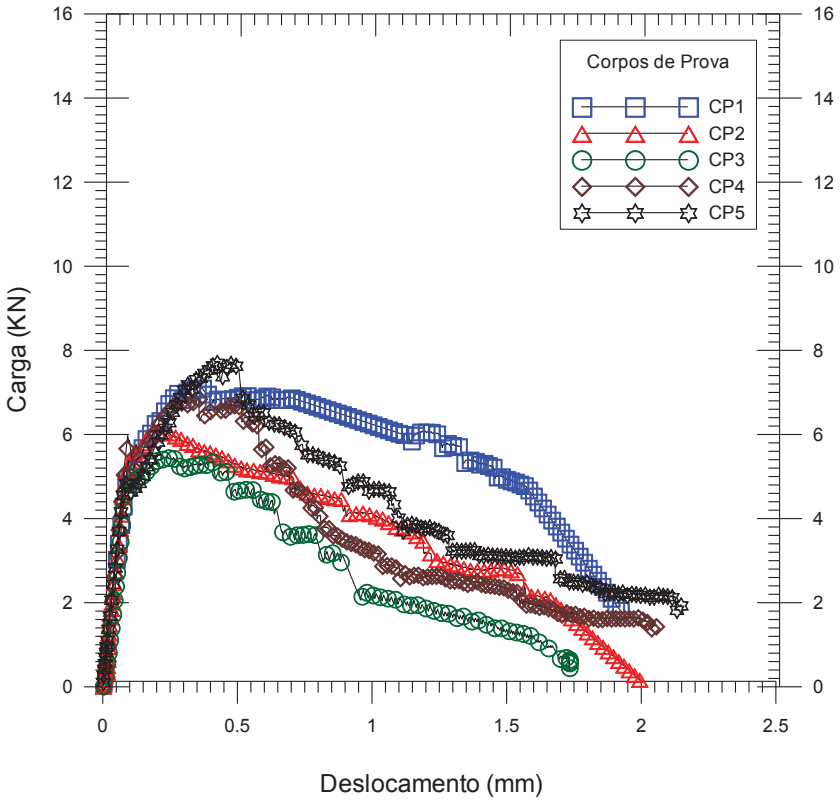


Figura anexo A 11 – Curva carga x deslocamento obtida do concreto CR1.24 210 AMB

Tabela anexo A 13 – Resistência de primeira fissura, resistência pós-fissuração e tenacidade para o concreto CR1.24 210 210

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Resistência de Primeira Fissura (MPa)	7,26	7,31	8,82	8,60	7,04	7,81	10,7
Resistência de Pós Fissuração (MPa)	10,2	10,3	8,83	9,88	11,2	10,1	8,33
Tenacidade (KJ/m^2)	5,20	3,54	3,50	3,09	4,11	3,89	21,1

Tabela anexo A 14 – Índices de Tenacidade pela Norma Belga para CR1.24 210 210

	Índices de tenacidade para cada amostra						
Deslocamentos	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
0.25 mm	1,35	1,18	0,89	1,11	1,32	1,17	15,9%
0.50 mm	1,37	1,04	0,75	1,12	1,55	1,17	26,4%
0.75 mm	1,34	0,91	0,57	0,77	1,12	0,94	31,8%
1.00 mm	1,24	0,81	0,35	0,54	0,97	0,78	44,9%
1.25 mm	1,19	0,59	0,28	0,44	0,75	0,65	53,9%
1.50 mm	0,98	0,55	0,21	0,39	0,64	0,55	52,1%
1.75 mm	0,65	0,31	0,08	0,29	0,51	0,37	59,9%

