UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações de estruturas pré-moldadas.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica – Ênfase em Materiais e Processos de Fabricação.

Felipe Sakae Bertolucci

ORIENTADORA: Prof. Dra. Mônica Pinto Barbosa
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

Ilha Solteira - SP
2010

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações de estruturas pré-moldadas

AUTOR: FELIPE SAKAE BERTOLUCCI
ORIENTADORA: Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA , Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S.SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOSÉ CELSO DA CUNHA
Departamento de Engenharia Civil / Centro Federal de Educaçao Tecnológica de Minas Gerais

Data da realização: 12 de abril de 2010.

Aos meus queridos pais: Luiz e Cristina.

A meu irmão Henrique.

A minha noiva Alessandra.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me iluminado durante toda essa caminhada, aprendendo a cada dia com os erros e acertos, dando-me forças para superar as dificuldades, humildade para reconhecer os erros e sabedoria para agradecer as conquistas.

A minha amada família, Luiz, Cristina e Henrique, por todo amor, carinho, compreensão e incentivo durante toda a minha vida. Por me dar apoiar e dar forças para lutar e obter mais esta conquista em minha vida.

A minha noiva Alessandra que esteve ao meu lado, me dando força e apoio para enfrentar as dificuldades, por seu amor, carinho e compreensão que foram essenciais para que este trabalho se tornasse possível.

À Profa. Mônica Pinto Barbosa, por ter dado a oportunidade de realizar esse trabalho, de ingressar no mundo da pesquisa científica e por todos esses anos de trabalho em conjunto, me apoiando e orientando.

Ao Prof. Marcelo de Araújo Ferreira, pelo apoio, orientação durante a realização desta pesquisa e por abrir as portas do laboratório NETPRE.

Ao Eng. Fernando Almeida por toda a ajuda para realizar os ensaios no laboratório NETPRE e pela troca de conhecimentos.

Aos amigos Bruno, Marcos, Alysson, Jean, João Felipe, Kleber, Rogerinho que ajudaram não somente na realização dos ensaios, mas também nas trocas de conhecimento e apoio nos momentos de dificuldades ajudando a conquistar mais esta etapa.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, em especial ao Eng. Flávio Moreira Salles por ter aberto as portas do laboratório para que fossem realizados os ensaios e pelo auxílio com seu conhecimento na discussão e análise dos resultados.

Ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da UNESP campus de Ilha Solteira, em especial ao Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel pelo auxílio na pesquisa, fornecendo o reômetro para a realização dos ensaios de reometria.

Aos técnicos e funcionários do LCEC, Bertolucci, Sérgio, Branco, Jorge, Sumie, Pascoalin, Anderson, Francisco, Michelan, Lana, Marcos, Joaquim, Gilmar, Lourival, Jair, Vicente, Edgar e a todos os funcionários pela ajuda prestada, pela troca de conhecimentos e pelo apoio durante todos esses anos de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

À CAPES pela bolsa de mestrado.

Resumo

BERTOLUCCI, F. S. (2010). **Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações viga-pilar de estruturas pré-moldadas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

A indústria estruturas de concretos pré-moldados possui como grande preocupação a ligação entre seus elementos, tendo em vista que a mesma exerce grande influência no comportamento da estrutura, sendo responsável pela transmissão e redistribuição dos esforços na estrutura.

A grande diferença entre estruturas pré-moldadas e estruturas de concreto moldadas "in loco" em relação ao seu comportamento estrutural está na ligação entre seus elementos. As ligações apresentam certa deformação quando solicitadas, recebendo na literatura técnica a denominação de ligações semi-rígidas.

Dessa forma, buscou-se estudar todos os grautes existentes no mercado e desenvolver um compósito cimentício de fácil preparo e de baixo custo, do tipo calda de cimento e argamassa, que apresentasse características mecânicas similares aos grautes. Foram desenvolvidas duas caldas de cimento e uma argamassa, as quais foram submetidas juntamente com os grautes selecionados a ensaios específicos de propriedades adesão e aderência.

Dentre as principais conclusões obtidas podem ser ressaltadas que a grande parte dos grautes possui problemas de fluidez dificultando o preenchimento total das ligações e sua aplicação. Em relação à aderência as duas caldas de cimento e a argamassa apresentaram comportamento semelhante indicando que há uma boa condição de aderência e, os grautes, devido à sua grande diferença de composição, tiveram comportamentos distintos.

Palavras-chaves:

Concretos pré-moldados, ligações semi-rígidas, grautes, calda de cimento, argamassa e aderência.

Abstract

BERTOLUCCI, F. S. (2010). **Investigation of cementitious composites for filling joints in the interface and niches in beam-column connections of precast structures.** Masters Degree's Dissertation. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

One of the concerns of the precast concrete industry is the connection among their different types of elements, in order that they strongly influence the behavior of the structural group, being responsible for the transmission and redistribution of the efforts in the structure.

Among the differences between precast structures and concrete structures shaped "in loco" we have the concern about the structural behavior of the link between its elements. The links have shown some deformation when tested, receiving in the technical literature the name of semi-rigid connections.

For that the concrete's precast structure has the behavior of a monolithic structure it's necessary the solidarization of the connection which is made by filling the vertical and horizontal niches with the aid of the grout.

In this paper, we aimed to study some grouts of the Brazilian market and, at the same time, develop a cimentitius composite of easy prepare and low cost, of the cement paste and mortar types, with similar mechanical characteristics to industrialized grouts to be used in the filling of the precast structures. It was rheologically and mechanically created and evaluated two kinds of cement grout and one mortar composition that were submitted along with the selected grouts to an evaluation of their rheological behavior, and to specific tests of their mechanical properties of adhesion and bond.

This study let us conclude that the cement paste and mortar developed showed a similar rheological behavior to the Herschel-Bulkley, besides to a good condition of bond and a good behavior in the structure link when compared to some industrialized grouts. Not all the evaluated grouts showed appropriate behaviors for joints' filling.

Keywords: precast concrete, semi-rigid connections, grouts, cement paste, mortar and bond.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Modelo 1 com 100% da armadura passando pelo pilar.....20

Figura 1.2 Modelo 2 com laje alveolar e 50% da armadura passando pelo pilar e 50% passando pelas laterais.....21

Figura 2.1 Reograma de diferentes tipos de fluidos.....33

Figura 2.2 Remanescente de um barco de Lambot.....35

Figura 2.3 Denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum.....39

Figura 2.4 Tipos de ligações viga-pilar, A: ligação viga-pilar com consolo embutido em pilar contínuo, B: viga-pilar sobre consolo aparente, C: vigas e pilares descontínuos, D: pilar descontínuo com viga contínua.....40

Figura 2.5 Detalhe de uma ligação viga-pilar com chapa soldada e utilização de espaçamento entre viga e pilar.(T&A).....44

Figura 2.6 Trajetórias das tensões principais junto à barra de armadura tracionada.....46

Figura 2.7 Acabamento superficial de fios e barras lisas.....47

Figura 2.8 Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto.....48

Figura 2.9 Disposição de geral do ensaio de arrancamento direto proposto por RILEM.....51

Figura 2.10 Preenchimento da bainha e da interface viga-pilar com o uso do graute.....54

Figura 3.1 Esquema da metodologia experimental utilizada.....57

Figura 3.2 Resultado da caracterização da areia média. Realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP.....60

Figura 3.3 Resultado da caracterização da areia fina. Ensaios realizados no LCEC-Ilha Solteira-SP.....61

Figura 3.4 Resultado da caracterização da brita de 19 mm. Ensaio realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP.....62

Figura 3.5 Tratamento posterior ao escaneamento no software Geomagic Studio 10.....63

Figura 3.6 Altura das nervuras Figura 3.6: Altura das nervuras.....64

Figura 3.7 Distância entre nervuras.....64

Figura 3.8 Ângulo de inclinação das nervuras.....64

Figura 3.9 Corte da área de uma nervura.....65

Figura 3.10 Caracterização das bainhas utilizadas nos ensaios de aderência. (a) diâmetro externo da bainha metálica, (b) diâmetro interno da bainha metálica, (c) diâmetro externo da bainha plástica corrugada, (d) diâmetro interno da bainha plástica corrugada, (e) diâmetro externo da bainha plástica lisa e (f) diâmetro interno da bainha plástica lisa.....66

Figura 3.11 Batedeira utilizada no preparo da calda de cimento. (a) Batedeira de calda montada para o ensaio e (b) Detalhe da haste misturadora.....68

Figura 3.12 Cone de Marsh sendo preenchido com a calda de cimento.....68

Figura 3.13 Corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão.....69

Figura 3.14 Viga prismática com cavidade preenchida por material de reparo. Ensaio de flexão da viga.....72

Figura 3.15 Cavidade sendo tratada para receber o material de preenchimento.....73

Figura 3.16 Ensaios de retração em materiais pozolânicos em andamento no LCEC.....74

Figura 3.17 Reômetro R/S de cilindros coaxiais com o banho térmico.....75

Figura 3.18 Detalhe dos spindles do tipo Vane e CC45.....76

Figura 3.19 Block-editor do ensaio reológico das caldas de cimento….....77

Figura 3.20 Block-editor do ensaio reológico dos grautes.....77

Figura 3.21 Detalhe da forma com o furo para o transpasse da bainha.....78

Figura 3.22 Detalhe da moldadem dos blocos de concreto.....79

Figura 3.23 Detalhe das diferentes bainhas utilizadas para os ensaios POT.....80

Figura 3.24 Bainha metálica sendo serrada para retirar o excesso.....81

Figura 3.25 Detalhe do processo de montagem do conjunto para o preenchimento da bainha.....82

Figura 3.26 Detalhe do preenchimento da bainha.....83

Figura 3.27 Conjunto montado para o ensaio “PULL-OUT TEST”.....84

Figura 3.28 Indicador de deformação digital de 4 canais.....84

Figura 4.1 Tempo de escoamento x tempo para a calda F1.....92

Figura 4.2 Tempo de escoamento x tempo para a calda F2.....92

Figura 4.3 Tempo de escoamento x tempo para a calda F3.....92

Figura 4.4 Tempo de escoamento x tempo para a calda F4.....93

Figura 4.5 Tempo de escoamento x tempo para a calda F5.....93

Figura 4.6 Tempo de escoamento x tempo para a calda F6.....93

Figura 4.7 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F1 sem agitação.....94

Figura 4.8 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F1 com agitação.....95

Figura 4.9 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F2 sem agitação.....95

Figura 4.10 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F2 com agitação.....96

Figura 4.11 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F3 sem agitação….....96

Figura 4.12 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F3 com agitação.....97

Figura 4.13 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F4 sem agitação.....97

Figura 4.14 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F4 com agitação.....98

Figura 4.15 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F5 sem agitação.....98

Figura 4.16 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F5 agitando..... 99

Figura 4.17 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F6 sem agitação.....99

Figura 4.18 Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F6 com agitação constante.....100

Figura 4.19 Resistência à compressão das caldas.....101

Figura 5.1 Tempo de fluidez x tempo das caldas de cimento….....105

Figura 5.2 (a) Ensaio de flow test. Detalhe do preenchimento do cone de ensaio; (b) detalhe do espalhamento da mistura.....106

Figura 5.3 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento da calda de cimento 1.....110

Figura 5.4 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento da calda de cimento 2.....110

Figura 5.5 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 3.....112

Figura 5.6 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 6.....112

Figura 5.7 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 7....113

Figura 5.8 Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento dos diferentes grautes.....114

Figura 5.9 Ensaios de adesão das vigas com cavidades preenchidas com graute e calda de cimento nas idades de 3 e 7 dias e suas vigas padrões de concreto.....116

Figura 5.10 Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha plástica lisa retirada do concreto.....118

Figura 5.11 (a) e (b) Dois detalhes do interior dos Blocos de concreto liso após serem ensaiados.....118

Figura 5.12 Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha plástica corrugada retirada do concreto.....120

Figura 5.13 (a) e (b) Detalhes do interior dos blocos do concreto ensaiados com bainha corrugada, após ensaio POT.....120

Figura 5.14 Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha plástica corrugada mantida no concreto.....121

Figura 5.15 (a) e (b) Blocos com tubo plástico após o ensaio “PULL OUT TEST”.....122

Figura 5.16 Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha metálica corrugada mantida no concreto.....123

Figura 5.17 (a) e (b) Detalhe do bloco com bainha metálica corrugada após o ensaio POT.....123

Figura 5.18 Tensão de aderência x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos de concreto com diferentes bainhas utilizadas.....125

Figura 5.19 Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos preenchidos com a calda de cimento 1.....127

Figuras 5.20 Detalhe da ruptura dos blocos preenchidos com a calda 1 após o ensaio PULL OUT TEST; (a) bloco com fendilhamento, (b)Idem; (c) idem (d) Detalhes internos do bloco após ensaio.....127

Figura 5.21 Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos de concreto com bainha corrugada plástica retirada preenchidos com a calda de cimento 2.....129

Figura 5.22 (a) Detalhe dos blocos preenchidos com a calda 2 após o ensaio ainda com o relógio comparador instalado; (b) e (c) detalhes da ruptura por fendilhamento, (d) detalhe do interior do bloco após ensaio.....130

Figura 5.23 Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos preenchidos com o graute 6.....131

Figura 5.24 (a) a (d) Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute6 após o ensaio de POT.....132

Figura 5.25 Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos preenchidos com o graute7.....133

Figura 5.26 (a) a (d) Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute 7 após o ensaio de PULL OUT TEST.....134

Figura 5.27 Tensão aplicada x deformação do ensaio POT para os blocos preenchidos com a argamassa……135

Figura 5.28 (a) a (d) Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute 7 após o ensaio de POT.....136

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Reologia da pasta de cimento, graute, argamassa, concreto…….33

Tabela 2.2 Fatores que influenciam no comportamento da aderência aço-concreto……..……49

Tabela 3.1 Análise físico-química do cimento CP-V-ARI RS e CP-V-ARI PLUS. Realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP……...59

Tabela 3.2 Valores de resistência à compressão e quantidade de água fornecida pelos fabricantes……71

Tabela 4.1 Composição das Caldas de Cimento……87

Tabela 4.2 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F1 sem agitação……87

Tabela 4.3 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F1 com agitação constante……..88

Tabela 4.4 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F2 sem agitação……88

Tabela 4.5 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F2 com agitação constante Dosagem da argamassa……..88

Tabela 4.6 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F3 sem agitação……88

Tabela 4.7 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F3 com agitação constante……..89

Tabela 4.8 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F4 sem agitação……89

Tabela 4.9 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F4 com agitação……89

Tabela 4.10 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F5 sem agitação……89

Tabela 4.11 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F5 com agitação constante……..90

Tabela 4.12 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F6 sem agitação……90

Tabela 4.13 Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F6 com agitação……90

Tabela 5.1 Composição das caldas de cimento e água de exsudação…….104

Tabela 5.2 Composição dos grautes, com sua relação água/graute (a/g) e sua abertura média obtida no flow test……106

Tabela 5.3 Dosagem da argamassa……107

Tabela 5.4 Resultados mecânicos dos grautes e caldas de cimento……108

Tabela 5.5 Resultados de fluidez e os parâmetros reológicos obtidos para a calda de cimento……111

Tabela 5.6 Resultados de fluidez e os parâmetros reológicos obtidos para a calda de cimento ……111

Tabela 5.7 Dosagem do concreto……115

Tabela 5.8 Resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade do concreto……115

Tabela 5.9 Perda de adesão dos grautes e das caldas de cimento……116

Tabela 5.10 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……119

Tabela 5.11 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……121

Tabela 5.12 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……122

Tabela 5.13 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……124

Tabela 5.14 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……128

Tabela 5.15 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……131

Tabela 5.16 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……133

Tabela 5.17 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……135

Tabela 5.18 Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida……137

Tabela 5.19 Resumo do comportamento dos diferentes compósitos cimentícios……139

Lista de Símbolos

τ - Tensão de Cisalhamento

$\dot{\gamma}$ - Taxa de Deformação

μ - Viscosidade Dinâmica

τ_c - Tensão Crítica de escoamento

k - Parâmetro de um fluido (viscosidade)

n - Parâmetro de Herschel-Bulkley

VR_s - Variação da retração por secagem das barras (%)

R_{se} - Retração média por secagem das barras da mistura “ensaio” (%)

R_{sc} - Retração média por secagem das barras da mistura “controle” (%)

L_{ie} - Comprimento médio inicial das barras ao final da cura úmida;

L_{fe} - Comprimento médio final das barras ao final da cura seca

τ - Tensão de aderência

P - Carga aplicada

ϕ - diâmetro da barra de aço

L_a - Comprimento de ancoragem

Sumário

I **INTRODUÇÃO**.....18

1.1 *CONSIDERAÇÕES INICIAIS*.....18

1.2 *OBJETIVOS*.....22

1.3 *ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO*.....23

II **ESTADO DA ARTE**.....25

2.1 *CALDA DE CIMENTO*.....25

2.1.1 *Cimento*.....25

2.1.2 *Aditivos*.....26

2.1.3 *Calda de Cimento*.....27

2.2 *REOLOGIA DAS CALDAS DE CIMENTO*.....29

2.3 *CONCRETO PRÉ-MOLDADO*.....35

2.3.1 *Concreto*.....35

2.3.2 *Definições*.....36

2.3.3 *Tipos de concreto pré-moldado*.....38

2.4 *LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS*.....40

2.4.1 *Ligações semi-rígidas*.....42

2.4.2 *Preenchimento das Juntas entre Pilar e Viga: Uso do Graute*.....44

2.5 *ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO*.....45

2.5.1 *Tipos de aderência*.....47

2.5.1.1 **Aderência por adesão química**.....*47*

2.5.1.2 **Aderência por atrito**.....*48*

2.5.1.3 **Aderência mecânica**.....*48*

2.5.2 *Fatores que influenciam na aderência aço-concreto*.....48

2.5.3 *Ensaios de Aderência*.....49

2.5.3.1 **Ensaio de "PULL-OUT TEST"**.....50

2.6 PREENCHIMENTO DAS LIGAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.....51

III **PROGRAMA EXPERIMENTAL**.....55

3.1 *CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS*.....58

3.1.1 *Cimentos*.....58

3.1.2 *Caracterização dos Agregados*.....59

3.1.2.1. **Agregados Miúdos**.....59

3.1.2.2. **Agregado Graúdo**.....61

3.1.3 *Caracterização da Barra de* Aço.....62

3.1.4 *Bainhas*.....65

3.2 *CALDA DE CIMENTO*.....67

3.3 *ENSAIOS* REOMÉTRICOS.....69

3.4 *COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUTES*.....70

3.5 *ENSAIOS REALIZADOS*.....71

3.5.1 *Ensaios das Propriedades Mecânicas*.....71

3.5.2 *Ensaio de* Adesão.....71

3.5.3 *Ensaios de Retração por Secagem*.....73

3.5.4 *Ensaios Reológicos*.....75

3.5.5 *Ensaio de Aderência "PULL-OUT TEST"*.....77

3.5.5.1 **Ensaio de Aderência "PULL-OUT TEST" para as diferentes bainhas estudadas**.....78

3.5.5.1.1 ***Montagem do Ensaio***.....83

3.5.5.2. **Ensaio de Aderência "PULL-OUT TEST" para os diferentes materiais de *preenchimento***.....85

IV **ESTUDO DA CALDA DE CIMENTO**.....86

4.1 *CALDAS DE CIMENTO*.....86

4.1.1 *Composição das Caldas de Cimento*.....87

4.1.2 *Comportamento Reológicos das Caldas de Cimento*.....94

V **ESTUDO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PARA PREENCHIMENTO DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS**.....103

5.1 *COMPOSIÇÃO DAS CALDAS DE CIMENTO, GRAUTES E* ARGAMASSA.....103

5.1.1 *Composição das Caldas de Cimento*.....103

5.1.2 *Composição dos Grautes*.....105

5.1.3 *Dosagem da Argamassa.*.....107

5.2 *ENSAIOS MECÂNICOS DAS CALDAS DE CIMENTO, DOS GRAUTES E DA* ARGAMASSA.....107

5.3 *ENSAIOS REOLÓGICOS*.....109

5.4 *DOSAGEM DO CONCRETO*.....114

5.5 *ENSAIOS DE ADESÃO*.....116

5.6 *ENSAIOS DE ADERÊNCIA DAS DIFERENTES BAINHAS*.....117

5.6.1 *Bainha Plástica Lisa retirada do Concreto (Concreto Liso)*.....118

5.6.2 *Bainha Plástica Corrugada retirada do Concreto (Concreto Corrugado)*.....119
5.6.3 *Bainha Plástica Corrugada mantida no Concreto (Tubo Plástico)*.....121
5.6.4 *Bainha Metálica Corrugada mantida no Concreto (Tubo Metálico)*.....123
5.6.5 *Comparativo entre as diferentes bainhas ensaiadas*.....124
5.7 *ENSAIOS DE ADERÊNCIA PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO*.....126
5.7.1 *Calda de Cimento 1*.....126
5.7.2 *Calda de Cimento 2*.....128
5.7.3 *Graute 6*.....131
5.7.4 *Graute 7*.....133
5.7.5 *Argamassa*.....135
5.7.6 *Comparativo entre os diferentes materiais de preenchimento*.....137
5.7.7 *Considerações Finais dos resultados entre os diferentes materiais de preenchimento*.....138

VI **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**.....141

REFERÊNCIAS.....147

ANEXO A: ENSAIO DE ADERÊNCIA “PULL-OUT TEST” PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO COM O AUXÍLIO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS.....151

ANEXO B: ENSAIOS EM ESCALA REAL.....169

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria de estruturas de concretos pré-moldados é uma área da construção civil que necessita de avançar na realização de atividades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico com o intuito de melhorar sua qualidade e produtividade, buscando a criação de novos métodos e técnicas de produção. Segundo Ballarin (1993) a investigação acadêmica não tem acompanhado a expansão da indústria de pré-moldados. Algumas tentativas para melhorar essa deficiência tem sido feita no Estado de São Paulo por El Debs e Libório na EESC-USP, Ferreira na UFSCar, Barbosa na Unesp-Ilha Solteira, entre outros e pela própria ABCIC (Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto), além do apoio das Agencias de Fomento para projetos de pesquisa nesta área. Dentro deste contexto, faz-se importante que tanto a pesquisa científica como a pesquisa aplicada seja direcionada para atender as necessidades da expansão do setor de pré-moldados, quer seja na aplicabilidade de novos materiais que surgem no domínio dos concretos, como o concreto auto-adensável; passando pela pesquisa estrutural das deformabilidades das ligações e, chegando à investigação e avaliação de novos tipos de compostos cimentícios, como a calda de cimento, que possam substituir a utilização do “graute” industrializado no preenchimento das juntas que se formam entre as vigas e elemento do pilar.

Uma das grandes preocupações da indústria de pré-moldados está relacionada ao estudo das ligações dos elementos pré-moldadas, tendo em vista que a mesma exerce grande influência no comportamento da estrutura, sendo responsável pela transmissão e redistribuição dos esforços na estrutura. A grande diferença entre estruturas pré-moldadas e estruturas de concreto moldadas “in loco” em relação ao seu comportamento estrutural está na ligação entre seus elementos.

As ligações são regiões de descontinuidade na estrutura pré-moldada, onde ocorrem grandes concentrações de tensões, as quais podem ou não mobilizar deslocamentos e esforços decorrentes dos elementos por elas ligados, fazendo com que haja uma redistribuição dos esforços ao longo da estrutura, interferindo no comportamento da mesma. Elas merecem, portanto, uma atenção especial de pesquisadores e projetistas.

De uma maneira geral, as ligações viga-pilar não se comportam exatamente da forma que são consideradas na análise estrutural, como articulações ou engaste, e são idealizadas de modo a permitir ou impedir totalmente os deslocamentos relativos entre os elementos, o que não acontece na realidade. Ocorre que as ligações apresentam certa deformação quando solicitadas, recebendo na literatura técnica a denominação de ligações semi-rígidas. O efeito das ligações influencia na estrutura pré-moldada a redistribuição dos esforços ao longo dos elementos pré-moldados, nos deslocamentos laterais, na estabilidade global das estruturas não contraventadas e nas flechas locais das vigas com extremidade semi-rígidas.

As ligações semi-rígidas são classificadas de acordo com a norma NBR 9062-2006 que considera como base o fator de restrição entre 0,15 e 0,85. Mesmo assim o conceito de ligação semi-rígida e seus efeitos nas estruturas pré-moldadas encontram-se em varias normas e manuais de procedimento de projetos, como os manuais do PCI (Precast Concrete Institut) nos EUA e no Manual de Ligações Estruturais da FIB na Europa.

Entretanto, o estudo das ligações foi uma das prioridades de pesquisa estabelecidas pelo PCI, sobretudo nas décadas dos anos 80 e 90, tendo o mesmo promovido vários projetos temáticos sobre o assunto em questão. Na Europa podemos citar o programa COST ACTION C1: CONTROL OF THE SEMI-RIGID BEHAVIOUR OF CIVIL ENGENEERING STRUCTURAL CONNECTIONS, envolvendo varias universidades européias ao longo de 10 anos, e cujos resultados finais foram apresentados no relatório final em Cost C1 (1999). Todavia, esses programas experimentais não geraram procedimentos para projeto e para análise que considerem o comportamento semi-rígido das ligações, os quais possam ser incorporados nas normas e nos projetos.

No Brasil o estudo das ligações semi-rígidas em estruturas pré-moldadas teve inicio na EESC-USP o trabalho de Ferreira (1993) onde foram estudados os

comportamentos dos pórticos planos com nós semi-rígidos e uma metodologia para a determinação analítica das deformabilidades em ligações típicas. Dentre as principais pesquisas experimentais sobre o tema em questão pode ser citados os trabalhos desenvolvidos por Soares (1998), Ferreira (1999), Ferreira e Elliot (2002), Miotto (2002), Migliore Jr. (2005), Baldissera (2006), Souza (2006) e Kataoka (2007).

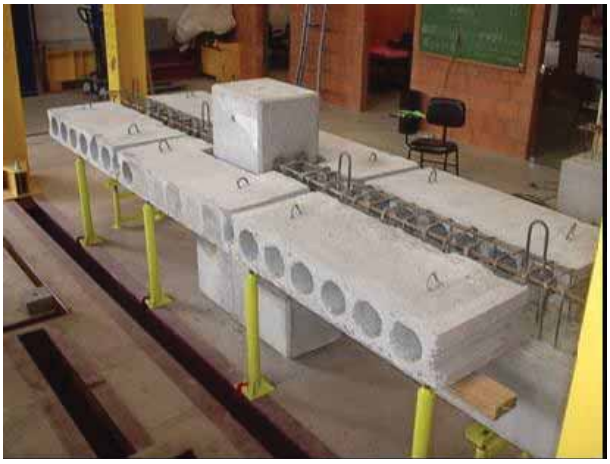
Souza (2006) desenvolveu um procedimento experimental para avaliar o comportamento das ligações viga-pilar, ensaiando uma viga pré-moldada de concreto armada apoiada sobre dois pilares com consolo de concreto, utilizando ligação semi-rígida com armadura de continuidade solidarizada no local. Kataoka (2007) utilizou dois modelos cruciformes que possuem consolos de concreto com chumbadores, vigas em balanço, e laje alveolar apoiada sobre as vigas, que recebeu uma capa de concreto moldado no local para solidarização da armadura de continuidade. A taxa de armadura de continuidade que passa através do pilar e ao lado do mesmo não é a mesma para ambos os modelos, sendo que no primeiro modelo foi considerado 100% da armadura passando pelo pilar e no segundo modelo 50% da armadura passando pelo pilar e 50% nas laterais.

Os modelos tiveram pilares com 50x40cm e consolo com 40x25cm para o apoio das vigas, diferindo entre si quanto a presença de lajes alveolares apoiadas sobre as vigas no segundo modelo, conforme ilustra as Figuras 1 e 2.

Figura 1.1: Modelo 1 com 100% da armadura passando pelo pilar.

Fonte: Kataoka (2007)

Figura 1.2: Modelo 2 com laje alveolar e 50% da armadura passando pelo pilar e 50% passando pelas laterais.



Fonte: Kataoka (2007)

Um dos grandes problemas encontrados por Kataoka (2007) foi quanto ao comportamento da estrutura do modelo 1 que apresentou alto índice de fissuração principalmente na interface da ligação viga-pilar. Segundo a pesquisadora, a grande fissuração apresentada no modelo 1 se deu ao fato da baixa aderência entre o graute e a bainha da armadura de continuidade no pilar, já que a bainha era lisa de acordo com os procedimentos da fábrica de pré-moldados.

Para o preenchimento da interface entre a viga e o pilar, o apoio da viga, o furo do chumbador e também a abertura do pilar por onde passa a armadura de continuidade, para a ancoragem das mesmas, Kataoka (2007) utilizou o graute industrial. Este produto em pó pronto para o uso, à base de cimento Portland, agregados naturais e aditivos desenvolve altas resistências mecânicas sem retração e apresenta fluidez por um longo período.

Este estudo foi divido em duas etapas distintas e ao mesmo tempo interligadas entre si. A primeira etapa consistiu num estudo minucioso do compósito calda de cimento. Foram estudadas seis composições de caldas de cimento elaboradas com dois tipos de cimento e três tipos de aditivos superplastificantes. Uma avaliação minuciosa do comportamento mecânico, da fluidez e do comportamento reológico foi realizado, dando suporte para a segunda etapa desse estudo.

Na segunda etapa, buscou-se desenvolver um compósito cimentício de fácil preparo e custo não muito elevado, do tipo calda de cimento, que apresentasse

características mecânicas similares aos grautes, na busca de minimizar os problemas descritos por Kataoka (2007). Para tanto, foram elaboradas duas composições de caldas de cimento e de uma argamassa, as quais foram avaliadas juntamente com os grautes industriais selecionados a ensaios específicos de propriedades mecânicas, reológicas, adesão e aderência.

Inicialmente foram realizados ensaios mecânicos de caracterização das caldas de cimento, argamassa e de oito diferentes grautes fornecidos por diferentes fabricantes e, posteriormente, realizou-se ensaios de adesão para três tipos de grautes pré-selecionados em função de suas características mecânicas e para as duas caldas de cimento desenvolvidas.

Ao término dos ensaios de adesão, deu-se início aos ensaios de arrancamento direto, tipo “PULL OUT TEST”, para avaliar as aderências dos diferentes materiais estudados. Primeiramente, testaram-se diferentes tipos de bainhas para preenchimento, a saber: bainha metálica corrugada, bainha plástica corrugada, bainha plástica lisa, com o intuito de verificar a melhor bainha a se utilizar para diminuir a perda de aderência.

Definida a bainha que apresentou o melhor comportamento, realizou-se ensaios de “PULL OUT TEST” para os diferentes materiais de preenchimentos, as duas caldas de cimento, a argamassa e dois grautes selecionados em função dos ensaios de adesão, verificando dessa forma, qual os melhores materiais de preenchimento.

Em função dos ensaios realizados pôde-se concluir quais seriam, dentre os compósitos avaliados, aqueles que obtiveram melhor desempenho. A etapa a seguir seria avaliar em um protótipo em escala real o comportamento da ligação usando os materiais selecionados. Embora este ensaio tenha sido realizado, a conclusão do mesmo não foi totalmente satisfatória, devido a uma serie de problemas de ordem técnica ocorrido no decorrer do mesmo.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar e pesquisar um compósito cimentício do tipo “Calda de Cimento” que possua boa fluidez, que permita com que o mesmo seja introduzido facilmente nos nichos e que possa ser utilizado sem grandes custos pela indústria de pré-moldados preenchendo de forma satisfatória os

vazios existentes entre os elementos pré-moldados, tais como: interface entre a viga e o pilar, o apoio da viga, o furo do chumbador, a abertura do pilar por onde passa a armadura de continuidade, para a ancoragem das mesmas, etc.

Objetivo específico:

Este "novo produto" deverá apresentar alta resistência, módulo de elasticidade compatível com o do concreto, não apresentar retração, ter uma boa aderência com o concreto pré-moldado e com o aço e possuir uma boa trabalhabilidade.

Para testar a capacidade da calda a ser desenvolvida, a mesma será comparada com alguns tipos de grautes disponibilizados no mercado da construção civil e usualmente utilizados pela indústria de pré-moldados. Ensaios referentes ao comportamento quanto a resistência a adesão, resistência mecânica, aderência serão realizados para este fim.

O estudo foi desenvolvido em duas etapas: a primeira consistiu no estudo do compósito calda de cimento, desde suas propriedades reológicas, compatibilidade cimento-aditivo, fluidez e propriedades mecânicas. A segunda no estudo da calda, graute e argamassa para as funções acima mencionadas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, a saber:

Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo apresenta-se o objetivo da pesquisa, bem como uma abordagem sucinta dos ensaios realizados para os diferentes materiais de preenchimento estudados para o preenchimento dos nichos das ligações entre elementos pré-moldados de concreto.

Capítulo 2 – Estado da Arte: apresenta-se uma revisão literária sobre a história do concreto; concreto pré-moldado, seus tipos e ligações das estruturas pré-moldadas; pasta de cimento, sendo abordado alguns aspectos importantes referentes ao cimento, aditivos, calda de cimento; e aderência aço-concreto.

Capítulo 3 – Programa Experimental: neste capítulo estão descritos os materiais utilizados para o preparo da calda de cimento e dos grautes, os equipamentos, bem como os procedimentos experimentais, as normas empregadas

e a descrição das metodologias para preparo da calda e dos grautes, bem como os ensaios empregados.

Capítulo 4 – Estudo da calda de cimento: apresenta-se neste capítulo o estudo do comportamento mecânico, da fluidez, metodologia de determinação da vida util e comportamento reológico de caldas de cimento, variando os tipos de cimento e aditivos superplastificantes.

Capítulo 5 – Estudo dos compósitos cimentícios para preenchimento das ligações semi-rígidas: neste capítulo são avaliados o comportamento de duas caldas de cimentos, da argamassa e dos grautes industriais, tendo sido avaliados o índice de fluidez, água de exsudação, vida útil, resistência à compressão axial e diametral, módulo de elasticidade, ensaios de adesão, aderência tipo “PULL OUT TEST” e, discussão sobre os resultados apresentados.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros: expõem-se nesse capítulo as conclusões obtidas em função dos resultados apresentados nos capítulos anterioriores e as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas: estão expostas as referências utilizadas no trabalho.

Anexo A – Ensaio de Aderência “PULL OUT TEST” para os diferentes materiais de preenchimento com o auxílio de extensômetros elétricos: estão expostos os resultados dos ensaios de aderência com os diferentes materiais de preenchimento utilizando extensômetros elétricos colados nas barras de aço para auxiliar na leitura dos resultados.

Anexo B – Ensaios em escala real: neste capítulo descreve-se a montagem dos modelos em escala real, o preenchimento dos nichos, da bainha e da concretagem da capada da laje da viga, após a montagem da ligação em escala real.

II ESTADO DA ARTE

2.1. CALDA DE CIMENTO

Entende-se como calda de cimento para injeçao como sendo um material obtido pela mistura de cimento, agua e eventualmente aditivos, destinado ao preenchimento de bainhas ou dutos de armaduras de protensao de peças de concreto protendido. A NBR 7681-1983 define a calda de cimento para injeção como sendo um material obtido pela mistura conveniente de cimento, água e eventualmente, de aditivos, destinado ao preenchimento de bainhas ou dutos de armaduras de protensão de peças de concreto protendido. Ela deve apresentar fluidez adequada, durante tempo que confira segurança à operação de injeção prevista.

A calda de cimento possui como característica principal uma fluidez elevada que a permite ser utilizada para os trabalhos de injeção, que consistem essencialmente em obturar os vazios existentes nas rochas fissuradas, nos aluviões ou nas obras a fim de aumentar suas estanqueidades ou suas resistências. A fluidez da calda depende da natureza e da finura do cimento, do teor de água, das adições eventuais, como os aditivos químicos e a cal. Seu poder de fluidez e resistência permite também preencher os vazios existentes entre a armadura de protensão e a bainha, para garantir a proteção da armadura contra a corrosão e estabelecer a aderência entre a armadura e o concreto.

2.1.1 Cimento

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições podem variar de um cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

O clínquer tem como matérias-primas principais o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450ºC. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó.

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

A concentração e reatividade dos compostos do cimento, bem como a temperatura, controlam a velocidade da reação de hidratação. A reatividade está relacionada à finura do cimento que também influencia na velocidade da reação. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rápida será a reação. O tamanho do grão e sua distribuição granulométrica têm importância no controle de qualidade dos cimentos, desde que exista uma relação entre dimensão da partícula e tempo de hidratação (grau de hidratação).

2.1.2 Aditivos

Os aditivos são substâncias que são adicionadas de forma “intencional” ao concreto, tendo como finalidade reforçar ou melhorar algumas de suas características, chegando inclusive a facilitar seu preparo e utilização.

Os aditivos químicos superplastificantes pertencem a uma classe de redutores de água quimicamente diferentes dos redutores normais de água e são capazes de reduzir o consumo da mesma em até 30%. Antigamente, eram-lhe atribuídas apenas propriedades tensoativas que reduzem a tensão superficial da água, permitindo que a mesma massa de água possua um maior efeito sobre os grãos de cimento em relação à água sem aditivo (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Através das medições das cargas elétricas superficiais, geradas na interface sólido/líquido, foi possível concluir que a ação fundamental do aditivo é defloculante

ou dispersante (BUCHER, 1998). Enfim, as duas contribuições, tanto tensoativas como dispersantes, devem ser consideradas como mecanismos fundamentais de ação do superplastificante.

As vantagens de se utilizar os superplastificantes incluem uma melhor trabalhabilidade do concreto, uma maior redução de água, melhor durabilidade, maior resistência mecânica, maior fluidez.

Os primeiros aditivos superplastificantes, também definidos como superfluidificantes, possuíam como base polímeros de melanina e naftaleno, que possui como efeito dispersante a repulsão eletrostática. Com o passar dos anos, surgiu uma nova linha de superplastificantes, considerados como aditivos hiperfluidificantes pelas empresas fornecedoras, destinados principalmente para concretos de alto desempenho e, baseados em policarboxilatos com um efeito dispersante estérico devido a sua forma e tamanho da cadeia.

Devido a essa maior complexidade química e a sua repulsão não ser eletrostática, o aditivo possui um maior efeito sobre a mistura. Dessa forma, os superplastificantes à base de policarboxilatos necessitam de uma menor dosagem para que apresentem resultados semelhantes aos demais tipos de superplastificantes.

Dependendo da evolução da família de aditivos, a trabalhabilidade da mistura cimentícia aumenta, inclusive em baixas relações água/cimento, ou seja, há uma redução no consumo de água. Além disso, nesse tipo de mistura com a utilização de superplastificantes não há perdas em termos de resistência mecânica, mas sim uma melhora tanto a curto como em longo prazos e, portanto, uma melhor durabilidade.

2.1.3 Calda de Cimento

A calda de cimento possui como característica principal uma fluidez elevada que a permite ser utilizada para os trabalhos de injeção, que consistem essencialmente em obturar os vazios existentes nas rochas fissuradas, nos aluviões ou nas obras a fim de aumentar suas estanqueidades ou suas resistências.

A injetabilidade das caldas é definida como sendo a capacidade da mesma de penetrar no meio a ser injetado. A fluidez da calda depende da natureza e da finura do cimento, do teor de água, das adições eventuais, como os aditivos químicos e a cal.

Para cada espécie de calda ou de argamassa e, para cada espécie de trabalho a ser efetuado, existe um limite de injetabilidade abaixo do qual não se deve descer e que é indispensável de ser determinado.

Para se estudar o comportamento da deformação no estado fresco dos aglomerantes, nada mais adequado do que buscar os conceitos de reologia, considerada adequada a materiais “complexos” que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás. O estudo do comportamento reológico é de suma importância tendo em vista que um dos grandes problemas enfrentados na solidarização das ligações entre elementos pré-moldados é a fluidez do material de preenchimento. Há grandes dificuldades no momento do preenchimento dos nichos verticais e horizontais entre elementos pré-moldados devido à baixa fluidez que os materiais possuem e devido ao seu ganho de viscosidade com o passar do tempo.

As caldas de cimento para injeção são suspensões que apresentam propriedades reológicas bastante variáveis em função do cimento usado, processo de mistura, tempo decorrido entre seu preparo e aplicação, aditivos aplicados, temperatura e outros fatores que normalmente acarretam problemas quando de sua aplicação.

Elas são definidas como sendo suspensões em água, acrescidas ou não de aditivo, dependendo de sua finalidade. Dentro de certos limites de proporção água/cimento, esta suspensão apresenta propriedades reológicas bastante semelhantes aos fluidos não Newtonianos, por um tempo limitado após sua preparação.

Para se compreender o comportamento reológico da calda de cimento é necessário, dentre outros fatores, que se compreenda o processo de contato do grão de cimento com a água, ou seja, o seu processo de hidratação. As propriedades reológicas e a viscosidade são indicativos reológicos influenciados pelo estado de dispersão ou floculação das partículas.

No processo de hidratação do cimento, ao entrar em contato com a água, os grãos de cimento tendem a ter um comportamento floculante quando não se utiliza aditivos dispersantes ou defloculantes, ou seja, em situações onde há uma pequena quantidade de água de amassamento da pasta, o processo de floculação dos grãos

de cimento fica mais evidenciado, de forma a se aprisionar dentro desses grãos floculados parte da água de amassamento.

Quando existem forças de atração entre as partículas origina-se uma estrutura interna na pasta, responsável pela sua pouca fluidez. Esta estrutura formada pode ser facilmente destruída por agitação da pasta, que então se fluidifica. Este fenômeno reversível é chamado de tixotropia. Isto não significa que a pasta venha a ser um fluido tixotrópico, pois independente de mudanças do meio, endurece irreversivelmente, isto é apenas a pasta de cimento recém-misturada pode apresentar comportamento tixotrópico (CHAPPUIS, 1990).

2.2. REOLOGIA DAS CALDAS DE CIMENTO

A definição da palavra reologia (rhein = escorrer, fluir e logos = estudo) é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria. Sua importância está no fato de ser uma ciência interdisciplinar por si só, fazendo apelos à química, à física, à mecânica, à matemática, que lhes fornecem, por sua vez os instrumentos de base, se mostrando útil a cada uma dessas disciplinas.

Alguns autores tentaram defini-la, como por exemplo, Tartterssall (1976), como a ciência que explica o comportamento de materiais “complexos” que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás.

A reologia analisa as respostas de um material provocadas pela aplicação de uma tensão ou de uma deformação, o que significa dizer que ela tem interesse nas relações entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo. Entretanto, o fenômeno de retração não depende da aplicação de tensão ou deformação e é, por excelência, um fenômeno reológico.

No caso específico dos materiais compósitos à base de cimento – pastas de cimento, caldas de cimento, argamassas – a importância da reologia está relacionada com as etapas de processamento, transporte, aplicação e conformação plásticas dessas suspensões.

De um modo geral, suspensões são misturas do tipo sólido/líquido formado por um conjunto de partículas distribuídas de forma relativamente uniforme através

de um meio líquido, sem que haja dissolução do material particulado em função do tempo, Stein (1986).

Nos casos em que a concentração dos sólidos é bastante reduzida (<5% do volume) e a freqüência de colisões é relativamente baixa, a viscosidade da suspensão é normalmente constante em função da taxa de cisalhamento e a suspensão ainda comporta-se como um fluido newtoniano, onde a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. A constante de proporcionalidade é a viscosidade do fluido. Matematicamente, tem-se:

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \tag{2.1}$$

onde: τ : tensão; $\dot{\gamma}$: taxa de deformação; μ : viscosidade dinâmica.

Neste caso os principais fatores que afetam a viscosidade da suspensão é a concentração volumétrica dos sólidos, e as características do meio líquido (densidade, por exemplo) e temperatura. Entretanto, à medida que se eleva a concentração de sólidos e as partículas passam a interagir entre si, o comportamento reológico da suspensão se desvia do modelo newtoniano e passa a depender não só dos fatores mencionados acima como também de outras variáveis, entre elas, as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, formato, área superficial específica, rugosidade superficial, densidade, entre outras.); e o tipo de interação entre elas (atração, repulsão).

O comportamento reológico das suspensões se torna ainda mais complexo quando determinadas moléculas (dispersantes) são adicionadas ao meio líquido para se adsorverem à superfície das partículas, de modo a impedir a formação de aglomerados. Neste caso outras variáveis aparecem com interesse, como a concentração de moléculas dispersantes no meio líquido, peso molecular, e conformação espacial da molécula de dispersante.

Todas essas variáveis podem influenciar a relação entre tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento de suspensões concentradas, desviando seu comportamento daquele previsto por Newton. Os fluidos não-Newtonianos não apresentam relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento, portanto a definição

clássica de viscosidade não se aplica mais, uma vez que não há constante de proporcionalidade entre τ e $\dot{\gamma}$, neste caso, a viscosidade deixa de ser uma característica intrínseca do fluido e passa a depender da taxa de cisalhamento e dos diversos outros fatores já mencionados. Em decorrência disso, outras expressões matemáticas são normalmente utilizadas para descrever a viscosidade de fluidos não-Newtonianos, entre elas, as mais utilizadas são a razão simples ($\tau / \dot{\gamma}$), denominada viscosidade aparente (μ_{ap}), e a derivada da curva entre τ e $\dot{\gamma}$, $\left(\frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}}\right)$, normalmente conhecida como a "viscosidade diferencial", Oliveira et al (2000).

Os fluidos em geral podem apresentar outros comportamentos independentes do tempo além do Newtoniano: Pseudoplásticos e Dilatante. Variações destes dois tipos de comportamento podem gerar outros três tipos:

- Newtoniano com tensão de escoamento (fluido de Bingham);
- Pseudoplástico com tensão de escoamento;
- Dilatante com tensão de escoamento.

As suspensões podem apresentar também comportamentos reológicos dependentes do tempo, denominados tixotropia e reopexia. Tixotropia é definida como a redução da viscosidade em função do tempo em suspensões mantidas a uma taxa de cisalhamento constante, a reopexia é o fenômeno inverso, sendo caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente em função do tempo em suspensões submetidas a uma taxa de cisalhamento constante. Há complexas explicações nessas definições, de tal forma que, de uma maneira geral, diz-se que o material está ou não tixotrópico e não, é ou não tixotrópico.

Deve ser considerado como "estando" tixotrópico um material que quando cisalhado (em carregamento) desorganiza sua estrutura interna e que ao ser descarregado procura reestruturar-se, recuperando suas propriedades iniciais numa certa escala de tempo.

Em linhas gerais, se essa recuperação de propriedades iniciais dá-se em tempo breve, o material apresenta pouca ou nenhuma tixotropia, e se, ao contrário, essa recuperação efetuar-se num tempo elevado, diz-se tratar de um material fortemente tixotrópico. Ou ainda, nesse processo de carregamento/descarregamento, a tixotropia é identificada como uma diminuição da

viscosidade em relação ao tempo para uma mesma taxa de deformação. Se ao contrário, essa viscosidade elevar-se, diz-se tratar de um fenômeno anti-tixotrópico ou reopético.

O estudo dos efeitos de tixotropia é fundamental para estudos reológicos de fluidos já que, a simples coleta de certo material para análise pode modificar totalmente o comportamento da mistura inicial. Essa problemática é muito comum na determinação de parâmetros reológicos de fluidos alimentares como, por exemplo, iogurte, dentre outros.

A seguir são apresentados outros modelos matemáticos que podem representar diferentes tipos de comportamentos reológicos. Esses modelos são válidos para escoamentos simples e expressam a relação $\tau(\dot{\gamma})$ (tensão cisalhante em função da taxa de deformação).

O modelo mais simples, como já descrito anteriormente, é o do fluido newtoniano em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Este tipo de comportamento é observado com o ar, água, óleos, álcoois, etc.

No caso de fluidos não-Newtonianos (com presença de tensão crítica), os modelos são da forma:

$$\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma}) \tag{2.2}$$

Alguns exemplos importantes são:

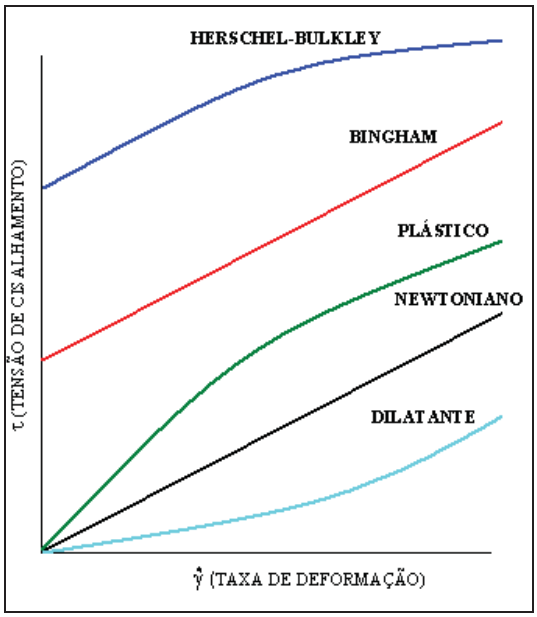
$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad \text{(Bingham e Green – 1920)} \tag{2.3}$$

$$\tau = \tau_c + k_n \dot{\gamma}^n \quad \text{(Herschel e Bulkley – 1926, se n < 1)} \tag{2.4}$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{K\dot{\gamma}} \quad \text{(Casson – 1959)} \tag{2.5}$$

Em cada caso, os parâmetros τ_c, μ_B e K são diferentes e devem ser determinados experimentalmente. Esses modelos são aplicáveis, por exemplo, a concreto fresco, lamas, tintas, misturas hiperconcentradas, etc. A Figura 2.1 ilustra alguns dos diferentes tipos de modelos reológicos encontrados na literatura.

Figura 2.1: Reograma de diferentes tipos de fluidos.



Fonte: Santos (2003)

A Tabela 2.1 a seguir mostra os valores dos parâmetros reológicos encontrados na literatura, para os diferentes compósitos feitos à base de cimento, como a pasta de cimento, graute, argamassas, concreto, concreto auto-adensável, entre outros.

Tabela 2.1: Reologia da pasta de cimento, graute, argamassa, concreto.

Material	Cement paste, grout	Mortar	Flowing concrete	Self−compacting concrete	Concrete
Yield stress N/m^2	10−100	80−400	400	50−200	500−2000
Plastic viscosity Ns/m^2	0.01−1	1−3	20	20−100	50−100
Structural breakdown	Significant	Slight	None	None	None

Fonte: Banfill (2003)

Conforme a tabela acima, podemos observar os diferentes valores encontrados entre as argamassas, grautes e as caldas de cimentos. Dessa forma,

buscou-se estudar e pesquisar um material que tivesse valores de tensão crítica e viscosidades baixas, de tal forma que facilitasse o processo de preenchimento dos nichos existentes nas ligações entre os elementos de concreto pré-moldados. O comportamento reológico da mistura é de importância no que tange sua aplicação e desempenho.

Buscando obter o melhor desempenho para o preenchimento das bainhas e nichos dos elementos pré-moldados o material deve possuir uma boa fluidez que deve ser mantida por um determinado tempo para que o mesmo possa ser facilmente aplicado. Sendo assim, verifica-se o comportamento do material não apenas no seu estado macro, por meio de ensaios de consistência e fluidez, mas também em uma escala micro, onde analisa o processo de ganho de viscosidade e tensão conforme as reações de hidratação do cimento ocorrem.

Dessa forma, tomou-se como base inicial para o estudo deste material, a pesquisa anteriormente desenvolvida pelo próprio pesquisador em relação ao compósito cimentício do tipo calda de cimento. Bertolucci (2007) estudou o comportamento reológico das caldas de cimentos fabricadas com diferentes tipos de cimentos e aditivos superplastificantes.

Foram estudados 6 tipos diferentes de caldas de cimento, sendo utilizados dois tipos de cimento CP-V-ARI RS e o microcimento MC 20 RS e três tipos diferentes de aditivos superplastificantes, dois a base de policarboxilatos de fabricantes diferentes e um a base de naftaleno. Tendo em vista que, com a variação dos materiais constituintes da calda de cimento, o pesquisador buscou analisar a influencia dos mesmos no comportamento mecânico e reológico das caldas de cimento.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa observou-se que a temperatura é um fator de grande influência sobre fluidez da calda de cimento, quer seja a temperatura da água, do cimento, do ambiente, bem como a temperatura da calda em si. Verificou-se que a calda sofre grande influência do tipo de base química do aditivo superplastificante utilizado, podendo o mesmo modificar o seu índice de fluidez bem como seu comportamento reológico, com referência no índice de viscosidade e nível de tensão crítica.

Outro fator de influência é a composição química do cimento. Enquanto a variação percentual de seus componentes normalmente não é de grande influencia

nos concretos, na calda de cimento a modificação de alguns componentes químicos do cimento, faz com que seu comportamento mude completamente, havendo uma redução do tempo de vida útil das misturas.

2.3. CONCRETO PRÉ-MOLDADO

2.3.1 Concreto

Segundo Helene (2007) “o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.”

O concreto da era atual surgiu após o aparecimento do cimento Portland, que foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland, uma ilha situada no sul desse país. Como o resultado da invenção de Aspdin se assemelhasse na cor e na dureza a essa pedra de Portland, ele registrou esse nome em sua patente. É por isso que o cimento é chamado cimento Portland.

O francês Joseph-Louis Lambot construiu um barco cujo formato, foi constituído por barras de ferro finas e grossas e preenchida com argamassa de cimento. Obteve, em 1855, a patente para seu produto, cuja denominação dada foi de “cimento armado”. (VASCONCELOS, 2007). Na Figura 2.2 é ilustrado um dos barcos de Lambot, com aproximadamente 4 m de comprimento por 1,3 m de largura e 4 cm de espessura.

Figura 2.2: Remanescente de um barco de Lambot.

Fonte: Kaefer (1998)

Em 1877, baseado na idéia de Lambot, Joseph Mounier patenteou um método para a construção de vasos, sendo construídos basicamente em argamassa armada.

Segundo Mehta (1994), “o concreto é o material estrutural dominante hoje em dia. No futuro, para selecionar os materiais de construção os engenheiros considerarão não somente os atrativos técnicos e econômicos dos materiais, mas também as implicações ecológicas e de conservação de energia do uso destes materiais. A julgar pelos parâmetros possíveis de estimar, o futuro do concreto deverá ser ainda melhor, porque o material parece possuir as mais fortes qualificações gerais para uso estrutural. Comparado a outros materiais de construção, o concreto não é apenas energeticamente mais eficiente, mas também ecologicamente harmônico. A aplicação em larga escala dos princípios da Ciência dos Materiais à tecnologia de produção do concreto oferece a expectativa de que no futuro o produto será consideravelmente superior em resistência, elasticidade e tenacidade do que o disponível atualmente”.

2.3.2 Definições

“A pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a obra ou parte dela é moldada fora do local definitivo. Freqüentemente a pré-moldagem é relacionada a dois termos: a pré-fabricação e a industrialização da construção.” (EL DEBS, 2000)

O campo de aplicação do concreto pré-moldado é bastante amplo. Ele abrange praticamente toda a Construção Civil, sendo encontrado em edificações, construções pesadas e diversas outras obras civis, como, por exemplo, as construções utilizadas em infra-estruturas.

Nas edificações, a pré-moldagem pode ser empregada nas estruturas de edifícios industriais, comerciais e habitacionais, bem como em equipamentos urbanos de uso múltiplo, como hospitais, terminais rodoviários e ferroviários. Na construção pesada é muito utilizada nas pontes de grande porte e em túneis, além do seu emprego em obras portuárias e usinas hidrelétricas.

No Brasil, o emprego da pré-moldagem teve início em 1925, com a fabricação das estacas para a fundação do Jockey Clube do Rio de Janeiro. No final da década

de 50 e na década de 60, chegaram ao Brasil os reflexos do grande avanço da pré-moldagem na Europa, que fomentaram seu emprego no país.

Quanto às tendências do emprego e estudo do concreto pré-moldado, merecem destaque, em um panorama mundial, os seguintes assuntos: a) automatização do projeto; b) aumento do uso do concreto arquitetônico; c) automatização do uso de elementos de uso intensivo e d) aumento do concreto de alto desempenho (CAD).

As vantagens da pré-moldagem, ou seja, as características que favorecem sua utilização são aquelas relacionadas à execução de parte da estrutura fora do local de utilização definitivo, como conseqüência das facilidades da produção dos elementos, da eliminação ou da redução do cimbramento, velocidade de execução / curto prazo, canteiro industrial, aspectos construtivos.

No caso da produção em grandes séries, em fábricas, as vantagens decorrentes das facilidades de execução são bem mais significativas. Entre outras, essas vantagens seriam possibilitar: grande reutilização das fôrmas, emprego da protensão com armadura pré-tracionada, emprego de seções com melhor aproveitamento dos materiais, maior produtividade da mão-de-obra e maior controle de qualidade.

As desvantagens da pré-moldagem, ou seja, as características que desfavorecem sua utilização são aquelas decorrentes da colocação dos elementos nos locais definitivos de utilização e da necessidade de prover a ligação entre os vários elementos que compõem a estrutura. As desvantagens decorrentes da colocação dos elementos nos locais definitivos de utilização estariam relacionadas aos custos e às limitações do transporte e da moldagem dos elementos. As limitações no caso do transporte seriam, de maneira geral, os gabaritos de transporte e no caso da montagem, seriam a disponibilidade e as condições de acesso de equipamentos para sua realização.

As ligações entre os elementos se constituem em uma das dificuldades do emprego da pré-moldagem. Normalmente, ligações mais simples acarretam estruturas mais pobres em relação às solicitações, enquanto ligações que procuram reproduzir o monolitismo das estruturas de concreto moldado no local são, em geral, mais trabalhosas ou mais caras. Esse aspecto não deve ser considerado uma

restrição ao uso da técnica da pré-moldagem, mas, sim, o preço que se paga para ter as facilidades na execução dos elementos.

Com o emprego da pré-moldagem pode-se prever o desmonte da construção, fornecendo alternativas de rearranjo do espaço construído.

2.3.3 Tipos de concreto pré-moldado

Segundo El Debs (2000), os elementos pré-moldados podem ser classificados quanto à seção transversal, processo de execução e função estrutural. Dentre os tipos de concreto pré-moldado, é possível destacar: pré-moldado de fábrica, pré-moldado de canteiro, pré-moldado de seção completa, pré-moldado de seção parcial, pré-moldado pesado, pré-moldado leve, pré-moldado normal e pré-moldado arquitetônico.

O pré-moldado de fábrica é executado em instalações permanentes distantes da obra. Esse tipo de pré-moldado pode ou não atingir o nível de pré-fabricado, segundo o critério da NBR 9062 (2006). A capacidade de produção da fábrica e a produtividade do processo, que dependem dos investimentos em fôrmas e equipamentos, podem ser pequenas ou grandes. A questão do transporte das peças até a obra deve ser observada quanto aos gabaritos de transporte e custos.

O pré-moldado de canteiro é executado em instalações temporárias nas proximidades da obra, com baixa capacidade de produção. Por estarem próximas à obra, não há restrições quanto ao transporte, além de que os elementos estruturais são isentos de impostos referentes à produção industrial e à circulação de mercadorias.

Quanto ao gênero da seção utilizada, tem-se o pré-moldado de seção completa, executado de forma que sua seção resistente é formada fora do local de utilização definitivo. Eventualmente, na aplicação deste tipo de pré-moldado, pode ocorrer o emprego do concreto moldado no local, em ligações ou como regularização, mas não visando ampliar a seção resistente.

O pré-moldado de seção parcial é inicialmente moldado apenas com parte da seção resistente final, sendo posteriormente completada na posição de utilização definitiva com concreto moldado no local, originando um elemento composto.

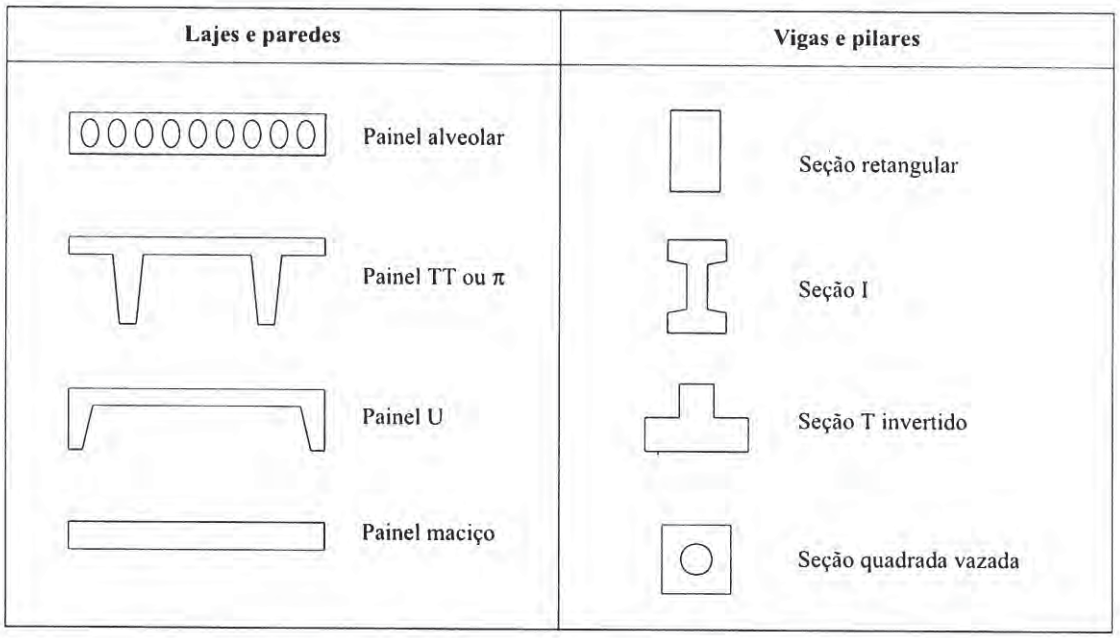
Os critérios para classificação quanto ao peso é subjetivo e circunstancial. Entretanto, ela é importante no desenvolvimento de projetos em que se emprega a

pré-moldagem, uma vez que está relacionada aos equipamentos de transporte e montagem. O pré-moldado pesado apresenta pesos acima de 5 kN (500 kgf) e o pré-moldado leve é caracterizado por peças de até 0,3 kN (30 kgf), de modo que os elementos compreendidos entre 0,3 kN e 5 kN são classificados como elementos de peso médio (HASS, apud EL DEBS, 2000). O pré-moldado leve é aquele que não necessita de equipamentos especiais para transporte e montagem, podendo-se improvisar os equipamentos ou até mesmo atingir a situação em que a montagem possa ser manual.

Quanto à aparência, os elementos pré-moldados podem ser divididos em normal e arquitetônico. O pré-moldado normal é aquele em que não há preocupação em relação à aparência do elemento. Por outro lado, o pré-moldado arquitetônico possui uma forma especial ou padronizada que contribui na forma arquitetônica ou em efeito de acabamento da construção, podendo ou não ter finalidade estrutural.

As dimensões e formas dos elementos estruturais de concreto pré-moldado podem ser adequadas de acordo com as necessidades de projeto, assim como lilustrado pela Figura 2.3, com algumas denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum.

Figura 2.3: Denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum.



Fonte: El Debs (2000)

2.4. LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS

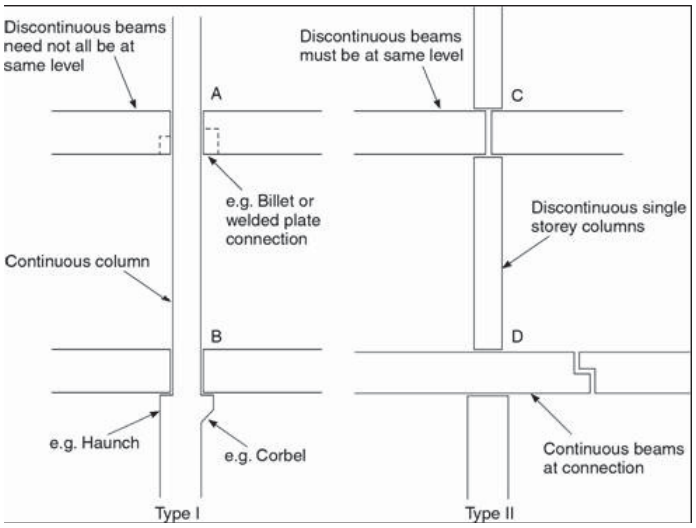
Atualmente existem diversos tipos de ligações viga-pilar, variando em complexidade, custo e comportamento estrutural. De modo geral, as ligações viga-pilar pré-moldadas podem ser encontradas em duas situações básicas em relação aos pilares, a saber (Figura 2.4):

Quando o pilar é contínuo e os componentes horizontais são conectados a ele, a ligação é chamada de ligação de extremidade da viga ou ligação viga-pilar;

Quando pilar é descontínuo, em termos construtivos, e os componentes horizontais são, ao contrário, contínuos ou separados por ligações, a ligação é considerada como de "topo".

As ligações viga-pilar com pilares contínuos, em estruturas de esqueleto em concreto pré-moldadas, Figura 2.4 - tipo I, são normalmente utilizadas em edifícios para múltiplos pavimentos, e vem sendo avaliadas experimentalmente por Ferreira no NETPRE - UFSCar, (ver Souza (2006), Kataoka (2007), Catoia (2007)).

Figura 2.4: Tipos de ligações viga-pilar, A: ligação viga-pilar com consolo embutido em pilar contínuo, B: viga-pilar sobre consolo aparente, C: vigas e pilares descontínuos, D: pilar descontínuo com viga contínua.



Fonte: FIB (2003)

O sistema estrutural em pré-moldados de concreto é composto por elementos que são montados através de diferentes dispositivos mecânicos (por meio de chumbadores, solda, transpasse de armaduras com preenchimento de graute ou

concreto). Entretanto, não se trata apenas de uma operação de conectar os elementos uns aos outros, mas principalmente de se garantir a integridade estrutural da estrutura global.

Dessa forma, o principal propósito das ligações estruturais é a transferência das forças internas entre os elementos pré-moldados de tal forma que promova o comportamento estrutural pretendido quando a estrutura for solicitada.

A escolha do sistema da ligação deve ser compatível com o projeto do sistema estrutural, e consistente durante toda a edificação. Em uma situação ideal somente uma tipologia de ligação deve ser usada em um edifício.

Segundo Ferreira (1999) as ligações apresentam-se como regiões de descontinuidade que podem ou não mobilizar deslocamentos e esforços decorrentes dos elementos por elas ligados, fazendo com que haja uma redistribuição desses esforços ao longo da estrutura, interferindo no comportamento da mesma. Em conseqüência disso, as ligações viga-pilar que são projetadas para transmitir os momentos fletores e devem apresentar resistência, rigidez e ductilidade, aproximando-se das estruturas de concreto armado moldadas in loco.

Em geral, as ligações resistentes à flexão são utilizadas com os seguintes propósitos:

- Estabilizar e aumentar a rigidez em pórticos pré-moldados;
- Diminuir a altura dos elementos resistentes à flexão;
- Distribuir momentos de segunda ordem para as vigas e lajes, e conseqüentemente reduzir os momentos no pilar;
- Aumentar a resistência ao colapso progressivo.

Um dos fatores mais importantes é garantir que a segurança da ligação não será posta em risco devido às falhas de execução, e que as operações no canteiro sejam mais simples, o suficiente para assegurar a execução dos componentes.

As ligações podem ser classificadas em diferentes formas, dependendo, por exemplo, do tipo dos elementos conectados ou do tipo da força principal a ser resistida ou transmitida. Dependendo da sua rigidez elas são classificadas em articuladas, rígidas ou semi-rígidas. As ligações articuladas caracterizam-se pela não capacidade de resistir a momentos fletores significantes, ao contrário das ligações rígidas, que resistem aos momentos fletores. As ligações semi-rígidas possuem um comportamento intermediário, entre as ligações articuladas e rígidas,

permitindo certa interação entre os elementos a ela adjacentes, transmitindo parcialmente os momentos fletores.

2.4.1 Ligações semi-rígidas

O termo “ligações semi-rígidas” foi utilizado inicialmente na década de 30 nas estruturas metálicas, sendo incorporado no final dos anos 80 ao estudo das estruturas pré-moldadas. Esta notação, a princípio, está relacionada com a rigidez à flexão da ligação. O conceito de ligação semi-rígida e seus efeitos nas estruturas pré-moldadas também se encontram em várias normas e manuais de procedimentos de projeto, como os manuais do PCI (Precast Concrete Institute) nos EUA. O manual FIB (2003) já apresenta o conceito de ligações semi-rígidas e seus efeitos nas estruturas pré-moldadas, mas também não apresenta procedimentos teóricos que possam ser aplicados diretamente no projeto.

Dentro de uma mesma ligação pode haver vários mecanismos de transmissão de forças. Segundo FIB (2003), uma “junta” deve ser entendida como uma interface entre dois ou mais elementos onde atuam forças (tração, compressão, cisalhamento) ou momentos. Já uma “ligação” pode envolver mais de uma interface e as partes dos elementos adjacentes, sendo projetada para resistir à ação de forças e momentos. Assim, o projeto de uma ligação é função tanto dos elementos estruturais quanto dos mecanismos de transmissão de forças nas interfaces entre estes elementos. Para uma ligação viga-pilar típica, a “região” da ligação pode ser estendida bem além das superfícies de contato. Além da consideração das forças a serem transferidas pela ligação, é importante dentro do projeto das ligações viga-pilar atentar para as verificações de segurança em incêndio, contra danos acidentais, os efeitos transitórios durante a montagem (defeitos na montagem) e durabilidade.

Gorgun (1997) e Ferreira & Elliot (2002), consideram as ligações como regiões (que incorporam a extremidade de uma viga, por exemplo), onde ocorrem concentrações das tensões e deslocamentos localizados, fazendo com que haja uma modificação do desempenho estrutural do elemento pré-moldado interligado por estas ligações, afetando assim o desempenho da estrutura global.

No Brasil, na nova versão da NBR 9062-2006, as ligações são consideradas como semi-rígidas para engastamento parciais entre 20% e 90%, sendo que o efeito

desfavorável das deformabilidades das ligações viga-pilar deve ser levando em conta na análise da estabilidade das estruturas pré-moldadas.

Souza (2006) ao estudar o efeito da rigidez da ligação viga-pilar sobre a resposta da rigidez da viga pré-moldada, afirma que a avaliação do comportamento estrutural da ligação viga-pilar é fundamental haja visto que viga e ligação interagem fortemente. O pesquisador em questão utilizou uma tipologia de ligação com armadura de continuidade e apoio sobre consolo de concreto e chumbador. O sistema de ancoragem da armadura negativa nos pilares de extremidades foi feito por meio de luvas prensadas rosqueadas. Este sistema também pode ser feito por meio de barras inseridas em bainhas grauteadas com extremidade parafusada. Neste segundo caso, a armadura no pilar de extremidade é obtida por meio de uma chapa parafusada ou soldada na extremidade, ficando a armadura dentro de uma bainha horizontal preenchida com graute. Embora esta seja uma solução mais barata em termos econômicos, não se pode garantir a qualidade da aderência entre armadura e o graute, além de se ter o problema de acabamento na extremidade externa do pilar.

O espaçamento entre viga e pilar adotado foi de 5 cm na interface viga-pilar. Esse espaçamento, segundo a recomendação da FIB (draft 2003) deve ser no mínimo de 5 cm entre a viga e o pilar para garantir o bom preenchimento, porém segundo Souza (2006) no 1º Encontro de Calculistas promovido pela ABCIC em setembro de 2005, foi constatado o uso de espaçamentos de até 10 cm. Este espaçamento também é preenchido com graute para permitir a consolidação de região comprimida. A Figura 2.5 ilustra o detalhe de uma ligação viga-pilar com chapa soldada, com a utilização do espaçamento entre viga e pilar.

Figura 2.5: Detalhe de uma ligação viga-pilar com chapa soldada e utilização de espaçamento entre viga e pilar.(T&A)

Fonte: Souza (2006)

2.4.2 Preenchimento das Juntas entre Pilar e Viga: Uso do Graute

O graute é um produto em pó ou adições pronto para o uso, à base de cimento Portland, agregados naturais e aditivos. É uma argamassa pronta de alta resistência e retração compensada tendo como principais campos de utilização dos grautes as obras novas e as de recuperação estrutural. Os grautes para reparo são, em geral, denominados argamassas ou micro-concretos fluidos ou simplesmente grautes de reparo.

A expansão controlada ou, conforme o produto, a simples compensação da retração, garante a estabilidade volumétrica e impede a existência de vazios, propiciando perfeita aderência e compacidade. Os grautes são materiais destinados ao preenchimento de vazios confinados ou semiconfinados em locais de difícil acesso, seja por se tratarem de cavidades muito estreitas ou locais com elevada densidade de obstáculos tais como armaduras, tubulações, entre outros.

Este produto desenvolve altas resistências mecânicas sem retração, sendo indicado para serviços de grauteamento em geral, como por exemplo, bases de peças fixas ou como argamassa de reparos. Apresenta fluidez por um longo período, permitindo trabalhar em áreas de difícil acesso.

A fluidez do graute permite que haja um preenchimento total da seção, sem a necessidade de adensamento. A alta resistência inicial permite a rápida liberação das fôrmas e da estrutura grauteada, possibilitando maior agilidade no processo de fixação de equipamentos, e rápida colocação da estrutura reparada ou reforçada em

carga. A elevada resistência final e a apresentação de módulo de deformação compatível com o do concreto garantem o bom desempenho frente a esforços elevados, mesmo para reforço de concretos de alta resistência.

Uma argamassa ou um microconcreto fluído para que seja considerado um graute é necessário que o mesmo tenha as seguintes características: apresentar uma consistência fluida, sem necessidade de adensamento mecânico, altas resistências inicial e final e, expansão controlada.

Os grautes possuem algumas vantagens quanto à sua aplicação em obras:

- Devido à sua fluidez, consegue preencher melhor os vazios e cavidades com elevada concentração de armadura, sem deixar vazios;
- Rapidez em sua execução;
- Devido à sua baixa permeabilidade, apresenta uma maior proteção contra a corrosão;

2.5. ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

A aderência existente entre o aço e o concreto assegura que as estruturas de concreto armado possuam um bom comportamento estrutural de tal forma que, a estrutura trabalhe como um conjunto solidário. Assim, os materiais se deformam em conjunto, havendo a transferência dos esforços da barra de aço para o concreto.

A avaliação da aderência se dá pela relação entre a tensão de cisalhamento no concreto circunvizinho à armadura e o deslocamento relativo entre os dois materiais, provocado pela diferença entre as deformações específicas de cada um deles.

O efeito da aderência para as barras lisas se dá por meio de dois tipos de aderência, a saber: aderência por adesão química existente entre a pasta de cimento e a barra de aço e aderência por atrito que está relacionado diretamente com a rugosidade superficial da barra. Com isso, quanto maior as irregularidades da superfície da barra, maior será o intertravamento mecânico entre o aço e o concreto.

Com o uso de barras nervuradas a resistência ao deslizamento tem como seu fator preponderante a ação mecânica entre o concreto e as nervuras, devido às pressões exercidas pela nervura sobre o concreto. Neste caso, o efeito da adesão

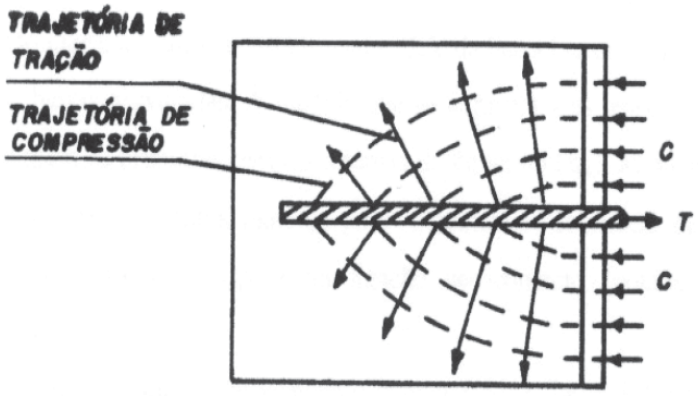
química é pequeno e o atrito não ocorre até que haja o escorregamento da barra de aço.

Segundo ACI (1994), a ruptura na ligação das barras de aço nervuradas com o concreto podem ocorrer devido:

- ao esmagamento do concreto junto às nervuras;
- ao corte do concreto em torno da barra ou entre nervuras;
- ao fendilhamento longitudinal do concreto de recobrimento ao longo da barra;
- a combinação destes três modos de ruptura.

A aplicação de esforços de tração em uma barra de aço embutida em um corpo de prova de concreto produz esforços de tração e compressão no mesmo, que se transformam em tensões principais de tração e compressão, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: Trajetórias das tensões principais junto à barra de armadura tracionada.



Fonte: Leonhardt (1979)

O fenômeno da aderência ocorre devido à transmissão dos esforços aplicados na armadura para o concreto. Essa transferência, segundo Valle & Fusco (1995), ocorre principalmente pela ação das nervuras sobre o concreto entre as saliências. Caso ocorra o esmagamento de uma dessas saliências, não há o comprometimento da ancoragem da armadura, pois o esforço que estava sendo nela aplicada passa a ser transferido para as outras saliências.

Com isso, há duas situações que ocorrem ruptura na aderência: a micro-ruptura, cuja ruptura se dá no local da ligação aço-concreto não comprometendo a ancoragem e, a macro-ruptura, que ocorre após várias micro-rupturas, que compromete a ancoragem da armadura, pois não há redistribuição dos esforços. A micro-ruptura está relacionada com a máxima tensão de aderência obtida ao longo do comprimento de ancoragem, enquanto que a macro-ruptura é o valor de tensão de aderência de ruptura registrado quando há a perda de ancoragem da armadura no concreto.

2.5.1 Tipos de Aderência

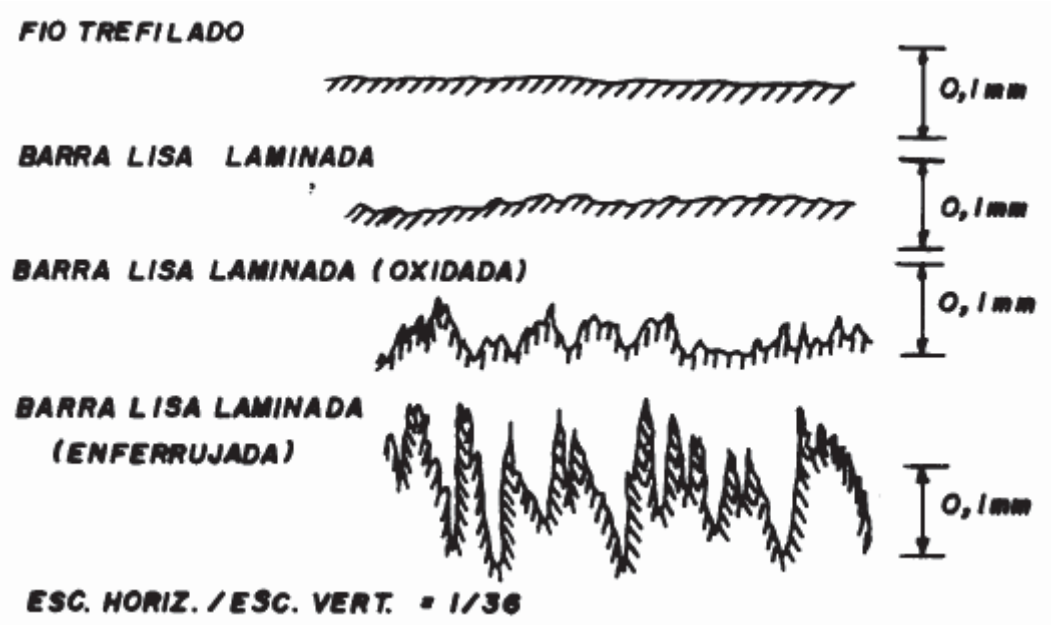
A aderência é composta por diversas parcelas que são decorrentes de diferentes fenômenos que interferem na ligação aço-concreto. Segundo Fusco (1995) existem três tipos possíveis de aderência, a saber:

2.5.1.1 Aderência por adesão química

A aderência por adesão ocorre devido à ligação físico-química originada na interface aço-concreto durante as reações de pega do cimento, onde a pasta de cimento penetra nas rugosidades superficiais das barras. A Figura 2.7 ilustra a rugosidade superficial dos fios e barras lisas.

A aderência por adesão é fraca, pois é destruída em baixas solicitações devido aos pequenos deslizamentos da barra.

Figura 2.7: Acabamento superficial de fios e barras lisas.



Fonte: Fusco (1995)

2.5.1.2 Aderência por atrito

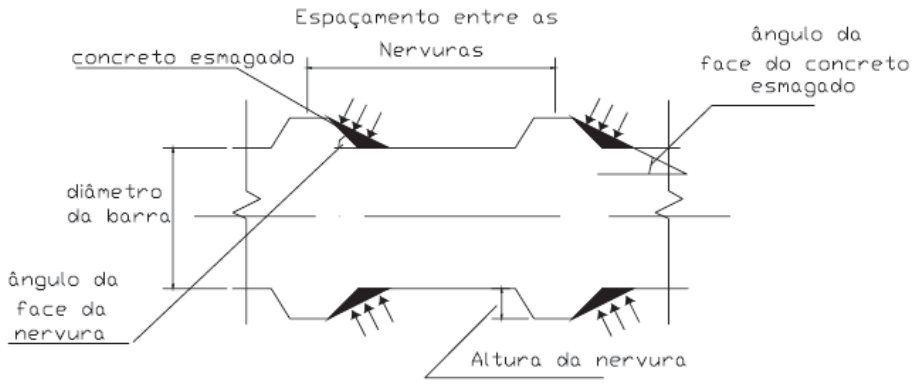
Essa parcela de aderência manifesta-se após o rompimento da adesão e, ocorre devido ao atrito aço-concreto. É necessário que haja pressões transversais às armaduras que aparecem em função de tensões de compressão transversais devido a cargas externas, retração ou expansão do concreto. (LEONHARDT, 1979).

2.5.1.3 Aderência mecânica

É a interação mecânica entre o aço e o concreto, que ocorre devido à presença de saliências na superfície da barra. A geometria da barra nervurada é um fator de influencia nesse tipo de ligação, como por exemplo, forma, altura das nervuras, inclinação da nervura e, distância entre nervuras, conforme ilustra a Figura 2.8.

O intertravamento mecânico ocorre devido ao encaixe entre o concreto e as nervuras das barras de aço, formando assim, “consoles de concreto” que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto.

Figura 2.8: Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto.



Fonte: Tepfers (1979)

2.5.2 Fatores que influenciam na aderência aço-concreto

A tensão de aderência pode ser definida como sendo a relação entre a força atuante na barra e a superfície da barra aderente ao concreto. Em um primeiro momento, esta relação parece ser bem simples, porém existem vários fatores que influenciam no comportamento da aderência, intervindo dessa forma em sua quantificação.

A Tabela 2.2 a seguir, mostra alguns fatores que podem influenciar no comportamento da aderência.

Tabela 2.2: Fatores que influenciam no comportamento da aderência aço-concreto.

FATOR	COMPORTAMENTO DO FATOR	COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA
Resistência mecânica do concreto	AUMENTA	AUMENTA
Superfície das barras	AUMENTO DA RUGOSIDADE	AUMENTA
Diâmetro das barras	AUMENTO	DIMINUI
Área relativa da nervura	AUMENTA	AUMENTA
Posição das barras na concretagem	HORIZONTAL (SUPERIOR)	DIMINUI
Idade do ensaio	AUMENTA	AUMENTA
Adensamento	AUMENTA	AUMENTA
Carregamento cíclico	AUMENTA	DIMINUI

Fonte: Barbosa (2002)

Conforme a Tabela 2.2 acima pode-se observar que um dos fatores que influenciam no comportamento da aderência é a resistência à compressão do concreto, onde quanto maior a resistência, melhor a aderência. Alguns pesquisadores indicam que o concreto com resistência entre 25 e 45 MPa não apresentam grandes diferenças no comportamento da aderência, enquanto que para concretos de alta resistência pode-se ter uma aumento significativo da taxa de aderência em relação ao concreto convencional. Este aumento da aderência se deve a um concreto mais compacto e denso e da diminuição da espessura da zona de transição entre a barra de aço e o concreto. A idade do ensaio e o adensamento do concreto são fatores que influenciam no comportamento da aderência, mas que estão ligados a resistência do concreto.

2.5.3 Ensaios de Aderência

Existem vários tipos de ensaios que determinam a tensão de aderência entre a armadura de aço e o concreto, como por exemplo:

- Ensaio de Arrancamento Direto – “PULL-OUT TEST (POT)”;
- Ensaio de Arrancamento com Anel Circunferencial –“RING PULL-OUT TEST”;
- Ensaios de Flexão – “BEAM TEST (Bt)”;

- Ensaio de Aderência do tipo “PUSH-OUT TEST”;
- Ensaio de Extremo de Viga – “BEAM END TEST”;
- Ensaio das Quatro Barras;
- Ensaio de Conformação Superficial ou Ensaio de Tirante de Concreto.

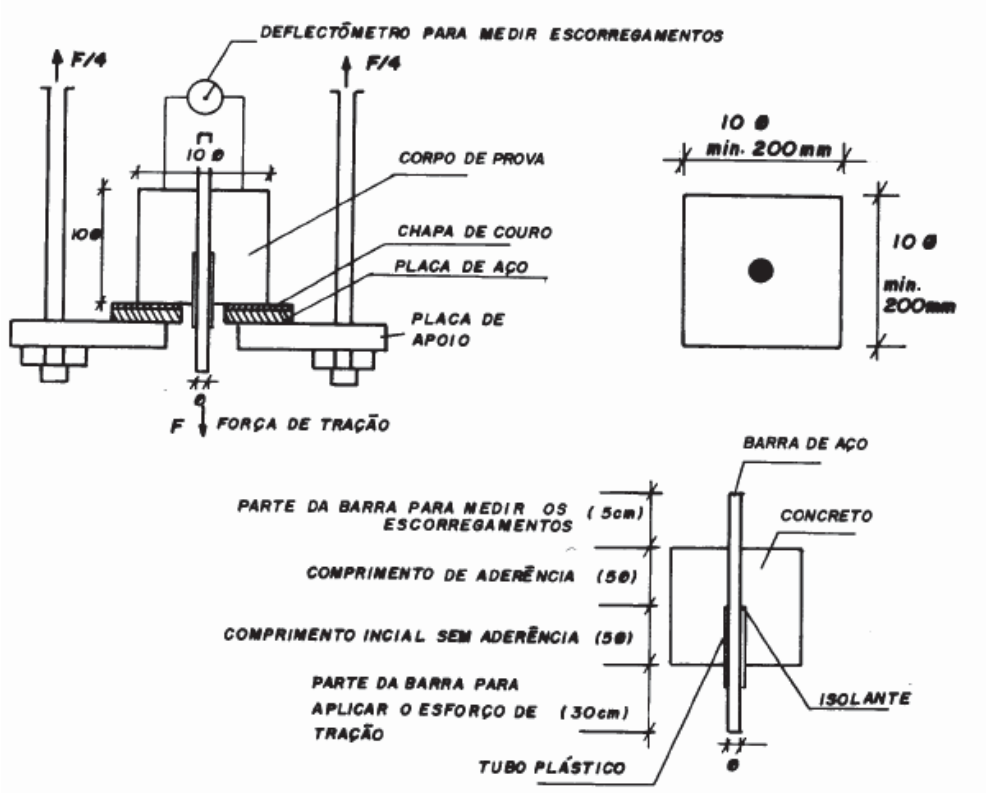
Neste trabalho, optou-se por utilizar o ensaio de arrancamento direto tipo “PULL-OUT TEST”. Fez-se uma adaptação do ensaio POT, pois utilizou-se bainhas para as confecções dos blocos de concreto, não havendo assim a aderência direta do aço com o concreto. Com isso, houve o preenchimento da bainha com outro material, como o graute e a calda de cimento, tendo como finalidade reproduzir o comportamento da ligação viga-pilar-viga de elementos pré-moldados de concreto.

2.5.3.1 Ensaio de “PULL-OUT TEST”

Este é um dos mais tradicionais ensaios de aderência que consiste em extrair uma barra de aço posicionada no centro de um corpo de prova de concreto, colocado sobre placas de apoio de uma máquina de concreto onde, as duas extremidades da barra são projetadas fora do corpo de prova, medindo-se assim, a força de tração aplicada em uma das extremidades e o escorregamento na outra extremidade.

Este ensaio de arrancamento direto está normalizado pela RILEM, doc 7.II.128 (1973) e também está referido na ASTM C234 (1991), com todos os detalhes para que o ensaio possa ser realizado em laboratório. Segue abaixo a Figura 2.9 que ilustra a disposição geral do ensaio POT.

Figura 2.9: Disposição de geral do ensaio de arrancamento direto proposto por RILEM.



Fonte: RILEM (1973)

As vantagens do POT são que, possuem um baixo custo e simplicidade, dando uma idéia real do conceito de ancoragem, pois o comprimento que está circundado pelo concreto é o que define o próprio comprimento de ancoragem.

Sua desvantagem está no fato do corpo de prova ser solicitado de forma que não se reproduz a maneira real em que a barra de aço é solicitada quando projetada as finalidades de uso. Dessa forma, os resultados obtidos servem apenas para pesquisas comparativas ou estudos qualitativos.

2.6. PREENCHIMENTO DAS LIGAÇÕES ENTRE OS ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO

O NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) localizado na UFSCar na cidade de São Carlos-SP tem atuado na caracterização do comportamento estrutural de elementos pré-moldados de concreto, onde são estudados os mecanismos de deformação dos componentes das ligações (onde no

caso os comportamentos dos materiais cimentícios são muito importantes, pois afetam o comportamento do conjunto). Dentro do estudo das ligações, do ponto de vista do NETPRE, procura-se entender como estes materiais e componentes empregados nas ligações se comportam em termos de conjunto estrutural, sem se preocupar com o desenvolvimento de novos materiais que atenda as exigências do comportamento estrutural.

As ligações viga-pilar com pilares contínuos, em estruturas de esqueleto em concreto pré-moldadas, são normalmente utilizadas em edifícios para múltiplos pavimentos, e vem sendo avaliadas experimentalmente por Ferreira, Souza (2006), Kataoka (2007), Catoia (2007).

Souza (2006) desenvolveu um procedimento experimental para avaliar o comportamento das ligações viga-pilar, ensaiando uma viga pré-moldada de concreto armada apoiada sobre dois pilares com consolo de concreto, utilizando ligação semi-rígida com armadura de continuidade solidarizada no local. O modelo ensaiado teve dimensões reais permitindo analisar o comportamento tanto da ligação como da viga. No preenchimento das juntas entre os pilares e a viga foi utilizado o graute industrial pronto de alta resistência e retração compensada. Este produto em pó pronto para o uso, à base de cimento Portland, agregados naturais e aditivos desenvolve altas resistências mecânicas sem retração e apresenta fluidez por um longo período. O pesquisador concluiu que a ligação apresentou um comportamento semi-rígido tanto no Estado Limite de Serviço como no Estado Limite Último.

Kataoka (2007) utilizou dois modelos cruciformes que possuem consolos de concreto com chumbadores, vigas em balanço, e laje alveolar apoiada sobre as vigas, que recebeu uma capa de concreto moldado no local para solidarização da armadura de continuidade. A taxa de armadura de continuidade que passa através do pilar e ao lado do mesmo não é a mesma para ambos os modelos, sendo que no primeiro modelo foi considerado 100% da armadura passando pelo pilar e no segundo modelo 50% da armadura passando pelo pilar e 50% nas laterais.

Um dos grandes problemas encontrados por Kataoka (2007) foi quanto ao comportamento da estrutura do modelo 1 que apresentou alto índice de fissuração principalmente na interface da ligação viga-pilar. Segundo a pesquisadora, a grande

fissuração apresentada no modelo 1 se deu ao fato da baixa aderência entre o graute e a bainha da armadura de continuidade no pilar, já que a bainha era lisa de acordo com os procedimentos da fábrica de pré-moldados.

Para o preenchimento da interface entre a viga e o pilar, o apoio da viga, o furo do chumbador e também a abertura do pilar por onde passa a armadura de continuidade, para a ancoragem das mesmas, Kataoka (2007) utilizou o mesmo graute industrial de Souza (2006).

A pesquisadora conclui que uma das razões se deve ao fato da bainha da armadura ser lisa e não corrugada, porém ela salienta sobre “a necessidade de se buscar um novo material que consiga combinar as qualidades de fluidez, preenchendo os nichos e bainhas, tenha uma boa aderência aço-graute e graute-concreto pré-moldado e que mantenha as propriedades de resistência e módulo de elasticidade semelhantes aos dos elementos pré-moldados de concreto, tendo um fck entre 40 e 50 MPa e Ec próximos a 30 GPa”.

Além disso, por se tratar de uma argamassa, seguindo as recomendações do fabricante, existe uma dificuldade de se preencher as interfaces viga-pilar com o graute, o que pode ser verificado na Figura 2.10 fornecida pela autora.

O objetivo de desenvolver uma calda de cimento é comparar sua utilização no comportamento da ligação usando o mesmo tipo de ensaio realizado por Kataoka (2007) onde foi utilizado o graute. Para tanto necessita-se buscar um material que possua as mesmas características do graute, mas que possua um comportamento de igual ou melhor na ligação viga-pilar, e que propicie evitar os inconvenientes que o graute acarreta. Essa preocupação de se buscar um material que permita atender as exigências da ligação viga-pilar faz com que se analise de forma mais detalhada seu comportamento quanto à retração, resistência mecânica à compressão axial, aderência, módulo de elasticidade e, sobretudo seu comportamento reológico.

Figura 2.10: Preenchimento da bainha e da interface viga-pilar com o uso do graute.

Fonte: Kataoka (2007)

III PROGRAMA EXPERIMENTAL

A suspensão, intitulada “Calda de Cimento”, definida como sendo uma mistura de água e cimento acrescida ou não de aditivo superplastificante, possui um comportamento de fluido não newtoniano (pseudoplástico), apresentando uma viscosidade que varia de acordo a com tensão aplicada e apresentado deformações significativas que são obtidas a partir de uma determinada tensão crítica.

Nesta pesquisa, as caldas de cimento foram fabricadas com os cimentos MC-20 RS e CP-V-ARI RS com adição de aditivos superplastificantes a base de naftaleno e policarboxilato, com e sem agitação constante da mistura na determinação do índice de fluidez, resultado em um total de doze misturas diferentes.