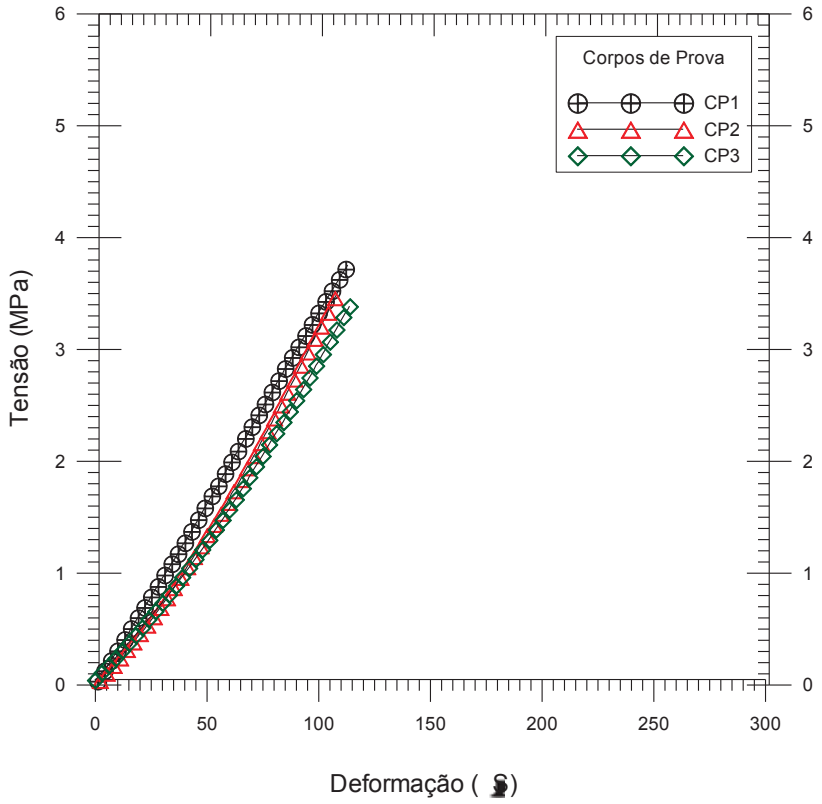


Figura anexo A 12 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR0 110 AMB

Tabela anexo A 15 – Valores de resistência à tração, $\varepsilon_{pico,}$ E e tenacidade do CR0 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Resistência à tração (MPa)	3,76	3,53	3,39	3,56	5,25
ε_{pico} (μS)	113	99	104	105	6,74
E (GPa)	32,1	33,6	31,6	32,5	3,23
Tenacidade (KJ/m^2)	0,0030	0,0090	0,0020	0,0025	28,3

OBS: O valor da tenacidade para o CP2 foi retirado do cálculo da média e do CV

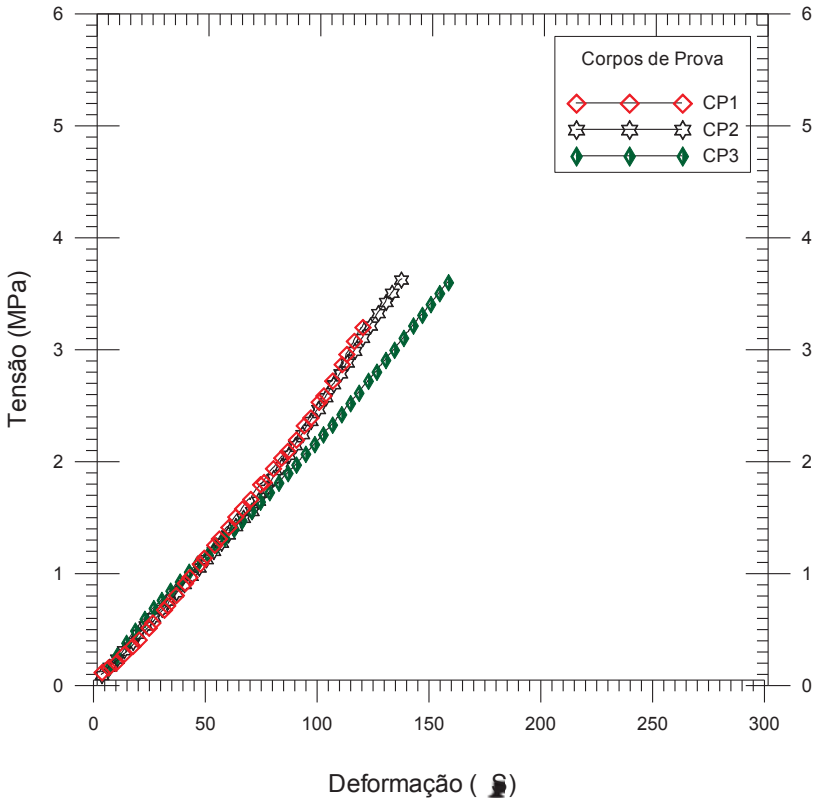


Figura anexo A 13 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR0 210 AMB

Tabela anexo A 16 – Valores de resistência à tração, $\varepsilon_{pico,}$ E e tenacidade do CR0 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Tensão (MPa)	3,26	3,52	3,63	3,47	5,48
Deformação de Pico (μS)	122	138	160	140	13,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	23,5	23,5	22,0	23,0	3,77
Tenacidade (KJ/m^2)	0,0083	0,0077	0,0076	0,0079	5,01

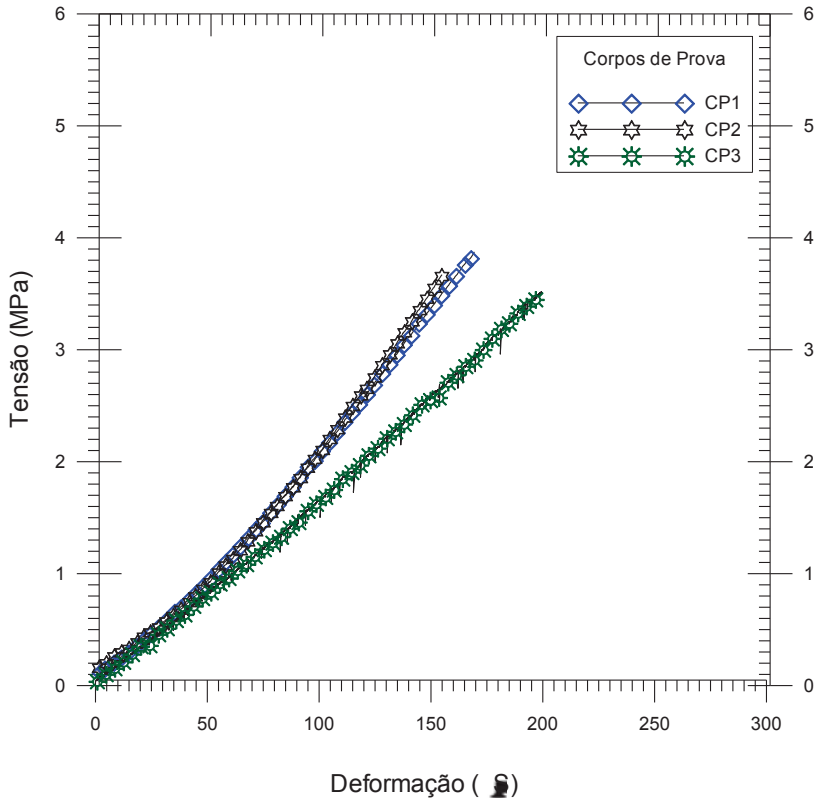


Figura anexo A 14 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR0 210 210

Tabela anexo A 17 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR0 210 210

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Tensão (MPa)	3,87	3,67	3,51	3,68	4,90
Deformação de Pico (μS)	169	155	200	175	13,2