Duas metodologias foram utilizadas no preparo da calda de cimento, a saber: A primeira obedeceu a norma NBR 7685 (1983) e a segunda que busca reproduzir a calda que está sendo utilizada in situ, a qual foi feita para que se pudesse verificar o comportamento de suas propriedades reológicas bem como o seu índice de fluidez e vida útil.

A utilização dessas duas metodologias para a determinação do índice de fluidez teve como objetivo comparar o comportamento da calda de cimento in situ, onde ela foi mantida sob agitação constante durante a sua aplicação, com a calda de cimento determinada em laboratório seguindo a norma NBR 7685-1983, na qual a mesma fica sob-repouso entre os intervalos de leituras da fluidez.

Os ensaios de dosagens das caldas de cimento bem como os ensaios reométricos, de resistência à compressão, índice de fluidez, vida útil e água de exsudação foram realizados no Laboratório CESP de Engenharia Civil, sendo feito em um ambiente com controle da temperatura e dos materiais utilizados no preparo das mesmas. Os ensaios reométricos foram realizados utilizando o reômetro R/S Brookfield que controla tensão ou deformação, disponível no grupo de pesquisa

RMVP da UNESP. Para este tipo de suspensão, o modelo reológico de Herschel-Bulkley pareceu ser o melhor se adaptar.

Desse estudo buscou-se desenvolver caldas de cimento com propriedades próximas dos grautes comercialmente existentes no mercado e que pudessem ser facilmente manipuladas na obra, atentando para o fato de que estas caldas tivessem uma viscosidade maior, tendo em vista a dificuldade de poder realizar a estanqueidade da ligação para o preenchimento de elementos pré-moldados de concreto.

Kataoka (2007) estudou dois diferentes modelos de ligação entre elementos pré-moldados de concreto, cujas interfaces entre os elementos pré-moldados de concretos foram preenchidas com um graute industrial, as quais apresentaram alto índice de fissuração principalmente na interface da ligação viga-pilar para o modelo denominado de modelo 1. Diante dos problemas enfrentados por Kataoka (2007), a proposta de desenvolver um compósito cimentício que apresentasse características mecânicas similares aos grautes, levou ao desenvolvimento de duas caldas de cimento e uma argamassa, as quais foram submetidas juntamente com oitos dos grautes mais utilizados no mercado para os ensaios de caracterização.

Foram realizados ensaios que avaliaram o seu comportamento mecânico, como a resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade, comportamento de adesão e ensaios de arrancamento direto tipo “PULL-OUT TEST” para verificar o comportamento da aderência dos mesmos.

Inicialmente, testaram-se diferentes tipos de bainhas para preenchimento, a saber: bainha metálica corrugada, bainha plástica corrugada, bainha plástica lisa, com o intuito de verificar a melhor bainha a se utilizar para diminuir a perda de aderência.

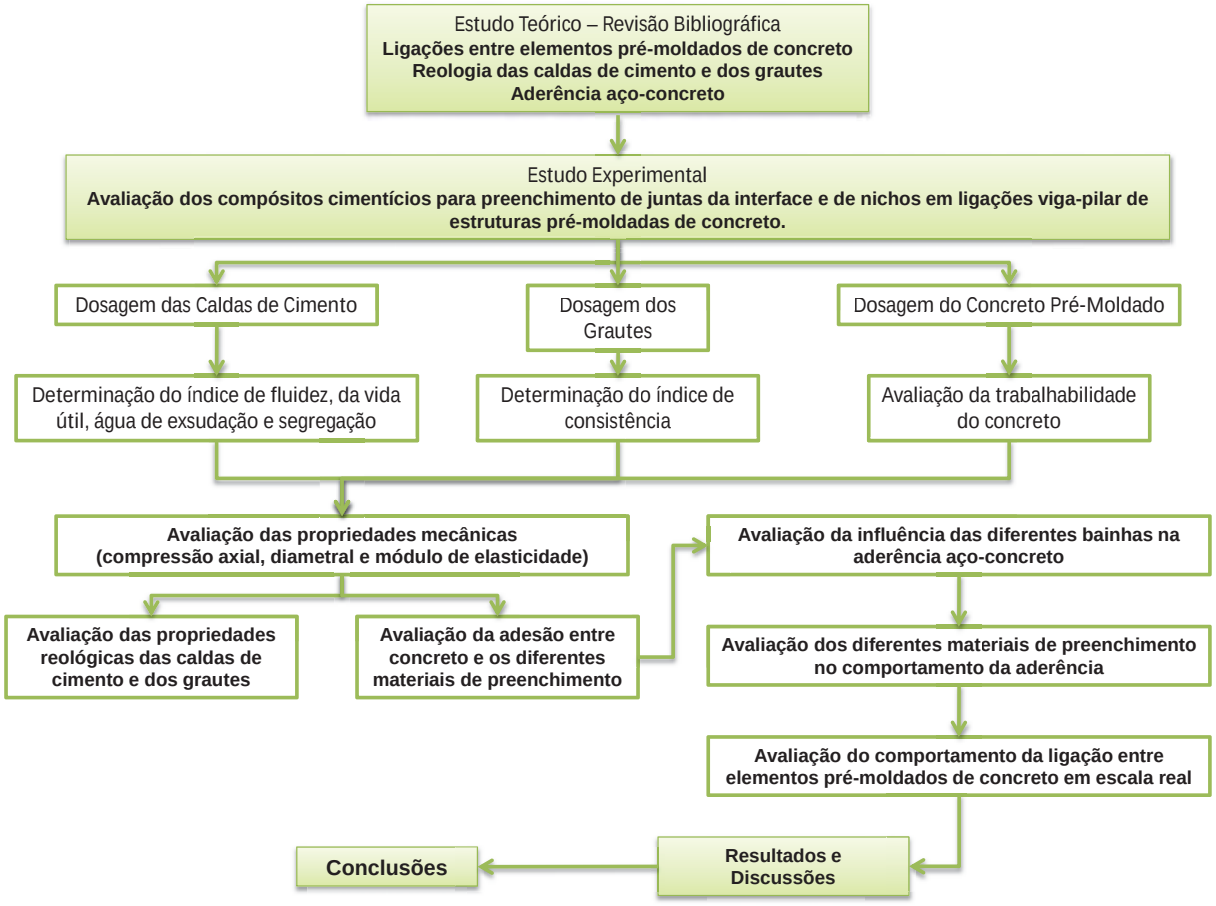
Definida a bainha que apresentou o melhor comportamento de aderência, realizaram-se ensaios de “PULL-OUT TEST” para os diferentes materiais de preenchimentos, as duas caldas de cimento, os dois grautes selecionados em função dos ensaios de adesão e a argamassa, verificando dessa forma, quais os melhores materiais de preenchimento.

Após comparar os resultados de aderência obtidos para os diferentes materiais estudados, escolheu-se um único tipo de graute e uma das caldas para a realização do ensaio em escala real de um modelo de ligação entre elementos pré-

moldados, a ser realizado no laboratório NETPRE localizado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) na cidade de São Carlos.

No organograma abaixo, Figura 3.1, apresentamos as fases do programa experimental desenvolvido para esta pesquisa.

Figura 3.1: Esquema da metodologia experimental utilizada.



Fonte: Produção do próprio autor

A seguir são descritas cada uma das diversas fases do programa experimental desenvolvido.

3.1. CARACTERIZAÇAO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados e suas caracterizações, quer seja na confecção do concreto, calda de cimento, ensaios de adesão e ensaios de aderência são descritos e especificados a seguir.

3.1.1 Cimentos

As análises físico-químicas dos cimentos CP-V-ARI RS e CP-V-ARI PLUS foram feitas de acordo com a recomendação da norma brasileira NBR, ou seja: Determinação da finura através de peneiramento NBR 12826 (1993) e NBR 11579 (1991); Determinação da finura – Método de Blaine NBR NM-76 (1998); Massa específica NBR NM-23 (2001); Perda ao fogo NBR NM-18 (2004); Análise química NBR NM-21 (2004); Resistência à compressão do cimento NBR 7215 (1996). A Tabela 3.1 fornece os resultados dos ensaios de caracterização, todos eles realizados no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em Ilha Solteira – SP.

O cimento CP-V-ARI PLUS foi utilizado para a confecção do concreto pré-moldado e, o cimento CP-V-ARI RS foi utilizado para o preparo da calda de cimento. Os dois cimentos utilizados no preparo da calda de cimento e do concreto possuem valores de seus componentes químicos que pouco se diferem um do outro, nota-se que a superfície específica Blaine é um parâmetro que possui uma diferença de valores na ordem de 17%. A resistência à compressão axial dos cimentos inicialmente possuem pequenas diferenças, tendo o CP-V-ARI RS apresentados valores inferiores para as idades de 3 e 7 dias, entretanto aos 28 dias há igualdade de resistência.

Tabela 3.1: Análise físico-química do cimento CP-V-ARI RS, CP-V-ARI PLUS, MC-20 RS. Realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP.

Tipos de Cimentos		CP-V-ARI RS	CP-V-ARI PLUS	MC-20 RS
Finura Peneira 200 (% retida)		0,37	0,32	0,21
Finura Peneira 325 (% retida)		1,67	1,30	0,91
Superf. espec. Blaine (cm²/g)		4768	4072	7004
Densidade aparente (g/cm³)		0,90	0,94	0,84
Densidade absoluta (g/cm³)		3,05	3,12	3,17
Análise Química (%)	***Perda ao fogo***	2,84	3,24	1,70
	Insolúveis	0,61	0,26	1,70
	SiO_2	22,57	18,82	26,60
	Fe_2O_3	2,17	2,86	1,72
	Al_2O_3	6,81	5,43	9,51
	CaO	59,85	64,25	53,07
	MgO	1,91	0,89	3,15
	SO_3	2,05	2,75	3,00
	Na_2O	0,20	0,11	0,23
	K_2O	0,77	0,77	0,53
	Equiv alcalino Na_2O	0,71	0,62	0,58
	Cal livre em CaO	1,41	1,46	1,43
Resistência a compressão axial (MPa)	***3 dias***	37,2	45,4	36,3
	7 dias	47,6	50,6	44,5
	28 dias	52,2	52,3	55,9

Fonte: Produção do próprio autor

3.1.2 Caracterização dos Agregados

3.1.2.1 Agregados Miúdos

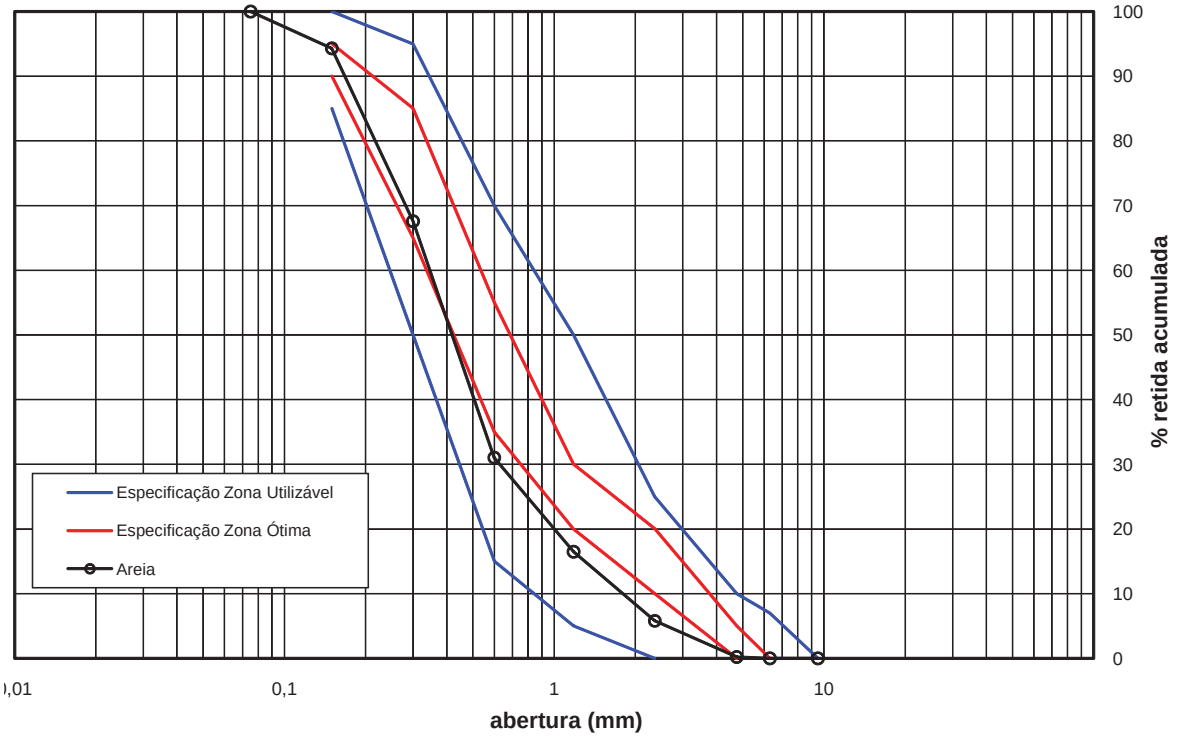
Para a determinação do traço experimental do concreto pré-moldado utilizou-se dois agregados miúdos, uma areia média e uma areia fina, para que se pudesse reproduzir o concreto utilizado pela empresa de pré-moldados de concreto. Buscou-se adaptar o traço de concreto com as mesmas características dos modelos em escala real.

A areia média tem como procedência o Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida localizado na cidade de Três Lagoas – MS, cuja curva granulométrica exposta pela Figura 3.2 a seguir foi desenvolvida no LCEC obedecendo as

especificações ou recomendações da norma brasileira a NBR NM-248 (2003), a massa específica na condição saturada superfície seca (S.S.S.) NBR NM-52 e ensaio de absorção NBR NM-30 (2001), materiais pulverulentos NBR 7218 (1987) e matéria orgânica NBR NM-49 (2001).

Figura 3.2: Resultado da caracterização da areia média. Realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	94,3	67,6	31,0	16,5	5,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



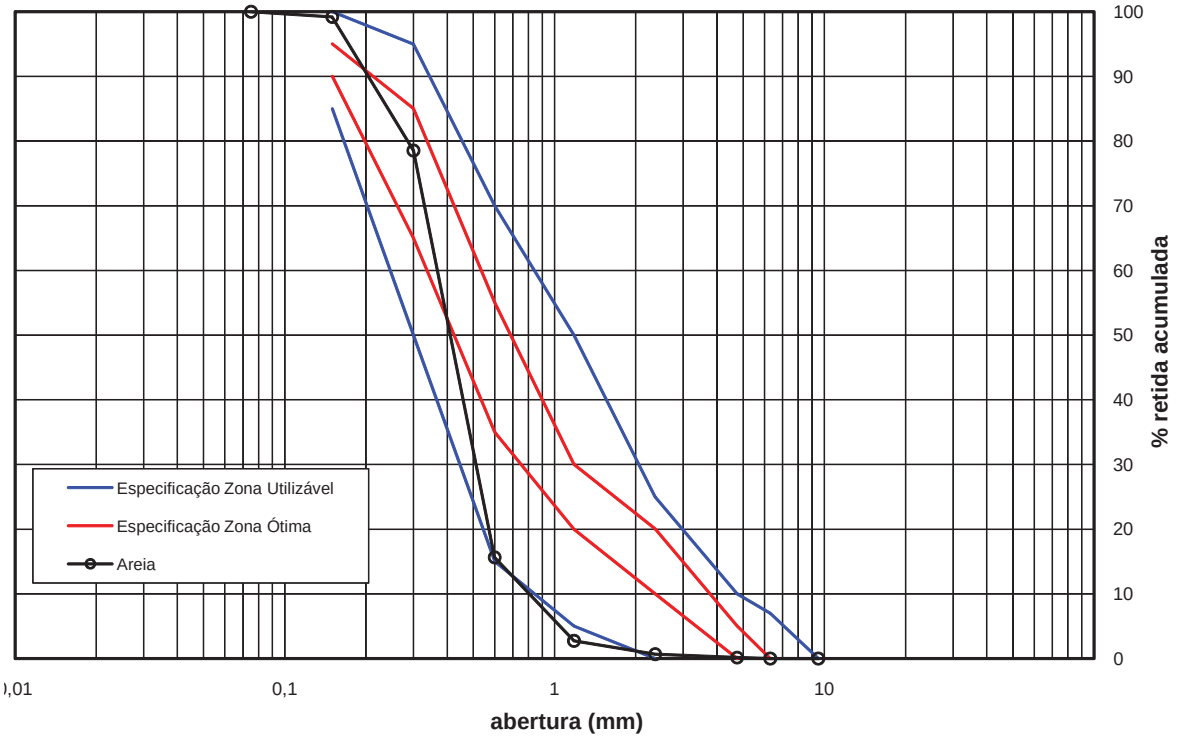
ϕ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absor-ção (%)	pulve-rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
4,75	2,15	2,615	2,624	2,610	1,580	1,150	0,20	0,21	+clara

Fonte: Produção do próprio autor

A areia fina utilizada na pesquisa foi cedida pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil. O agregado foi utilizado para a construção da UHE Estreito - MA, com os resultados da caracterização sendo ilustrados pela Figura 3.3 a seguir, ensaiada pelo mesmo laboratório.

Figura 3.3: Resultado da caracterização da areia fina. Ensaios realizados no LCEC-Ilha Solteira-SP

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	99,2	78,6	15,6	2,8	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



ϕ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absor-ção (%)	pulve-rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
1,18	1,97	2,615	2,622	2,610	1,540	1,226	0,18	0,10	+clara

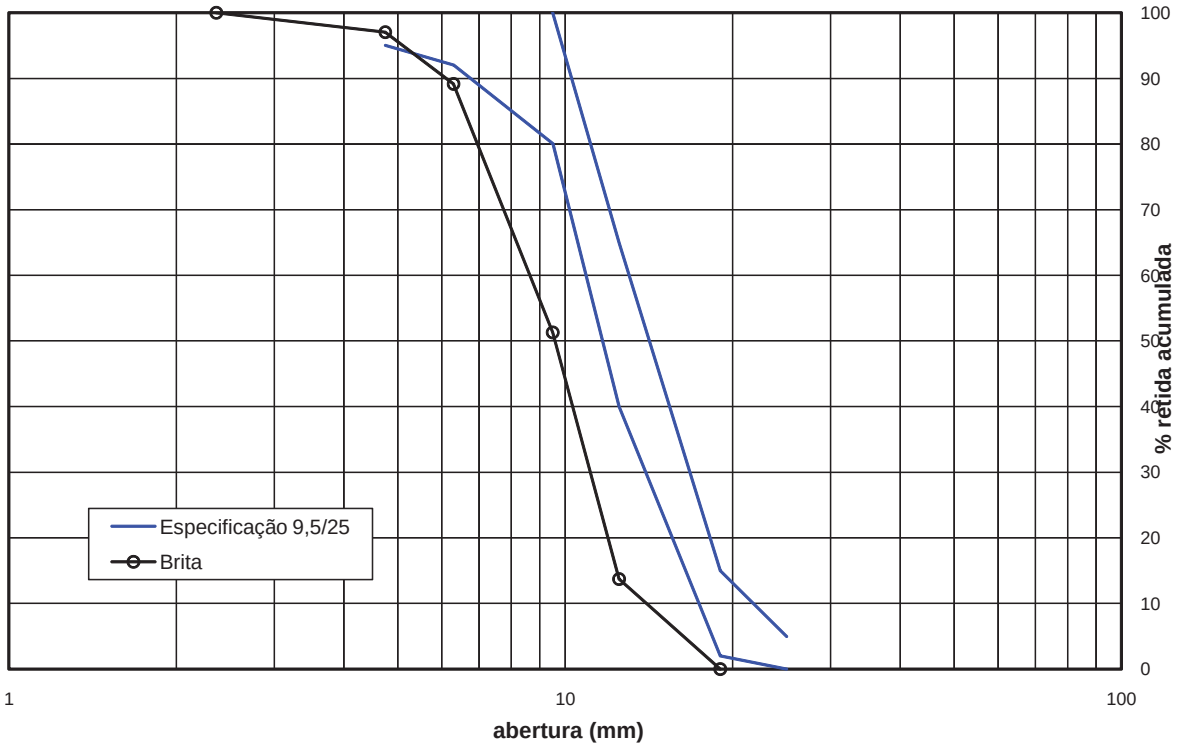
Fonte: Produção do próprio autor

3.1.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto tem como procedência a pedreira localizada na cidade de Icém – SP. A Figura 3.4 a seguir, mostra os detalhes da caracterização da brita 19 mm. Esta caracterização, realizada no LCEC em Ilha Solteira-SP, cuja análise granulométrica teve como base a NBR NM-248 (2003), a massa específica na condição saturada superfície seca (S.S.S.) e ensaio de absorção NBR NM–53 (2003) e o ensaio de materiais pulverulentos NBR 7218 (1987).

Figura 3.4: Resultado da caracterização da brita de 19 mm. Ensaio realizado no LCEC-Ilha Solteira-SP.

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,0	89,2	51,3	13,7	0,0	0,0	0,0



ϕ máximo (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária (g/cm³)	absor-ção (%)	pulve-rulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)			
19,0	6,48	2,900	2,872	2,902	1,567	0,95	0,99

Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que pela referência da NBR NM-248 (2003), a brita utilizada teria como classificação um diâmetro máximo de 19 mm, porém como podemos observar pela curva granulométrica, há uma grande quantidade de britas com diâmetros baixos, o que faz com que a curva se desloque para a esquerda. Como a NBR NM-248 (2003) não referencia a brita de 16 mm, temos apenas 12,5 mm ou 19 mm, esta brita fica sendo classificada como 19 mm.

3.1.3 Caracterização da Barra de Aço

Para a realização dos ensaios de “PULL-OUT TEST” foram utilizadas barras de aço doadas pela empresa ArcelorMittal Brasil localizada na cidade de Piracicaba

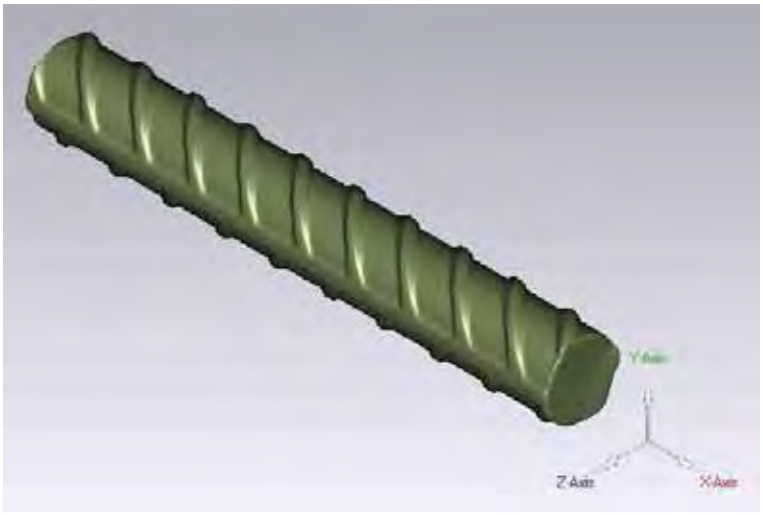
– SP. O Aço utilizado é o CA-50, tendo a barra 16 mm de diâmetro, peso por metro linear de 1,596 kg/m.

Os ensaios mecânicos obtiveram os seguintes resultados, a saber: tensão de escoamento de 580,0 MPa e tensão de ruptura de 747 MPa, tendo a ruptura localizada no meio da barra e com um dobramento correto. Todos os ensaios de caracterização mecânica das armaduras foram realizados no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) e obedeceram a NBR 7480 (1996).

Para avaliação das características geométricas das armaduras, fator de grande importância na aderência aço-concreto, foram realizados junto ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS, ensaios caracterização da geometria usando à técnica de redimensionamento em três dimensões elaborada com ajuda de um *scanner* tridimensional a lazer.

Posteriormente utilizou-se do software Geomagic Studio 10 para realizar o tratamento e os cortes, conforme ilustra a Figura 3.5. Foram feitas medições das alturas das nervuras, das distâncias entre nervuras e dos respectivos ângulos de inclinação e da área da face das nervuras em questão, utilizando o software AutoCAD.

Figura 3.5: Tratamento posterior ao escaneamento no software Geomagic Studio 10.

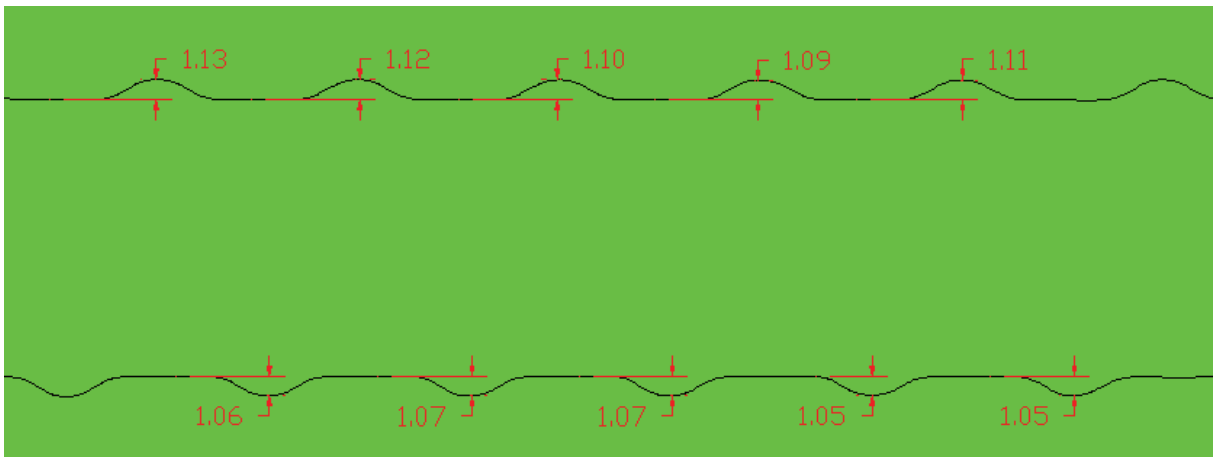


Fonte: Produção do próprio autor

As Figuras 3.6 a 3.9 ilustram os cortes realizados para a obtenção das alturas das nervuras, distancia entre nervuras, ângulo de inclinação e área da nervura, respectivamente. Dessa forma, constatou-se que a barra de aço ensaiada

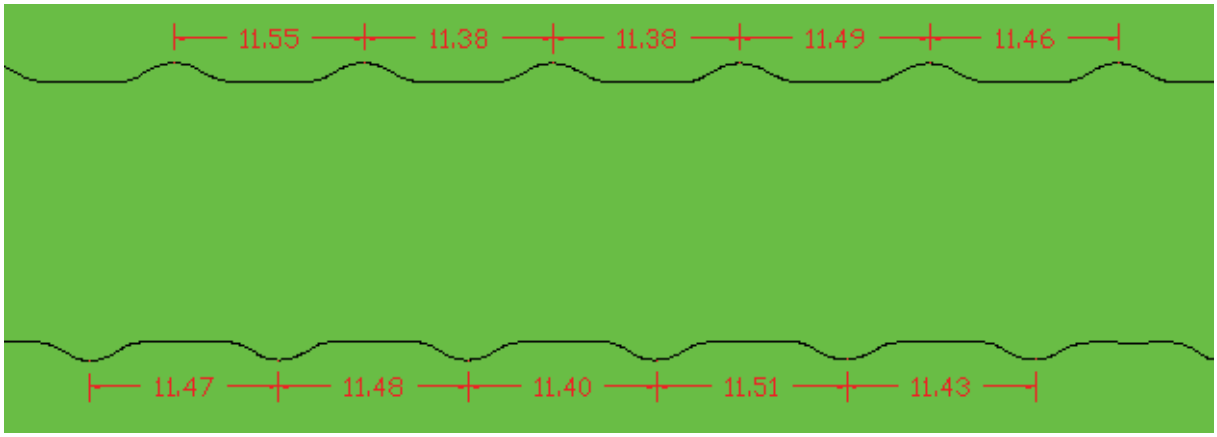
apresentou uma altura de nervura média de 1,08 mm, distancia média entre nervuras de 11,45 mm, inclinação média da nervura de 55,86º, área da nervura real de 82,78 mm^2 e área da nervura projetada de 41,44 mm^2.

Figura 3.6: Altura das nervuras.



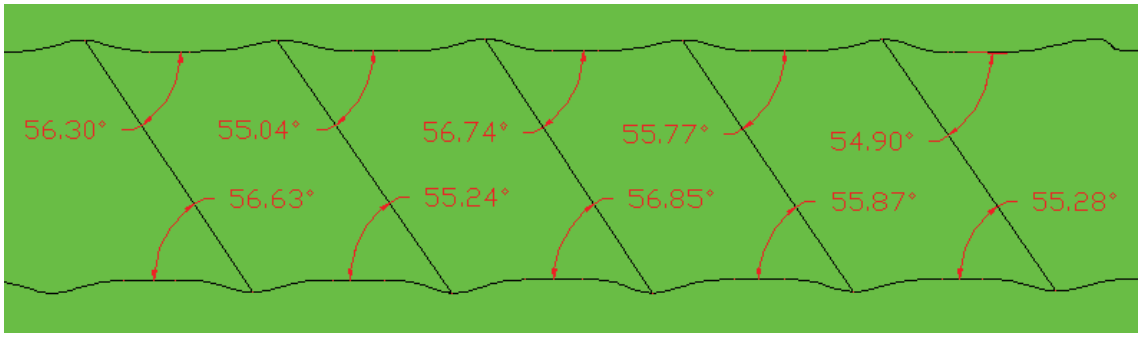
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3.7: Distância entre nervuras



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3.8: Ângulo de inclinação das nervuras.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3.9: Corte da área de uma nervura.

Fonte: Produção do próprio autor

3.1.4 Bainhas

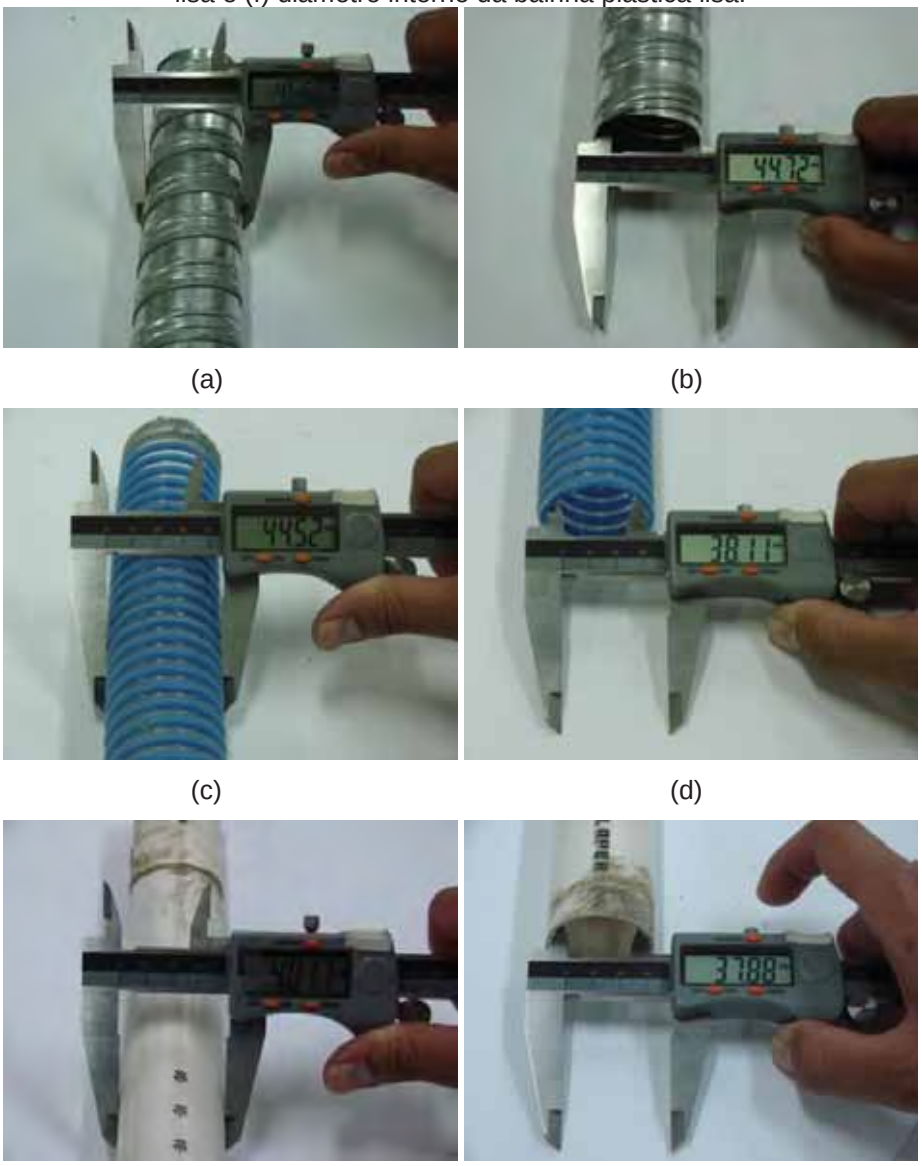
Para a realização dos ensaios de aderência, foram utilizados três tipos de bainhas, a saber: bainha metálica corrugada, bainha plástica corrugada e bainha plástica lisa, as quais podem ser apreciadas na Figura 3.10.

A bainha metálica, Figura 3.10(a) e (b), foi obtida por meio de doação do Laboratório CESP de Engenharia Civil, tendo como diâmetro interno de 44,72 mm e externo de 46,65 mm.

A bainha corrugada plástica utilizada, Figura 3.10 (c) e (d), foi comprada em lojas de artigos para piscinas, cujo diâmetro externo é de 44,52 mm e o diâmetro interno de 38,11 mm.

Para a bainha plástica lisa, Figura 3.10(e) e (f), utilizou-se tubo de PVC com 40,17 mm de diâmetro externo e 37,88 mm de diâmetro interno.

Figura 3.10: Caracterização das bainhas utilizadas nos ensaios de aderência. (a) diâmetro externo da bainha metálica, (b) diâmetro interno da bainha metálica, (c) diâmetro externo da bainha plástica corrugada, (d) diâmetro interno da bainha plástica corrugada, (e) diâmetro externo da bainha plástica lisa e (f) diâmetro interno da bainha plástica lisa.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Fonte: Produção do próprio autor

3.2. CALDA DE CIMENTO

O programa experimental para a elaboração da calda de cimento, compreendeu em ensaios onde foi usada a metodologia padronizada pela ABNT, segundo as especificações da NBR 7681 (1983) no que se refere à calda de injeção e um estudo reometrico do seu comportamento, conforme especificado anteriormente.

Na primeira etapa de caracterização das caldas de cimento foram utilizados diferentes cimentos e aditivos superplastificantes, a saber:

Os dois cimentos utilizados no preparo da calda de cimento, cimento MC 20 RS e o cimento CP-V-ARI RS, que possuem valores de seus componentes químicos um pouco diferentes um do outro, não tendo porém, valores que sejam discrepantes um do outro. A principal diferença está na relação à sua superfície específica Blaine, que no cimento MC 20 RS é 7004 cm^3/g enquanto que, para o cimento CP-V-ARI RS é de 4768cm^3/g.

Com relação aos aditivos superplastificantes empregados no preparo da calda a sua diferença está em relação à base química de cada um onde, o aditivo 1 e o aditivo 3 são à base de policarboxilatos enquanto que o aditivo superplastificante 2 possui uma base química de naftaleno.

O aditivo 1 apresenta sua composição básica numa solução de policarboxilatos em meio aquoso com um pH que varia entre 3,5 a 5,5 e de densidade de 1,04 a 1,08kg/l à 25ºC. O aditivo 3 possui também uma base química de policarboxilatos porém, com um pH variando entre 5 e 7 e densidade de 1,067 a 1,107g/cm3 à 25ºC. Já o aditivo 2 possui como composição básica sais sulfonados em meio aquoso, com pH entre 7 e 9 e densidade variando entre 1,18 a 1,22kg/l à 25ºC.

Utilizou-se água com temperatura controlada de 4,5ºC a 5,0ºC, a qual é colocada juntamente o aditivo superplastificante em batedeira própria para caldas, como mostra a Figura 3.11(a), ficando a mistura sobre agitação durante o tempo que era especificado por norma (Figura 3.11(b)). O cimento é incorporado aos poucos e, à medida que o mesmo é adicionado, aumenta-se à velocidade de rotação das hélices da batedeira de forma a manter a mistura sempre agitada.

Figura 3.11: Batedeira utilizada no preparo da calda de cimento. (a) Batedeira de calda montada para o ensaio e (b) Detalhe da haste misturadora.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Após a colocação de todo o cimento o recipiente é tampado e a calda é misturada com uma velocidade constante de 1250 rpm por um período de 4 minutos. A Figura 3.11 ilustra a batedeira da calda.

Ao término da mistura é feita a leitura inicial do índice de fluidez de acordo com a NBR 7682 (1983) conforme ilustra a Figura 3.12. Parte da calda é retirada para se fazer o ensaio de exsudação (600 ml de calda) e o restante da mistura é colocada em descanso para as leituras de vida útil realizadas de 30 em 30 minutos a partir da leitura inicial. Um minuto antes da determinação do índice de fluidez a calda é misturada manualmente e depois inserida no funil de Marsh.

Figura 3.12: Cone de Marsh sendo preenchido com a calda de cimento.

Fonte: Produção do próprio autor

O segundo procedimento aplicado, com o intuito de tentar reproduzir a aplicação da calda nos canteiros de obra, diferenciou na determinação da vida útil, onde a mistura foi mantida sobre uma agitação constante, cuja velocidade foi de 500 rpm. Foram avaliadas um total de 12 tipos de caldas de cimento, sendo 6 caldas utilizando a metodologia da NBR 7685 (1983) para a determinação da vida útil e outras 6 caldas mantidas sob agitação constante nos intervalos de leituras dos índices de fluidez.

A determinação da vida útil foi feita segundo a norma NBR 7685 (1983). Para a execução do ensaio de exsudação foi obedecida a determinação da norma NBR 7683 (1983) enquanto a resistência à compressão obedeceu a norma NBR 7684 (1983), tendo sido moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm para as rupturas de 3 e 7 dias conforme a Figura 3.13.

Figura 3.13: Corpos-de-prova cilíndricos para ensaios de compressão.

Fonte: Produção do próprio autor

3.3. ENSAIOS REOMÉTRICOS

Nos ensaios reométricos a calda também foi agitada antes de se iniciar os testes. A agitação foi feita pelo próprio reômetro com uma rotação de 130 rpm, ou uma tensão de 50 Pa, por um tempo de 60 segundos, em seguida a calda foi deixada em repouso por 10 segundos. A partir desse descanso, deu-se início aos ensaios de reologia com o controle de tensão aplicada medindo dessa forma a taxa de deformação da calda para a respectiva tensão.

Dessa forma, houve uma preocupação para estudar o comportamento da calda de cimento durante o seu preparo e execução na obra, já que a mesma permanece sob a agitação constante durante o processo de injeção o que pode

influenciar em suas propriedades, tendo assim um comportamento diferente da mesma calda estudada em laboratório.

Na segunda etapa da pesquisa, buscando obter a calda de cimento para o preenchimento dos nichos verticais e horizontais das ligações entre elementos pré-moldados de concreto foram utilizados os seguintes materiais para a confecção da calda de cimento foram: aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos de duas diferentes empresas; o cimento foi o CP-V-ARI RS.

Em relação aos dois tipos aditivos superplastificantes empregados no preparo das caldas a diferença está em relação à empresa fabricante, uma vez que ambos possuem a mesma base química, à base de policarboxilatos porém com diferentes indices de PH e de densidade, conforme citado anteriormente.

A água foi utilizada na temperatura ambiente entre 21,0ºC a 24,0ºC com o intuito de aumentar sua viscosidade já que a temperatura dos materiais influencia na viscosidade da calda de cimento. O procedimento de mistura da calda de cimento seguiu o mesmo procedimento da primeira etapa de pesquisa.

Foram realizados ensaios de determinação do índice de fluidez, vida útil da calda, índice de exsudação, resistência à compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e retração por secagem.

3.4. COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUTES

Foram inicialmente selecionados e estudados oito diferentes tipos de grautes, fornecidos por quatro diferentes empresas. Cada empresa forneceu duas amostras distintas de grautes, que foram submetidas aos testes iniciais de resistência à compressões axial e diametral, módulo de elasticidade, flow test e retração por secagem, todos obedecendo à normalização da ABNT. A quantidade de água de amassamento utilizada na preparação dos grautes foi à máxima permitida pelos fabricantes. A Tabela 3.2 a seguir mostra os valores de resistência à compressão e quantidade de água sugerida pelo fabricante por saco de graute (25kg).

A escolha por se utilizar a máxima quantidade de água sugerida pelo fabricante teve sua razão baseada no problema enfrentado e relatado por Kataoka (2007) relacionado à trabalhabilidade dos grautes. A pesquisadora encontrou sérias dificuldades para a realização da solidarização da ligação dos elementos pré-

moldados ensaiados, devido à baixa fluidez apresentada pelo graute no momento de sua aplicação.

Tabela 3.2: Valores de resistência à compressão e quantidade de água fornecida pelos fabricantes.

	Resistência à Compressão Axial (MPa)							
	Empresas							
	C	*C*	*B*	*B*	*D*	*D*	*A*	*A*
Idade (dias)	Graute 1	Graute 2	Graute 3	Graute 4	Graute 5	Graute 6	Graute 7	Graute 8
3	-	-	40,0	-	-	-	-	34,0
7	-	-	50,0	55,0	45,0	45,0	20,0	48,0
28	70,0	60,0	60,0	60,0	60,0	55,0	40,0	62,0
Quantidade de água sugerida (litros/saco 25 kg)	2,0 a 3,0	2,3 a 3,8	3,5	3,25	3,75 a 4,0	2,5 a 3,0	3,0	4,2 a 5,0

Fonte: Produção do próprio autor

3.5. ENSAIOS REALIZADOS

3.5.1 Ensaios das Propriedades Mecânicas

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e modulo de elasticidades, segundo as NBR 5739 (2007) e NBR 8522 (1984) respectivamente, tanto para a calda de cimento como para os grautes e a argamassa. O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado com o objetivo de verificar se os módulos de elasticidade dos materiais de preenchimento estão próximos do concreto pré-moldado.

Para os ensaios de resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm com rupturas previstas nas idades de 3 e 7 dias.

Os ensaios do Módulo de Elasticidade dos materiais estudados foram realizados na prensa hidráulica modelo PC 2001 da EMIC, disponibilizada tanto no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) quanto no laboratório de Engenharia Civil da FEIS/UNESP. A utilização do módulo de elasticidade do concreto é de extrema validade em obras de construção civil, pois representa um fator de proporção que possibilita estimar as deformações a partir do conjunto de tensões aplicadas, assim como determinar as tensões atuantes a partir dos dados de deslocamentos permissíveis da estrutura.

3.5.2 Ensaio de Adesão

Os ensaios de adesão das caldas e grautes com o concreto pré-moldado foram realizados para verificar o comportamento e a eficiência de adesão do

material ao substrato já existente. Esse ensaio não é normalizado pela ABNT, mas foi desenvolvido e amplamente utilizado pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil, durante a construção de suas usinas hidrelétricas. Sua intenção é avaliar a eficiência da adesão de produtos e argamassas de reparo ao substrato. Trata-se de um ensaio de ruptura à tração por flexão em vigas prismáticas de 100x100x360 mm, conforme mostram as Figuras 3.14(a) e 3.14(b).

No terço médio da viga prismática é deixada uma cavidade que é preenchida com o material a ser avaliado, simulando condição de reparo e adesão de materiais distintos. Antes de ser feito o preenchimento da cavidade é feito um tratamento na superfície (Figura 3.15 (a)), tendo sido utilizado uma escova de aço para lixar a superfície logo após a desmoldagem das vigas (Figuras 3.15(b) e 3.15(c)), e posteriormente, no dia do preenchimento eram feitos ranhuras na cavidade utilizando uma maquita (Figura 3.15 (d)), como ilustra as Figuras 3.15.

As vigas são bi-apoiadas e sofrem carregamento no terço central, sendo submetidas a um ensaio de ruptura por flexão, forçando o desprendimento do material analisado da peça de concreto.

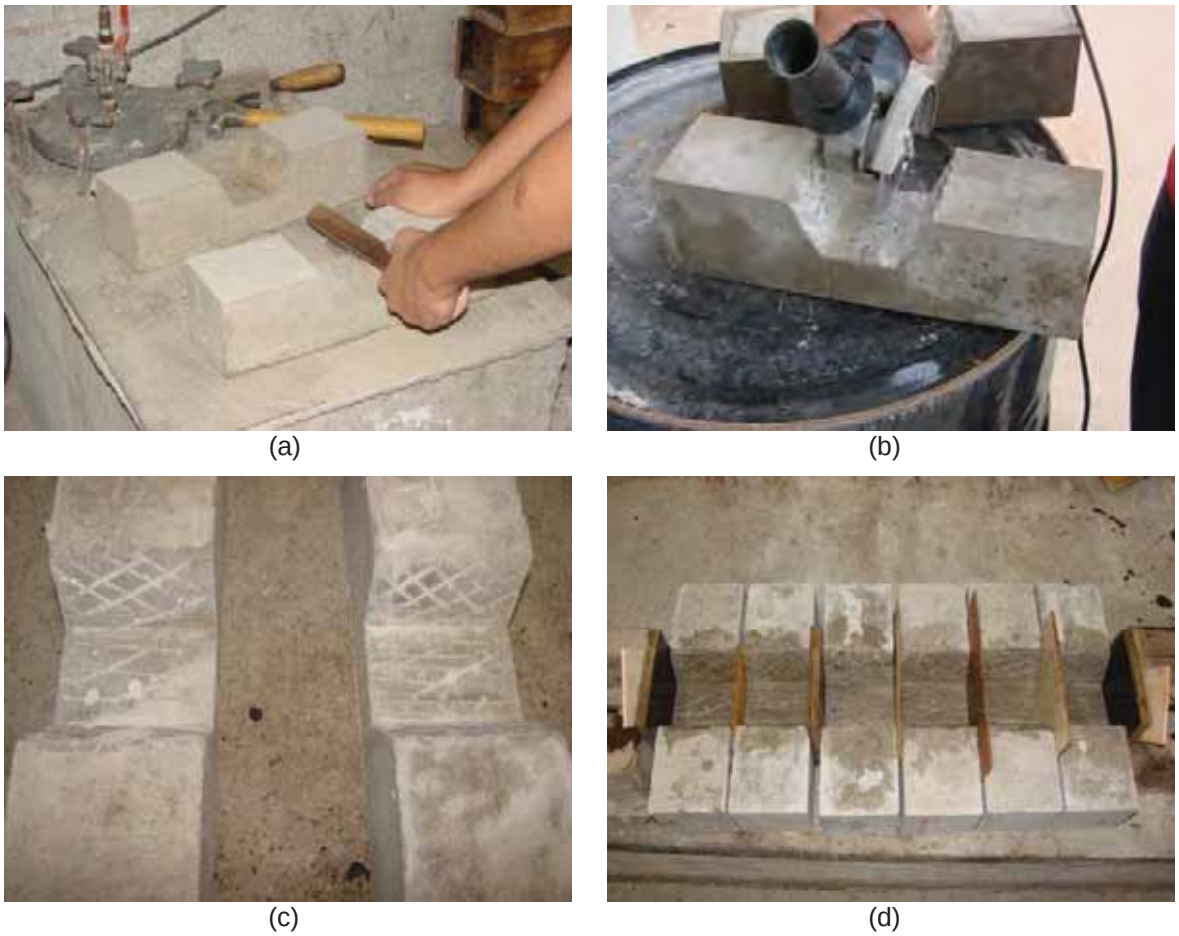
O ensaio de flexão foi realizado com 10 e 14 dias de idade do concreto, sendo que o preenchimento das cavidades foi feito com a idade de 7 dias do concreto. Dessa forma, os materiais de preenchimento ensaiados à flexão estavam com idades de ruptura de 3 e 7 dias, curados na câmara úmida.