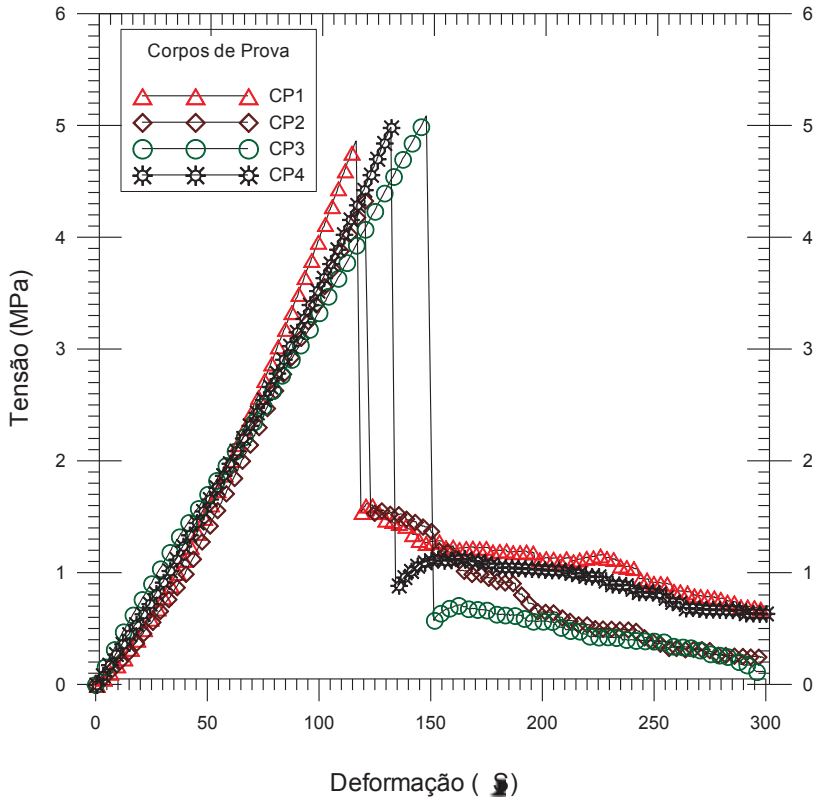


Figura anexo A 15 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR1.24 110 AMB

Tabela anexo A 18 – Valores de resistência à tração, $\varepsilon_{pico,}$ E e tenacidade do CR1.24 110 AMB

	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA	CV (%)
Tensão (MPa)	4,86	4,33	5,08	4,98	4,81	6,94
Deformação de Pico (μS)	117	136	148	132	129	10,9
Módulo de Elasticidade (GPa)	32,8	30,8	33,5	32,8	32,5	3,62
Tenacidade (KJ/m^2)	0,0120	0,0090	0,0130	0,0120	0,0120	15,1

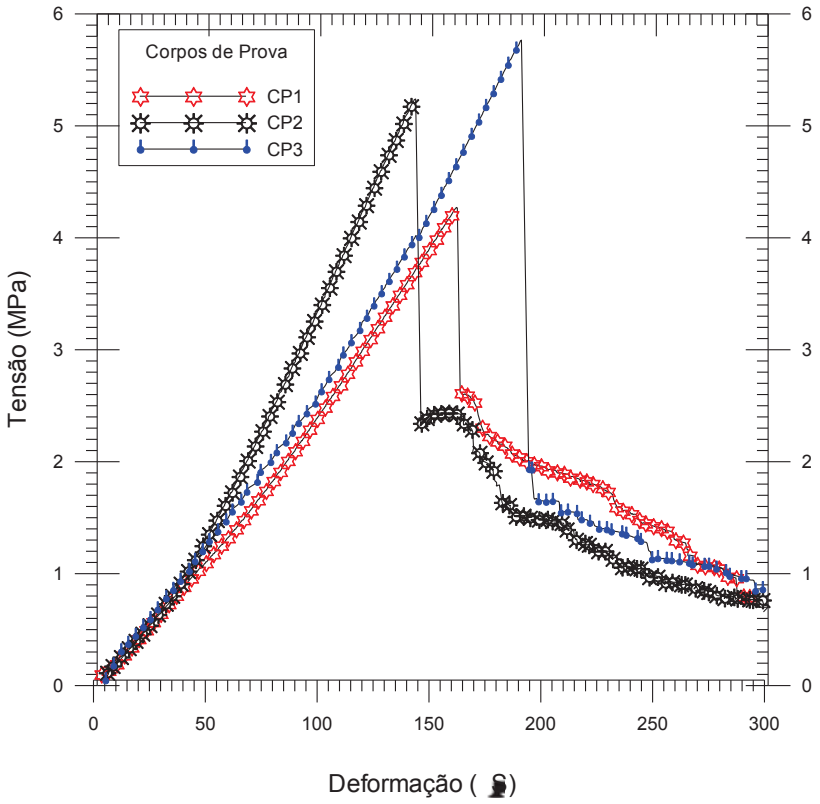


Figura anexo A 16 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR1.24 210 AMB

Tabela anexo A 19 – Valores de resistência à tração, $\varepsilon_{pico,}$ E e tenacidade do CR1.24 210 AMB