Figura 3.14: Viga prismática de concreto com cavidade preenchida por material de reparo. Ensaio de flexão da viga.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3.15: Cavidade sendo tratada para receber o material de preenchimento.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

3.5.3 Ensaios de Retração por secagem

A retração da calda de cimento pode ser determinada através dos ensaios de retração por secagem em materiais pozolânicos. Os ensaios podem ser realizados tanto para o graute como para a calda, utilizando o método das barras prismáticas com seção quadrada de 25 mm de lado e 285 mm de comprimento, seguindo as normas NBR 12650 (1992) e NBR 12651 (1992). A Figura 3.16 ilustra o ensaio de retração por secagem.

As barras prismáticas foram colocadas na cura inicial em câmara úmida submersos em um tanque de água saturada com cal por 7 dias. Ao final do período de cura úmida, é feita a leitura inicial das barras e posteriormente os corpos de prova são armazenados em câmara seca por 28 dias. Decorrido os 28 dias de cura é feita a leitura final.

$$VR_s = R_{se} - R_{sc} \quad (3.1)$$

Sendo:

$$R_{se} = \frac{L_{ie} - L_{fe}}{L_{ie}} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$R_{sc} = \frac{L_{ie} - L_{fe}}{L_{ie}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Onde:

VR_s = variação da retração por secagem das barras (%);

R_{se} = retração média por secagem das barras da mistura “ensaio” (%);

R_{sc} = retração média por secagem das barras da mistura “controle” (%);

L_{ie} = comprimento médio inicial das barras ao final da cura úmida;

L_{fe} = comprimento médio final das barras ao final da cura seca.

Figura 3.16: Ensaios de retração em materiais pozolânicos em andamento no LCEC.

Fonte: Produção do próprio autor

3.5.4 Ensaios Reológicos

Os ensaios reométricos foram todos eles realizados no Laboratório de Reologia e Reometria disponível no Departamento de Engenharia Civil da UNESP-Ilha Solteira. Na análise reológica foi utilizado o reômetro R/S Rheometer, fabricado pela “Brookfield Engineering Laboratories” de cilindros coaxiais que controla tensão ou deformação, ilustrado na Figura 3.17 a seguir.

Figura 3.17: Reômetro R/S de cilindros coaxiais com o banho térmico.

Fonte: Produção do próprio autor

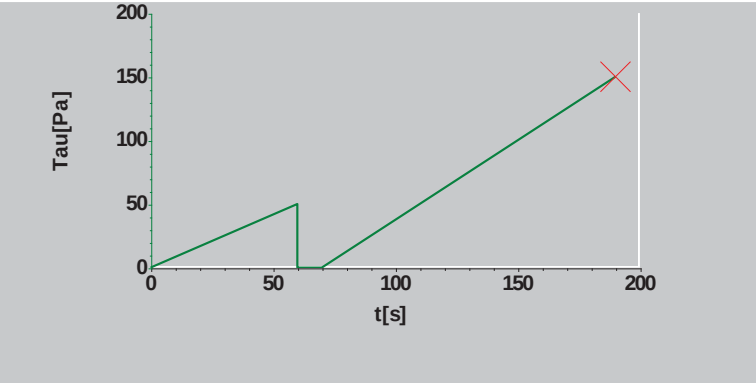
Para a determinação das propriedades reológicas das caldas de cimento utilizou-se do spindle CC 45, sistema de cilindros coaxiais, entretanto para os grautes utilizou-se o Vane 40-20, sistema de haletas, conforme a Figura 3.18 a seguir. O uso de diferentes spindles para a determinação das propriedades reológicas se deve aos tipos de fluidos ensaiados, no qual o graute possui agregados miúdos em sua composição, o que poderia danificar o spindle do tipo CC45 e também gerar dados incorretos.

Figura 3.18: Detalhe dos spindles do tipo Vane e CC45.

Fonte: Produção do próprio autor

O procedimento de determinação dos parâmetros reológicos das caldas de cimento foram adotados os seguintes procedimentos: utilizando o spindle CC45 com faixa de variação da taxa de deformação de 0 a 1032 s^{-1}, foi ensaiado um volume de 100 ml de calda o qual foi colocado no copo do spindle, dando em seguida, início os ensaios reométricos com o auxílio do software do próprio reômetro. O procedimento de leitura do software foi feito inicialmente para a calda com o aditivo. Agitou-se a calda com o próprio reômetro por um período de 60 segundos numa rotação de 130 rpm ou tensão de 50 Pa. Depois a calda é colocada em repouso por 10 segundos e posteriormente deu-se início aos ensaios de reologia com o controle da tensão aplicada medindo dessa forma a taxa de deformação da calda a respectiva tensão. A tensão máxima aplicada foi de 150 Pa por um período de 120 segundos sendo feitas 120 leituras, como mostra a Figura 3.19 a seguir.

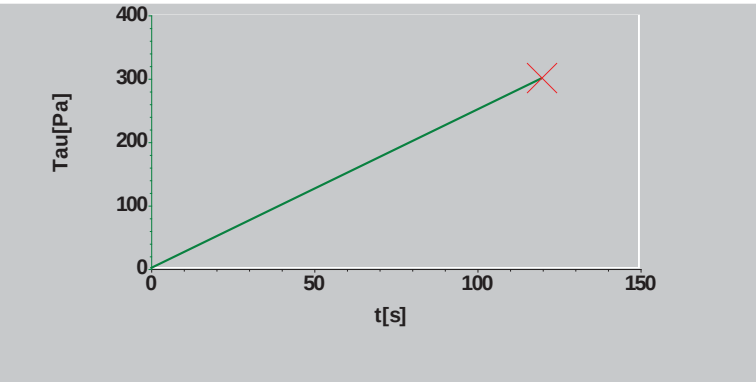
Figura 3.19: Block-editor do ensaio reológico das caldas de cimento.



Fonte: Produção do próprio autor

A determinação dos parâmetros reológicos dos grautes foram feitos da seguinte forma: utilizando o Vane 40-20, cuja faixa de variação da taxa de deformação foi de 0 a 235,5 s^{-1}, um volume de graute, pré-determinado pelo fabricante, é colocado no copo do spindle dando inicio os ensaios reométricos com o auxílio do software do próprio reômetro que teve a tensão controlada. A tensão máxima aplicada foi de 300 Pa, para um período de 120 segundos sendo feita 120 leituras, conforme mostra a Figura 3.20 a seguir.

Figura 3.20: Block-editor do ensaio reológico dos grautes.



Fonte: Produção do próprio autor

3.5.5 Ensaio de Aderência “PULL-OUT TEST”

Os ensaios de “PULL-OUT TEST” foram realizados em duas etapas, a saber: primeiramente estudou-se o comportamento da aderência para as diferentes bainhas utilizadas descritas anteriormente no item 3.1.4, tendo sido preenchidas as bainhas com um graute, escolhido devido ao seu desempenho nos ensaios de

adesão. Dessa forma, avaliou-se o desempenho das diferentes bainhas comparando seus desempenhos entre si e, determinando a partir dos resultados obtidos qual o melhor tipo de bainha a ser usada.

Posteriormente à escolha da bainha, deu-se inicio à segunda etapa dos ensaios de “PULL-OUT TEST”, para o preenchimento da bainha foram utilizadas as duas caldas e os dois grautes escolhidos em função dos resultados obtidos por meio dos ensaios de adesão.

3.5.5.1 Ensaio de Aderência “PULL-OUT TEST” para as diferentes bainhas estudadas

Para a confecção das formas foi obedecida a norma da RILEM/CEB RC 6 (1983). Sendo que, para a utilização de barras de aço com diâmetro nominal igual ou inferior a 20 mm, a seção transversal dos moldes deve ser de 200 mm e de 10xΦ, para barras com diâmetro superiores a 20 mm.

A Figura 3.21(a), ilustra a forma com uma aresta de 200 mm e no centro da face uma abertura com diâmetro de 50 mm (Figura 3.21 (b)) para que se pudesse transpassar a bainha utilizada nos ensaios.

Figura 3.21: Detalhe da forma com o furo para o transpasse da bainha.

(a)

(b)

Fonte: Produção do próprio autor

Para a concretagem dos blocos de concreto, inicialmente foram colocadas as bainhas, de maneira que ficassem centralizadas dentro do furo, vedando a junta entre a forma e a bainha com massa para calafetar (Figura 3.22(a)). Posteriormente,

as formas foram devidamente lubrificadas e utilizou-se uma mesa vibratória para o adensamento do concreto, conforme a Figura 3.22 (a) e (b).

Figura 3.22: Detalhe da moldagem dos blocos de concreto.

(a)

(b)

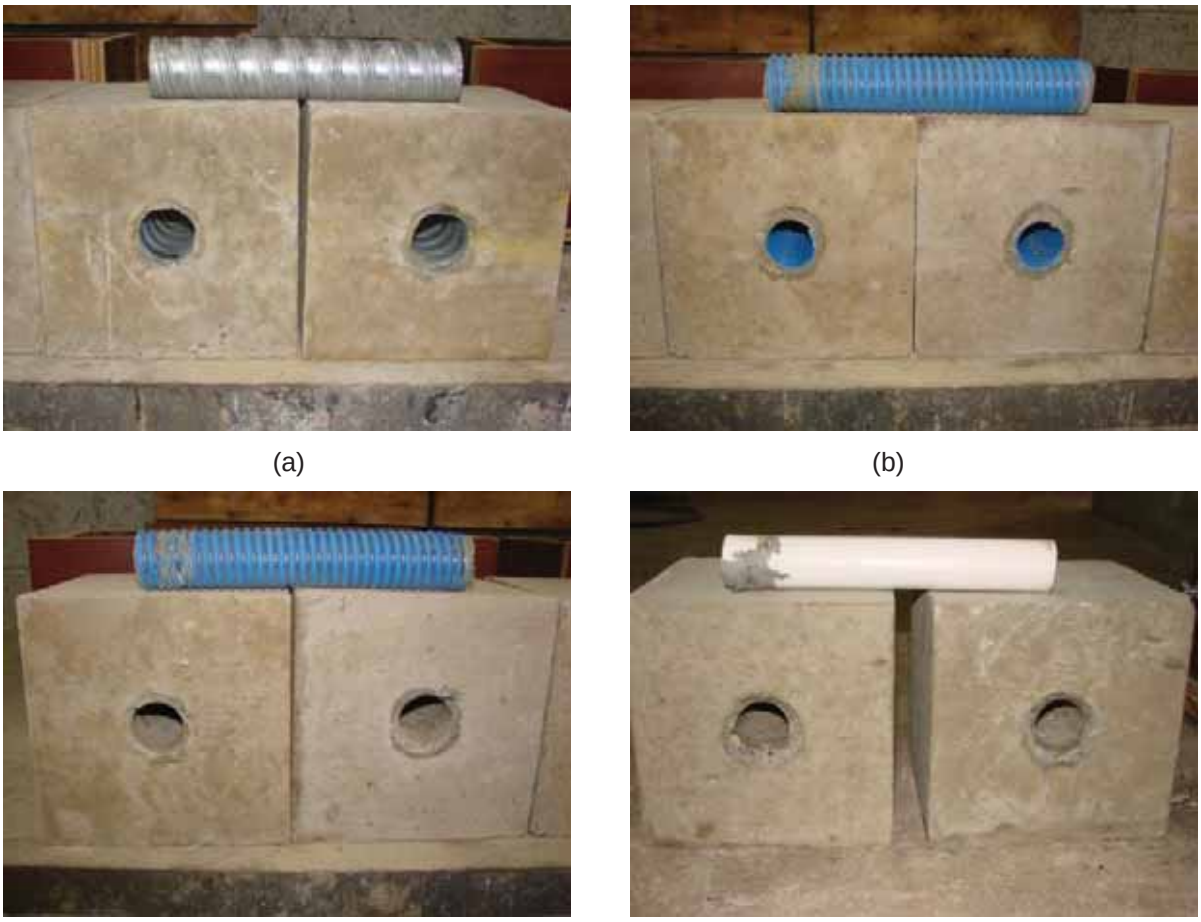
Fonte: Produção do próprio autor

Ao término da concretagem dos blocos deu-se o acabamento superficial no corpo de prova e cobriu-se o corpo de prova com filme plástico.

Foram moldados blocos de concreto com quatro tipos diferentes de bainhas, como mostra a Figura 3.23, a saber:

- bloco de concreto com bainha metálica corrugada (Figura 3.23(a));
- bloco de concreto com bainha plástica corrugada (Figura 3.23(b));
- bloco de concreto com bainha plástica, sendo retirada para deixar o concreto corrugado (Figura 3.23(c));
- bloco de concreto com bainha plástica lisa, sendo retirada para deixar o concreto liso (Figura 3.23(d)).

Figura 3.23: Detalhe das diferentes bainhas utilizadas para os ensaios POT.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Passadas 24 horas da moldagem dos blocos de concreto foi feita a desmoldagem dos corpos de prova e, posteriormente feita a retirada das bainhas plásticas lisas e corrugadas programadas para tal e, também cortou-se com auxílio de uma serra de mão as partes sobressalentes das bainhas metálicas e de plástico, como ilustra a Figura 3.24 a seguir.

Figura 3.24: Bainha metálica sendo serrada para retirar o excesso.

Fonte: Produção do próprio autor

Após o término dos processos de retirada e corte das bainhas, os blocos foram colocados na câmara úmida, sendo curados por 14 dias. Ao final do período de cura, foi feito o preenchimento da bainha com os diferentes grautes, caldas de cimentos e argamassa. Em um primeiro momento utilizou-se apenas um graute, que foi selecionado conforme os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e de adesão, para que se estudasse qual a melhor bainha a ser utilizada em um segundo ensaio de POT, tendo como objetivo estudar os diferentes materiais de preenchimento.

Dessa forma, realizou-se o preenchimento da bainha com o graute e a colocação da barra de aço com 1,20 m de comprimento centralizada na mesma. Para o preenchimento da bainha utilizou-se uma placa de isopor de 5 cm de altura, cortada nas dimensões da seção do bloco e com um furo centralizado para a colocação da barra de aço. Após a colocação da barra de aço centralizada na placa de isopor e feita à vedação, o bloco de concreto foi colocado sob a placa.

Posteriormente foram colocados corpos de prova cilíndricos nas laterais dos blocos para auxiliar no travamento da barra, por meio de um suporte com uma luva para evitar possíveis movimentos da barra durante o processo de preenchimento da bainha.

Em seguida, com o auxílio de um nível de bolha, nivelou-se a barra de aço de forma que, estivesse centralizada em relação à bainha, para não haver problemas de excentricidade durante a realização do ensaio POT. As Figuras 3.25(a), 3.25(b), 3.25(c), 3.25(d) a seguir ilustram a barra de aço sendo colocada ao centro do isopor de 5 cm de espessura, montagem do bloco com a barra de aço ao centro da bainha

para o preenchimento da mesma, nivelamento da barra de aço e modelo nivelado e pronto para o preenchimento da bainha, respectivamente. Dessa forma a Figura 3.25 mostra todo o processo de preenchimento da bainha para a realização dos ensaios de “PULL-OUT TEST”.

Terminado o processo de nivelamento da barra de aço, Figura 3.26 (a) preparou-se a mistura e, preencheu-se a bainha com os grautes e com as caldas, como mostra a Figura 3.26 (b).

Figura 3.25: Detalhe do processo de montagem do conjunto para o preenchimento da bainha.

(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 3.26: Detalhe do preenchimento da bainha.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Feito o preenchimento da bainha, o conjunto foi curado por 24 horas em temperatura ambiente. Após esse período, o conjunto foi colocado em câmara úmida por mais 13 dias, totalizando a idade de 28 dias do concreto e de 14 dias do material de preenchimento, quando realizado o ensaio de POT.

O conjunto foi retirado um dia antes dos ensaios de POT para que secasse ao ambiente e também foi feita a raspagem do excesso de graute ou calda, com auxilio de uma lixadeira elétrica, para que a superfície do bloco ficasse uniforme, evitando assim que houvesse problemas durante a acomodação do bloco.

3.5.5.1.1 Montagem do Ensaio

Para a realização do ensaio de POT, o sistema de carregamento mostrado na Figura 3.27, foi montado sobre cavalete de aço e nivelado com apoios de madeira. Para a aplicação da carga utilizou-se de um macaco hidráulico com pistão vazado com capacidade de 1000KN, conectado a uma bomba manual de pressão, ambos fabricados por Equipamentos Industriais Pontec LTDA.

Figura 3.27: Conjunto montado para o ensaio “PULL-OUT TEST”.

Fonte: Produção do próprio autor

Para a leitura das deformações ocorridas na célula de carga foram utilizados dois procedimentos. Primeiramente, nos ensaios de determinação de qual a melhor situação de bainha a ser utilizada no estudo da aderência dos diferentes materiais de preenchimento, utilizou-se um indicador de deformação digital modelo P3 Strain Indicator and Recorder da VISHAY Micro-Measurements, conforme a Figura 3.28 e, os escorregamentos da barra de aço foram medidos com o auxílio de um relógio comparador digital da marca Digico, com precisão de 0,001 mm e curso de 5,0 mm.

Figura 3.28: Indicador de deformação digital de 4 canais.

Fonte: Produção do próprio autor

Com os resultados obtidos nos ensaios de aderência, para as diferentes bainhas utilizadas, definiu-se a melhor bainha para ser utilizada no próximo ensaio, no qual foram testados os diferentes materiais de preenchimento. Buscou-se fazer um teste complementar com o auxílio de extensometria que será mostrado em anexo.

3.5.5.2 Ensaio de Aderência "PULL-OUT TEST" para os diferentes materiais de preenchimento

Nesta segunda etapa dos ensaios de aderência (POT), depois de definida a bainha a ser usada, foram avaliados os diferentes materiais de preenchimento, as duas caldas de cimento, os dois grautes e a argamassa. Os processos de moldagem dos blocos de concreto e o preenchimento das bainhas foram feitos de maneira semelhante à descrita anteriormente. Foram feitos dois tipos de leituras, uma tradicional e outra com o auxílio de extensometria.

Devido ao uso dos extensômetros elétricos colados à barra de aço, as leituras foram feitas com o auxílio de um sistema de aquisição de dados. Os resultados dos ensaios de POT com o uso de extensômetros serão mostrados no anexo A.

Com base nos resultados do comportamento da aderência dos cinco materiais anteriormente citados, verificaram-se os materiais de preenchimento que obtiveram os melhores resultados de aderência para que pudessem ser realizados os testes de validação dos materiais no modelo em escala real da ligação viga-pilar de elementos pré-moldados de concreto.

IV ESTUDO DA CALDA DE CIMENTO

Os estudos de caracterização das caldas de cimento foram divididas em duas etapas, a saber:

Na primeira etapa de caracterização das caldas de cimento foram utilizados diferentes cimentos e aditivos superplastificantes. Foram utilizados no preparo das caldas de cimento dois tipos de cimentos, cimento MC 20 RS e o cimento CP-V-ARI RS, e três tipos de aditivos superplastificantes, onde o aditivo tipo 1 e o aditivo tipo 3 são à base de policarboxilatos enquanto que o aditivo superplastificante tipo 2 possui uma base química de naftaleno. Os resultados desse estudo estão descritos neste capitulo a seguir

Na segunda etapa, tendo em mãos os resultados dos estudos das diferentes caldas, buscou-se desenvolver duas caldas de cimento para o preenchimento dos nichos das ligações entre elementos pré-moldados de concreto. Foi utilizado o cimento CP-V-ARI RS com dois tipos de aditivos superpastificantes, aditivo 1 e 3. No capitulo V são apresentados os resultados desse estudo.

4.1. CALDAS DE CIMENTO

A primeira etapa do estudo de caracterização das caldas de cimento consistiu em estudar o comportamento mecânico e reológicos das caldas de cimento variando os tipos de cimento e aditivos superplastificantes. Foram elaboradas inicialmente seis composições de caldas de cimento, elaboradas com dois tipos de cimentos e com três aditivos superplastificantes de diferentes fabricantes. Para todas elas foram utilizadas água com temperatura controlada de 4,5ºC a 5,0ºC.

Os aditivos superplastificantes empregados no preparo da calda se diferenciaram em relação à base química de cada um onde, o aditivo denominado

de tipo 1 e o aditivo denominado de tipo 3 foram aditivos à base de policarboxilatos enquanto que o aditivo denominado de tipo 2 possui base química de naftaleno.

Foram executados, para todas as caldas avaliadas, ensaios de índice de fluidez, exsudação, expansão, vida útil, resistência à compressão axial e ensaios reológicos. No intuito de se reproduzir a metodologia de aplicação da calda nos canteiros de obras, ao se realizar os ensaios de vida útil, a mistura de calda ficou sob agitação constante, diferindo da norma NBR 7685 (1983).

4.1.1 Composição das Caldas de Cimento

As composições das caldas de cimento elaboradas com os diferentes tipos de cimentos e aditivos superplastificantes estão dispostas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição das Caldas de Cimento

CALDA	CIMENTO	FATOR A/C	ADITIVO	DOSAGEM DE ADITIVO	ÁGUA DE EXSUDAÇÃO
F1	CP-V-ARI RS	0,40	Aditivo 1	0,7% (s.p.c.)	0,42%
F2	MC 20 RS	0,41	Aditivo 1	0,9% (s.p.c.)	0%
F3	MC 20 RS	0,40	Aditivo 2	1,8% (s.p.c.)	0%
F4	CP-V-ARI RS	0,40	Aditivo 2	2,0% (s.p.c.)	0,30%
F5	CP-V-ARI RS	0,37	Aditivo 3	0,7% (s.p.c.)	0,16%
F6	MC 20 RS	0,40	Aditivo 3	1,0% (s.p.c.)	0,16%

Fonte: Produção do próprio autor

Foram verificados os comportamentos da calda de cimento quanto a sua fluidez e o seu comportamento reológico, conforme mostram as Tabelas de 4.2 a 4.13, que apresentam os resultados de tempo de escoamento, viscosidade aparente, tensão crítica, temperatura ambiente e temperatura das caldas estudadas com e sem agitação.

Tabela 4.2: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F1 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,00	19,7	22,9	0,380	0,117
30	12,63	21,6	21,9	0,296	0,151
60	12,96	21,7	21,5	0,315	0,000
90	13,31	21,4	20,8	0,316	0,000
120	13,83	21,2	20,5	0,370	0,106
150	15,38	21,0	23,0	0,419	0,451
180	17,65	21,0	22,8	0,515	1,253

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.3: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F1 com agitação constante.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	10,99	18,1	22,2	0,256	0,000
30	10,23	20,4	21,6	0,247	0,000
60	9,79	20,9	21,3	0,243	0,000
90	9,77	20,6	20,9	0,281	0,010
120	10,22	20,6	22,3	0,278	0,091
150	10,35	20,7	22,8	0,304	0,295
180	11,93	21,1	23,0	0,428	1,654

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.4: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F2 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,65	18,1	22	0,412	0,020
30	18,13	20,4	21,5	0,422	0,000
60	19,62	21,2	21,8	0,481	0,000
90	20,53	21,4	21,5	0,488	0,000
120	23,47	21,5	21,5	-	-

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.5: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F2 com agitação constante.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,77	17,2	21,6	0,448	0,000
30	11,9	19,6	21,4	0,496	0,000
60	11,69	20,5	21,5	0,499	0,000
90	11,48	20,9	21,9	0,412	0,000
120	11,67	21	21,7	0,466	0,000
150	12,2	21,2	21,6	0,452	0,048
180	12,91	21	21,5	0,560	0,468

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.6: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F3 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	12,53	17,9	22,1	0,623	0,197
30	15,69	20,5	22,8	0,875	0,523
60	16,51	21,7	23,4	0,717	0,179
90	16,82	22,3	23,6	0,782	0,313
120	17,67	22,4	23,3	0,913	0,719
150	18,41	22,3	23,5	0,894	0,832
180	18,97	22,3	23,3	0,851	1,224

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.7: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F3 com agitação constante.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	12,34	16,7	21,6	0,670	0,211
30	13,03	20,1	23	0,737	0,521
60	12,54	21,9	23,2	0,668	0,487
90	11,97	22,5	23,2	0,681	0,607
120	12,13	22,5	23,1	0,685	0,902
150	12,54	22,2	23,3	0,786	1,337
180	12,71	22,3	23,2	0,674	1,491

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.8: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F4 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,41	17,9	23,5	0,472	0,000
30	13,83	22,8	23,4	0,600	0,475
60	13,73	23,5	23,0	0,580	0,383
90	13,73	23,5	22,9	0,728	0,607
120	13,70	23,4	23,2	0,631	1,147
150	13,90	23,2	22,8	0,730	1,145
180	13,83	23,2	22,6	0,620	1,392

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.9: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F4 com agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	10,05	18,7	20,1	0,297	0,278
30	9,67	22,6	22,1	0,360	1,346
60	9,51	23,1	22,8	1,577	2,683
90	9,51	23,0	21,3	0,869	3,940
120	9,63	22,6	20,7	0,473	3,851
150	9,61	22,4	20,8	0,789	4,825
180	9,83	22,2	22	0,340	5,164

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.10: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F5 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	12,62	18,2	22,4	0,467	0,129
30	17,85	21,2	23,1	0,427	0,000
60	16,87	21,6	22,9	0,485	0,000
90	17,17	21,8	23,3	0,452	0,097
120	17,35	21,9	23,0	0,516	0,070
150	17,65	21,9	23,2	0,608	0,107
180	18,41	21,9	23,1	1,179	0,099

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.11: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F5 com agitação constante.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	13,30	18,1	23,3	0,444	0,189
30	12,43	20,8	23,1	0,435	0,000
60	11,90	21,8	23,1	0,521	0,000
90	11,72	22,2	23,1	0,471	0,319
120	12,03	22,2	23,0	0,587	0,743
150	12,20	22,2	23,1	0,546	0,190
180	12,73	22,2	22,9	0,488	0,213

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.12: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F6 sem agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,36	19	22,6	0,281	0,228
30	12,19	20,8	23,4	0,299	0,000
60	13,25	21,6	23,2	4,367	0,000
90	13,95	21,7	23,5	0,367	0,000
120	14,91	21,7	22,8	0,305	0,000
150	16,11	21,7	23,0	0,445	0,000
180	17,26	21,6	22,8	0,442	0,000

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.13: Tempo de escoamento, viscosidade aparente e tensão crítica da calda F6 com agitação.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	11,56	17,6	22,7	0,295	0,000
30	11,45	20,1	23,1	0,277	0,000
60	11,64	21,3	23,2	0,332	0,000
90	11,49	21,8	23,5	0,313	0,000
120	11,74	21,9	22,8	0,363	0,000
150	11,71	21,9	22,7	0,436	0,000
180	11,40	22,0	22,9	0,371	0,000

Fonte: Produção do próprio autor

Todas as caldas apresentaram baixa taxa de exsudação não havendo sedimentação da mistura durante o tempo de repouso necessário para a determinação do índice de fluidez.

A calda F2 segundo o procedimento estabelecido por norma apresentou vida útil de 90 minutos, tempo este considerado baixo (o máximo de tempo de aplicação da calda em campo é de 180 minutos) e tempo de escoamento superior a 20 segundos. Entretanto, ao se manter a calda sob agitação constante, o tempo de vida

útil foi prolongado para 180 minutos e o tempo de escoamento caiu para 13 segundos.

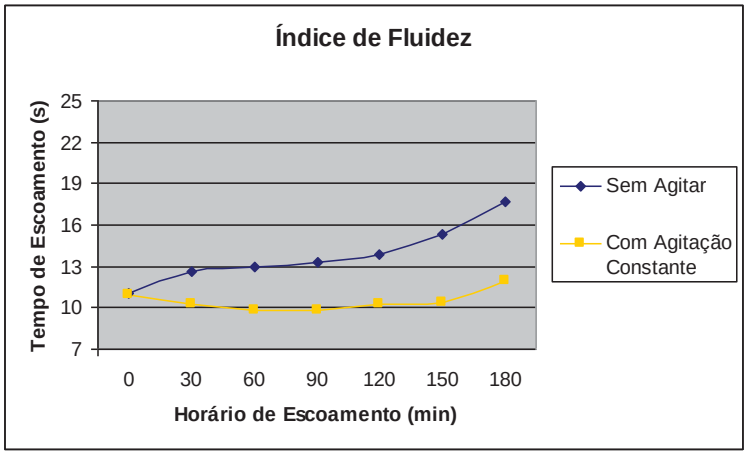
Outro fator observado foi a comparação das misturas elaboradas com mesmo aditivo e diferentes cimentos. Ao se comparar as caldas F1 e F2, ambas fabricadas com o superplastificante a base de policarboxilato (Aditivo 1) e cimentos CP-V-ARI RS e microcimento MC 20 RS respectivamente, verificou-se que o tipo de cimento influencia consideravelmente no comportamento da mistura no que concerne o tempo de vida útil da calda. A principal diferença entre o microcimento MC 20 RS e o CP-V-ARI RS é módulo de finura, onde o índice de Blaine dos dois cimentos varia de 4768 cm2/g para o CP-V-ARI RS e 7004 cm2/g para o microcimento.

Devido a esta variação há necessidade de se utilizar uma dosagem mais baixa de aditivo superplastificante na calda F1 (de 0,7%) contra os 0,9% na calda F2 e, aumentar a relação água cimento de 0,40 na calda F1 para 0,41 na calda F2. Apesar do aumento da porcentagem de aditivo e da relação água cimento, a calda F2 apresentou vida útil de 90 minutos enquanto que na calda F1 esta foi de 180 minutos, comprovando a influência da composição química do cimento no comportamento da calda também observada por Fernàndez-Altable (2006) e Hanehara (1999).

A calda F4 teve um comportamento constante com o seu tempo de vida útil independe da metodologia usada na determinação do índice de fluidez. O cimento CP-V-ARI RS apresentou uma boa compatibilidade com o superplastificante a base de naftaleno (Aditivo 2), mantendo sua fluidez constante no período de 180 minutos.

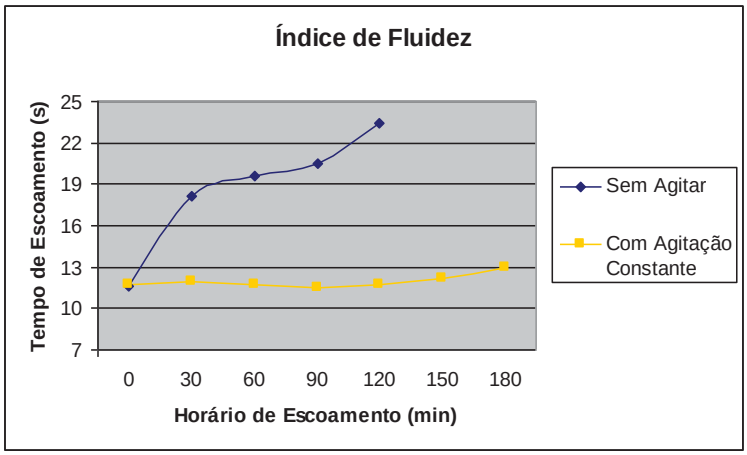
As Figuras 4.1 a 4.6 a seguir mostram o comparativo entre as duas metodologias aplicadas para determinação da vida útil das caldas de cimento, uma metodologia segunda a NBR 7685 (1983) e outra sob agitação constante entre os períodos de leitura de índice de fluidez, em complemento as informações das tabelas anteriormente apresentadas.

Figura 4.1: Tempo de escoamento x tempo para a calda F1.



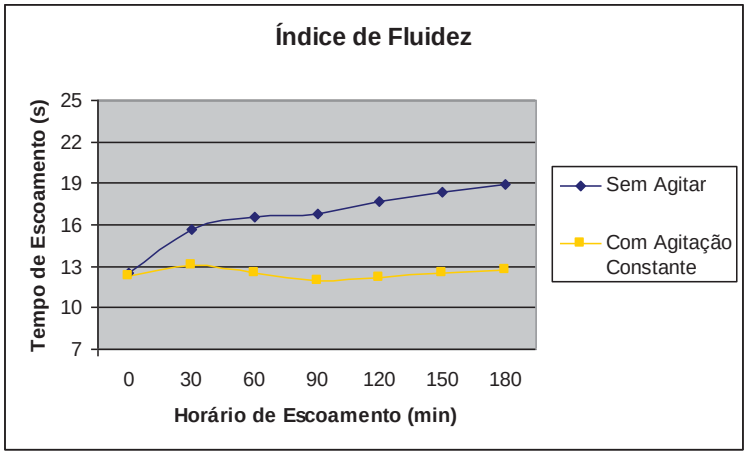
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.2: Tempo de escoamento x tempo para a calda F2.



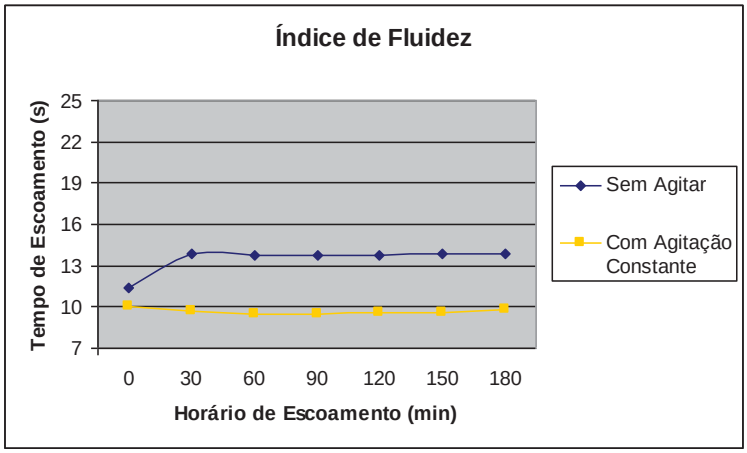
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.3: Tempo de escoamento x tempo para a calda F3.



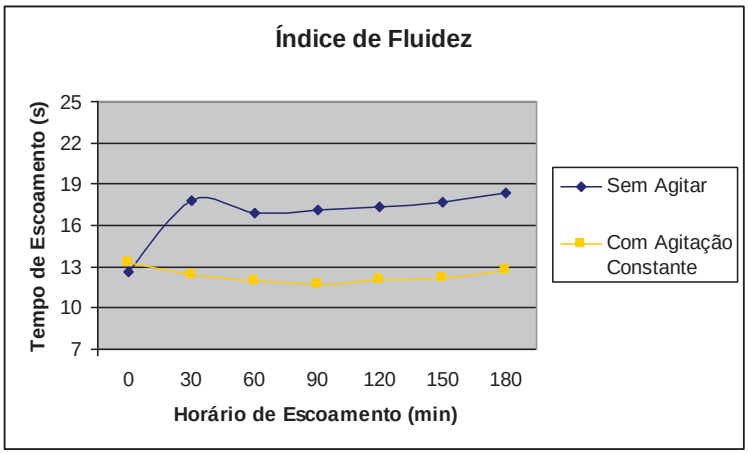
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.4: Tempo de escoamento x tempo para a calda F4.



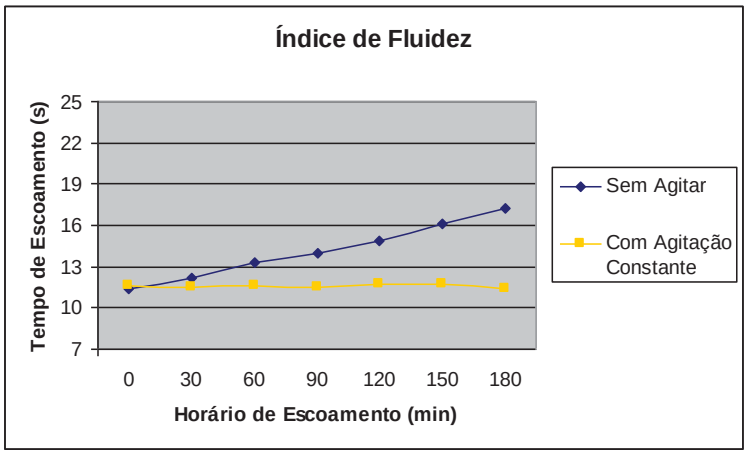
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.5: Tempo de escoamento x tempo para a calda F5.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.6: Tempo de escoamento x tempo para a calda F6.



Fonte: Produção do próprio autor

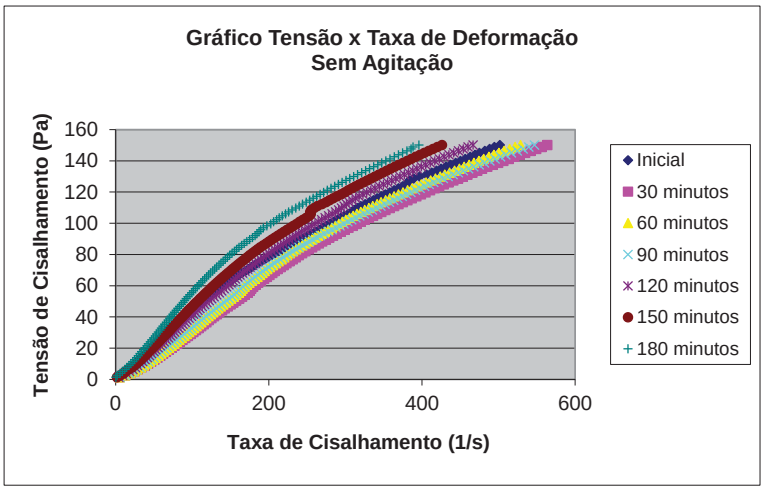
A partir dos resultados do índice de fluidez, mostrados nas Figuras 4.1 a 4.6, pode-se observar que as caldas preparadas sob uma agitação constante de 500 rpm, apresentaram um comportamento constante do seu tempo de escoamento conforme o tempo. Houve pouca perda de fluidez devido à agitação constante uma vez que as hélices da batedeira agem de forma a quebrarem as partículas da hidratação do cimento, fazendo assim com que a mistura mantenha-se fluida por muito mais tempo aumentando a sua vida útil para aplicação.

4.1.2 Comportamento Reológico das Caldas de Cimento

As caldas de cimento foram submetidas a ensaios reométricos, com o controle de tensão aplicada medindo dessa forma a taxa de cisalhamento da calda para a respectiva tensão. O reômetro R/S Brookfield de cilindros coaxiais utilizados na determinação dos parâmetros reológicos não possui uma grande precisão quando se trabalha com muito baixas taxas de deformação.

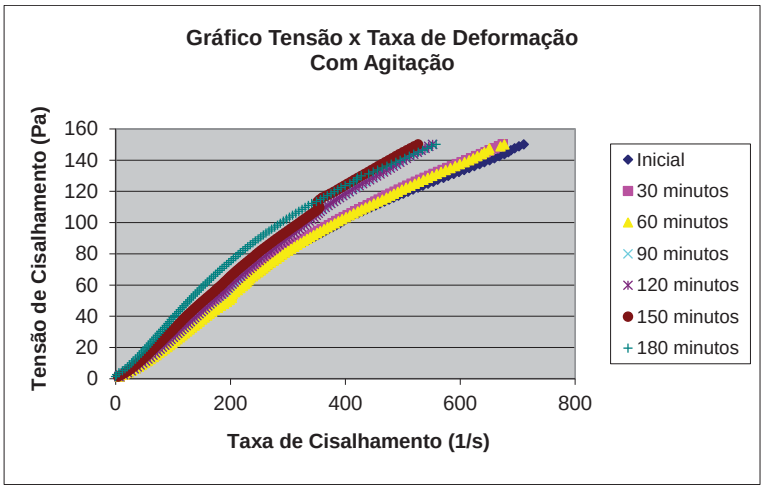
As Figuras de 4.7 a 4.18 mostram os gráficos de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento das caldas estudadas com e sem agitação de acordo com a norma.

Figura 4.7: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F1 sem agitação.



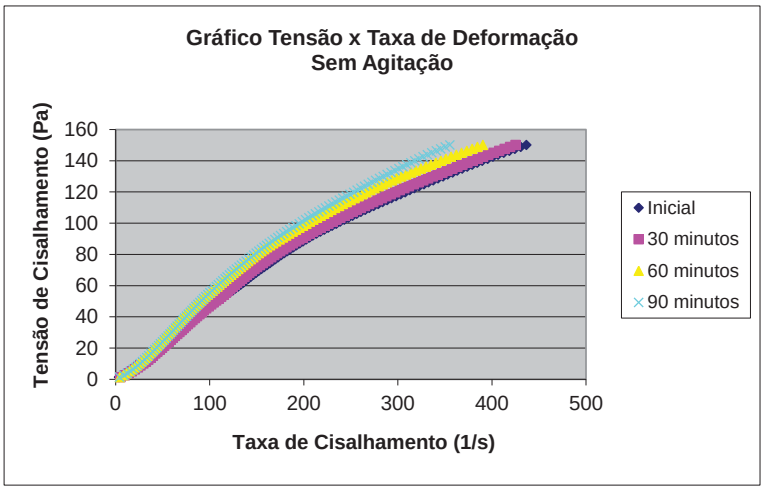
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.8: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F1 com agitação.



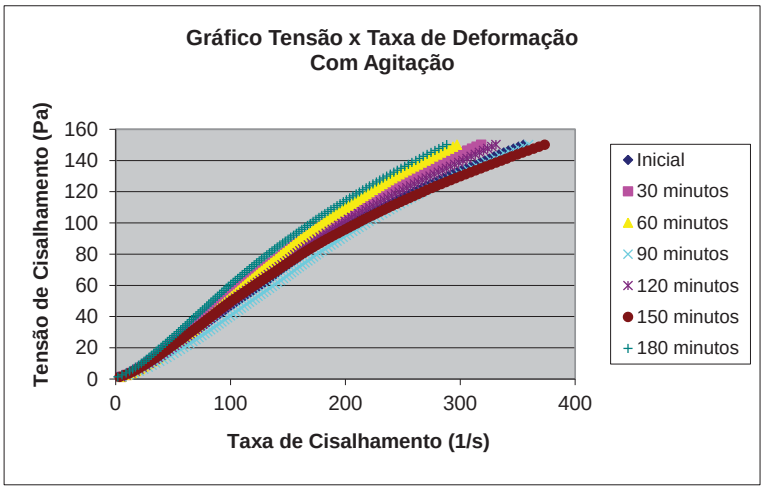
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.9: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F2 sem agitação.



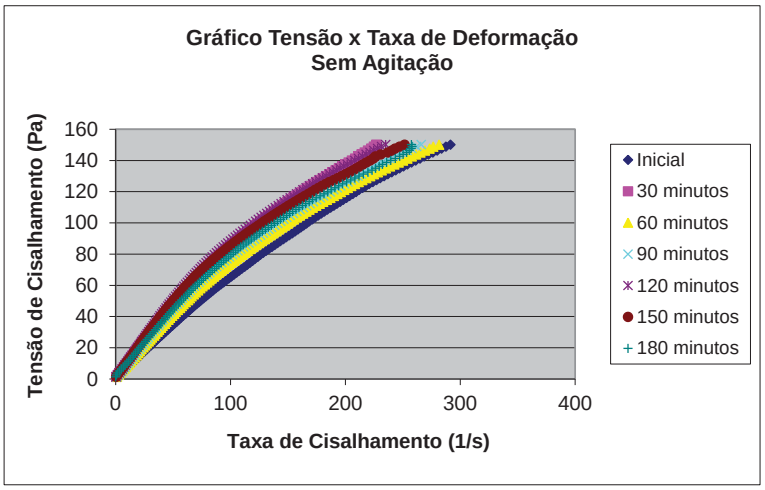
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.10: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F2 com agitação.



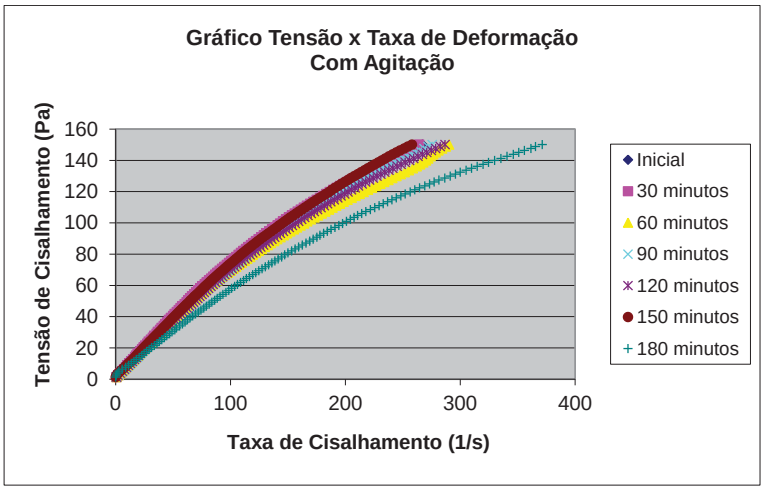
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.11: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F3 sem agitação.



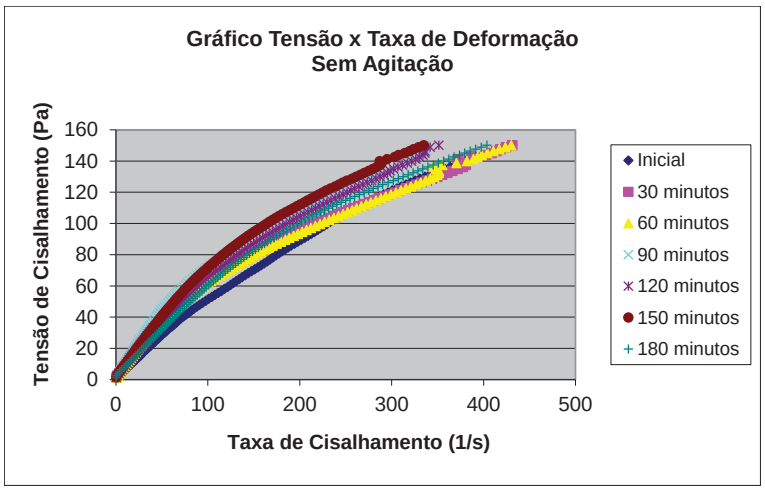
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.12: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F3 com agitação.



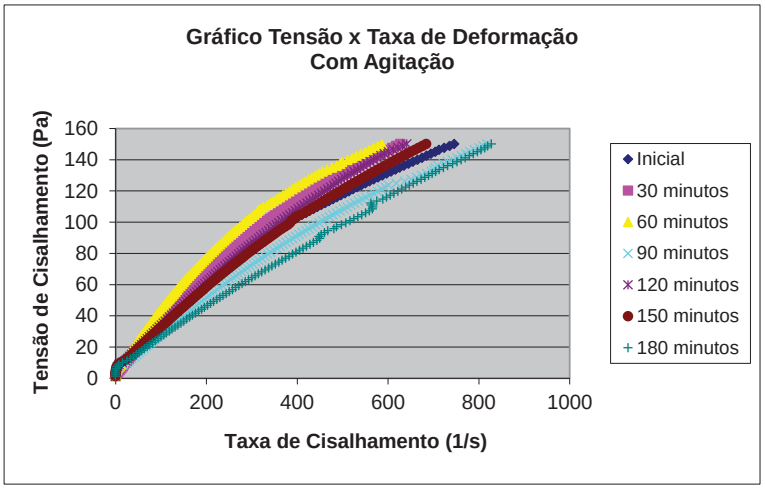
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.13: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F4 sem agitação.