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Tensão (MPa)	4,27	5,24	5,77	5,09	14,9
Deformação de Pico (μS)	163	144	191	166	14,2
Módulo de Elasticidade (GPa)	22,6	30,0	24,4	25,7	15,0
Tenacidade (KJ/m^2)	0,0060	0,0060	0,0040	0,0053	21,7

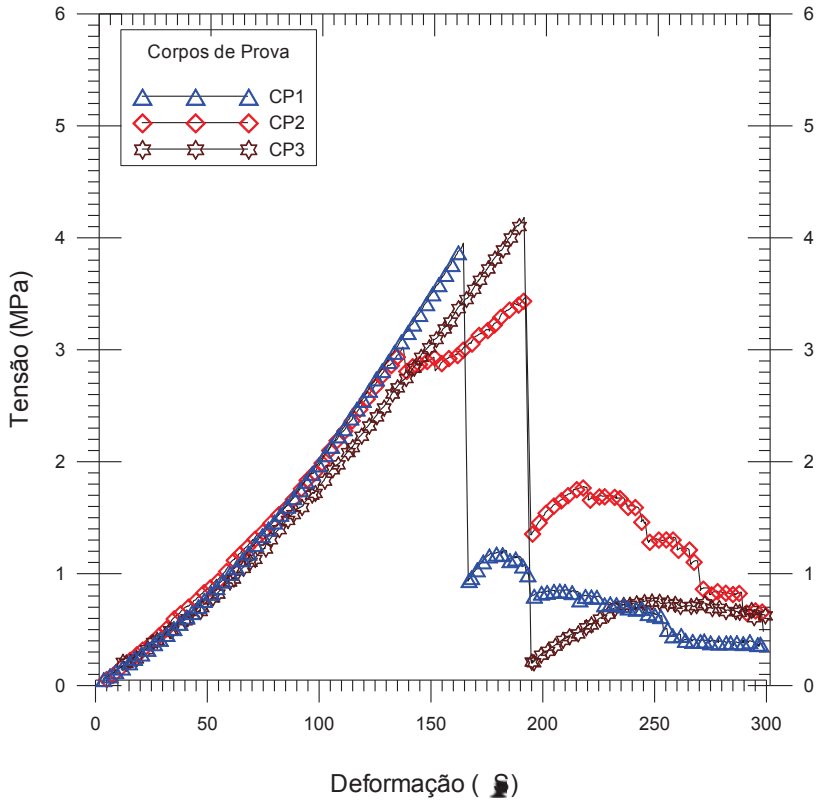


Figura anexo A 17 – Curvas σ – ε na tração para o concreto CR1.24 210 210

Tabela anexo A 20 – Valores de resistência à tração, $\varepsilon_{pico,}$ E e tenacidade do CR1.24 210 210

	CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CV (%)
Tensão (MPa)	3,95	3,47	4,18	3,87	9,37
Deformação de Pico (μS)	147	182	177	169	11,2
Módulo de Elasticidade (GPa)	22,1	21,1	21,5	21,6	2,33

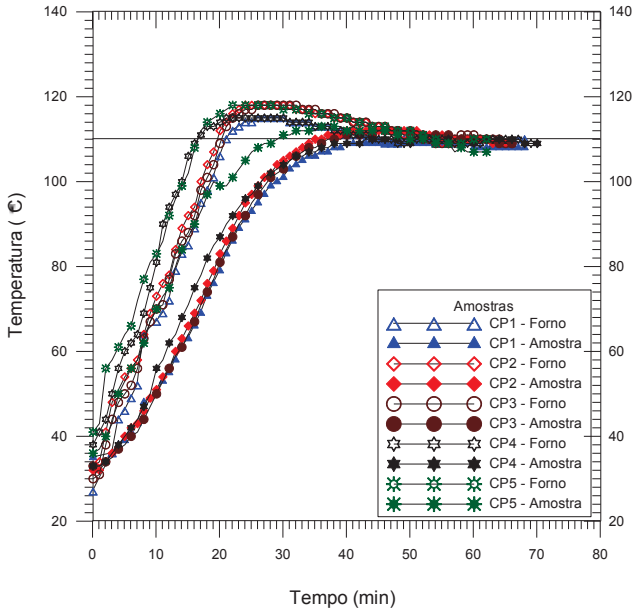


Figura anexo A 18 – Curva temperatura do forno e amostra versus tempo para CR0 110 110