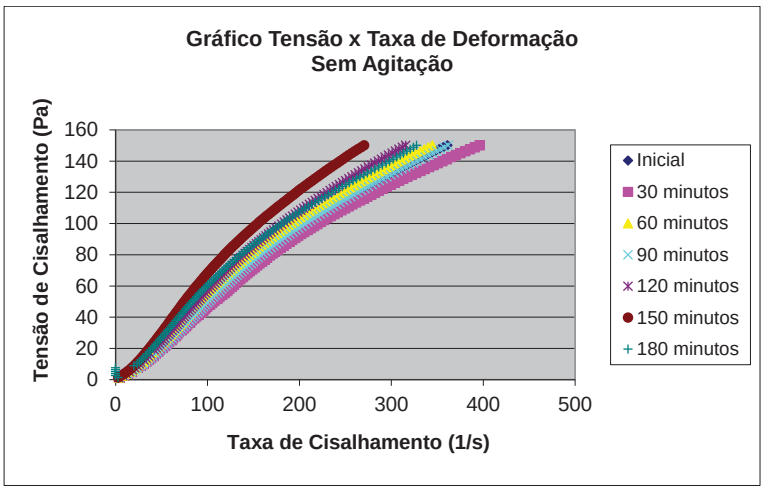
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.14: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F4 com agitação.



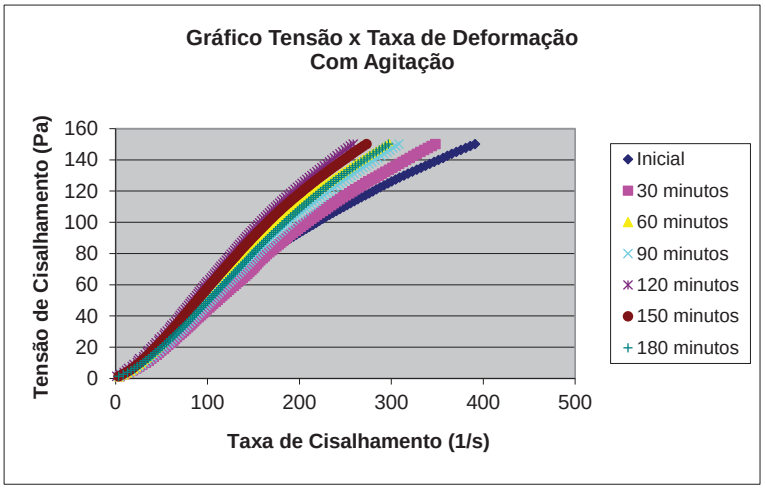
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.15: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F5 sem agitação.



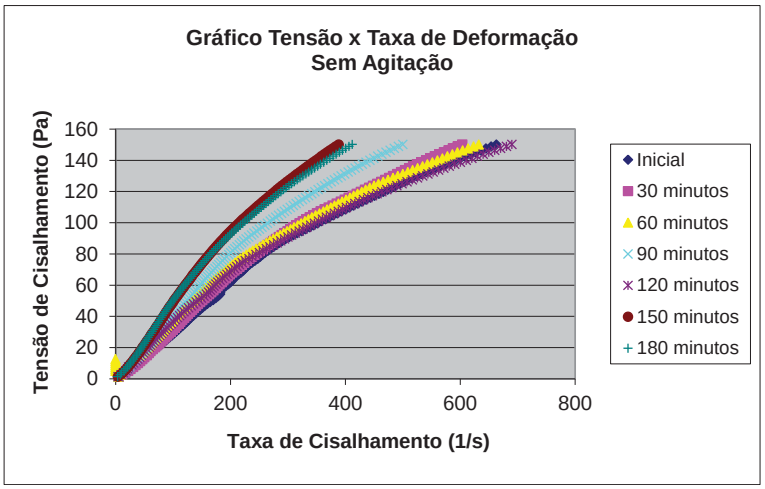
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.16: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F5 agitando.



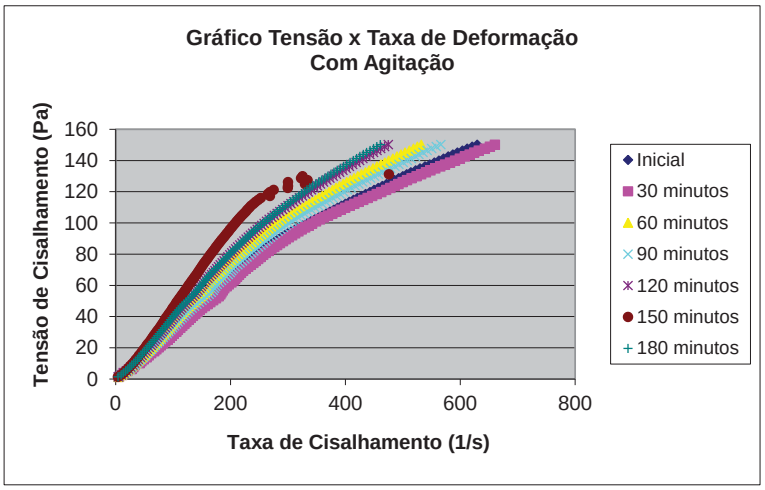
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.17: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F6 sem agitação.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.18: Gráfico de Tensão de cisalhamento x Taxa de cisalhamento da calda F6 com agitação constante.



Fonte: Produção do próprio autor

Nos ensaios reométricos houve o aparecimento de tensão crítica na calda F4, enquanto que na demais misturas a tensão crítica foi praticamente igual zero. Isso pode ser justificado pelo efeito dos superplastificantes de diferentes bases químicas. O aditivo à base de policarboxilatos (Aditivo 3) apresenta um efeito sobre a mistura fazendo com que a tensão crítica diminuía até ser praticamente nula, enquanto que o aditivo superplastificante a base de naftaleno (Aditivo 2) age menos sobre a mistura, fazendo com que apareça uma tensão crítica mesmo que baixa. Outro ponto de destaque foi que a calda F4 sob agitação constante apresentou tensão crítica superior à calda F4 mantida em repouso conforme a norma NBR 7682, Este comportamento pode ser considerado incomum uma vez que a agitação constante tende a quebrar as partículas da mistura quebrando as ligações existentes e consequentemente, diminuindo a tensão crítica, no entanto, pode ter ocorrido o processo inverso, acelerando as reações internas.

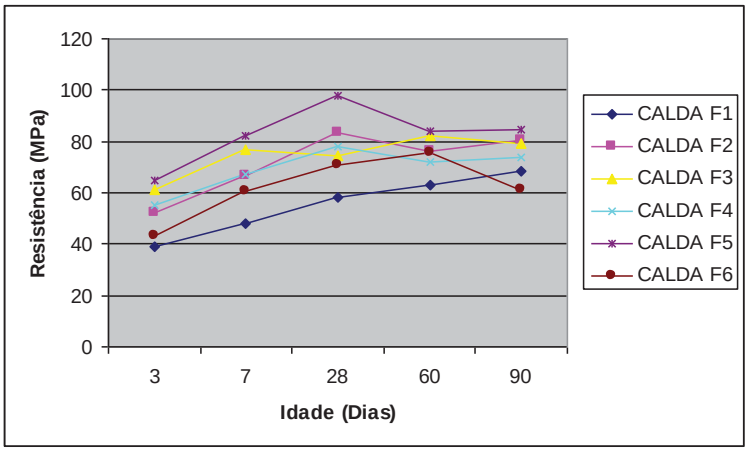
O mesmo comportamento foi observado na calda F3, a qual também apresentou tensão crítica, embora com valor inferior ao da calda F4. Notou-se que na calda F3 a agitação constante fez com que a sua tensão crítica retornasse novamente a zero, tendo seu comportamento sido modificado devido à quebra das partículas de hidratação.

Como se pôde verificar nos resultados apresentados, todas as caldas obtiveram um comportamento semelhante. Tendo um ganho viscosidade em função do tempo de acordo com seu modo de leitura, uma sob agitação constante e outra quando a mistura é mantida em repouso. Tem-se assim, que a agitação constante ajuda não somente na quebra das partículas como também na melhora do efeito de mistura e ação prolongada do superplastificante na reação química de hidratação do cimento.

As caldas F4 e F3 foram as misturas que obtiveram um melhor comportamento nas pequenas taxas de deformações, apresentando assim resultados de maior precisão.

As resistências à compressão das caldas apresentadas na Figura 4.19, superaram as expectativas iniciais, obtendo-se valores de resistência superiores a 60 MPa aos 7 dias de cura, tendo a calda F5 apresentado uma resistência à compressão aos 28 dias próximo a 100 MPa.

Figura 4.19: Resistência à compressão das caldas.



Fonte: Produção do próprio autor

Entretanto a calda F1 é a única que não atingiu uma resistência superior a 60 MPa aos 28 dias de cura, esse valor mais baixo se comparado com as demais caldas, o que pode ter ocorrido devido à compatibilidade do aditivo com o cimento, tendo dessa forma um menor efeito na mistura, como pôde ser observado pela sua água de exsudação que é superior as demais. Sendo assim, essa água livre pode acarretar uma maior porosidade da calda, diminuindo assim sua resistência à compressão.

A escolha por idade de ruptura de até 28 dias foi feita de acordo com a Norma que recomenda que materiais cimentícios tenham uma idade de ruptura de 28 dias para o controle padrão, já que em idades mais avançadas podem-se ter valores discrepantes deixando, em dúvida, os resultados anteriores obtidos.

V ESTUDO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PARA PREENCHIMENTO DAS LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

Este trabalho teve como finalidade estudar e pesquisar um compósito cimentício para o preenchimento de ligações semi-rígidas de estruturas pré-moldadas de concreto. Para tanto, foi realizado o estudo de composição e avaliação reológica e mecânica de um compósito do tipo calda de cimento, de um compósito do tipo argamassa, assim como dos grautes industriais existentes no mercado, que fizesse o preenchimento das ligações.

5.1. COMPOSIÇÃO DAS CALDAS DE CIMENTO, GRAUTES E ARGAMASSA

5.1.1 Composição das Caldas de Cimento

Para o estudo do compósito cimentício do tipo calda de cimento buscou-se desenvolver duas composições de caldas de cimento baseadas no estudo de suas propriedades realizado na etapa anterior, onde variou-se os tipos de cimentos e aditivos superplastificantes utilizados.

A Tabela 5.1 a seguir, apresenta as composições das caldas de cimento obtidas com o cimento CPV ARI RS, porém com aditivos superplastificantes de mesma base química, mas de diferentes fabricantes onde para a calda de cimento 1 utilizou o aditivo 3 e para a calda de cimento 2 o aditivo 1. Dessa forma, a calda de cimento 1 possui os mesmos compósitos que a calda F5 e a calda de cimento 2 da calda F1, da primeira etapa dessa pesquisa..

O fator água/cimento das duas caldas elaboradas foi determinado de forma a se obter um comportamento próximo aos dos grautes industriais utilizados no

preenchimento dos nichos entre elementos pré-moldados, Dessa forma as caldas de cimento elaboradas obtiveram uma maior viscosidade.

Tabela 5.1: Composição das caldas de cimento e água de exsudação.

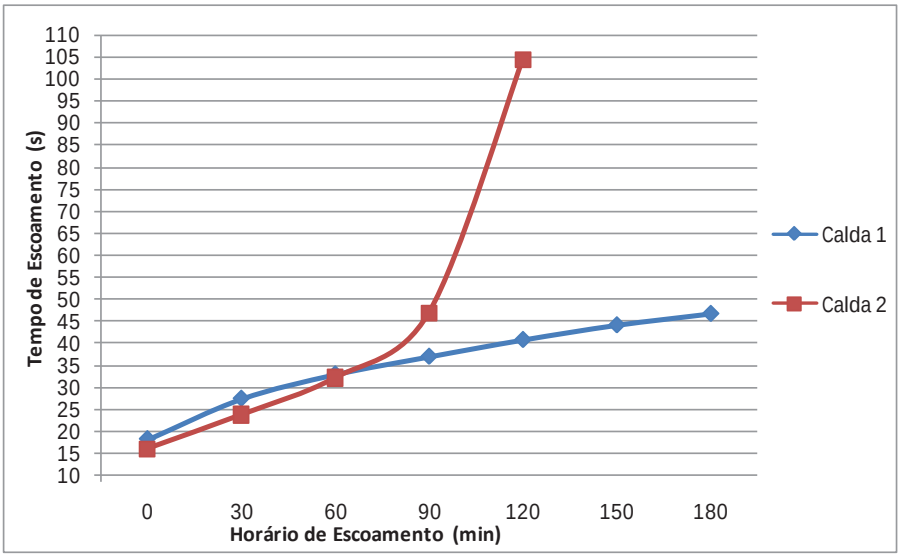
	Calda 1	Calda 2
Tipo do Cimento:	CP-V-ARI RS	CP-V-ARI RS
Fator A/C:	0,34	0,36
Aditivo:	0,45% (spc)	0,45% (spc)
Temperatura do Cimento:	27,6ºc	27,5ºc
Temperatura da Água:	26,6ºc	26,9ºc
Água de Exsudação (%):	0,00%	0,00%

Fonte: Produção do próprio autor

Na Tabela 5.1 pode-se observar que nas duas composições de caldas de cimento a porcentagem de água de exsudação é nula. Isto se deve ao fato do efeito produzido pelo superplastificante à base de policarboxilatos que consegue reter a água na mistura. Outro fator que influencia é o efeito da temperatura da água, pois quando se utiliza água a baixas temperaturas, a fluidez da calda de cimento fica menor. Neste caso, se houver excesso de aditivo na mistura haverá problemas de exsudação.

A determinação da vida útil das caldas de cimento seguiu o procedimento da norma NBR 7685 (1983), sendo feita a leitura de índice de fluidez, segundo a NBR 7682 (1983), a cada 30 minutos. A Figura 5.1, ilustra o tempo de vida útil das diferentes caldas de cimento estudadas.

Figura 5.1: Tempo de fluidez x tempo das caldas de cimento**.**



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que a compatibilidade entre o tipo de cimento e o aditivo químico exerce grande influência no comportamento da vida útil da calda de cimento. Na calda 2 além de ter sido necessário uma maior quantidade de água para obter a mesma fluidez inicial, o aditivo superplastificantes utilizado não conseguiu mantera fluidez constante ao longo do tempo, sendo bem evidente na Figura 5.1, a perda brusca de fluidez apos 90 minutos de leitura.

5.1.2 Composição dos Grautes

Foram estudados oito tipos de grautes de quatro diferentes fabricantes, onde buscou-se utilizar a máxima quantidade de água de amassamento sugerida pelo fabricante, com o intuito de obter a máxima trabalhabilidade do produto sem que o mesmo apresentasse problemas devido ao excesso de água na mistura. A Tabela 5.2 a seguir, mostra os resultados obtidos dos diferentes grautes avaliados, bem como os valores encontrados nos ensaios de consistência normal segundo a norma NBR 7215 (1996). A Figura 5.2(a) e (b) ilustram dois diferentes momentos do ensaio de flow test realizado para os grautes.

Tabela 5.2: Composição dos grautes, com sua relação água/graute (a/g) e sua abertura média obtida no flow test.

	Empresa	Relação a/g	Abertura média sem golpes(mm)
Graute 1	*C*	*0,12*	**241,5***
Graute 2	*C*	*0,152*	**192 - 245****
Graute 3	*B*	*0,14*	**288,2**
Graute 4	*B*	*0,13*	**352,5*****
Graute 5	*D*	*0,16*	**145 - 265,8********
Graute 6	*D*	*0,12*	**361**
Graute 7	*A*	*0,12*	**313,7**
Graute 8	*A*	*0,20*	**371,9**

obs:*30 golpes; **5 golpes ; ***pega muito rápida (expansão); ****20 golpes;

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.2(a) e (b): (a) Ensaio de flow test. Detalhe do preenchimento do cone de ensaio; (b) detalhe do espalhamento da mistura.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Com os resultados obtidos na Tabela 5.2, pode-se observar que os grautes 1, 2, 4 e 5 apresentaram problemas relacionados ao seu comportamento no estado fresco. Utilizando a máxima quantidade de água de amassamento sugerida pelo fabricante, os oito grautes acima referenciados, obtiveram uma consistência bem fluida, não sendo necessário a aplicação de golpes na mesa de consistência conforme recomendação da norma NBR 7215 (1996). Porém os grautes 1, 2, e 5, obtiveram uma mistura com baixa consistência em comparação aos demais, necessitando de aplicação de golpes para que obtivessem uma abertura média

satisfatória o graute 4, obteve a maior abertura dentre os oito grautes estudados, porém ao manuseá-lo para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência mecânica notou-se que omesmo obteve uma pega muito rápida, perdendo facilmente a sua trabalhabilidade.

5.1.3 Dosagem da Argamassa

Buscou-se também estudar uma composição de argamassa que possuísse comportamento no seu estado fresco semelhante aos dos grautes estudados. Sua composição esta descrita na Tabela 5.3, tendo a mesma apresentado uma abertura de 320 mm na mesa de consistência sem haver necessidade de aplicação de golpes.

Tabela 5.3: Dosagem da argamassa.

Materiais	kg/m^3
Cimento	793
Areia Média	1249
Água	270
Aditivo Superplastificante A	3,172

Fonte: Produção do próprio autor

Foram moldados 27 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade da argamassa para as idades de 3, 7 e 28 dias de cura úmida.

5.2. ENSAIOS MECÂNICOS DAS CALDAS DE CIMENTO, DOS GRAUTES E DA ARGAMASSA

A Tabela 5.4 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos realizados com idade de cura de 3 e 7 dias para os oito grautes e as duas caldas de cimento avaliadas.

Tabela 5.4: Resultados mecânicos dos grautes e caldas de cimento.

	Resistência à compressão				Módulo de Elasticidade (GPa)		Retração
	Axial (MPa)		Diametral (MPa)				
	3 Dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	Média (%)
Graute 1	58,5	68,4	6,10	7,00	32,42	36,12	0,068
Graute 2	45,5	47,4	5,40	6,30	26,05	27,38	0,109
Graute 3	44,7	50,8	6,62	7,50	25,15	27,92	0,095
Graute 4	61,9	67,8	5,88	6,74	29,86	31,77	0,115
Graute 5	54,1	65,4	6,67	7,41	25,57	28,97	0,124
Graute 6	51,4	60,3	6,10	6,80	31,34	34,41	0,09
Graute 7	25,8	29,4	4,32	4,77	25,46	28,27	0,085
Graute 8	45,9	52,9	6,31	6,36	18,39	20,97	0,186
Calda 1	61,6	82,8	6,80	7,10	14,86	18,49	0,16
Calda 2	62,1	82,8	5,90	6,60	16,84	17,54	0,246
Argamassa	44,5	61,5	5,00	7,40	27,70	30,90	0,086

Fonte: Produção do próprio autor

Analisando conjuntamente os resultados apresentados pelas Tabelas 5.2 e 5.4, pode-se observar que os grautes 3, 6 e 7 foram os que apresentaram um bom comportamento tanto no estado fresco, com uma boa trabalhabilidade, quanto no estado endurecido. Sendo assim, esses três grautes foram os selecionados para os testes de adesão, juntamente com as duas caldas de cimento.

O graute 8 apresentou um bom comportamento no estado fresco, porém teve o menor módulo de elasticidade dentre os grautes estudados e também uma retração média muito alta. Como o graute é um material que possui uma retração compensada, essa maior retração pode acarretar problemas de fissuração, o que não deveria ocorrer com esse tipo de material devido à sua aplicação.

As caldas de cimento apresentaram um bom resultado em termos de resistência à compressão, sendo muito superior aos valores de resistência dos grautes, porém os resultados do módulo de elasticidade foram inferiores a 20 GPa aos 7 dias. Mas como a calda não possui agregados em sua mistura, essa pode ser uma das razões do seu baixo módulo de elasticidade. Segundo Mehta & Monteiro (2008), o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado por

sua porosidade e há relatos de pastas de cimento hidratadas com valores de módulo de elasticidade entre 7 e 28 GPa.

Observa-se que a argamassa possui um comportamento bem próximo ao dos grautes estudados. Outro fator importante a ser comentado é com relação aos valores encontrados nos ensaios de retração por secagem. Nota-se que os grautes devido à sua composição possuem uma retração muito menor se comparada com as caldas de cimentos. Segundo Hasparyk et al. (2005) uma pasta de cimento retrai muito mais do que um concreto devido às restrições impostas pelo agregado graúdo, sendo que quanto maior a quantidade e dimensão máxima do agregado, menor será a deformação por retração. Dessa forma, pode-se observar que os grautes devido a existência de agregados miúdos em sua composição, fazem com que o mesmo tenha uma retração menor que a calda de cimento, tendo em vista que a calda não possui nenhum tipo de agregado em sua composição.

Para a realização dos ensaios de adesão, foram selecionados três tipos de graute dos oito anteriormente avaliados. A escolha foi baseada nos resultados dos ensaios mecânicos apresentados, mas levou-se em consideração também a trabalhabilidade dos grautes. Conforme dito anteriormente, os grautes 1, 2, 4 e 5 apresentaram problemas quanto à trabalhabilidade, dessa forma, os grautes escolhidos para a realização dos ensaios de adesão foram os grautes 3, 6 e 7.

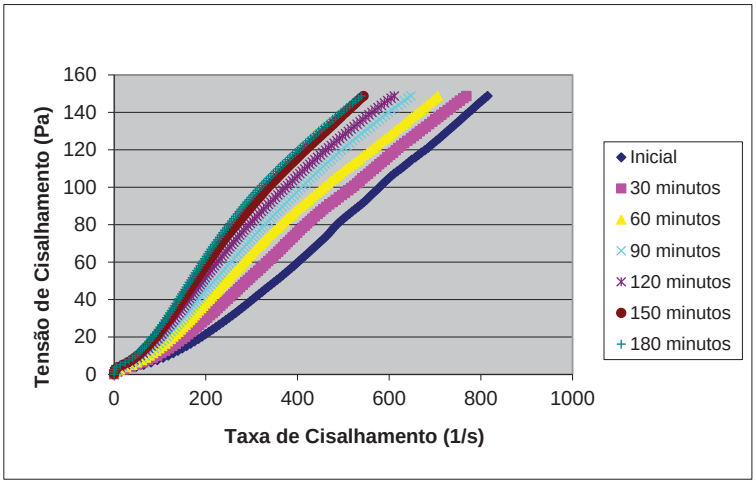
5.3. ENSAIOS REOLÓGICOS

Foram realizados ensaios reológicos para analisar o comportamento reológico do material, os grautes e as caldas de cimento estudadas neste trabalho, tais como a determinação de sua tensão critica e de sua viscosidade plástica, com o auxílio do reômetro R/S Brookfield de cilindros coaxiais.

Para a determinação dos parâmetros reológicos das caldas de cimento utilizou-se de um sistema de cilindros coaxiais, enquanto que, para os grautes foi utilizado o sistema de haletas tipo Vane, devido ao graute possuir partículas maiores (agregados) em sua composição.

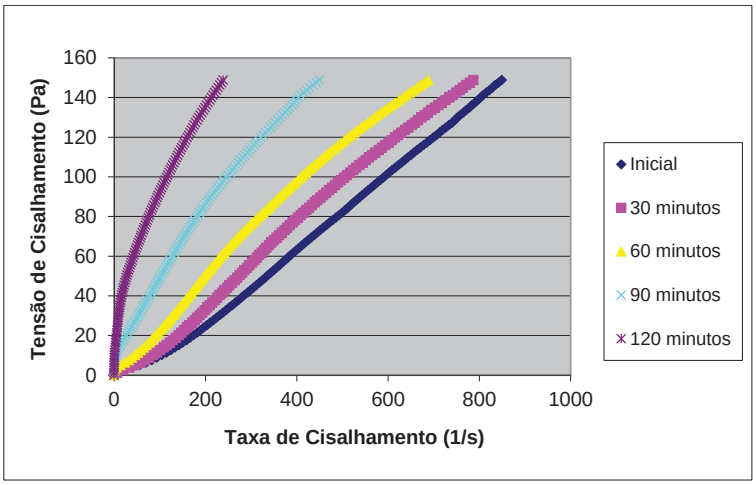
As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os gráficos obtidos de tensão x taxa de deformação para as caldas de cimento 1 e 2 respectivamente.

Figura 5.3: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento da calda de cimento 1.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.4: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento da calda de cimento 2



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que as duas caldas de cimento apresentam um de ganho de viscosidade em função do tempo. Este comportamento é percebido pela acentuação da curva de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento conforme o tempo de leitura da calda de cimento.

Verifica-se um ganho mais acentuado de viscosidade para a calda de cimento 2 conforme o decorrer do tempo se comparado com a calda 1, pois a calda 1 consegue manter uma fluidez quase que constante com o tempo. As Tabelas 5.5 e 5.6 complementam as figuras anteriores, mostrando os valores de tensão crítica e viscosidade aparente média para cada ponto de leitura.

Tabela 5.5: Resultados de fluidez e os parâmetros reológicos obtidos para a calda de cimento 1.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	18,16	26,5	26,4	0,149	0,558
30	27,32	258,0	26,5	0,172	0,700
60	32,83	24,5	25,9	0,199	0,995
90	36,84	23,5	25,9	0,227	1,333
120	40,64	23,2	25,6	0,259	1,554
150	43,96	22,8	25,5	0,310	1,776
180	46,54	22,8	25,6	0,361	1,925

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 5.6: Resultados de fluidez e os parâmetros reológicos obtidos para a calda de cimento 2.

Horário de Escoamento (min)	Tempo de Escoamento (s)	Temperatura da Calda (ºC)	Temperatura Ambiente (ºC)	Viscosidade Aparente Média (Pa.s)	Tensão Crítica (Pa)
0	15,99	27,6	26,9	0,151	0,679
30	23,68	26,8	27,3	0,178	0,622
60	32,07	25,0	26,0	0,298	1,818
90	46,80	23,7	25,9	1,278	3,283
120	104,23	22,7	25,8	3,108	6,477

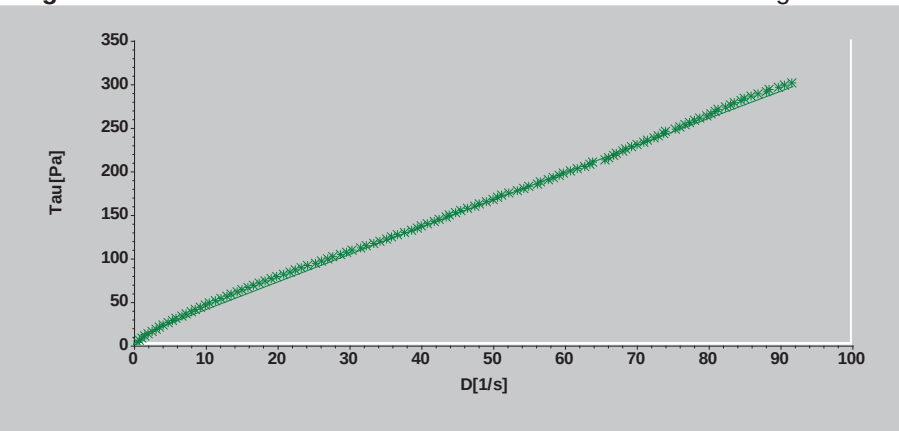
Fonte: Produção do próprio autor

Nas tabelas acima nota-se que houve um aumento da viscosidade aparente média maior para a calda 2, que pode ser justificado pelacompatibilidade do cimento com o aditivo superplastificante utilizado na composição das mesmas. As tensões críticas iniciais são próximas a zero para as duas caldas, fato que ocorre devido ao tipo de superplastificante utlizado. Sabe-se que, dependendo da base química do aditivo superplastificante a tensão crítica da mistura pode ser zero ou próxima a zero. (BERTOLUCCI et al, 2007)

Outro fator que influencia no comportamento reológico da calda de cimento é a temperatura da água. Como não foi utilizada água fria no preparo das mesmas, a tensão crítica de ambas foram próximas a zero; caso houvesse sido utilizada a água fria, a tensão crítica tenderia a zero.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 a seguir, apresentam os resultados dos ensaios reológicos para os três grautes selecionados, grautes 3, 6 e 7 respectivamente.

Figura 5.5: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 3.



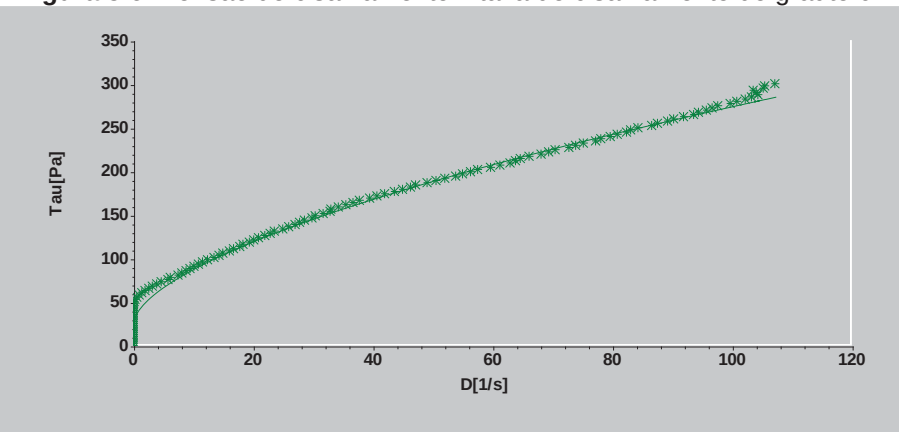
Fonte: Produção do próprio autor

O graute 3 possui uma tensão crítica calculada igual a -2,300 Pa, tendo um comportamento reológico compatível com a de um fluido do tipo HershelBulkley, cuja curva do fluído pode ser representada da seguinte forma, a saber:

- $Y = 9.9042 + 3{,}3234 \times Y^{0{,}98743}$, com um coeficiente de correlação de 0,99881 e um desvio padrão de 3,01.

Nota-se que pela curva do fluido do tipo HershelBulkley, a tensão crítica do graute é de 9,9042 Pa, entretanto, quando efetua-se o calculo com o auxílio do software, a tensão crítica é de -2,300 Pa. Isso ocorre devido ao procedimento realizado com o software para o cálculo da tensão crítica, onde seleciona-se os dez primeiros valores e traça-se uma reta média entre esses pontos e, o ponto onde a reta cruza com o eixo y, corresponde ao valor da tensão crítica.

Figura 5.6: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 6.

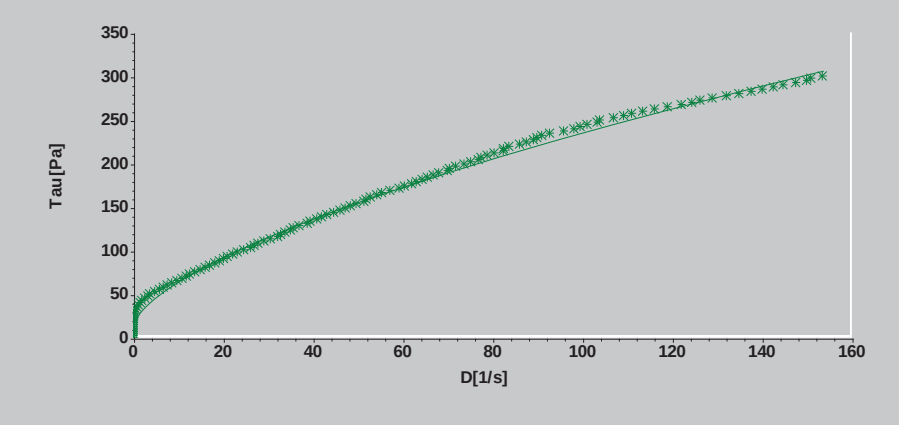


Fonte: Produção do próprio autor

A tensão crítica calculada para o graute 6 é de 49,719 Pa e, seu comportamento reológico é também de um fluido do tipo HershelBulkley, cuja curva pode ser representada da seguinte forma, a saber:

- $Y = 29.928 + 14{,}345 \times Y^{0{,}61682}$, com um coeficiente de correlação de 0,99305 e um desvio padrão de 7,23.

Figura 5.7: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do graute 7.



Fonte: Produção do próprio autor

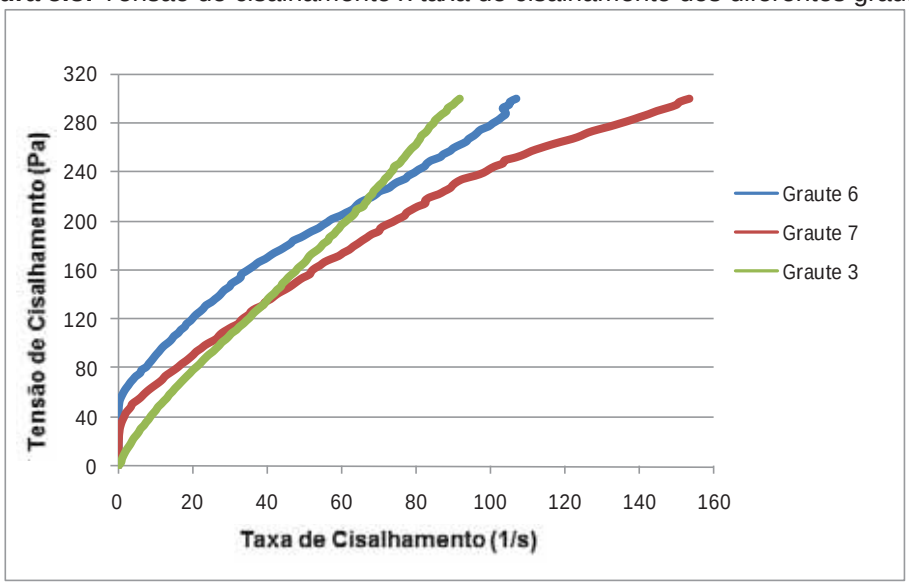
O graute 7 possui uma tensão crítica calculada igual a 20,067 Pa, tendo um comportamento reológico de um fluido do tipo HershelBulkley, cuja curva do fluído pode ser representada da seguinte forma, a saber:

- $Y = 17{,}047 + 10{,}896 \times Y^{0{,}6521}$, com um coeficiente de correlação de 0,99661 e um desvio padrão de 5,09.

Nota-se que tanto os grautes como as caldas de cimento apresentaram um comportamento do tipo HershelBulkley e que os parâmetros reológicos obtidos estão dentro dos valores encontrados na literatura conforme visto na tabela 2.1 do capítulo 2, onde as tensões críticas de pastas de cimento e dos grautes estão entre 10-100 Pa e sua viscosidade variando de 0,01-1 Pa.s.

A Figura 5.8 a seguir, mostra o gráfico comparativo entre os ensaios reológicos para os três grautes pré-selecionados e que foram ensaiados submetidos aos ensaios reológicos.

Figura 5.8: Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento dos diferentes grautes.



Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar pela Figura 5.8, que o graute 6 apresenta uma tensão crítica superior aos demais, tendo sido necessário aplicar maior tensão para início do escoamento do material. Nota-se que a viscosidade do graute 6 é maior do que à dos demais grautes, devido a inclinação da curva ser maior do que o dos grautes 3 e 7, valores que são confirmados pelas curvas de HershelBulkley obtidas para os três grautes. As viscosidades plásticas de HershelBulkley são obtidas pelo coeficiente da reta da curva, que no caso para os grautes 3, 6 e 7, são respectivamente: 3,3234 Pa.s, 14,345 Pa.s e 10,896 Pa.s.

Não foi possível determinar a viscosidade aparente média dos grautes, pois ao se utilizar o sistema de haletas do tipo Vane, quando se tentava vencer a tensão crítica do fluido, o spindle começava a aumentar a sua rotação de tal forma que formava uma vórtice, mudando o regime de escoamento laminar para um regime de escoamento turbulento. Dessa forma, as fórmulas pré-definidas no software passam a não ser mais válidas devido à mudança de regime do escoamento.

5.4. DOSAGEM DO CONCRETO

Para a realização dos ensaios de adesão e de aderência, buscou-se um concreto cuja composição tivesse características próximas ao concreto utilizado por uma indústria de pré-moldados. Na composição do concreto foi utilizado o cimento

do tipo CP-V-ARI PLUS, agregados miúdo do Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida e agregado graúdo pedreira localizada na cidade de Icém – SP, tendo sido obtido um slump de 4,7 cm.A composição do mesmo esta descrita na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Dosagem do concreto.

Materiais	kg/m^3
Cimento	400
Areia Média	569
Areia Fina	244
Brita 1 – 16mm	1007
Água	199,9

Fonte: Produção do próprio autor

Foram moldados um total de 27 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para a obtenção das propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão axial, resistência à tração e módulo de elasticidade), cujos ensaios foram realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias. A Tabela 5.8 apresenta os resultados dos ensaios obtidos das propriedades mecânicas do concreto, cujoscorpos de prova foram curados emcâmara úmida saturada.

Tabela 5.8: Resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade do concreto.

		Tensão (MPa)		Tensão Diametral (MPa)		Módulo Elasticidade (GPa)	
		Ind.	Média	Ind.	Média	Ind.	Média
Idade (dias)	3	30,1	31,5	3,89	4,05	31,4	32,2
		36,3		4,29		33	
		28,2		3,96			
	7	30	35,7	4,16	4,11	37,2	39,36
		36,3		4,16		41,6	
		40,8		4,02			
	28	37,7	36,4	4,62	4,5	34,8	34,84
		34,2		4,22		34,9	
		37,3		4,65			

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar pela Tabela 5.8 que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o concreto atingiu uma resistência à compressão próxima à 40 MPa aos 28 dias e um módulo de elasticidade próximo de 35 GPa.

5.5. ENSAIOS DE ADESÃO

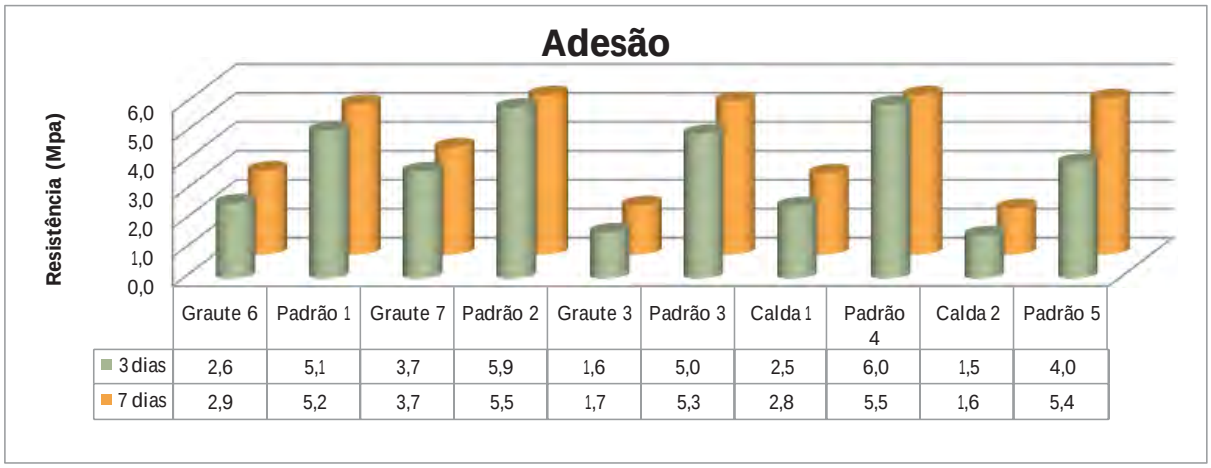
A Tabela 5.9 e a Figura 5.9 a seguir, mostram os resultados dos ensaios de adesão realizados com os três tipos de grautes e as duas caldas de cimento. Este ensaio, detalhado no capitulo anterior, foi realizado com vigas padrão, as quais foram feitas somente com concreto para melhor verificar a perda de adesão. A perda de adesão, foi fornecida em valor percentual, calculada nas idades de 3 e 7 dias com base no valor padrão da viga somente de concreto, sem cavidade, ensaiada à flexão da mesma maneira.

Tabela 5.9: Perda de adesão dos grautes e das caldas de cimento.

	Tensão (MPa)		PERDA DE ADESÃO (%)	
	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
Graute 6	2,6	2,9	49,02	44,23
Padrão 1	5,1	5,2		
Graute 7	3,7	3,7	37,29	32,73
Padrão 2	5,9	5,5		
Graute 3	1,6	1,7	68,00	67,92
Padrão 3	5,0	5,3		
Calda 1	2,5	2,8	58,33	49,09
Padrão 4	6,0	5,5		
Calda 2	1,5	1,6	62,50	70,37
Padrão 5	4,0	5,4		

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.9: Ensaios de adesão das vigas com cavidades preenchidas com graute e calda de cimento nas idades de 3 e 7 dias e suas vigas padrões de concreto.



Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar que o graute3 e a calda de cimento 2 obtiveram um comportamento de adesão bem próximos, chegando a uma perda de adesão de quase 70% aos 7 dias de cura do material.

Apesar do graute 6 ter apresentado valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade maiores do que os do graute 7, ao se analisar os resultados de adesão, verificou-se que o graute 7 possui um ganho de 21,6% se comparado ao graute 6, tendo assim uma melhor adesão ao concreto.

A calda 1 apesar de ter um baixo módulo de elasticidade, conseguiu obter um comportamento bem semelhante ao graute 6 em termos de adesão. Isso demonstra que mesmo tendo apresentando um módulo abaixo de 20 GPa, a calda 1 consegue ter uma boa aderência com o concreto.

Com os resultados apresentados anteriormente definiu-se quais os dois grautes a serem utilizados nos ensaios de aderência, tipo “PULL OUT TEST”, tendo sido selecionados os grautes 6 e 7. Deu-se então prosseguimento aos estudos dos compósitos, passando para a escolha do melhor tipo de bainha a ser utilizada nos ensaios de “PULL OUT TEST” com a utilização dos extensômetros. Para tanto, optou-se por utilizar o graute 7 para o preenchimentos das diferentes bainhas a serem avaliadas, por ter sido o graute que melhor comportamento apresentou no ensaio de adesão (32, 73% aos 7 dias).

5.6. ENSAIOS DE ADERÊNCIA DAS DIFERENTES BAINHAS

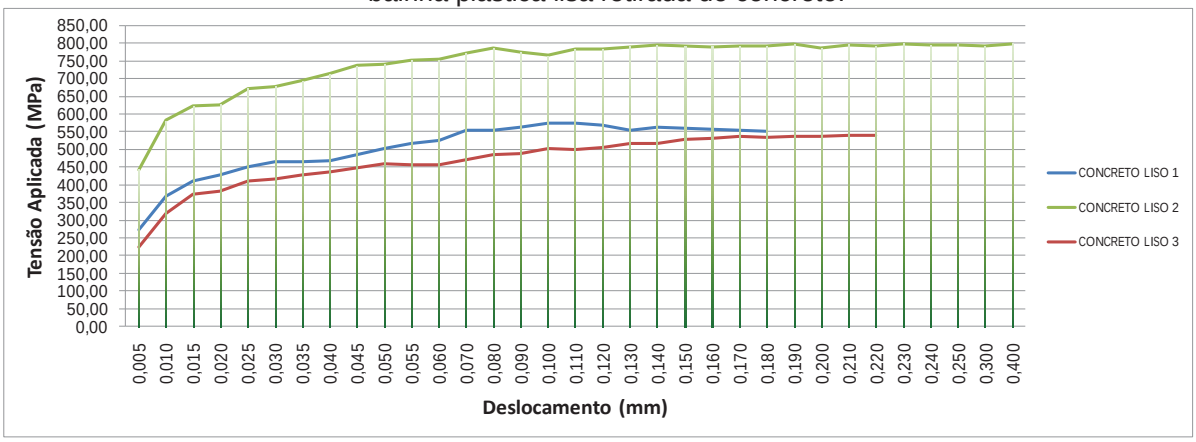
Conforme descrito anteriormente, foram moldados blocos de concreto com quatro tipos diferentes de bainhas, dispostos da seguinte maneira: duas bainhas foram deixadas no bloco de concreto, a bainha metálica e a bainha plástica, sendo ambas corrugadas e, duas bainhas foram retiradas após a desmoldagem dos blocos, a bainha plástica corrugada e a bainha plástica lisa.

O bloco de concreto com a bainha plástica lisa retirada foi denominado de concreto liso, enquanto que o bloco de concreto com a bainha plástica corrugada retirada chamou-se de concreto corrugado. Para as demais bainhas mantidas nos blocos foram utilizadas as seguintes denominações, tubo metálico para a bainha metálica corrugada e tubo plástico para a bainha plástica corrugada.

5.6.1 Bainha Plástica Lisa retirada do Concreto (Concreto Liso)

A Figura 5.10 a seguir, ilustra os resultados obtidos para a bainha plástica lisa, a qual foi inserida e posteriormente retirada do bloco de concreto e o comparativo entre as suas médias. Foram ensaiados três blocos. Na Figura 5.11(a) e (b) são ilustrados detalhes dos ensaios de ruptura.

Figura 5.10: Tensão aplicada x deslocamento do ensaio "PULL OUT TEST" para o bloco com a bainha plástica lisa retirada do concreto.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.11 (a) e (b): Dois detalhes do interior dos Blocos de concreto liso após serem ensaiados.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Pelas Figuras 5.11(a) e (b) pode-se observar que os blocos com os tubos plásticos lisos retirados apresentaram o problema de fendilhamento do concreto. Houve uma perda de aderência do graute com relação ao tubo liso do concreto, gerada pela ruptura da aderência mecânica.

Por intermédio da Figura 5.10 nota-se que houve um comportamento muito próximo nos ensaios dos blocos 1 e 3 tendo o bloco 3 apresentado um deslocamento maior. O bloco 2 apresentou um ganho de aderência significativo, tendo sido necessário aplicar uma tensão de 25 MPa a mais do que para os outros blocos. Além disso, esta amostra apresentou um deslocamento maior da barra de aço em relação ao concreto se comparado com as demais, de 0,40 mm do concreto liso 2 contra 0,22 e 0,18 mm dos concretos lisos 3 e 1, respectivamente.

A Tabela 5.10 a seguir apresenta os valores dos comprimentos da barra de aço excedentes ao bloco de concreto no início e ao final dos ensaios de "PULL OUT TEST".

Tabela 5.10: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

	COMPRIMENTO (cm)			
	CONCRETO LISO 1	CONCRETO LISO 2	CONCRETO LISO 3	MÉDIA
INICIAL	*4,641*	*4,856*	*5,275*	4,806
	4,536	*4,894*	*4,635*	
FINAL	*4,699*	*3,269*	*4,623*	4,240
	4,494	*3,38*	*4,973*	

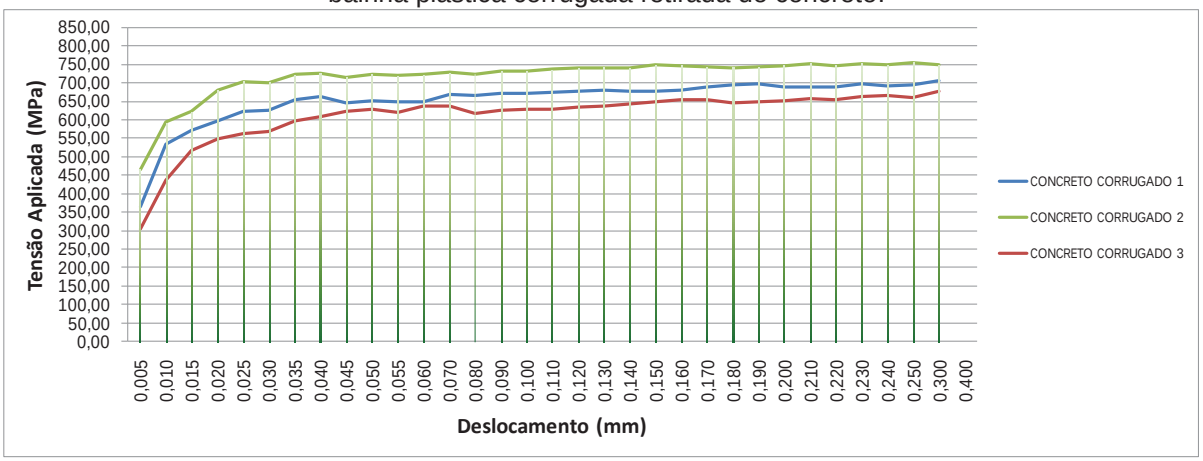
Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar que houve um pequeno deslizamento da barra de aço em relação ao graute, sendo que os maiores deslizamentos ocorreram nos blocos 2 e 3, confirmando o resultado apresentado no gráfico da Figura 5.10, que indica um maior deslocamento do aço em relação ao concreto para os mesmos blocos.

5.6.2 Bainha Plástica Corrugada retirada do Concreto (Concreto Corrugado)

Os resultados obtidos pelo ensaio de "PULL OUT TEST" para o concreto corrugado estão representados pela Figura 5.12 a seguir. Nas Figuras 5.13(a) e (b) são ilustrados dois dos detalhes dos blocos ensaiados, após ruptura.

Figura 5.12: Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha plástica corrugada retirada do concreto.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.13 (a) e (b): Detalhes do interior dos blocos do concreto ensaiados com bainha corrugada, após ensaio POT.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela Figura 5.12 que o concreto corrugado possui um comportamento homogêneo para os três blocos ensaiados, tendo havido o mesmo tipo de deformação final com tensões finais aplicadas próximas.

Pode-se observar pela Figura 5.13 que a aderência entre o graute e o concreto não sofreu ruptura, tendo havido uma aderência melhor do que da configuração anterior. Isso se deve ao fato das nervuras no concreto, que foram obtidas pela retirada da bainha plástica corrugada. Verifica-se que a perda de aderência se deu na interface aço-graute, no qual ocorreu o esmagamento do graute

juntos às nervuras e, dessa forma houve a ruptura do bloco e o desprendimento da barra de aço.

A Tabela 5.11 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida. Verifica-se que não foram realizadas leituras finais após os ensaios de POT, devido ao problema gerado pela forma de ruptura do bloco. Como houve o esmagamento da região do graute junto às nervuras, a ruptura ocorreu de maneira brusca, acarretando no desprendimento da barra de aço em relação ao graute.

Tabela 5.11: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

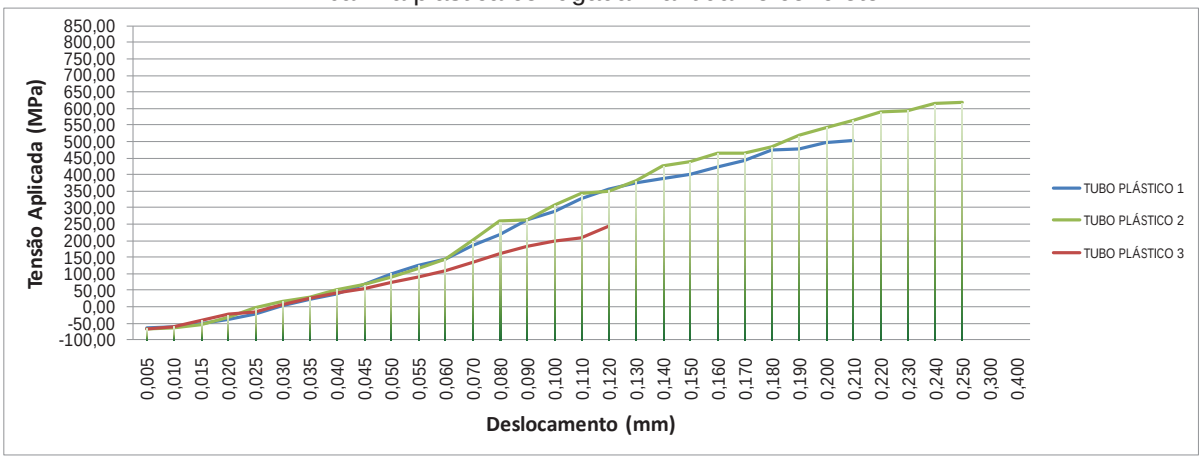
	COMPRIMENTO (cm)			
	C. CORRUGADO 1	C. CORRUGADO 2	C. CORRUGADO 3	MÉDIA
INICIAL	*5,075*	*5,016*	*4,982*	4,923
	4,825	*4,825*	*4,813*	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.6.3 Bainha Plástica Corrugada mantida no Concreto (Tubo Plástico)

A seguir estão representados na Figura 5.14 e na Tabela 5.12, os resultados dos ensaios de “PULL OUT TEST” para o tubo plástico, com os detalhes dos blocos depois de ensaiados e os valores dos comprimentos iniciais e finais da barra de aço em relação à bainha, respectivamente.

Figura 5.14: Tensão aplicada x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco com a bainha plástica corrugada mantida no concreto.



Fonte: Produção do próprio autor

Por intermédio da Figura 5.14 pode-se observar que o comportamento dos blocos com bainha plástica corrugada mantida no concreto possui um comportamento quase que linear. O corpo de prova 3 apresentou um valor discrepante com relação aos demais, tendo uma deformação 50% menor do que o corpo de prova 2.

Verifica-se que para as baixas tensões aplicadas este conjunto deforma-se mais do que os demais anteriormente vistos. A justificativa para esse tipo de comportamento pode estar relacionada ao material plástico (bainha), que foi mantida dentro do bloco, além de ser um material de característica mais maleável que a bainha de aço. As Figuras 5.15(a) e (b) ilustram os blocos após os ensaios.

Figura 5.15 (a) e (b): Blocos com tubo plástico após o ensaio “PULL OUT TEST”.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se notar pela figura anterior, que não ocorreu o fendilhamento do concreto, tendo apenas a barra sofrido um pequeno alongamento devido ao carregamento aplicado.

Tabela 5.12: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

	COMPRIMENTO (cm)			
	TUBO PLÁSTICO 1	TUBO PLÁSTICO 2	TUBO PLÁSTICO 3	MÉDIA
INICIAL	*4,712*	*4,704*	*4,673*	4,725
	4,684	*4,699*	*4,876*	
FINAL	*4,556*	*4,671*	*4,914*	4,701
	4,611	*4,735*	*4,718*	

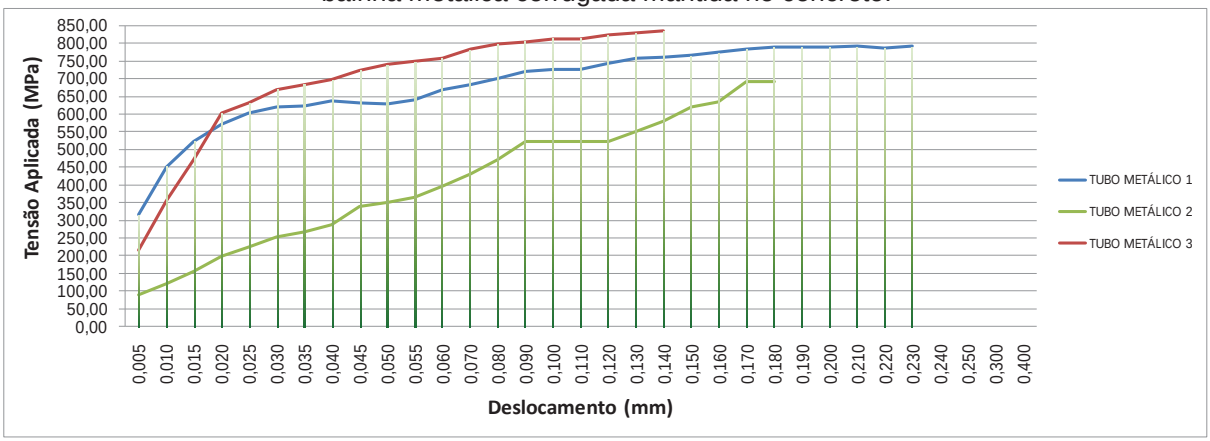
Fonte: Produção do próprio autor

Conforme a tabela anterior verifica-se que não houve o deslizamento da barra em relação à bainha, mostrando que a aderência graute-aço não foi rompida. Há apenas o deslocamento do conjunto bainha-graute-barra em relação ao concreto, devido ao material plástico existente entre o graute e o concreto.

5.6.4 Bainha Metálica Corrugada mantida no Concreto (Tubo Metálico)

A Figura 5.16 traz os valores obtidos no ensaio de "PULL OUT TEST" para o bloco com bainha metálica mantida no concreto e o detalha da ruptura do conjunto. A Figura 5.17(a) e (b) a seguir mostra o detalhe da ruptura dos blocos de concreto.

Figura 5.16: Tensão aplicada x deslocamento do ensaio "PULL OUT TEST" para o bloco com a bainha metálica corrugada mantida no concreto.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.17 (a) e (b): Detalhe do bloco com bainha metálica corrugada após o ensaio POT.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pelas figuras anteriores que houve um comportamento distinto entre os três corpos de prova ensaiados, sendo que para o corpo de prova 3 ocorreu a ruptura da barra de aço devido à carga aplicada no ensaio (cerca de 850 MPa), a qual devido à baixa deformação do conjunto levou a ruptura do aço. Nos demais casos ocorreram apenas o alongamento da barra de aço sem ocasionar no fendilhamento do concreto, mostrando a eficácia da aderência aço-graute-bainha-concreto.

A Tabela 5.13 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida.

Tabela 5.13: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

	COMPRIMENTO (cm)			
	TUBO METÁLICO 1	TUBO METÁLICO 2	TUBO METÁLICO 3	MÉDIA
INICIAL	*5,04*	*4,852*	*4,803*	4,899
	4,957	*4,856*	*4,888*	
FINAL	*5,004*	*4,833*	*4,88*	4,877
	4,912	*4,801*	*4,83*	

Fonte: Produção do próprio autor

Conforme os resultados apresentados pela Tabela acima, verifica-se que não há praticamente o deslizamento do aço em relação ao graute de preenchimento da bainha, o que mostra a boa aderência existente deste conjunto, aço-graute-bainha.

5.6.5 Comparativo entre as diferentes bainhas ensaiadas

A Figura 5.18 a seguir apresenta as curvas médias obtidas para cada uma das situações acima estudadas. Para que se possa comparar qual a melhor bainha a ser utilizada para a determinação da aderência dos diferentes materiais de preenchimento estudados foi realizado um calculo da tensão de aderência, além da analise do tipo de ruptura ocorrido.

Para o cálculo da tensão de aderência utilizou-se a seguinte equação:

$$\tau = \frac{P}{\pi \times \phi \times L_a} \tag{5.1}$$

Onde:

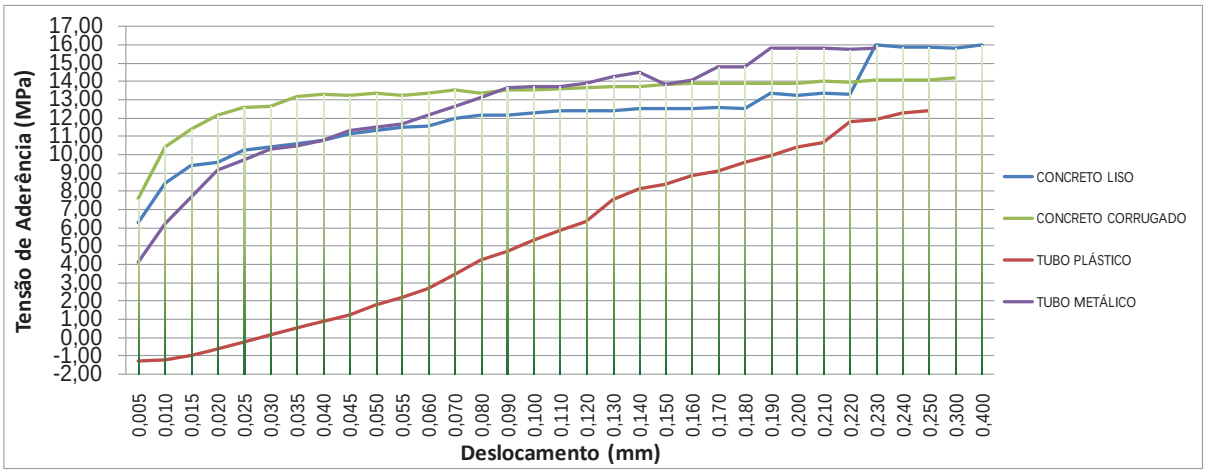
τ = tensão de aderência (MPa);

P = carga aplicada (kN);

ϕ = diâmetro da barra de aço (cm);

L_a = comprimento de ancoragem (cm).

Figura 5.18: Tensão de aderência x deslocamento do ensaio "PULL OUT TEST" para os blocos de concreto com diferentes bainhas utilizadas.



Fonte: Produção do próprio autor

Verifica-se que para todas as bainhas estudadas, as tensões de aderência final foram relativamente próximas. Porém, embora tenha havido pouca variação entre os valores da tensão última de aderência, os comportamentos das amostras foram diferentes.

Conforme já discutido anteriormente, o tubo plástico teve um comportamento quase que linear em função da tensão aplicada, o que mostra que é uma situação que sofre grandes deformações com pequenas cargas aplicadas. Enquanto que,

para as três demais situações, é necessário que se aplique uma carga alta para que se consigam pequenas deformações.

Para escolher qual a melhor bainha a ser utilizada, levou-se em consideração o comportamento dos corpos de prova ensaiados, buscando-se o conjunto que tenha apresentado uma homogeneidade maior, tendo em vista que o concreto liso, concreto corrugado e tubo metálico obtiveram tensões de aderência muito próximas. Dessa forma, concreto corrugado foi o que apresentou o comportamento mais homogêneo, ou seja, a situação com a bainha plástica corrugada retirada do concreto foi a que melhor atendeu nossas perspectivas.

Com a definição da melhor bainha, pode-se dar prosseguimento aos ensaios de “PULL OUT TEST” com as amostras preparadas segundo a normalização RILEM/CEB RC 6 (1983), tendo as armaduras sido instrumentadas por intermédio de extensômetros elétricos colados nas mesmas. Foram testados os diferentes materiais de preenchimento, os dois grautes, as duas caldas e a argamassa escolhidas anteriormente.

5.7. ENSAIOS DE ADERÊNCIA PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

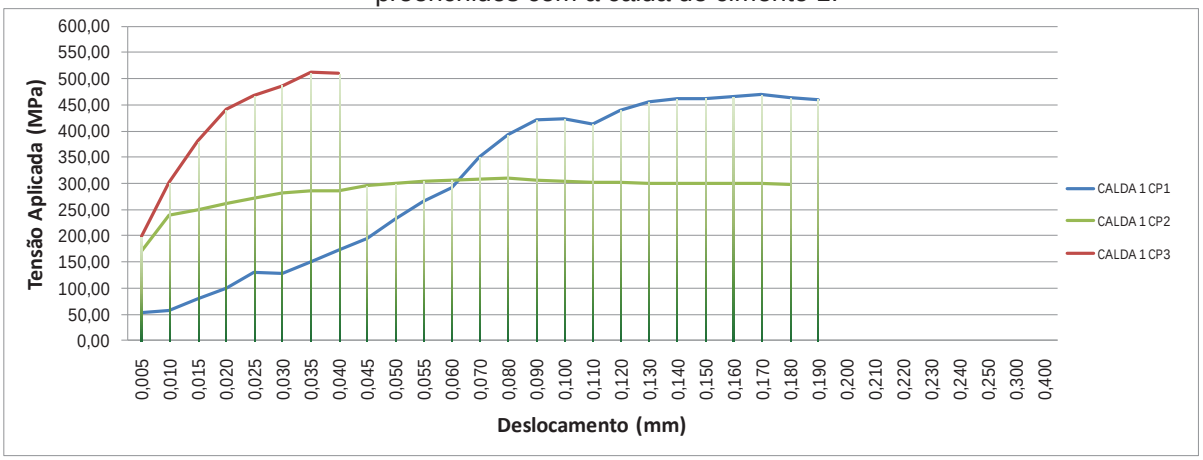
Os ensaios de aderência “PULL OUT TEST” para os diferentes materiais de preenchimento foram feitos de duas maneiras distintas: com leituras utilizando relógio comparador e com leituras, tendo o auxílio de um sistema de aquisição de dados. Os resultados desse segundo ensaio são apresentados no anexo A por se tratar de umagrande quantidade de pontos, obtidos nas leituras dos extensômetros.

Os resultados obtidos apresentados a seguir referem-se as leituras obtidas da forma tradicional do ensaio de POT.

5.7.1 Calda de Cimento 1

A Figura 5.19 traz os resultados obtidos nos ensaios de “PULL OUT TEST” para os três blocos com bainha corrugada retirada do concreto preenchidos com a calda de cimento 1 e, as Figuras 5.20 de (a) a (d)ilustram osdetalhamentos da ruptura de um dos blocos.

Figura 5.19: Tensão aplicada x deformação do ensaio "PULL OUT TEST" para os blocos preenchidos com a calda de cimento 1.



Fonte: Produção do próprio autor

Figuras 5.20: Detalhe da ruptura dos blocos preenchidos com a calda 1 após o ensaio PULL OUT TEST; (a) bloco com fendilhamento, (b)Idem; (c) idem (d) Detalhes internos do bloco após ensaio.

(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela Figura 5.19 que os blocos 1 e 3 ensaiados obtiveram uma tensão aplicada final próximas a 500 MPa enquanto que o bloco 2, atingiu apenas uma tensão aplicada de 300 MPa.

As Figuras 5.20 mostram os detalhes das rupturas encontradas nos ensaios com a calda 1 preenchendo a bainha. Nota-se pelas figuras de (a) até (c) que houve um esmagamento da região entre as nervuras da barra de aço, acarretando assim na perda de aderência. Verificou-se que a barra de aço deslizou para dentro do bloco de concreto, provocando a ruptura do mesmo.

Por meio da Figura 5.19 pode-se perceber que os blocos 1 e 2 obtiveram um maior deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST”, chegando ao valor de 0,190 mm, enquanto que o bloco 3 ensaiado apresentou um deslocamento máximo de 0,040 mm.

A Tabela 5.14 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida. Verifica-se que não foram realizadas leituras finais após os ensaios de POT, devido ao problema gerado pela forma de ruptura do bloco.

Tabela 5.14: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

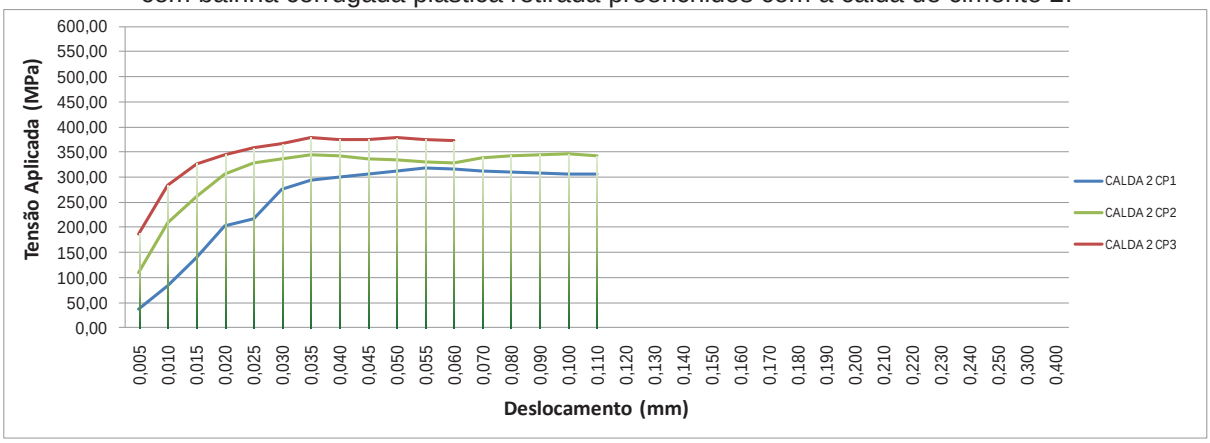
	COMPRIMENTO (cm)			
	CALDA 1 CP1	CALDA 1 CP2	CALDA 1 CP3	MÉDIA
INICIAL	*4,687*	*5,145*	*5,197*	4,974
	4,700	*5,115*	*5,000*	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.7.2 Calda de Cimento 2

A Figura 5.21 traz os valores obtidos nos ensaiosde POT para ostrêsblocosde concreto com a bainha sendo preenchida com a calda de cimento 2.

Figura 5.21: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos de concreto com bainha corrugada plástica retirada preenchidos com a calda de cimento 2.



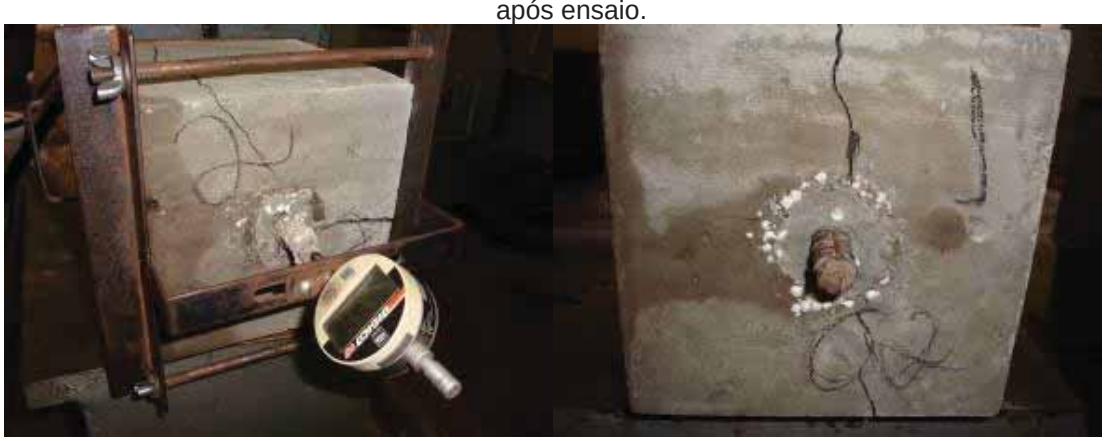
Fonte: Produção do próprio autor

Observando a Figura 5.21, nota-se que os três blocos ensaiados apresentaram uma carga aplicada final aproximadas variando entre 300 e 400 MPa. Verifica-se que ambos os blocos possuem curvas de tensão aplicada x deslocamento semelhantes, tendo um comportamento mais homogêneo, comparativamente aos ensaios com a calda 1.

Nota-se que para os blocos 1 e 2, houve um maior deslocamento da barra em relação ao bloco de concreto, atingindo um valor máximo de 0,110 mm.

As Figuras 5.22 (a) a (d) a seguir, mostram os detalhes da ruptura dos blocos de concreto após os ensaios de “PULL OUT TEST”.

Figura 5.22: (a) Detalhe dos blocos preenchidos com a calda 2 após o ensaio ainda com o relógio comparador instalado; (b) e (c) detalhes da ruptura por fendilhamento, (d) detalhe do interior do bloco após ensaio.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Observa-se pela Figura 5.22(a), (b) e (c) que para os três blocos ensaiados ocorreram os mesmos tipos de rupturas: fendilhamento com esmagamento da região da colocação da calda junto à barra de aço, acarretando na perda de aderência mecânica.

A Tabela 4.22 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida. Com o tipo de ruptura ocorrida, também não se pode realizar a leitura do comprimento final da barra de aço.

Tabela 5.15: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

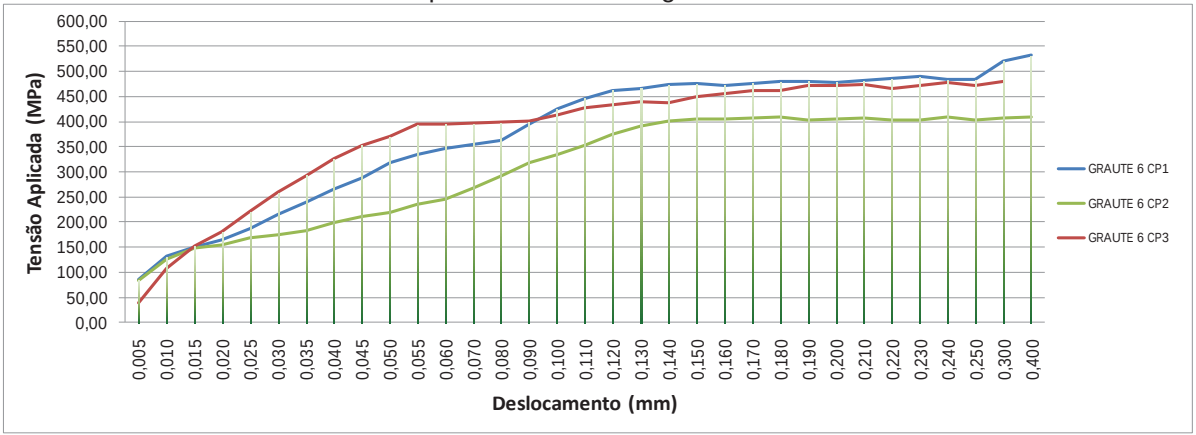
	COMPRIMENTO (cm)			
	TUBO METÁLICO 1	TUBO METÁLICO 2	TUBO METÁLICO 3	MÉDIA
INICIAL	*4,860*	*5,113*	*5,158*	5,046
	5,015	*5,170*	*4,960*	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.7.3 Graute 6

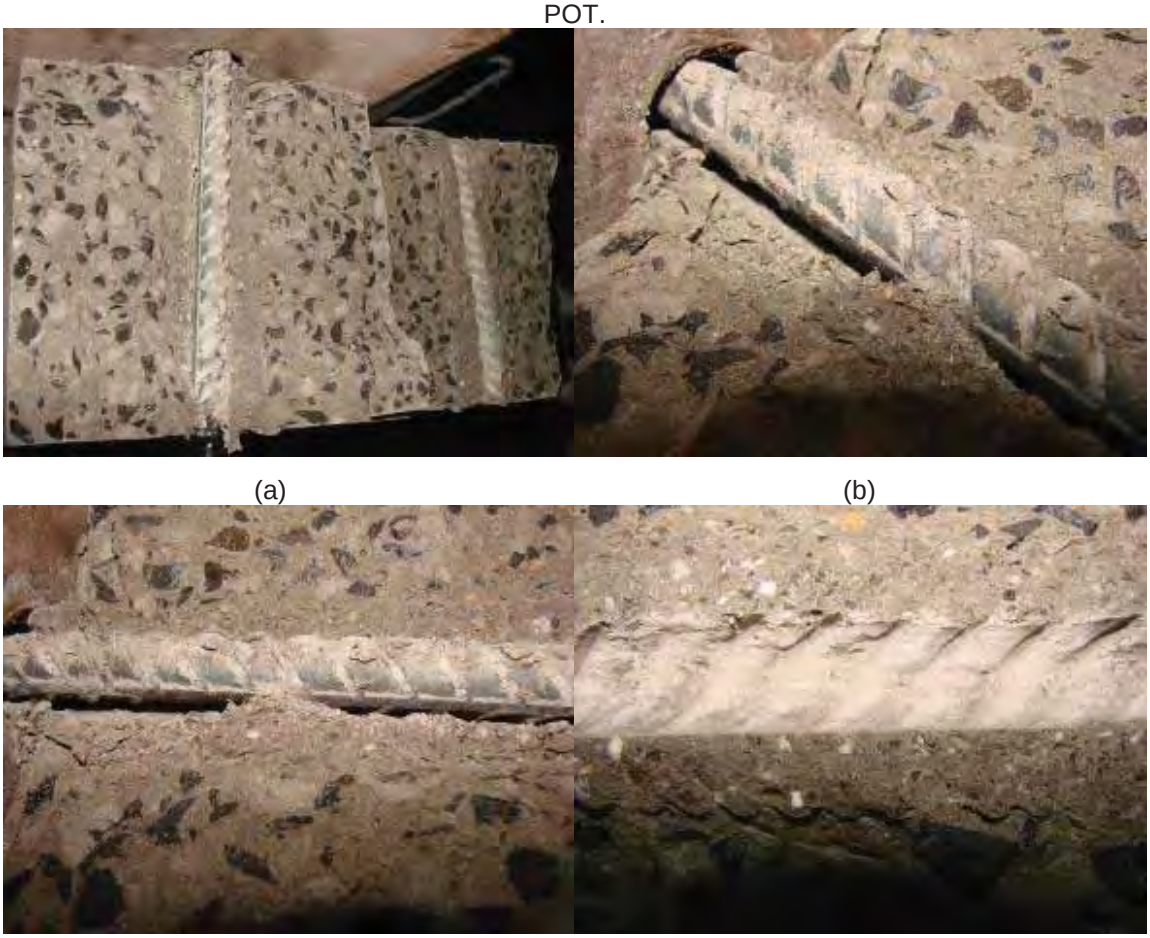
A Figura 5.23 apresenta os valores obtidos no ensaio de "PULL OUT TEST" para os três blocos de concreto preenchidos com o graute 6, enquanto que as Figuras 5.24 (a) ate (d) trazem detalhes dos mesmos após o ensaio.

Figura 5.23: Tensão aplicada x deformação do ensaio "PULL OUT TEST" para os blocos preenchidos com o graute 6.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.24 (a) a (d): Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute6 após o ensaio de POT.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar pela Figura 5.23 que há um comportamento próximo dos grautes quanto à tensão aplicada nos ensaios de POT, obtendo valores de ruptura próximos a 550MPa de tensão aplicada para um dos casos ensaiados. Os três blocos ensaiados apresentaram uma deformação próxima, tendo obtido o valor máximo de 0,400 mm.

Da mesma forma que os blocos preenchidos com as duas caldas de cimento, os blocos preenchidos com graute obtiveram o mesmo tipo de ruptura, ou seja, houve o esmagamento do graute na região próxima da barra de aço, o que acarretou na perda de aderência do conjunto e conseqüente desprendimento da barra de aço.

A Tabela 5.16 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida.

Tabela 5.16: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

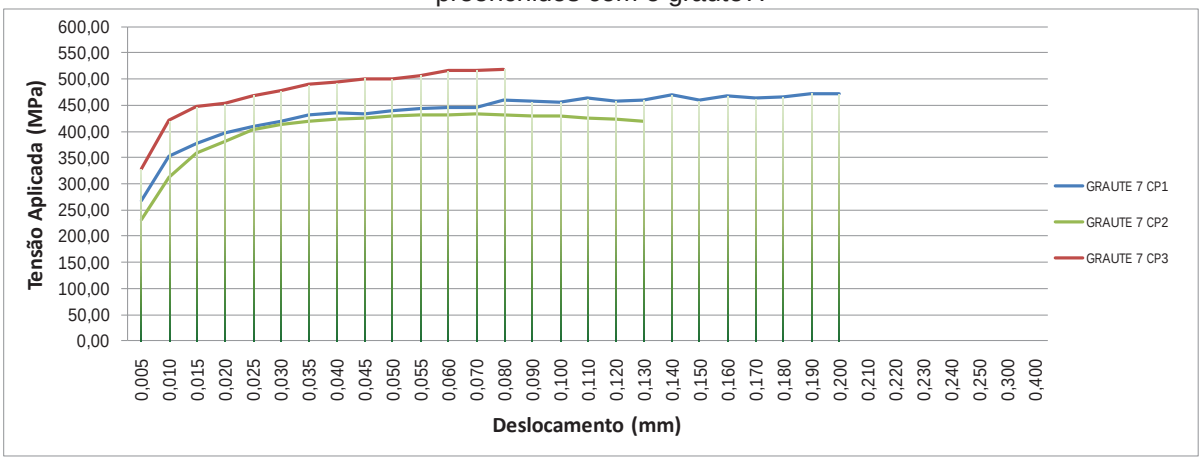
	COMPRIMENTO (cm)			
	GRAUTE 6 CP1	GRAUTE 6 CP2	GRAUTE 6 CP3	MÉDIA
INICIAL	*4,937*	*5,048*	*5,107*	5,025
	5,15	*5,028*	*4,88*	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.7.4 Graute 7

A Figura 5.25 ilustra os valores obtidos no ensaio de POT para os blocos preenchidos com graute 7.

Figura 5.25: Tensão aplicada x deformação do ensaio "PULL OUT TEST" para os blocos preenchidos com o graute7.



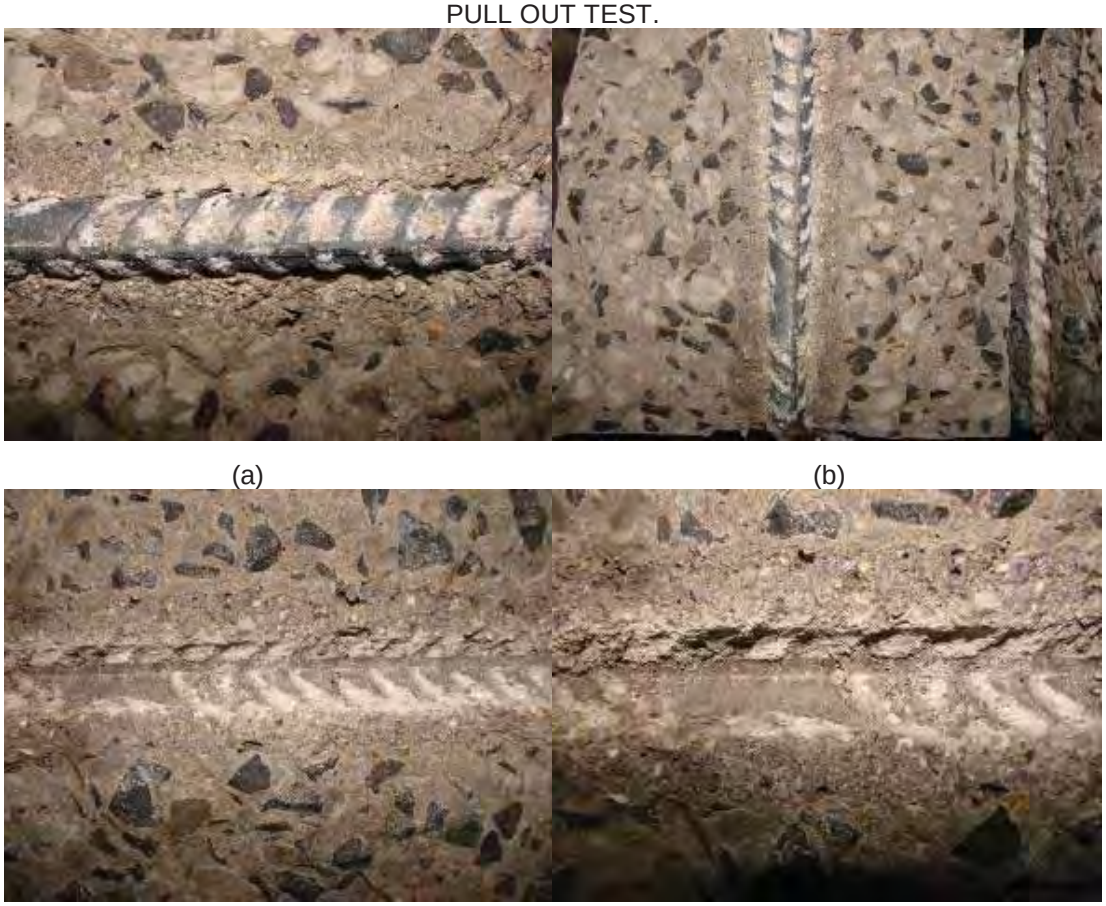
Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela figura anterior que os blocos 1 e 3 apresentam uma tensão aplicada de ruptura superior a 450 MPa, enquanto o bloco 2 apresenta um valor próximo a 450 MPa.

Observa-se que o bloco 1 apresentou um deslocamento superior aos demais blocos, obtendo um valor máximo de 0,200 mm. O bloco 3 foi o que apresentou a maior tensão aplicada, próxima de 550 MPa, entretanto foi o que apresentou o

menor deslocamento, cujo valor máximo foi de 0,080 mm, mostrando que o mesmo obteve um maior intertravamento que por causou este comportamento de elevada tensão e baixo deslocamento. A Figura 5.26 (a) a (d) a seguir traz detalhes da ruptura do conjunto.

Figura 5.26 (a) a (d): Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute 7 após o ensaio de PULL OUT TEST.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

As Figuras 5.26 (a) a (d) mostram os detalhes das rupturas dos blocos após o ensaio de “PULL OUT TEST”, nos quais pode-se observar que houve a ruptura do bloco de concreto, decorrente da perda de aderência mecânica pelo esmagamento da região do graute junto à barra de aço.

Notou-se que o preenchimento feito com o graute apresenta algumas diferenças se comparado com os blocos preenchidos com calda de cimento, como por exemplo, uma maior porosidade devido ao adensamento. Verifica-se que na

interface graute concreto há vazios decorrentes do processo de preenchimento, enquanto que nas caldas de cimento a interface entre a calda e o concreto é preenchida sem vazios.

A Tabela 5.17 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida.

Tabela 5.17: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

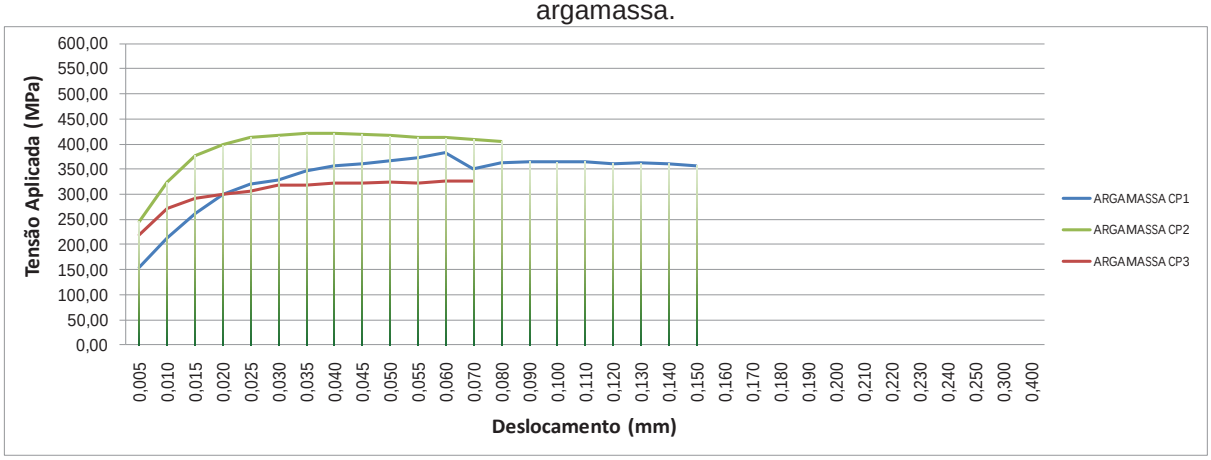
	COMPRIMENTO (cm)			
	GRAUTE 7 CP1	GRAUTE 7 CP2	GRAUTE 7 CP3	MÉDIA
INICIAL	5,250	5,000	4,880	4,904
	4,805	4,787	4,704	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.7.5 Argamassa

A Figura 5.27 ilustra os valores obtidos no ensaio de POT para os blocos preenchidos com a argamassa.

Figura 5.27: Tensão aplicada x deformação do ensaio POT para os blocos preenchidos com a argamassa.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela Figura anterior que os blocos 2 e 3 apresentam um comportamento em relação ao deslocamento semelhantes, obtendo um valor

máximo de deslocamento de 0,080 mm. Observa-se que o bloco 1 apresentou um deslocamento superior aos demais blocos, obtendo um valor máximo de 0,150 mm.

O bloco 2 foi o que apresentou a maior tensão aplicada, entretanto verifica-se que houve o escorregamento da barra de aço que fez com que a tensão final fosse próxima de 400 MPa, tendo o pico de tensão de aproximadamente de 425 MPa com um deslocamento de 0,035 mm. As Figuras 5.28 (a) a (d) a seguir trazem os detalhes da ruptura do conjunto ensaiado.

Figura 5.28 (a) a (d): Detalhes do interior dos blocos preenchidos com o graute 7 após o ensaio de POT.

(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Pode-se observar que houve a ruptura do bloco de concreto decorrente da perda de aderência mecânica pelo esmagamento da região do graute junto à barra de aço, conforme ilustram as Figuras 5.28 (a) e (b), enquanto que nas figuras (c) e (d) ilustram os detalhes internos dos blocos após ensaio.

A Tabela 5.18 a seguir mostra os valores iniciais e finais de comprimento da barra de aço em relação à bainha preenchida.

Tabela 5.18: Comprimento inicial e final da barra de aço em relação à bainha preenchida.

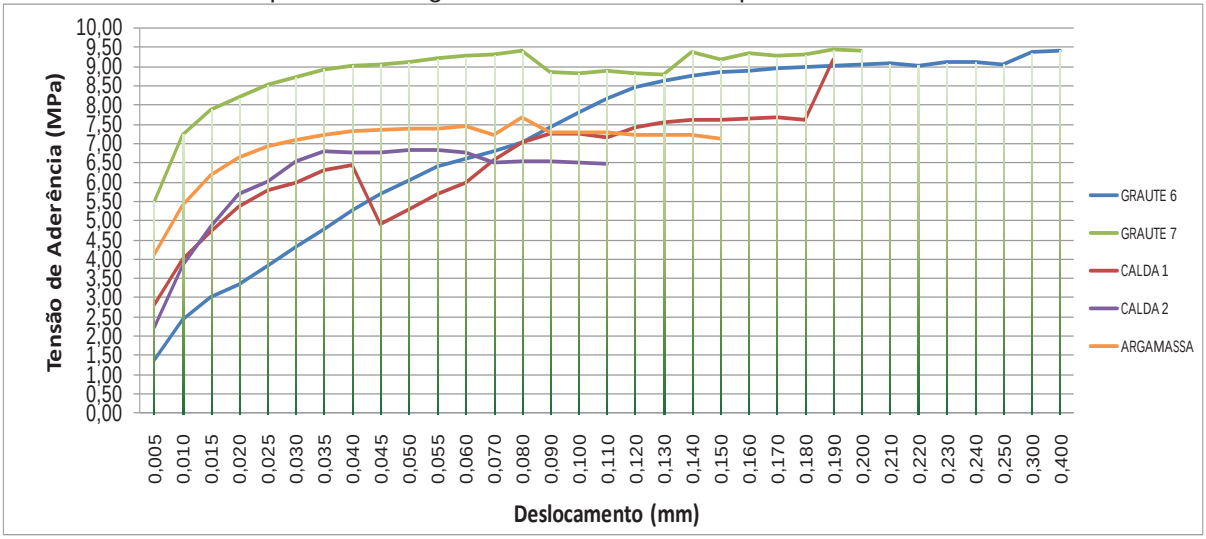
	COMPRIMENTO (cm)			
	TUBO METÁLICO 1	TUBO METÁLICO 2	TUBO METÁLICO 3	MÉDIA
INICIAL	*4,877*	*5,270*	*5,159*	4,997
	4,904	*4,839*	*4,932*	
FINAL	-	-	-	-
	-	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor

5.7.6 Comparativo entre os diferentes materiais de preenchimento

A Figura 5.29 a seguir apresenta as curvas médias obtidas para cada uma das situações acima estudadas. Para que se possa comparar qual o melhor material de preenchimento foi realizado um calculo da tensão de aderência, equação 5.1, conforme o item 5.6.5.

Figura 5.29: Tensão de aderência x deslocamento do ensaio "PULL OUT TEST" para os blocos de concreto com bainha plástica corrugada retirada do concreto preenchidos com diferentes materiais.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que o graute 6 e graute 7 obtiveram valores de tensão de aderência próximos a 9,50 MPa e, conforme mostram as curvas. As curvas obtidas com a

argamassa e calda 2 foram próximas, havendo apenas a diferença da argamassa, que apresentou uma tensão de aderência e deslocamento superior.

Pode-se observar uma maior homogenidade dos resultados obtidos pela calda de cimento 2, o graute 6 e a argamassa por não apresentarem em suas curvas muitas variações de valores.

Ao se comparar os resultados obtidos em relação ao material utilizado, entre as duas caldas de cimento, os dois grautes e a argamassa, nota-se uma maior homogenidade das caldas de cimento e da argamassa, tendo pouca variação de valores, porém os grautes 6 e 7 apresentam comportamentos distintos devido à sua composição, tendo em vista que são de fabricantes diferentes. Embora as caldas de cimento possuam diferentes aditivos superplastificantes em sua mistura, o seu comportamento é muito próximo, verificando assim a baixa influência que o aditivo possui no comportamento no estado endurecido, já que o comportamento no estado fresco, verificado por meio de ensaios reológicos o tipo de aditivo superplastificante exerce grande influência.

Nota-se que apesar dos resultados obtidos com os ensaios de adesão mostrarem um melhor comportamento do graute7, verifica-se que nos ensaios de aderência, o graute que possuiu o melhor comportamento foi o graute 6, que apresentou propriedades mecânicas superiores ao do graute 7 , porém uma adesão menor.

5.7.7 Considerações Finais dos resultados entre os diferentes materiais de preenchimento

A Tabela 5.19 apresenta de maneira resumida os resultados obtidos para todos os compósitos avaliados nos ensaios anteriores e o que nos levou, a escolher a calda 2 e a argamassa como as duas melhores opções para o estudo realizado.

Tabela 5.19: Resumo do comportamento dos diferentes compósitos cimentícios.

Ensaios Realizados	Comportamento mediante os ensaios		
	Caldas 1 e 2	**Grautes (8 tipos)**	**Argamassa**
Propriedades Mecânicas	Aprovadas	Eliminados 5 tipos. Aprovados os grautes 3, 6 e 7.	Aprovado
Ensaios Reológicos	Aprovadas	Aprovados os 3 grautes restantes (3, 6 e 7)	Não realizado
Adesão	Aprovadas, sendo que a calda 1 apresentou melhor desempenho	Eliminado o graute 3. Aprovados os grautes 6 e 7.	Não realizado
Ensaio de Aderência - "PULL OUT TEST"	Aprovadas, sendo que a calda 2 teve melhor desempenho	Eliminado o graute 7. Aprovado o graute 6.	Aprovado

Fonte: Produção do próprio autor

No que tange a escolha tomada temos as seguintes justificativas:

Argamassa: A decisão tomada de eliminar o graute 6 e adotar a argamassa como substituta do mesmo, deve-se ao fato dessa ser um compósito não industrializado e com características similares ao graute industrializado. Além disso, nos ensaios realizados por KATAOKA (2007) já tinha sido utilizado o graute industrial e os resultados obtidos não foram tão satisfatórios. Assim sendo optou-se por utilizar a argamassa desenvolvida em substituição ao graute 6, que foi o que melhor se comportou em todos os ensaios realizados.