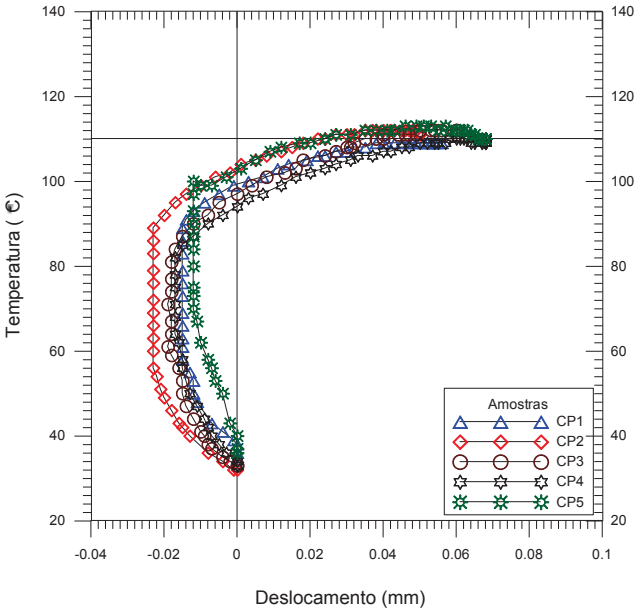


Figura anexo A 19 – Curva temperatura da amostra x deslocamento linear para CR0 110 110

Tabela anexo A 21 – Valores de Δ de temperatura da amostra, alongamento máximo e coeficiente de dilatação (α) para o concreto CR0 110 110

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Δ de Temperatura da Amostra	72	78	77	77	74	76	3,32
Alongamento Máximo (mm)	0,058	0,051	0,061	0,068	0,069	0,061	12,1
Coeficiente de dilatação - α (E-06 ° C^{-1})	2,83	2,29	2,78	3,10	3,27	2,85	13,0

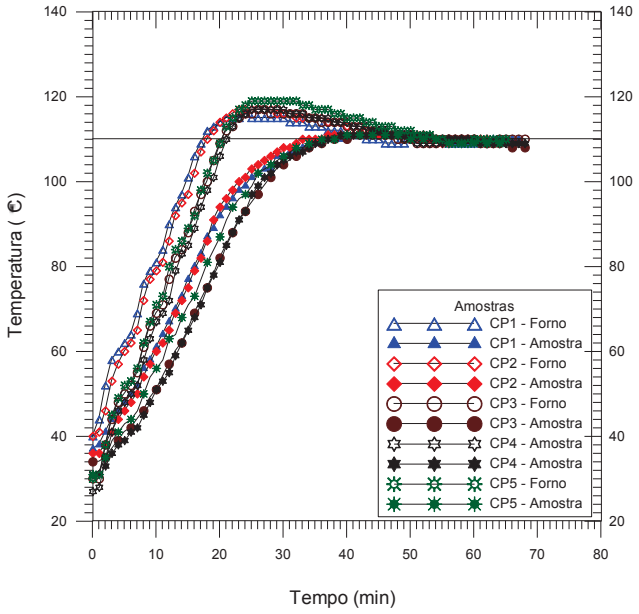


Figura anexo A 20 – Curva temperatura do forno e amostra x tempo para CR1.24 110 110

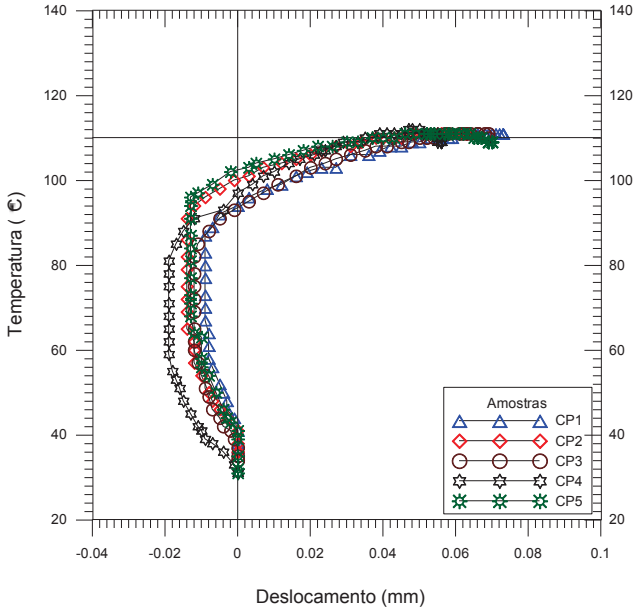


Figura anexo A 21 – Curva temperatura x deslocamento linear da amostra CR1.24 110 110

Tabela anexo A 22 – Valores de Δ de temperatura da amostra, alongamento máximo e coeficiente de dilatação (α) para o concreto CR1.24 110 110

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Δ de Temperatura da Amostra	73	74	75	79	78	76	3,41
Alongamento Máximo (mm)	0,076	0,065	0,072	0,056	0,069	0,068	11,3
Coeficiente de dilatação - α (E-06 ° C^{-1})	3,67	3,08	3,38	2,48	3,09	3,14	14,0

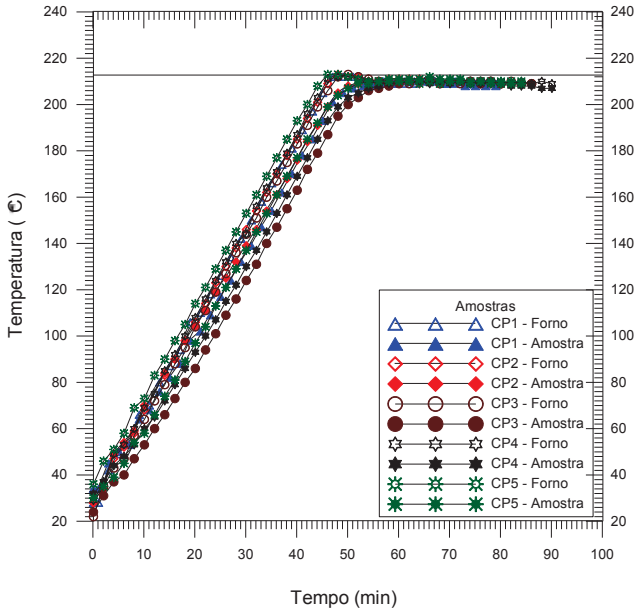


Figura anexo A 22 – Curva temperatura do forno e amostra x tempo para CR0 210 210

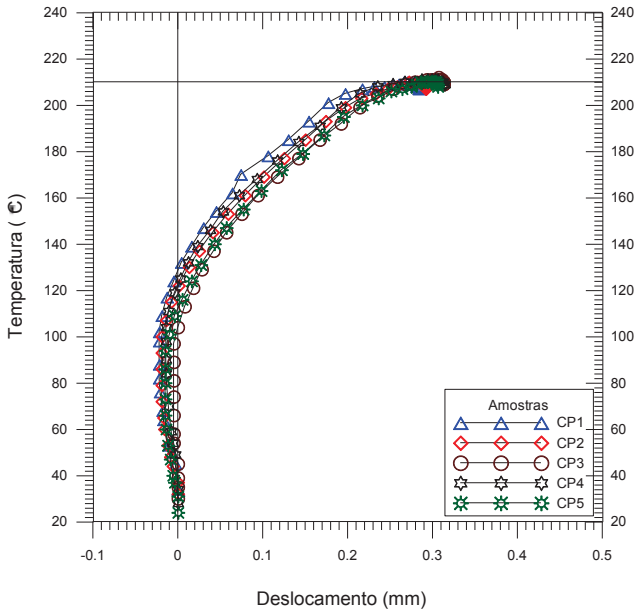


Figura anexo A 23 – Curva temperatura x deslocamento linear da amostra para CR0 210 210

Tabela anexo A 23 – Valores de Δ de temperatura da amostra, alongamento máximo e coeficiente de dilatação (α) para o concreto CR0 210 210

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Δ de Temperatura da Amostra	174	181	185	177	180	179	2,32
Alongamento Máximo (mm)	0,284	0,314	0,306	0,292	0,313	0,302	4,40
Coeficiente de dilatação - α (E-06 ° C^{-1})	5,73	6,09	5,80	5,79	6,10	5,90	3,02