Caldas: Entre as duas caldas desenvolvidas uma delas reagiu melhor ao ensaio de adesão (calda 1), enquanto a calda 2 reagiu melhor ao ensaio de "PULL OUT TEST". Em se tratando do preenchimento de ligações semi-rígidas a necessidade de um material mais viscoso, com menor vida útil e que se apresentasse de forma mais homogênea no ensaio de aderência ("PULL OUT TEST"), levou a optar pela escolha da calda 2. Os ensaios de fluidez apresentados na Tabela 5.6 e os resultados de aderência apresentados na Figura 5.21 comprovam esta escolha.

Para melhor avaliar o comportamento dos compósitos selecionados, calda 2 e argamassa, no preenchimento de ligações semi-rigidas, foi previsto e realizado um ensaio em escala real, nas mesmas dimensões daquele realizado por KATAOKA (2007). Os resultados desses ensaios são apresentados no anexo B deste trabalho. A razão de sua exclusão do corpo do mesmo e sua colocação em forma de anexo deve-se ao fato dos problemas operacionais surgidos durante o desenrolar dos ensaios, o que levou a resultados não muito conclusivos.

VI CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo principal estudar e pesquisar um material cimentício que possa ser usado no preenchimento dos nichos verticais, horizontais e das bainhas da ligação entre elementos pré-moldados de concreto, em substituição ao graute comumente utilizado para tal finalidade. Este estudo foi desenvolvido em duas etapas, cujas conclusões são apresentadas separadamente.

Dentre as conclusões obtidas na **primeira etapa** deste trabalho pode-se ressaltar:

CALDAS DE CIMENTO DESENVOLVIDAS

O comportamento da calda de cimento é suscetível aos seus compósitos e ao meio em que ela é preparada.

A temperatura é um fator de grande influência sobre a fluidez da calda de cimento, quer seja a temperatura da água, do cimento, do ambiente, bem como a temperatura da calda em si.

Verificou-se que a calda sofre grande influência do tipo de base química do aditivo superplastificante utilizado, podendo o mesmo modificar o seu índice de fluidez bem como seu comportamento reológico, com referência no índice de viscosidade e nível de tensão crítica, como discutida anteriormente na calda F4.

Outro fator de influência é a composição química do cimento. Enquanto a variação percentual de seus componentes normalmente não é de grande influencia nos concretos, na calda de cimento a modificação de alguns componentes químicos do cimento, faz com que seu comportamento mude completamente, havendo uma redução do tempo de vida útil das misturas. Além disso, pode se ter o aparecimento de corpo de fundo na calda, um aumento no percentual de água de exsudação ou até mesmo uma modificação no traço inicial da calda, mudando o fator água/cimento e a dosagem de aditivo superplastificante.

A metodologia de determinação do índice de fluidez é outro fator de grande influência sobre o comportamento da calda. O índice de fluidez está muito influenciado pelo modo de determinação do mesmo, onde segundo a NBR 7682 a calda deve ser mantida em repouso no período entre as leituras de índice de fluidez. Ao se determinar o índice de fluidez pela Norma e tentando-se reproduzir o que ocorre em canteiro de obra, quando a calda é aplicada, sendo mantida em constante agitação, houve diferenças no índice de fluidez, que é menor quando se utiliza a normalização brasileira, aumentando assim sua vida útil.

Em relação à reologia, o método de agitação constante tendeu a uma diminuição tanto da viscosidade aparente quanto da tensão crítica já que há uma quebra nas ligações devido às pás da hélice da batedeira de calda. É importante evidenciar que com o processo de agitação, ocorreu uma catalisação das reações químicas do aditivo e da calda, influenciando em muito nos parâmetros reológicos. Cabe ressaltar ainda que, essa influência depende em muito do tipo de superplastificante utilizado. Isso ainda é uma incógnita nos processos internos do comportamento reológico de misturas das caldas, sendo objeto de estudo de muitos autores.

Dentre as conclusões obtidas na **segunda etapa** deste trabalho pode-se ressaltar:

GRAUTES

Inicialmente buscou-se estudar o comportamento de oito diferentes grautes de quatro fornecedores distintos existentes no mercado, avaliando-se dessa forma o comportamento dos mesmos tanto no estado fresco como no estado endurecido. Pode-se observar que os grautes em sua grande maioria não apresentam problemas com relação à sua resistência à compressão, pois os valores encontrados estão próximos aos fornecidos pelos fabricantes. Porém, alguns deles apresentaram problemas em relação à trabalhabilidade e a retração.

Mesmo utilizando o máximo de água de amassamento sugerido pelo fabricante, alguns grautes ficaram secos, podendo assim limitar a sua aplicação em casos específicos e, neste caso em especial eles poderiam vir a comprometer o adensamento. Quatro dos oito grautes inicialmente estudados apresentaram

problemas de trabalhabilidade, tendo um abatimento bem inferior aos outros quatros que não necessitaram de golpes na mesa de consistência para conseguir uma abertura superior a 300 mm. Desta maneira, dos oito grautes inicialmente escolhidos, foram selecionados apenas três para a continuação da pesquisa, sendo realizados ensaios de adesão e posteriormente aos resultados de adesão, dois grautes foram escolhidos para que fossem realizados os ensaios de “PULL OUT TEST”.

CALDAS DE CIMENTO E ARGAMASSA

Em busca de desenvolver um material que obtivesse um comportamento no estado endurecido próximo ao dos grautes e que tivesse uma boa fluidez para que diminuísse os problemas em sua aplicação, optou-se por desenvolver, nesta etapa do trabalho, duas caldas de cimento e, posteriormente também uma argamassa. Apesar de apresentarem um valor de retração muito elevado, as mesmas tiveram um bom comportamento mecânico, tendo resistência à compressão axial superior e compressão diametral semelhante à dos grautes, embora o módulo de elasticidade das caldas tenha sido menor que o dos grautes, devido à ausência de agregados em sua composição.

A argamassa desenvolvida apresentou um comportamento bem semelhante ao dos grautes estudados, tendo assim um bom comportamento mecânico, com um módulo de elasticidade próximo ao do concreto e uma baixa retração.

EM RELAÇAO AO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS MATERIAIS

Em relação ao comportamento das caldas e dos grautes no estado fresco, pode-se verificar que para as caldas de cimento, o tipo de aditivo superplastificante utilizado em sua composição exerce grande influência nos parâmetros reológicos. Nota-se que para os três grautes selecionados para a segunda etapa da pesquisa, apenas um deles obteve a melhor abertura média na mesa de consistência, com 361 mm de abertura, tendo o mesmo obtido a maior tensão crítica entre os três grautes ensaiados. Salienta-se que o graute que obteve a menor abertura entre os três grautes analisados quanto ao seu comportamento reológico, apresentou uma tensão crítica igual a zero. Dessa forma, como foram estudados grautes de diferentes

fabricantes, os materiais que compõem a mistura do graute influenciam no comportamento reológico do mesmo, fazendo assim com que possuam diferentes valores de tensão crítica.

EM RELAÇAO AOS ENSAIOS DE ADESÃO

Notou-se que para os ensaios de adesão, as vigas padrões confeccionadas apenas com concreto pré-moldado, sem a presença de cavidade, obtiveram valores próximos. De forma semelhante ao comportamento da aderência, a resistência do material influencia no comportamento, dessa forma o material com maior resistência apresenta uma perda de adesão menor. Pode-se observar um comportamento discrepante apenas para a calda de cimento, apresentando resistência de adesão divergente. As caldas de cimento obtiveram um comportamento de adesão semelhante ao do graute.

EM RELAÇAO AOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA "PULL OUT TEST" PARA AS DIFERENTES BAINHAS

Nos ensaios de aderência "PULL OUT TEST" realizados com os diferentes tipos de bainhas, foram as bainhas plásticas corrugadas retiradas do concreto que obtiveram um comportamento mais homogêneo, tendo sido essa configuração a escolhida para o estudo da aderência dos diferentes materiais de preenchimento.

Nos ensaios de arrancamento das bainhas inseridas nos blocos de concreto, o comportamento predominante foi o de ruptura por fendilhamento do concreto, embora também tenha ocorrido ruptura da barra de aço. Mesmo ocorrendo o fendilhamento do concreto, observou-se que a carga aplicada no conjunto, superou o limite de escoamento do aço CA-50 que é aproximadamente 580 MPa. A bainha metálica foi a única que apresentou em um dos seus corpos-de-prova ensaiados a ruptura da barra de aço.

EM RELAÇAO AOS ENSAIOS DE "PULL OUT TEST" PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

Pode-se concluir que no estudo dos diferentes materiais de preenchimento das bainhas, que as duas caldas de cimento apresentaram comportamento

semelhante e, os grautes, devido à sua diferença de composição, tiveram comportamentos distintos. Já a argamassa obteve um comportamento próximo ao das caldas de cimento, tendo obtido uma tensão aplicada elevada para um baixo deslocamento, indicando que há uma boa condição de aderência da argamassa entre argamassa-concreto-aço, onde toda a tensão aplicada é exercida sob a barra de aço.

Notou-se que, tanto o graute como a calda de cimento que apresentaram os melhores resultados nos ensaios de adesão, ao se realizar os ensaios de arrancamento “PULL OUT TEST” com os diferentes materiais de preenchimentos, não apresentaram uma boa tensão de aderência.

Uma conclusão geral que pode ser ressaltada é que a grande parte dos grautes possuem problemas de fluidez dificultando o preenchimento total das ligações e sua aplicação. Isso foi observado durante o ensaio de espalhamento. Outro ponto importante a ser salientado foi o fato da bainha corrugada apresentar o melhor comportamento no ensaio de arranchamento.

Com a escolha da argamassa e da calda de cimento, especificada ao longo do trabalho como calda número 2, foram realizados ensaios de preenchimentos de juntas da interface e de nichos em ligações viga-pilar de estruturas pré-moldadas de concreto em escala real no laboratório NETPRE na UFSCar em São Carlos – SP.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Tendo em vista os problemas encontrados nos ensaios dos modelos em escala real, sugerem-se alguns pontos para serem mais bem pesquisados.

- Realização de ensaios de preenchimento das ligações com os materiais desenvolvidos em escala real ou reduzida, com rígido controle dos mesmos.

- Em função da fissuração elevada nos modelo, pode-se buscar estudar um modelo com o tipo de bainha diferente, sendo ela corrugada ou então uma bainha metálica, não utilizando mais a bainha lisa.

- É necessário ainda aperfeiçoar os materiais estudados para preenchimento, quer seja um material do tipo da calda de cimento quer seja um material do tipo da argamassa desenvolvida. Mesmo tendo os materiais ora ensaiados obtidos comportamentos satisfatórios na ligação, não se deve unicamente levar em consideração o comportamento do conjunto, mas também o comportamento do estado fresco da mistura, para que tenha uma maior facilidade de aplicação em campo e, poder assim buscar melhorar a condição da retração no caso da calda de cimento, podendo ser utilizado, quem sabe, para tanto, a incorporação de um aditivo expansor.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standart test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced stea*l. Philadelphia: ASTM, 1991. (ASTM, C234)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215:* cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7218:* agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7480:* barras e fios de aço destinados a armadura de concreto armado. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7681:* calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7682:* calda de cimento para injeção: determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR* 7683*:* calda de cimento para injeção: determinação dos índices de exsudação e expansão. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7684:* calda de cimento para injeção: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7685:* calda de cimento para injeção: determinação da vida útil. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522:* concreto – determinação de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9062:* projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado - procedimento. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579:* determinação do índice de finura por meio de peneirados aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12650:* materiais pozolânicos – determinação da variação da retração por secagem devido à utilização de materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12651:* materiais pozolânicos – determinação da eficiência de materiais pozolânicos em evitar a expansão do concreto devido à reação álcali-agregado. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12826:* determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577-4:* agregados – reatividade álcali-agregado – parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-18:* cimento portland – análise química – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-21:* cimento portland –análise química – método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-23: cimento portland e materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-30:* agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-49:* agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-52:* agregado miúdo – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-53:* agregado graúdo – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-76:* determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM-248:* agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BALDISSERA, A. *Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: INTERNATIONAL CEMENT CHEMISTRY CONGRESS, 11, 2003, Durban. *Proceedings…* France: Rilem Publications, 2003. p. 533-539.

BARBOSA, M. T. G. *Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência*. 2002. 203 f. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BERTOLUCCI, F. S.; BARBOSA, M. P.; SANTOS, F. L.; SALLES, F. M. *influência dos aditivos superplastificantes nas propriedades reológicas das pastas de cimento.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. *Anais...* Bento Gonçalves: SBC, 2007.

CATOIA, B. *Estabilidade global de estruturas pré-moldadas com múltiplos pavimentos*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

EL DEBS, M. K. *Concreto pré-moldado:* Fundamentos e aplicações. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2000. 441 p.

FERREIRA, M. A*. Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado*. 1999. 232 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

FERREIRA, M. A. *Estudo de deformabilidades de ligações para a análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados de concreto*. 1993. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

FIB. *FIB guide to good practice:* structural connections for precast concrete buildings. FIB: Commission C6: Prefabrication. Task Group 6.2: Connections. 2003. (Draft Version 2003).
FIGUEIREDO, L. M. B. *Ligações mistas viga-pilar:* análise teórica e experimental. 2004. 253 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

FUSCO, P. B. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 1995. 256 p.

GORGUN, H. *Semi-rigid behavior of connections in precast concrete structures*. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, 1997. Disponível em: <http://etheses.nottingham.ac.uk/1294/1/362894.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2009.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. Deformações por retração e fluência. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto:* ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap 22, v. 1. p. 655-685.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. W. C. O. Concreto de cimento portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.* São Paulo: IBRACON, 2007. Cap 27, v. 2, p. 905-944.

KAEFER, L. F. *Concepção, projeto e realização das estruturas:* aspectos históricos. São Paulo: [S.n.] 1998. 43 p. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef605/HistoriadoConcreto.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2009.

KATAOKA, M. N. *Estudo da continuidade em ligações laje-viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

LEONHARDT, F. *Construções de concreto*. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. 6 v.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto:* estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto:* microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MIGLIORE JÚNIOR, A. R. Edifício pré-moldado com ligação rígida. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1, 2005, São Carlos. *Anais...* São Carlos: USP/EESC, 2005. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/109.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2009.

MIOTTO, A. M. *Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré moldado com ênfase ao estudo da deformação ao momento fletor.* 2002. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

OLIVEIRA, I. R. et al. *Dispersão e empacotamento de partículas:* princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

RILEM, FIP, CEB. Essai portant sur l'adhérence des armatures du betón. 1. Essai par flexion (7-II-28D). 2. Essai par tration (7-II-128). *Recomamdations Provisoires. Matériaux et Construction*, Paris, v. 6, n. 32,p. 96-105, 1973.

SANTOS, F. L. *Estudo teórico – experimental em via de determinação de uma lei de atrito em escoamentos de fluidos hiperconcentrados*. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

SOUZA, A. S. *Comportamento de elementos pré-moldados com ligações semi-rígidas*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

STEIN, H. N. Rheological behavior of suspensions. In: CHEREMISINOFF, N. P. (Ed.). *Encyclopedia of fluid mechanics:* slurry flow technology. Houston: Gulf Publishing, 1986. v. 5, p. 3-47.

TARTTERSALL, G. H. *The workability of concrete*. Slough: Viewpoint Publication, 1976. 138 p.

TEPFERS, R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforced bars. *Magazine of Concrete Research*, London, v. 31, n. 106, p. 3-12, 1979.

VASCONCELOS, A. C.; ISAIA, G. C. Retrospectiva do concreto no Brasil. In: ISAIA, C. G. (Ed.). *Concreto:* ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 2., v. 1.

ANEXO A

1. ENSAIO DE ADERÊNCIA “PULL OUT TEST” PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO COM O AUXÍLIO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

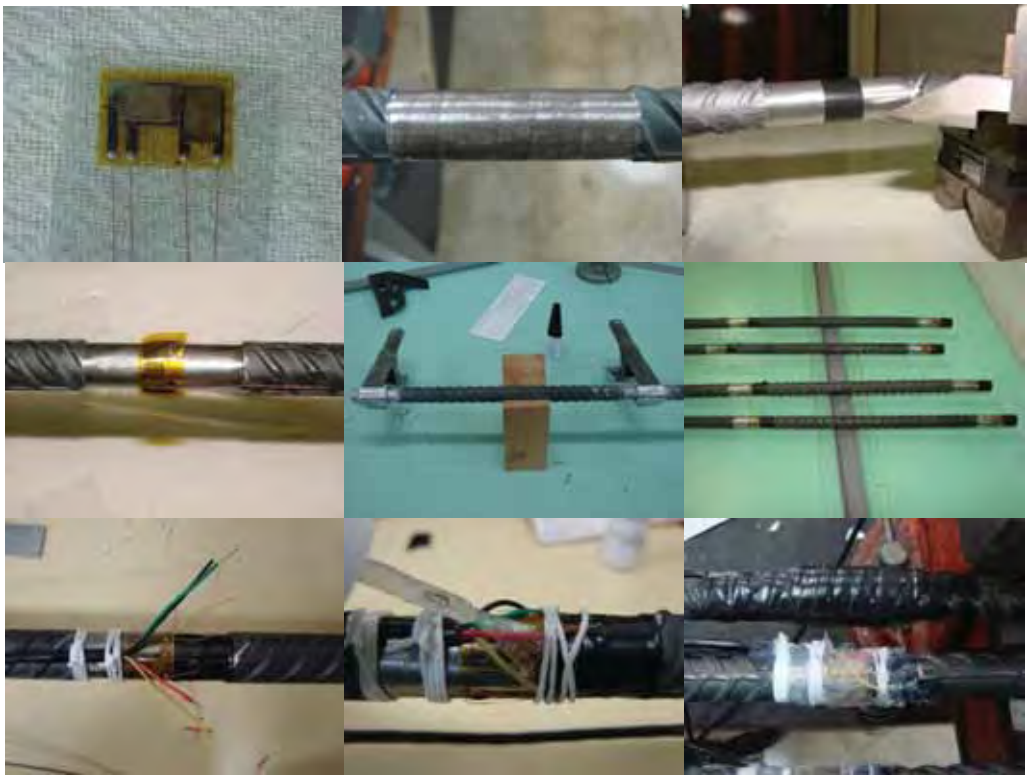
Para medir-se as deformações da barra de aço durante o ensaio de POT, utilizou-se de extensômetros elétricos coláveis do modelo Roseta Dupla a 90º com a expecificação para barras de 16 mm, fabricados pela Excel Sensores Ind. Com. e Exportação Ltda. Para a colagem dos extensômetros, as barras de aço foram cuidadosamente tratadas, sendo feita a retirada da proteção e corrugação de pequenas partes da barra de aço. Após a retirada destas partes, lixou-se a barra para obter uma superfície polida e, sem nenhuma oxidação da barra.

Posteriormente, foi feita a marcação do posicionamento dos extensômetros na barra de aço, em seguida, a superfície polida era limpa com álcool isopropílico para retirar as impurezas da barra. Dessa forma, a superfície estava pronta para receber a colagem dos extênsometros. A colagem foi feita utilizando a cola Super Bonder Precisão da fabricante Loctite e, com auxílio de presilhas o extensômetro era pressionado na barra.

Passado 10 minutos, as presilhas foram retiradas e deu-se início ao processo de soldagem das ligações dos terminais dos extensômetros ao fio condutor. Terminado a soldagem, realizou-se a impermeabilização dos extensômetros, onde primeiramente, passou-se uma resina de silicone líquida para a proteção da ligação e do extensômetro.

Ao final da secagem dessa camada de resina, utilizou-se adesivo de silicone transparente, produzindo uma camada mais espessa de proteção contra umidade e, para finalizar o processo colocou-se uma pequena manta de borracha sobre a camada de silicone e, envolveu-a com fita isolante para dar o acabamento final. A Figura A.1 ilustra todo o processo de colagem dos extensômetros.

Figura A.1: Processo de colagem dos extensômetros elétricos.



Fonte: Produção do próprio autor

Com isso, após o processo de extensometria nas barras de aços deu-se inicio ao preenchimento da bainha com os dois grautes e as duas caldas a serem estudadas. O preenchimento utilizou-se dos mesmos materiais anteriormente descrito, diferindo apenas na altura da placa de isopor colocada para deixar a extremidade da barra externa ao bloco. Utilizou-se além da placa de 5 cm de altura, uma nova placa de 2 cm de altura vazada do centro até a sua extremidade com o intuito de proteger o cabo que foi conectado ao sistema de aquisição. Dessa forma, a altura da barra externa ao bloco foi de 7 cm enquanto que, nos ensaios sem extensometria utilizou-se de 5 cm conforme recomendação da norma RILEM/CEB RC 6 (1983).

Posteriormente ao preenchimento o conjunto foi colocado em câmara úmida, conforme a Figura A.2, tendo sua ruptura efetuada na mesma data de 28 dias de idade do concreto como no ensaio anterior. Tomou-se o cuidado de proteger os cabos e seus conectores com um saco plástico para não ocorrer problemas devido à umidade e água.

Figura A.2: Conjunto colocado na câmara úmida com os cabos protegidos.

Fonte: Produção do próprio autor

Os conjuntos foram retirados 3 dias antes das datas dos ensaios, para que os mesmos secassem ao ambiente e, para a leitura dos extensômetros e da célula de carga, utilizou-se um sistema de aquisição de dados DAQBOOK 112 de 4 canais ligados a um notebook Toshiba TECRA510CDT com o software DASYLab versão 4.01.11, um medidor de deformação digital tipo TMDE da Transdutec para ligar a célula de carga nele primeiramente e depois no sistema de aquisição e, um condicionador dinâmico de sinais com 2 canais que eram conectados os extensômetros que estão funcionando em uma ponte fechada. A Figura A.3 ilustra todo o novo sistema de leituras.

Figura A.3: Sistema de aquisição de dados pronto para a realização do ensaio.

Fonte: Produção do próprio autor

2. ENSAIOS DE ADERÊNCIA PARA OS DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

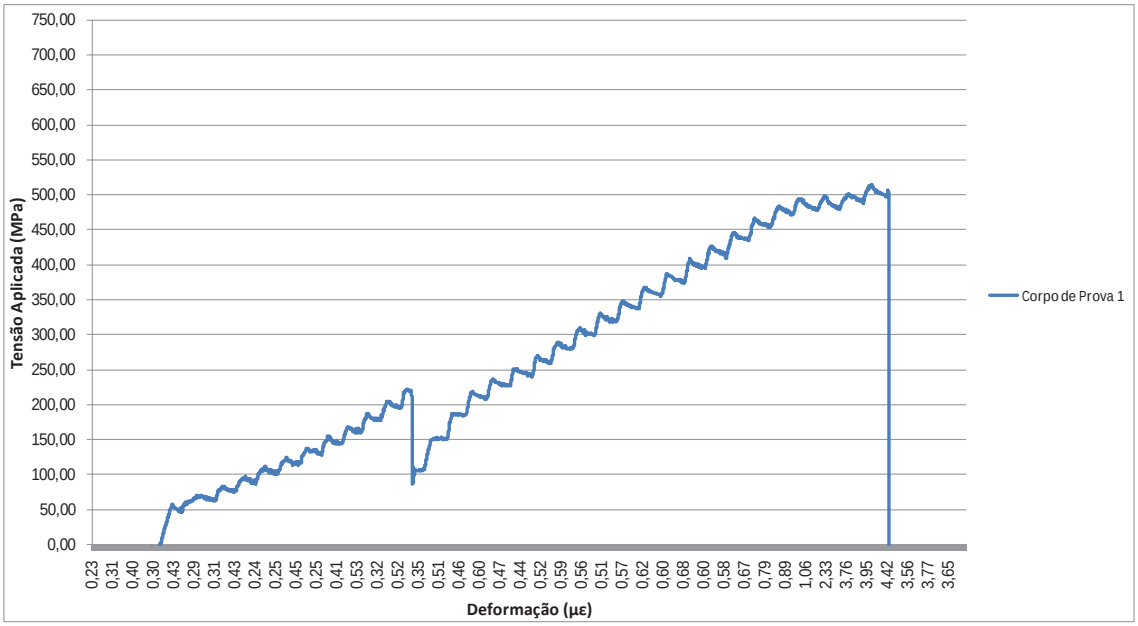
Os ensaios de aderência “PULL OUT TEST” para os diferentes materiais de preenchimento foram feitos com o auxílio de sistema de aquisição de dados e, devido à grande quantidade de pontos obtidos nas leituras dos extensômetros, necessitou-se fazer uma filtragem dos resultados, realizado por intermédio de um programa desenvolvido especialmente para isso, no qual foi calculado uma média entre os pontos encontrados devido à limitação imposta para a confecção dos gráficos.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

1.2.1 Calda de Cimento 1

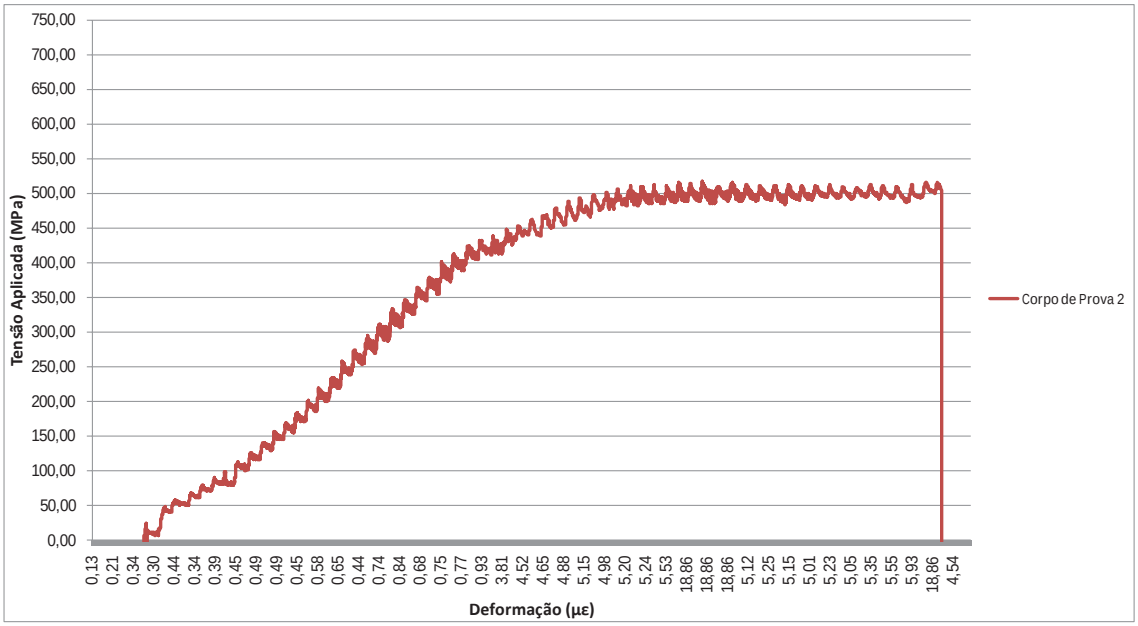
As Figuras A.4, A.5 e A.6 trazem os resultados obtidos nos ensaios de “PULL OUT TEST” para os três blocos com bainha corrugada retirada do concreto preenchidos com a calda de cimento 1 e, a Figura A.7 apresenta detalhamento da ruptura de um dos blocos.

Figura A.4: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 1 preenchido com a calda de cimento 1.



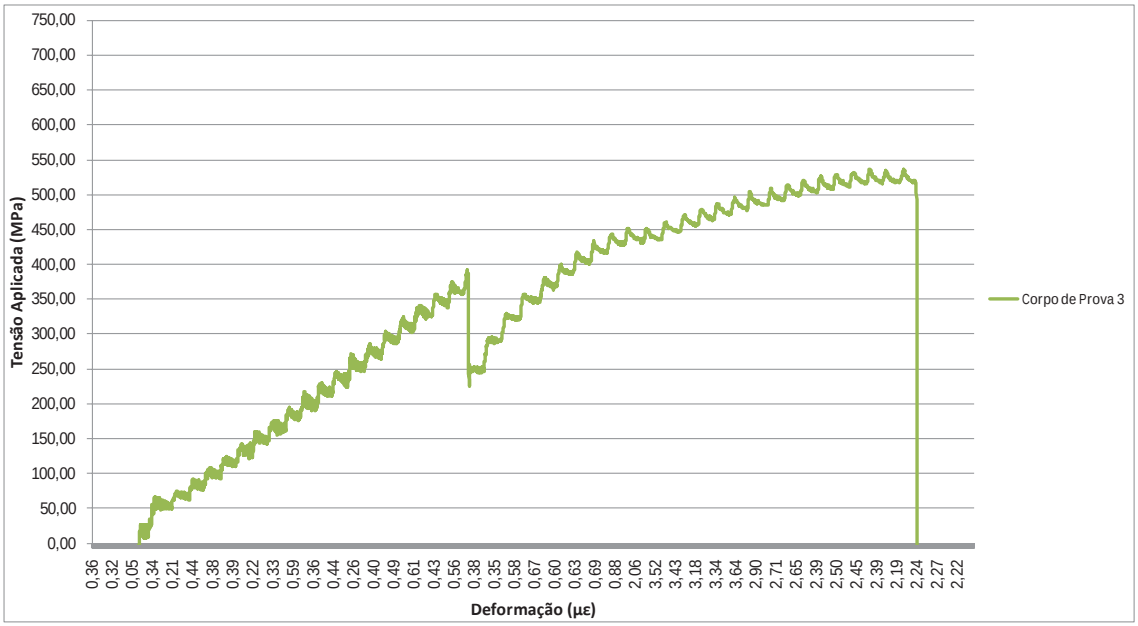
Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.5: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 2 preenchido com a calda de cimento 1.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.6: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 3 preenchido com a calda de cimento 1.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.7: Detalhe da ruptura dos blocos preenchidos com a calda 1 após o ensaio de POT.

Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pela Figura A.4 a A.6 que os três blocos ensaiados obtiveram uma tensão aplicada final próximas a 500 MPa.

Observa-se que para os blocos 1 e 3, enquanto o carregamento era aplicado houve uma caída na tensão, fato que pode ser entendido como sendo uma acomodação do material enquanto era realizado o ensaio, tendo ocorrido uma curvatura da barra de aço no local onde era fixado a cunha.

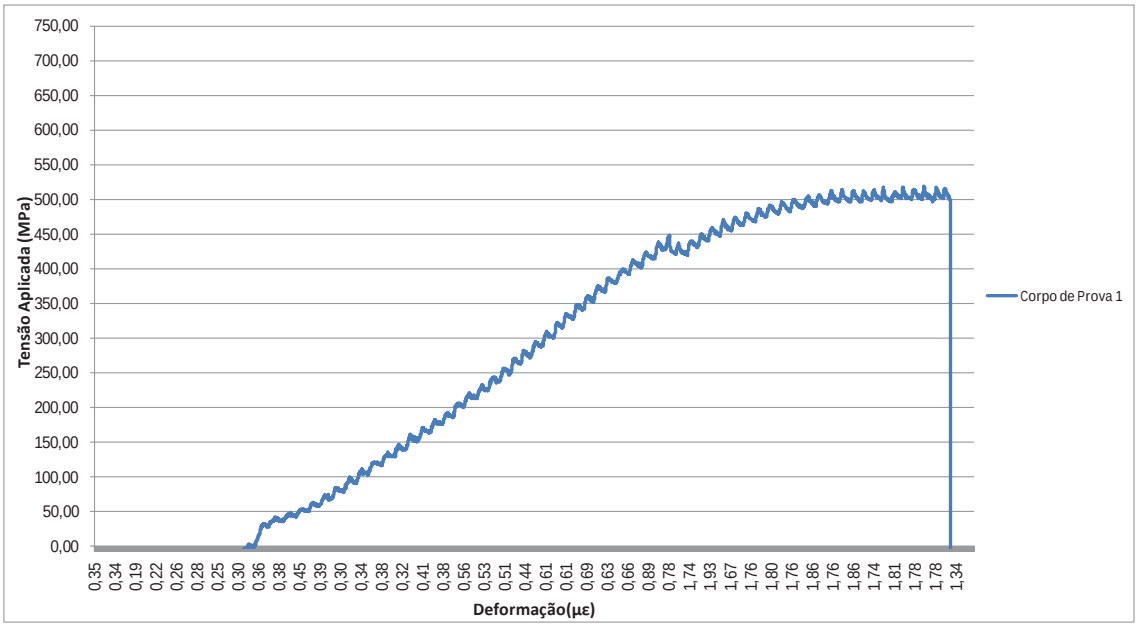
A Figura A.7 mostra o detalhe das rupturas encontradas nos ensaios com a calda 1 preenchendo a bainha. Nota-se que houve um esmagamento da região entre as nervuras da barra de aço, acarretando assim na perda de aderência. Verificou-se que a barra de aço deslizou para dentro do bloco de concreto, provocando a ruptura do mesmo.

Por meio da Figura A.5 pode-se perceber que o bloco 2 obteve uma maior deformação, chegando ao valor de 18,86 με, enquanto que os demais blocos ensaiados apresentaram deformações próximas a 4,0 με.

1.2.2 Calda de Cimento 2

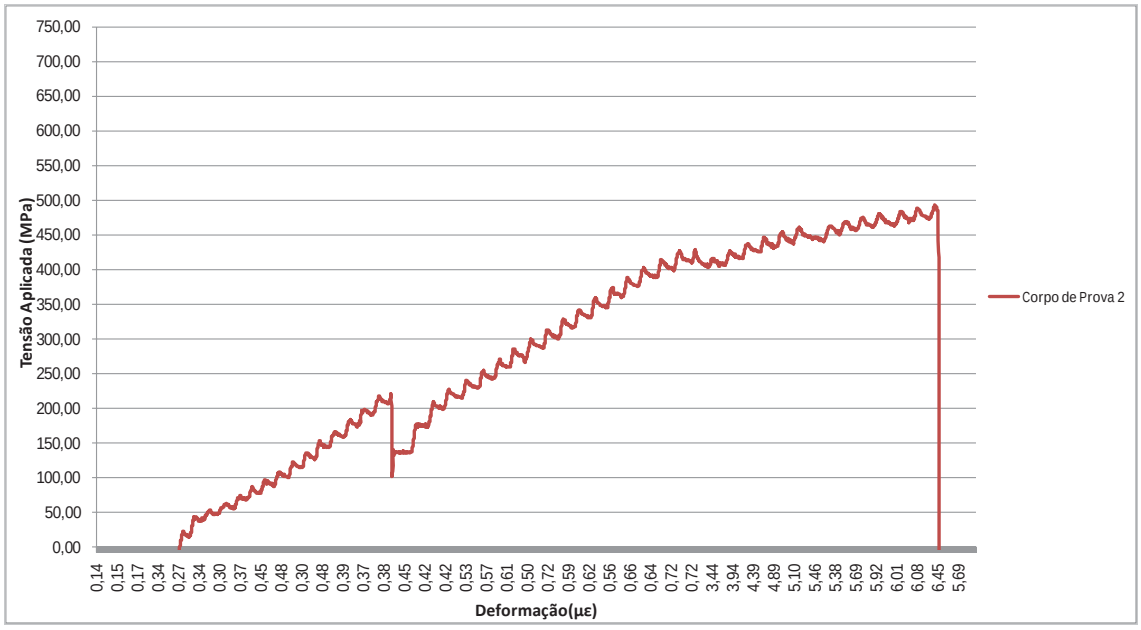
A Figuras A.8, A.9 e A.10 trazem os valores obtidos nos ensaios de “PULL OUT TEST” para os três blocos de concreto com a bainha sendo preenchida com a calda de cimento 2.

Figura A.8: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 1 preenchido com a calda de cimento 2.



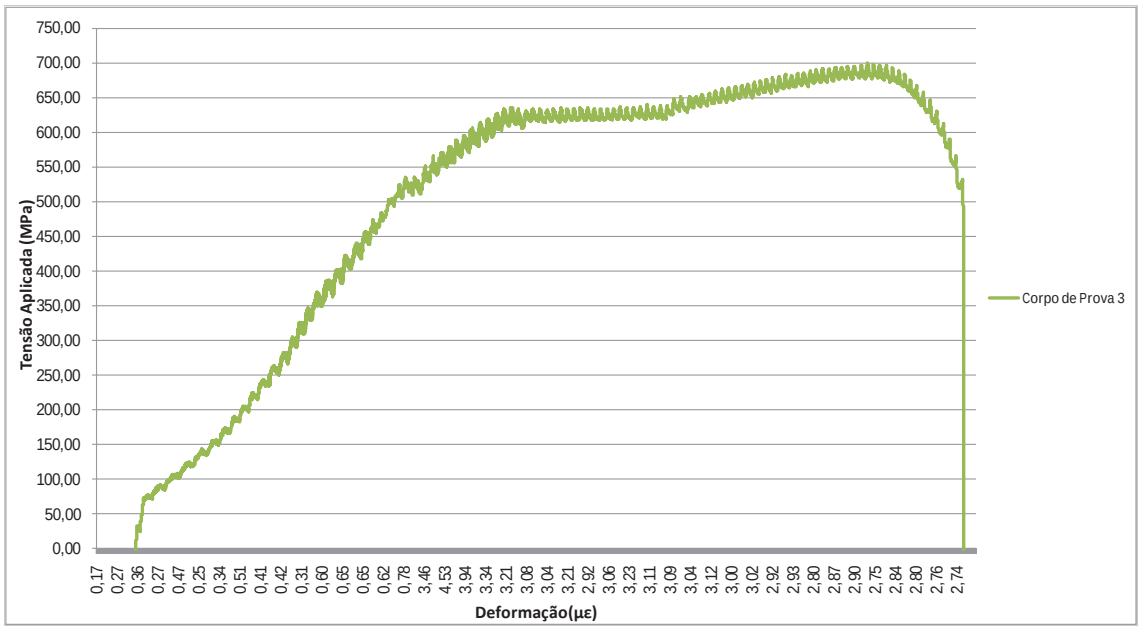
Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.9: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 2 preenchido com a calda de cimento 2



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.9: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 3 preenchido com a calda de cimento 2.

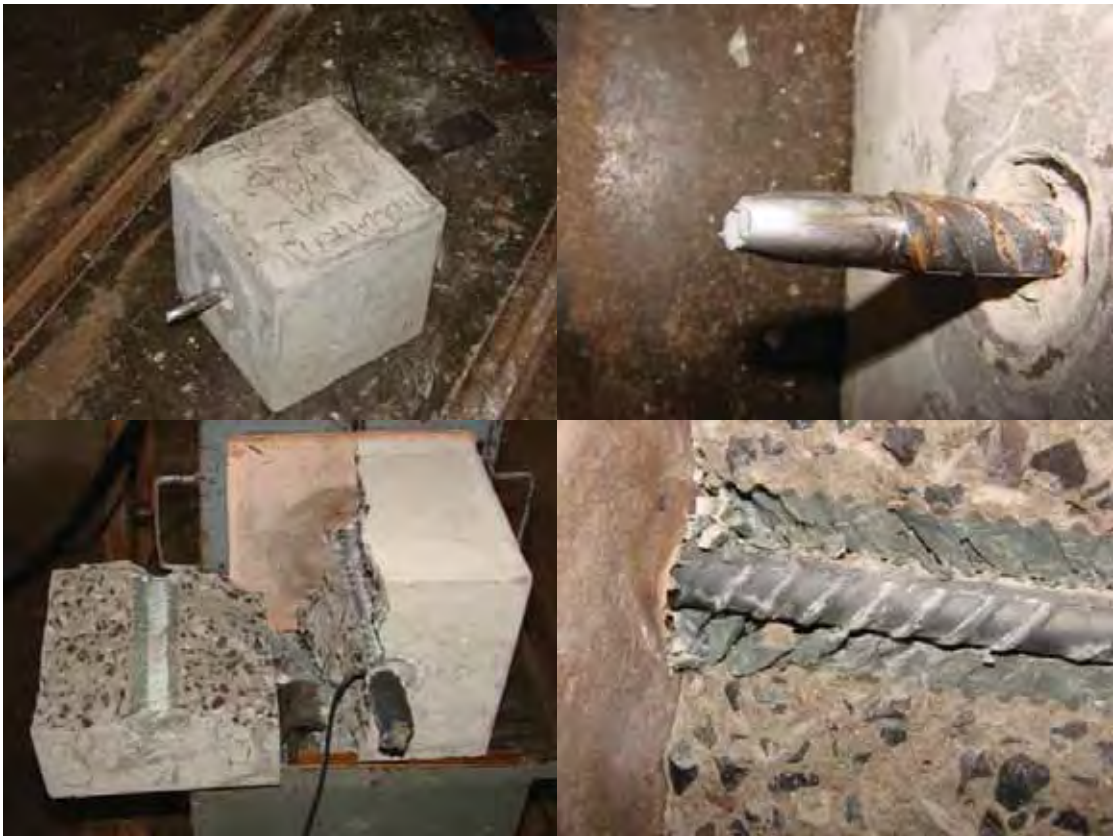


Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pelas figuras anteriores que o bloco 3 foi o que apresentou um comportamento superior aos demais blocos ensaiados, chegando a atingir uma tensão aplicada de 700 MPa. Observa-se que para os blocos 1 e 2, houve uma ruptura brusca, sem diminuição da tensão aplicada para uma mesma deformação, indicando assim a ruptura do bloco e não da barra de aço. Entretanto, no bloco 3, há a diminuição da tensão aplicada para uma mesma deformação, indicando o escoamento do aço até a sua ruptura.

A Figura A.10 a seguir, mostra o detalhe da ruptura dos blocos de concreto após os ensaios de “PULL OUT TEST”.

Figura A.10: Detalhe dos blocos preenchidos com a calda 2 após o ensaio de POT.



Fonte: Produção do próprio autor

Observa-se pela Figura A.10 que para o bloco houve a ruptura da barra de aço no local onde a barra de aço sofreu uma redução na sua seção, necessária para a colagem dos extensômetros e, que o bloco em si não sofreu ruptura, permanecendo intacto.

Para os demais blocos, ocorreu a ruptura do mesmo, devido ao esmagamento da região da calda junto à barra de aço, acarretando na perda de aderência mecânica.

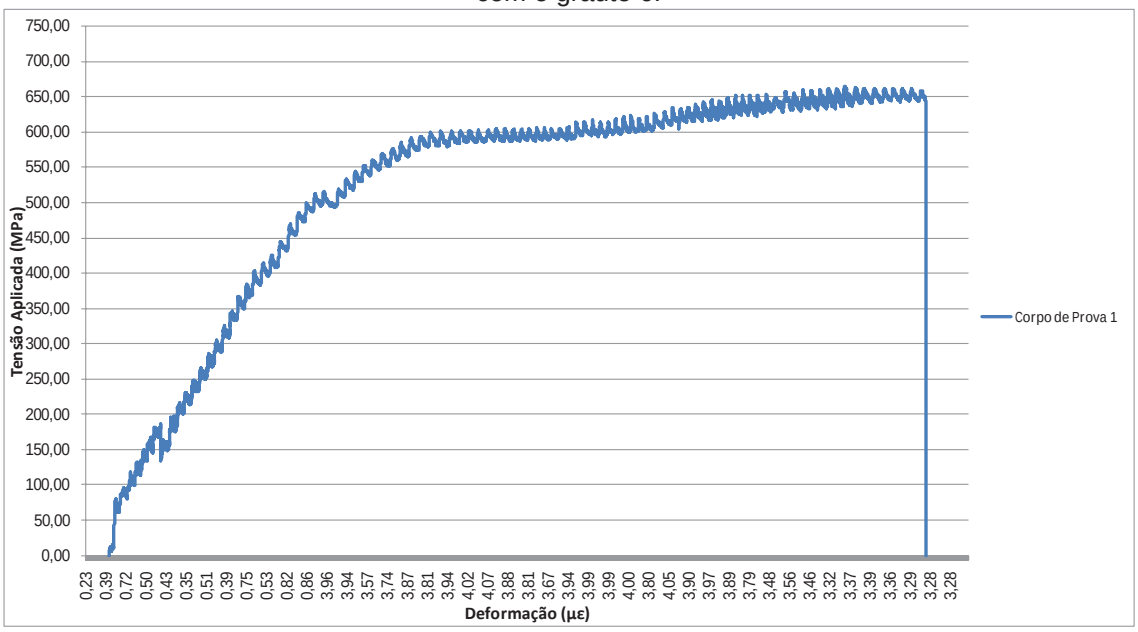
O bloco 2 apresentou uma tensão aplicada próxima à 500 MPa e uma deformação acima de 6,0 με, superior aos demais blocos ensaiados, que chegaram próximos apenas a 5,0 με.

1.2.3 Graute 6

As Figuras A.11, A.12 e A.13 trazem os valores obtidos no ensaio de “PULL OUT TEST” para o três bloco com bainha corrugada retirada do concreto preenchido

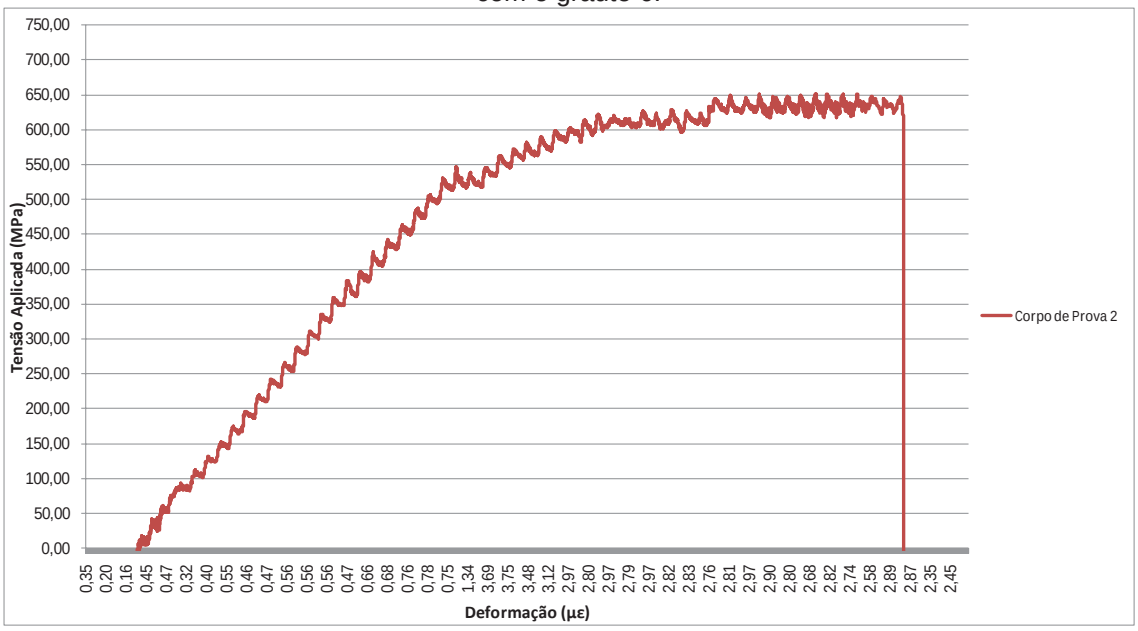
com o graute 6, enquanto que a Figura A.14 traz o detalhe do conjunto após o ensaio.

Figura A.11: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 1 preenchido com o graute 6.