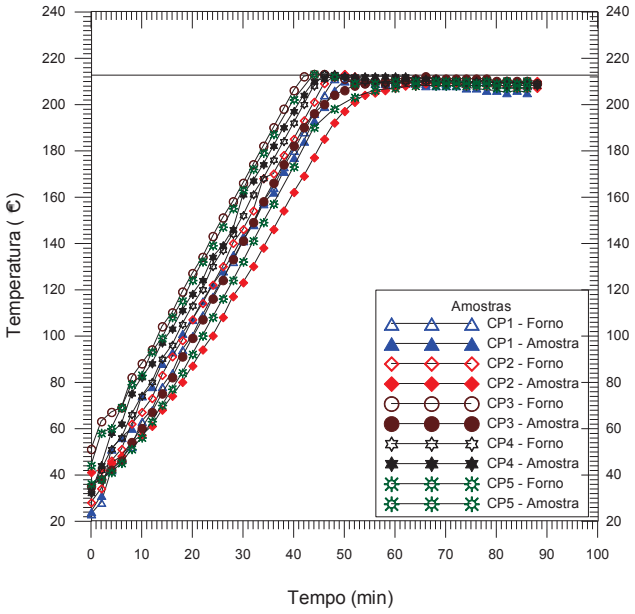


Figura anexo A 24 – Curva temperatura do forno e amostra x tempo para CR1.24 210 210

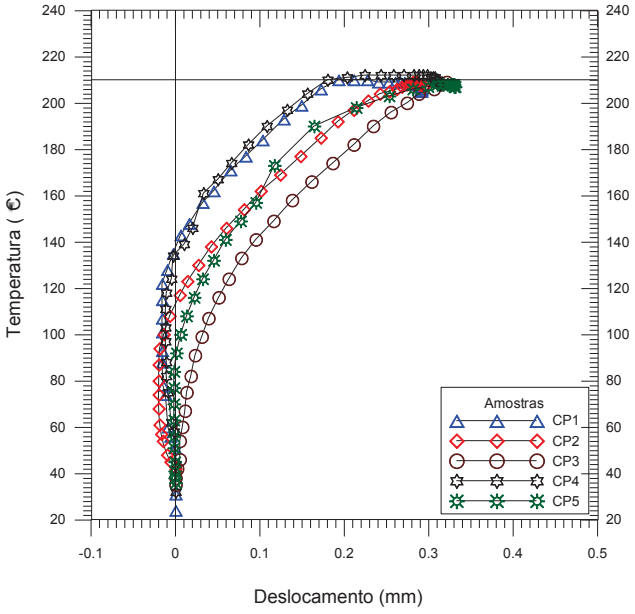


Figura anexo A 25 – Curva temperatura x deslocamento linear para CR1.24 210 210

Tabela anexo A 24 – Valores de Δ de temperatura da amostra, alongamento máximo e coeficiente de dilatação (α) para o concreto CR1.24 210 210

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	CV (%)
Δ de Temperatura da Amostra	182	166	175	176	171	174	3,42
Alongamento Máximo (mm)	0,291	0,294	0,348	0,313	0,331	0,315	7,71
Coeficiente de dilatação - α (E-06 ° C^{-1})	5,61	6,21	6,98	6,24	6,79	6,37	8,48

Tabela anexo A 25 – Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica para CR0

Identificação	Porosidade (P_r,%)	Absorção de Água (A,%)	Massa Específica (M_e)
110 º CP1	20,8	9,32	2,82
110 º CP2	21,8	9,83	2,84
110 º CP3	22,3	10,1	2,85
210 º CP1	19,8	8,77	2,81
210 º CP2	19,8	8,79	2,82
210 º CP3	19,8	8,77	2,82

Tabela anexo A 26 – Porosidade, Absorção de Água e Massa Específica para CR1.24

Identificação	Porosidade (P_r,%)	Absorção de Água (A,%)	Massa Específica (M_e)
110 º CP1	19,4	8,35	2,88
110 º CP2	20,0	8,66	2,89
110 º CP3	20,0	8,63	2,90
210 º CP1	21,2	9,19	2,93
210 º CP2	20,3	8,85	2,88
210 º CP3	20,1	8,68	2,90