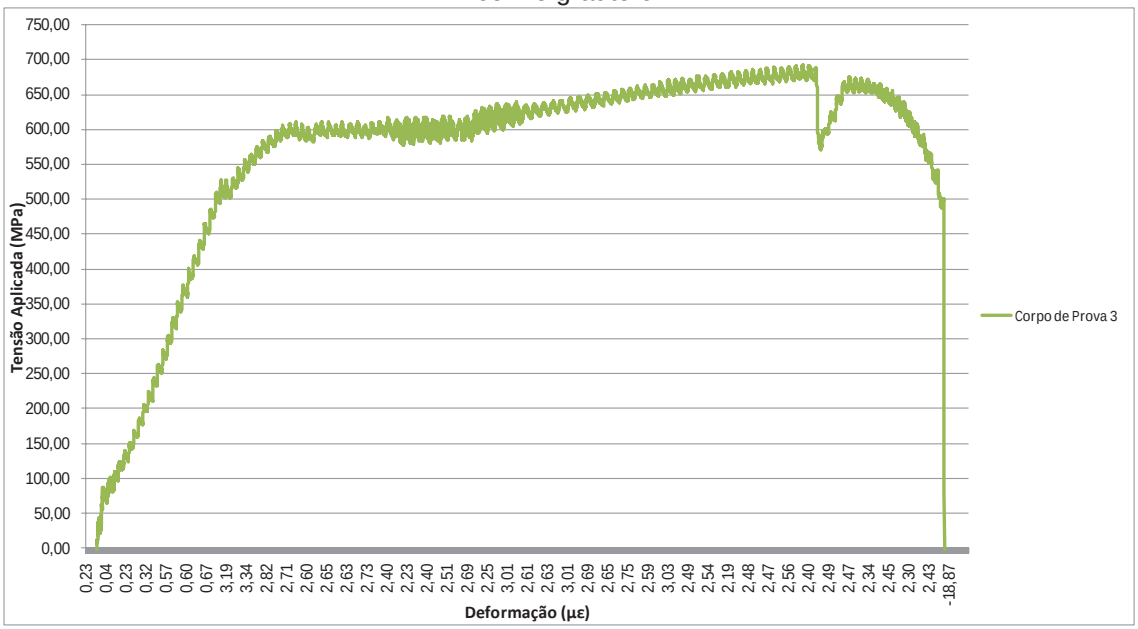
Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.12: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 2 preenchido com o graute 6.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.13: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 3 preenchido com o graute 6.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.14: Detalhe dos blocos preenchidos com o graute 6 após o ensaio de POT.

Fonte: Produção do próprio autor

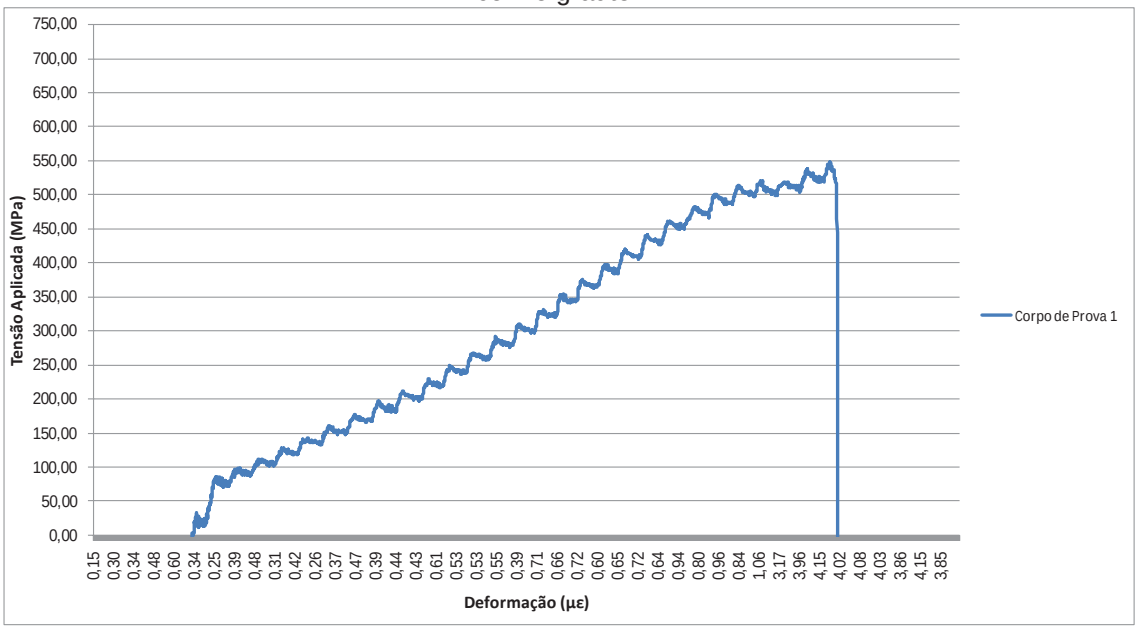
Pode-se observar pelas Figuras A.11, A.12 e A.13 que há um comportamento próximo dos grautes quanto à tensão aplicada nos ensaios de “PULL OUT TEST”, obtendo valores de ruptura próximos a 700 MPa de tensão aplicada. O bloco 3 foi o mais discrepante em termos de deformação, dentre os conjuntos ensaiados, isto se deve ao tipo de ruptura. A ruptura ocorreu na barra de aço e não houve a ruptura do bloco de concreto. Entretanto, para os demais blocos ocorreram a ruptura do bloco de concreto. A Figura A.14 mostra o detalhe da ruptura da barra de aço, que ocorreu novamente na região na qual, houve uma pequena redução da seção transversal para a colagem dos extensômetros.

Os corpos de prova 1 e 2, como tiveram ruptura do bloco de concreto, obtiveram curvas bem próximas e, possuem valores de deformações maiores se comparados ao bloco 3. Nota-se que houve o esmagamento da região do graute junto à barra de aço, acarretando na perda de aderência e desprendimento da barra.

1.2.4 Graute 7

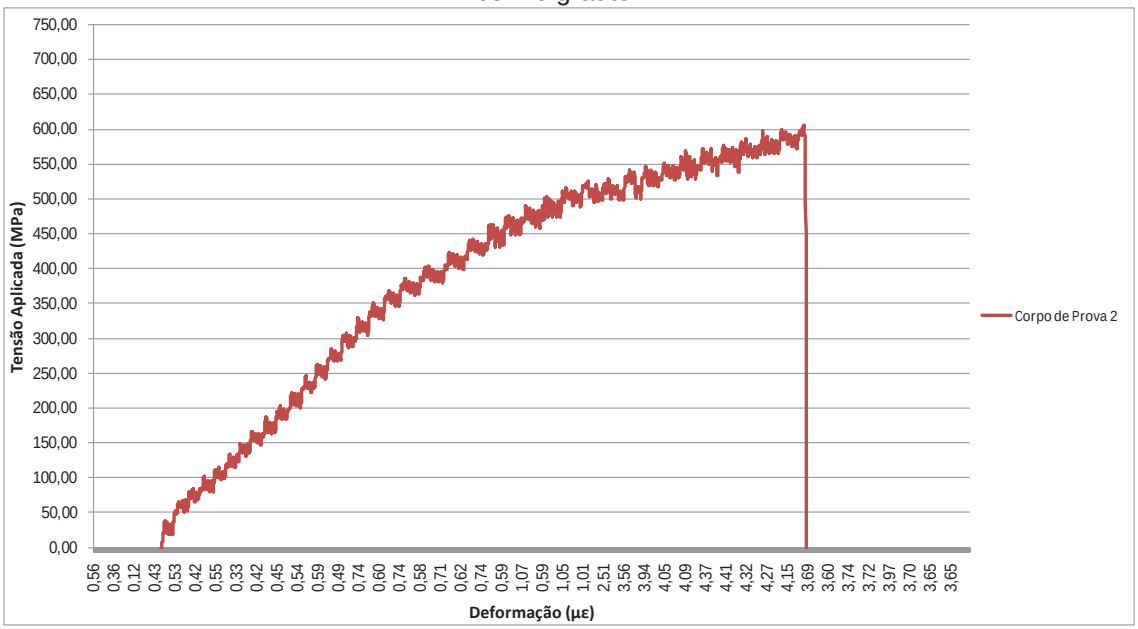
As Figuras A.15, A.16 e A.17 trazem os valores obtidos no ensaio de “PULL OUT TEST” para o bloco com bainha corrugada retirada do concreto preenchido com graute 7 e a Figura A.18 traz o detalhe da ruptura do conjunto.

Figura A.15: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 1 preenchido com o graute 7.



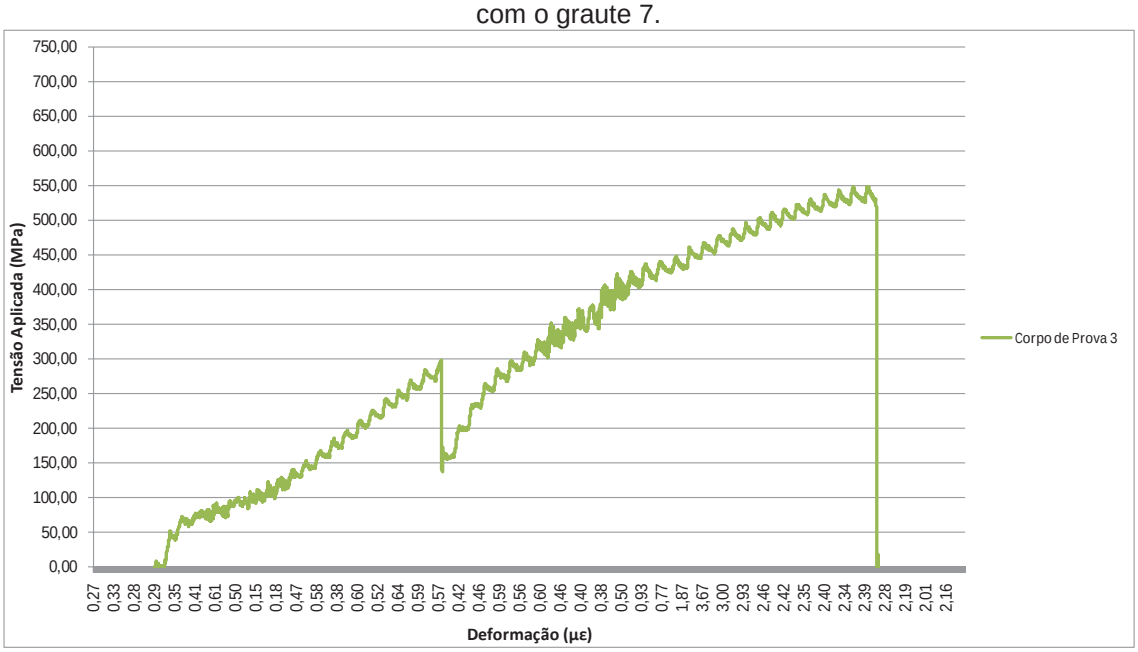
Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.16: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 2 preenchido com o graute 7.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura A.17: Tensão aplicada x deformação do ensaio “PULL OUT TEST” para o bloco 3 preenchido com o graute 7.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se pelas Figuras anteriores que os blocos 1 e 3 apresentam uma tensão aplicada de ruptura próxima a 500 MPa, enquanto o bloco 2 apresenta um valor próximo a 600 MPa.

Observa-se que as curvas 1 e 2 apresentam deformações superiores a 4,0 με, apresentado curvas semelhantes. Entretanto, o bloco 3, apresentou uma deformação próxima a 3,0 με, tendo ocorrido o mesmo “fenômeno” ocorrido com os ensaios dos blocos 1 e 3 preenchidos com a calda de cimento 1, ou seja, uma diminuição da tensão aplicada para a mesma deformação, indicando uma acomodação do conjunto, podendo ter ocorrido um deslizamento da barra de aço em relação ao concreto e, posteriormente ocorreu um novo intertravamento, aumentado a aderência.

As curvas apresentaram uma ruptura brusca, sem qualquer diminuição da tensão aplicada, acarretado pela perda da aderência mecânica.

Figura A.18: Detalhe dos blocos preenchidos com o graute 7 após o ensaio de POT.

Fonte: Produção do próprio autor

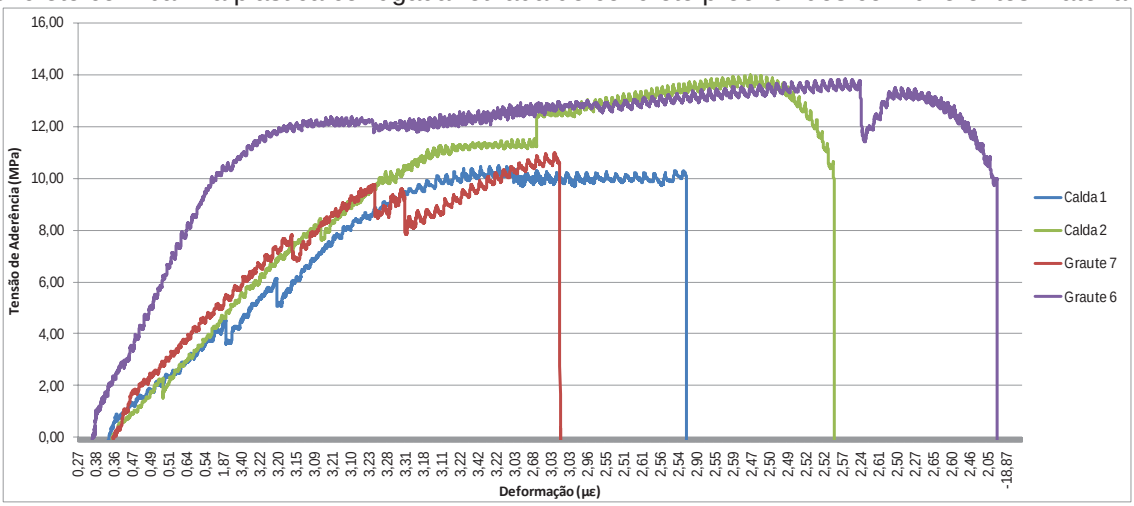
A Figura A.18 mostra o detalhe das rupturas dos blocos após o ensaio de “PULL OUT TEST”, no qual pode-se observar que houve a ruptura do bloco de concreto, decorrente da perda de aderência mecânica pelo esmagamento da região do graute junto à barra de aço.

Nota-se que o preenchimento feito com o graute apresenta algumas diferenças se comparado com os blocos preenchido com calda de cimento, como por exemplo, uma maior porosidade devido ao adensamento. Verifica-se que na interface graute concreto há vazios decorrentes do processo de preenchimento, enquanto que nas caldas de cimento conforme mostrado pelas Figuras A.7 e A.10, a interface entre a calda e o concreto é preenchida sem que haja vazios.

1.2.5 Comparativo entre os diferentes materiais de preenchimento

A Figura A.19 a seguir apresenta as curvas médias obtidas para cada uma das situações acima estudadas. Para que se possa comparar qual o melhor material de preenchimento foi realizado um calculo da tensão de aderência, equação 4.1, conforme o item 4.5.5.

Figura A.19: Tensão de aderência x deslocamento do ensaio “PULL OUT TEST” para os blocos de concreto com bainha plástica corrugada retirada do concreto preenchidos com diferentes materiais.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que a calda 2 e o graute 6 obtiveram valores de tensão de aderência próximos a 14,0 MPa e, conforme mostram as curvas, houve a ruptura do aço, verificada pela perda de tensão para um mesma deformação. As curvas obtidas com o graute 7, calda 1 e 2 foram próximas, havendo apenas a diferença da calda 2, que apresentou uma tensão de aderência superior.

Pode-se observar uma maior homogenidade dos resultados obtidos pela calda de cimento 2 e o graute 6, por não apresentarem em suas curvas muitas variações de valores.

Ao se comparar os resultados obtidos em relação ao material utilizado, entre as duas caldas de cimento e os dois grautes, nota-se uma maior homogenidade das caldas de cimento, tendo pouca variação de valores, porém os grautes 6 e 7 apresentam comportamentos distintos devido à sua composição, tendo em vista que são de fabricantes diferentes. Embora as caldas de cimento possuam diferentes aditivos superplastificantes em sua mistura, o seu comportamento é muito próximo, verificando assim a baixa influência que o aditivo possui no comportamento no estado endurecido, já que o comportamento no estado fresco, verificado por meio de ensaios reológicos o tipo de aditivo superplastificante exerce grande influência.

Nota-se que apesar dos resultados obtidos com os ensaios de adesão mostrarem um melhor comportamento do graute 7, verifica-se que nos ensaios de aderência, o graute que possuiu o melhor comportamento foi o graute 6, que apresentou propriedades mecânicas superiores ao do graute 7 , porém uma adesão menor.

ANEXO B

1 ENSAIOS EM ESCALA REAL

1.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento do material já existente para o preenchimento da ligação entre elementos pré-moldados em conjunto com estudo de materiais que pudessem substituí-los de maneira satisfatória. Com o estudo do comportamento dos diferentes materiais, buscou-se a validação dos mesmos por meio de um ensaio em escala real, se possível já realizado anteriormente e que contasse com resultados que pudessem ser comparados com os realizados para este trabalho. Para tanto, foi escolhido o protótipo usado por Kataoka (2007) em sua dissertação de mestrado, o qual foi fornecido pela indústria de pré-moldados PROTENDIT de São José do Rio Preto - SP.

Kataoka (2007) utilizou dois modelos cruciformes que possuem consolos de concreto com chumbadores, vigas em balanço e laje alveolar apoiada sobre as vigas, os quais receberam uma capa de concreto moldado no local para solidarização da armadura de continuidade. A taxa de armadura de continuidade que passa através do pilar e ao lado do mesmo não é a mesma para ambos os modelos, sendo que no primeiro modelo foi considerado 100% da armadura passando pelo pilar e no segundo modelo 50% da armadura passando pelo pilar e 50% nas laterais.

Um dos grandes problemas encontrados por Kataoka (2007) foi quanto ao comportamento da estrutura do modelo 1 que apresentou alto índice de fissuração principalmente na interface da ligação viga-pilar. Dessa forma buscou-se estudar diferentes materiais de preenchimento para realizar os ensaios em escala real do modelo 1.

1.1.1 Montagem dos protótipos

A montagem do protótipo, conforme projeto do item 3.5 do capítulo 3, foi iniciada com a fixação de chapas metálicas nos consolos para se fazer a ligação do conjunto de ligação viga-pilar-viga. As chapas metálicas cujas dimensões são de 100x50 mm com espessura de 6 mm foram fixadas com massa plástica no local de

giro da ligação e, após esta etapa, realizou-se o encaixe e escoramento das vigas. Para que houvesse melhor aderência na ligação, a face do pilar e da viga que entraria em contato com o material de preenchimento foi apicoado, gerando uma região mais rugosa.

Ao se encaixar a viga nos chumbadores do consolo encontrou-se dificuldade de garantir a vedação do nicho vertical devido ao espaçamento entre as faces, dessa forma buscou-se preencher o nicho com o concreto que foi utilizado para a concretagem da capa da viga.

Após o encaixe e o escoramento da viga, iniciou-se o processo de ancoragem das barras da armadura de continuidade, formada por quatro barras de 16 mm, que foram posicionadas atravessando o pilar por meio do uso de bainhas lisas, que posteriormente foram preenchidas com os diferentes materiais de preenchimento. No mesmo momento que se realizou a ancoragem da armadura, foi feito o preenchimento do furo do chumbador. As Figuras B.1(a), B.1(b), B.1(c), B.1(d), B.1(e) e B.1(f) a seguir mostram as bainhas com a armadura de transpasse, a bainha preenchida com a argamassa, detalhe do suspiro para preenchimento da bainha com calda, preenchimento da bainha com a calda de cimento, evidência do preenchimento total da bainha e bainha final preenchida com a calda, respectivamente.

Figura B.1: Bainhas preenchidas com a argamassa e com a calda de cimento 2.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Fonte: Produção do próprio autor

Após o preenchimento das bainhas, realizou-se a concretagem da capa da viga, conforme ilustram as Figuras B.2 (a) e (b) e B.3(a) a (d). O concreto utilizado para a capa foi comprado de uma usina localizada na cidade de São Carlos-SP com um f_{ck} de 30 MPa. Foram moldados corpos-de-prova 10 x 20 cm para que fossem rompidos no dia dos ensaios dos modelos, tendo obtido a resistência média de 32,5 MPa.

Figura B.2(a) e (b): Detalhes da fôrma da capa da laje da viga.

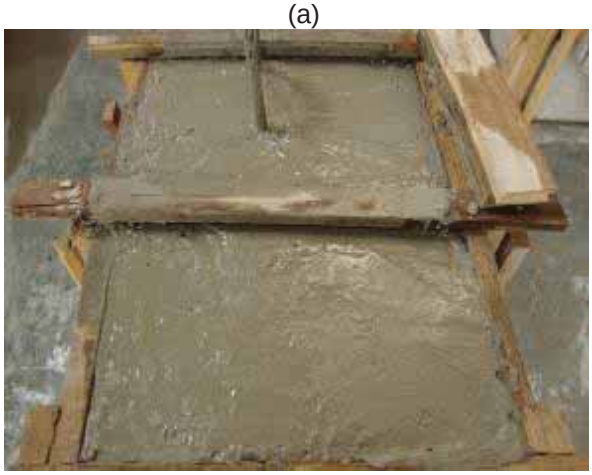
(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

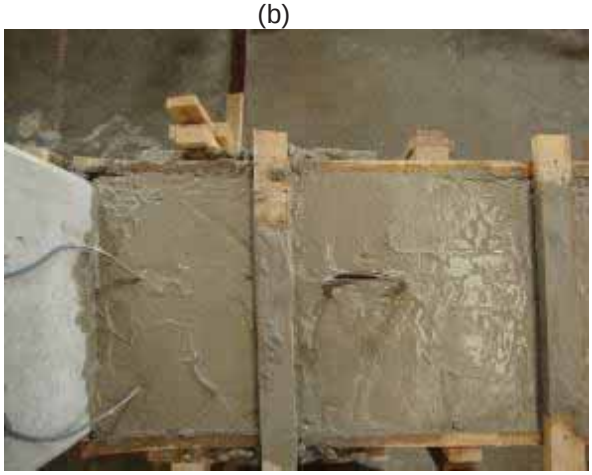
Figura B.3: (a) Detalhe da capa da laje da viga concretada, (b) e (c) em processo de concretagem, (d) concretagem finalizada.

(a)

(b)



(c)



(d)

Fonte: Produção do próprio autor

Finalizada a concretagem, a última etapa a ser realizada foi a desforma dos protótipos e posteriormente os mesmos estavam prontos para a instrumentação e ensaio, como mostra a Figura B.4 a seguir.

Um dos problemas verificados no protótipo que estava devidamente nivelado, foi a diferença de altura final de um lado da ligação em relação ao outro, tendo sido encontrada uma diferença de 4 a 5 cm de altura do lado esquerdo em relação ao direito. Esta diferença de altura pode vir a prejudicar a aplicação de carga, pois um lado recebe a carga primeiro do que o outro. Para que o problema da diferença de aplicação da carga afetasse no comportamento da ligação, foram colocadas chapas metálicas para que se pudessem compensar a diferença de altura.

Figura B.4(a) e (b): Modelo sendo posicionado para receber a instrumentação final e para ensaio conjunto.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

1.1.2 Instrumentação

As Tabelas B.1 e B.2 a seguir, mostram os equipamentos / instrumentos utilizados na realização dos ensaios.

Tabela B.1: Listagem de equipamentos utilizados nos ensaios.

Equipamento / Instrumento	Marca	Modelo
Sistema de aquisição de dados de extensometria	Vishay Measurements Group, Inc.	Sistem 5000
Cilindro Hidráulico	Enerpac	RC
Cilindro Hidráulico	Enerpac	RR
Transdutores lineares	MSI	HS 50 HS 25

Fonte: Produção do próprio autor

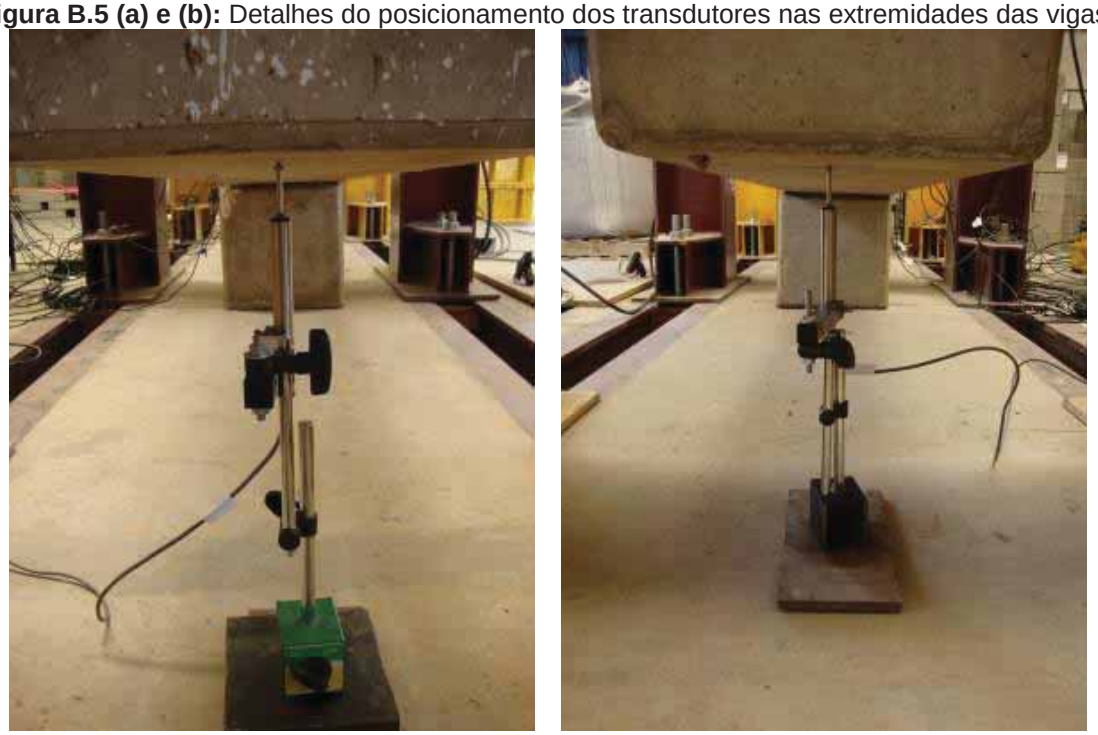
Tabela B.2: Resumo da forma de orientação da instrumentação.

Equipamentos de medição	Nomenclatura	Canal	Função
Célula de Carga 1	CC 1	1	Leitura de força
Célula de Carga 2	CC 2	2	Leitura de força
Célula de Carga 3	CC 3	3	Leitura de força
Transdutor LVDT 1	TD 1	4	Leitura de deslocamento
Transdutor LVDT 2	TD 2	5	Leitura de deslocamento
Transdutor LVDT 3	TD 3	6	Leitura de deslocamento
Transdutor LVDT 4	TD 4	7	Leitura de deslocamento
Transdutor LVDT 5	TD 5	8	Leitura de deslocamento
Transdutor LVDT 6	TD 6	9	Leitura de deslocamento

Fonte: Produção do próprio autor

As medidas de deslocamento vertical (flechas) dos elementos de viga foram realizadas por meio de transdutores LVDT (Linear Variable Differential Transducers), os quais foram posicionados nas extremidades das vigas. Com relação à obtenção do deslocamento vertical e do gráfico carga aplicada-rotação utilizou-se transdutores como se pode observar nas Figuras B.5(a) e (b) e B.6(a) e (b) a seguir, respectivamente. A rotação da ligação foi realizada por meio de medidas indiretas de rotação no centro de giro do apoio.

Figura B.5 (a) e (b): Detalhes do posicionamento dos transdutores nas extremidades das vigas.



(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

Figura B.6 (a) e (b): Detalhes dos transdutores fixados sob o consolo do pilar para medir a rotação da ligação.

(a) (b)

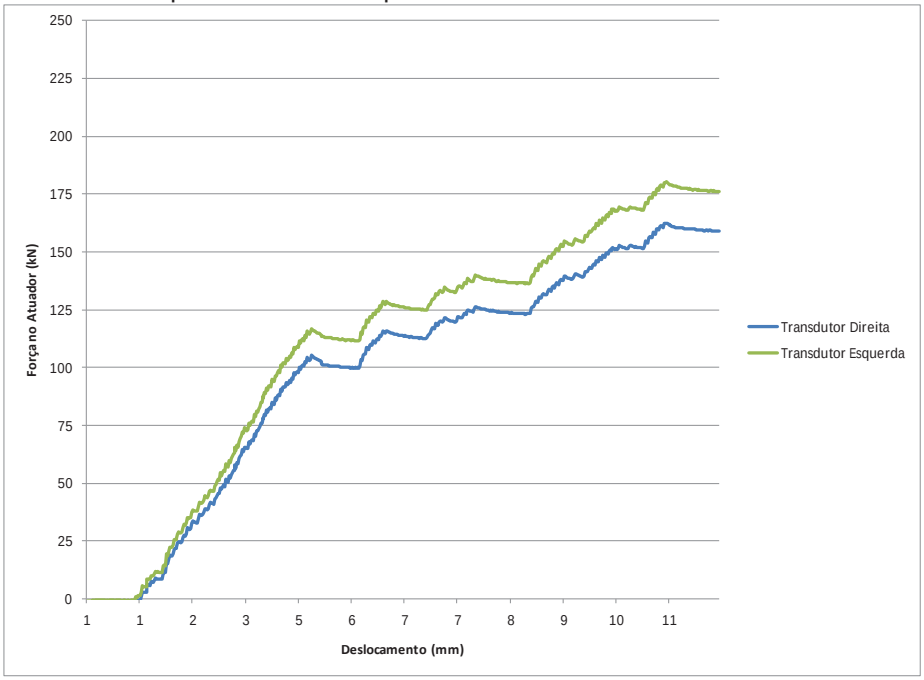
Fonte: Produção do próprio autor

1.1.3 Modelo preenchido com a calda de cimento

Foi aplicado neste modelo uma força incremental na extremidade das vigas, através da utilização de atuadores hidráulicos com capacidade de 250 kN cada, tendo em vista que o mesmo modelo ensaiado por Kataoka (2007) obteve uma carga aplicada máxima de 220 KN . Antes de iniciar o carregamento nos atuadores laterais, o atuador posicionado sobre o pilar central foi carregado até atingir aproximadamente 200 KN, sendo que esta força foi mantida durante todo o ensaio.

Neste primeiro ensaio os transdutores 1 e 4 posicionados na extremidade da viga, conforme pode-se observar na Figura B.5, foram retirados debaixo da viga quando se obteve uma carga aplicada próxima de 180 KN. A retirada se deu devido à rotação da viga, que poderia haver uma ruptura brusca da ligação e com isso, poderia danificar o equipamento. Para o segundo ensaio com o modelo preenchido com argamassa o posicionamento dos transdutores mudou, sendo colocados acima da viga de forma a realizar todas as leituras até o final do ensaio. A Figura B.7 a seguir, apresenta o gráfico dos resultados da força aplicada x deslocamento vertical da viga ensaiada.

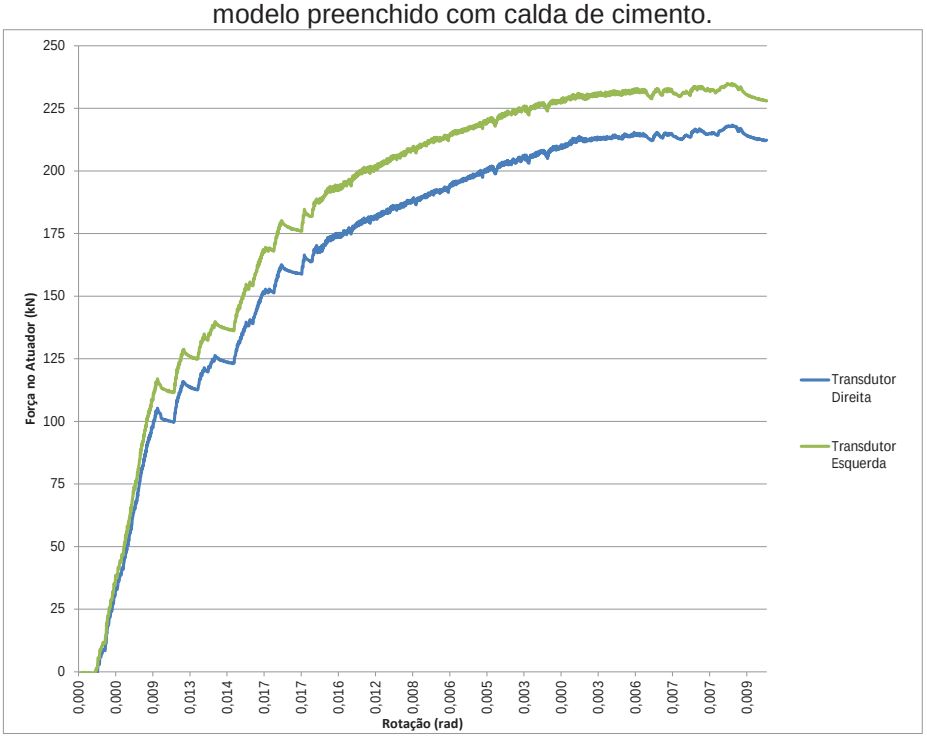
Figura B.7: Força aplicada nas extremidades da viga x deslocamento vertical para os lados direito e esquerdo do modelo preenchido com calda de cimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme mostram os resultados apresentados na Figura B.7, percebe-se que o deslocamento máximo obtido com a aplicação de até 180 KN foi de 11 mm do lado direito, enquanto que do lado esquerdo o deslocamento vertical máximo foi de aproximadamente 10 mm. Na Figura B.8 são apresentados os valores da rotação do protótipo, medido no consolo e, onde a distância de leitura entre os transdutores foi de 9 cm.

Figura B.8: Força aplicada nas extremidades da viga x rotação para os lados direito e esquerdo do modelo preenchido com calda de cimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Pela Figura B.6 percebe-se que durante o ensaio houve o aparecimento de uma fissura que se estendeu até o local onde estava fixado o transdutor que fazia as leituras. Essa fissura acarretou em uma falha na leitura de instrumento, que pode ser observado quando a rotação atinge um valor mínimo de -0,003 rad, posteriormente a rotação começa a ter valores positivos. A Figura B.9 (a) e (b) mostra o detalhe do posicionamento do modelo.

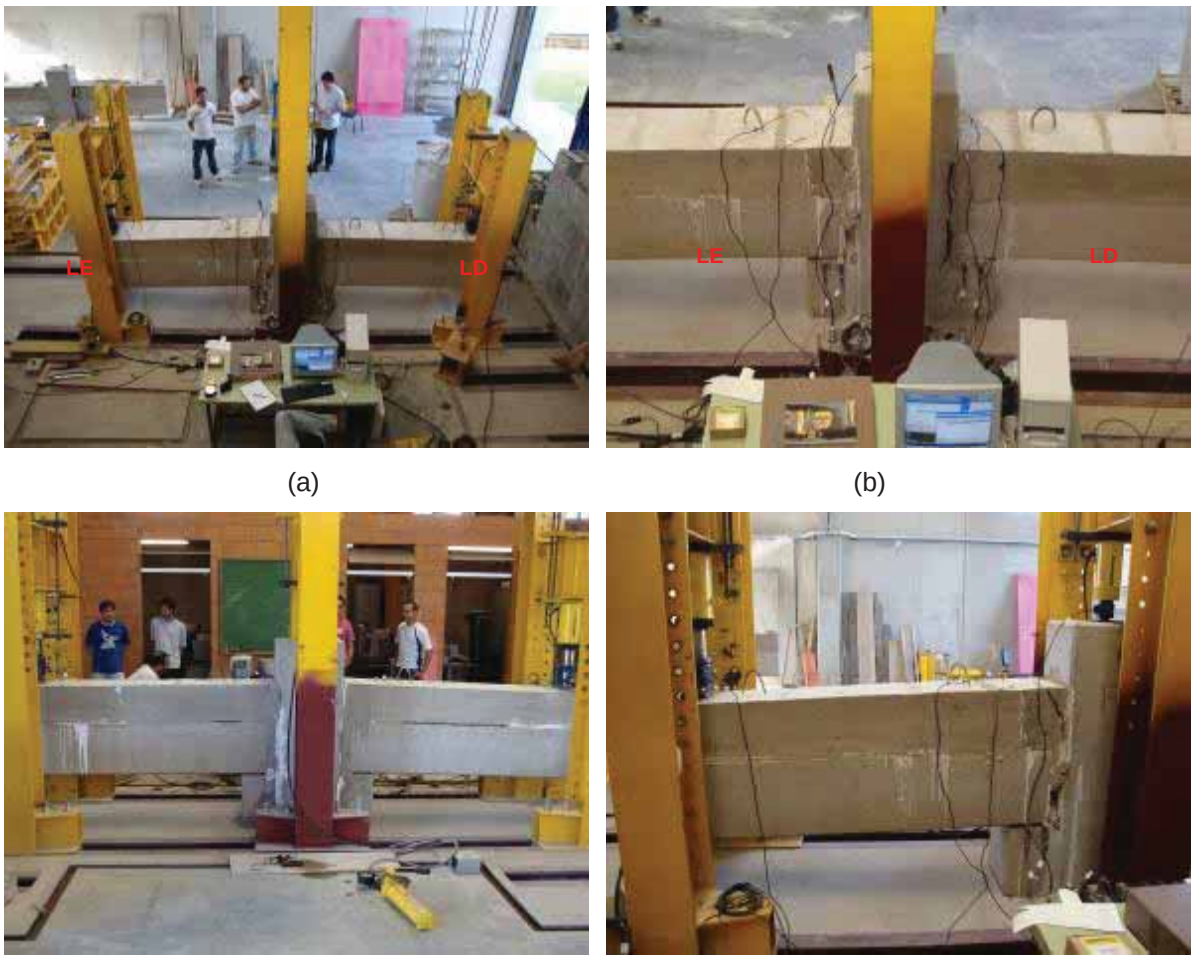
Figura B.9 (a) e (b): Detalhe do posicionamento do modelo antes do início do ensaio e da carga central sobre o pilar.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

As Figuras B.10(a), B.10(b), B.10(c) e B.10(d) a seguir, mostram o modelo após ser ensaiado, ilustrando o estado final da ligação.

Figura B.10: Detalhe do posicionamento final do modelo após ruptura.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Produção do próprio autor

Observou-se que houve uma maior rotação do lado esquerdo do protótipo do que em relação ao lado direito, como se pode observar pelas Figuras B.10(c) e B.10(d). Outro ponto importante é a elevada fissura encontrada no nicho vertical entre a face da viga com o pilar, que acarretou no rompimento do modelo neste local, tendo sido aplicada uma carga máxima na extremidade da viga de 225 KN.

Observa-se também que ocorreu uma fissuração excessiva na região da interface da viga-pilar (Figuras B.11(a) e (b)). Essa fissura aparece nas duas faces do modelo, indicando que a ligação havia atingido o Estado Limite Último (ELU).

Figura B.11 (a) e (b): Detalhe das fissuras no nicho vertical entre a face da viga-pilar e no local de leitura dos transdutores.

(a)

(b)

Fonte: Produção do próprio autor

1.1.4 Modelo preenchido com a argamassa

Os procedimentos de instrumentação e de aplicação de carga inicial no centro do pilar foram iguais do ensaio do modelo preenchido com a calda de cimento. A única diferença citada anteriormente foi em relação ao posicionamento dos transdutores nas extremidades da viga, ver Figuras B.12(a) e B.12(b) a seguir, sendo agora posicionados para obter as leituras na face da capa da laje da viga, para proteger o equipamento caso houvesse uma ruptura da ligação. As Figuras B.13 e B.14 a seguir mostram os gráficos dos resultados de força aplicada versus deslocamento vertical e força aplicada x rotação, respectivamente.

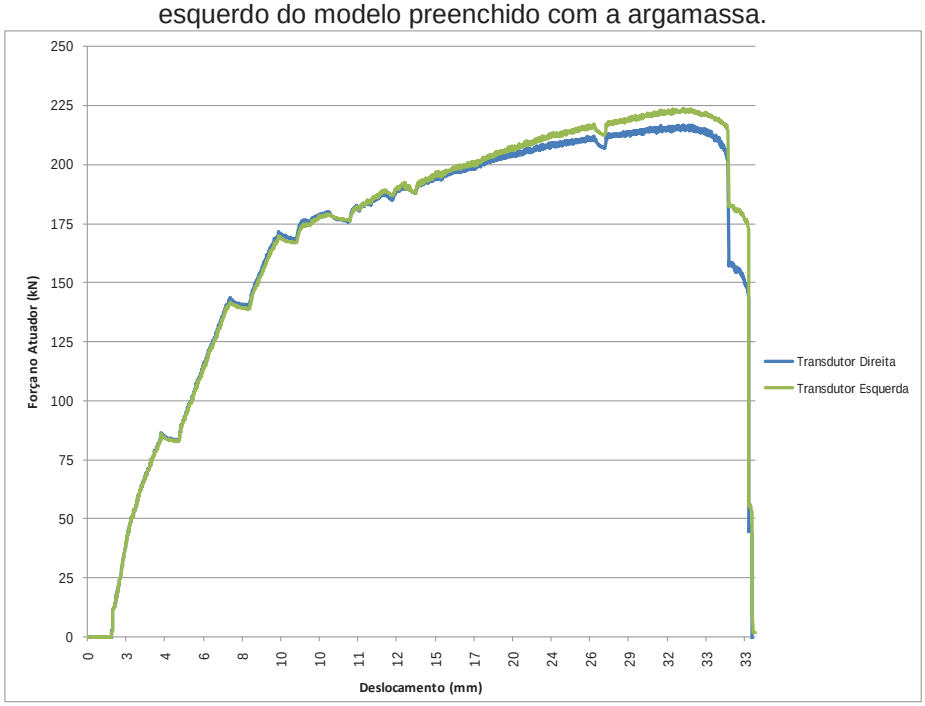
Figura B.12 (a) e (b): Detalhe do novo posicionamento dos transdutores nas extremidades das vigas.

(a)

(b)

Fonte: Produção do próprio autor

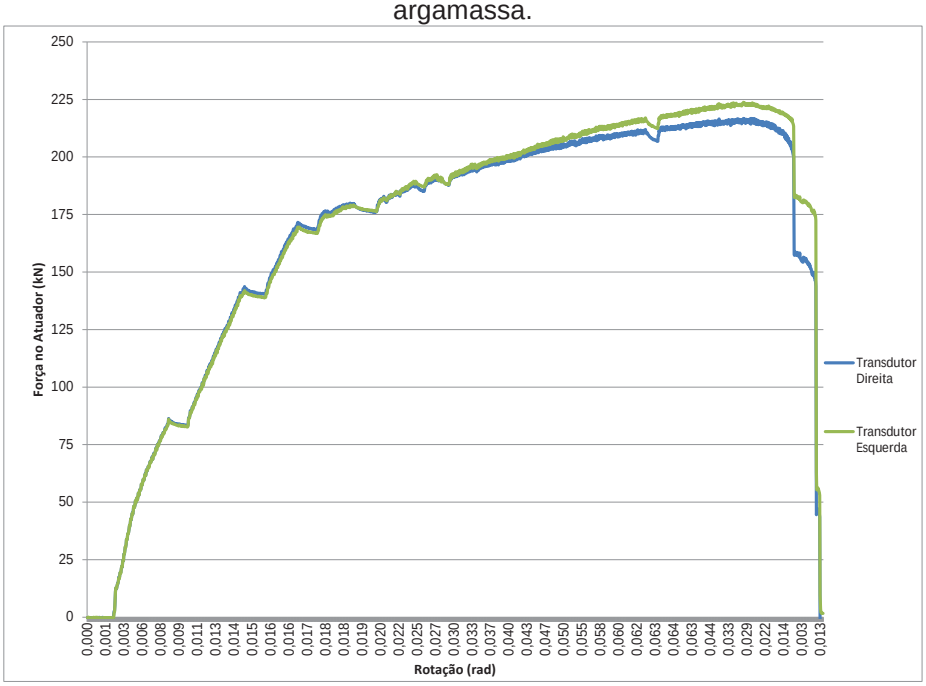
Figura B.13: Força aplicada nas extremidades da viga x deslocamento vertical para os lados direito e esquerdo do modelo preenchido com a argamassa.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se por meio da Figura anterior que há um comportamento semelhante dos dois lados do modelo, tendo sido aplicado uma carga máxima de 225 KN e o deslocamento vertical máximo obtido foi de 33 mm.

Figura B.14: Força aplicada nas extremidades da viga x rotação do modelo preenchido com a argamassa.



Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que os valores de rotação obtidos pelo modelo 2 foram superiores aos do modelo 1 preenchido com calda de cimento, tendo atingido um valor máximo de rotação de 0,013 rad.

Houve um comportamento semelhante dos dois modelos, onde em ambos a rotação máxima foi atingida pelo lado esquerdo. Neste caso em específico, na interface viga-pilar iniciou-se uma fissuração mais elevada quando a carga aplicada atingiu 190 KN. Ao atingir valores de 210 KN, notou-se o aparecimento de fissuras na face do pilar, acima da capa da laje da viga, conforme ilustram as Figuras B.15(a) e (b) a seguir.

Ao se atingir a carga de 225 KN, ocorreu a ruptura das quatro barras de aço de continuidade. A ruptura das barras ocorreu devido a maior aderência do material de preenchimento com a bainha e a armadura de continuidade, o que fez com-toda a carga aplicada fosse transmitida para as barras, acarretando assim na sua ruptura.

Figura B.15(a) e (b): Detalhe do aparecimento das fissuras no pilar no modelo preenchido com a argamassa.

(a) (b)

Fonte: Produção do próprio autor

As Figuras B.16(a), B.16(b) e B.17(c) a seguir mostram os detalhes da interface viga-pilar após a sua ruptura, detalhe da ruptura das barras de aço e o a estrutura da ligação após a ruptura das barras de aço.

Figura B.16 (a) a (c): Detalhes da ruptura das barras de aço de continuidade.

(a)

(b)

(c)

Fonte: Produção do próprio autor

Dessa forma, com os resultados obtidos no ensaio do modelo em escala real preenchidos com os dois materiais estudados, comparou-se com os resultados obtidos por Kataoka (2007), como mostra a Tabela B.3 a seguir.

Tabela B.3: Comparativo dos resultados dos diferentes materiais de preenchimento estudados.

Material de preenchimento	Carga máxima aplicada (KN)	Deslocamento Vertical máximo (mm)	Rotação máxima (rad)
Calda de Cimento	225	11*	0,018
Argamassa	225	33	0,064
Graute (KATAOKA 2007)	220	22	0,007

* retirou-se o transdutor com a aplicação de carga de 180KN

Fonte: Produção do próprio autor

Como pode-se observar pela tabela 5.3 anterior, os valores de carga aplicadas tanto nos modelos preenchidos com calda de cimento e argamassa foram os mesmo que aplicados por Kataoka (2007) no modelo preenchido com o graute.

A rotação máxima e o deslocamento vertical de ambos os modelos foram superiores ao encontrado por Kataoka (2007), indicando que os materiais de preenchimento estudados nesta pesquisa obtiveram uma menor rigidez na ligação. A fissuração elevada no nicho vertical da ligação fez com que o deslocamento vertical e a rotação fossem superiores ao encontrados por Kataoka (2007). Outro fator foi o aparecimento de fissuras no local de colagem dos transdutores verticais, sendo assim as fissuras podem ter afetado nos valores obtidos nas leituras.