



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

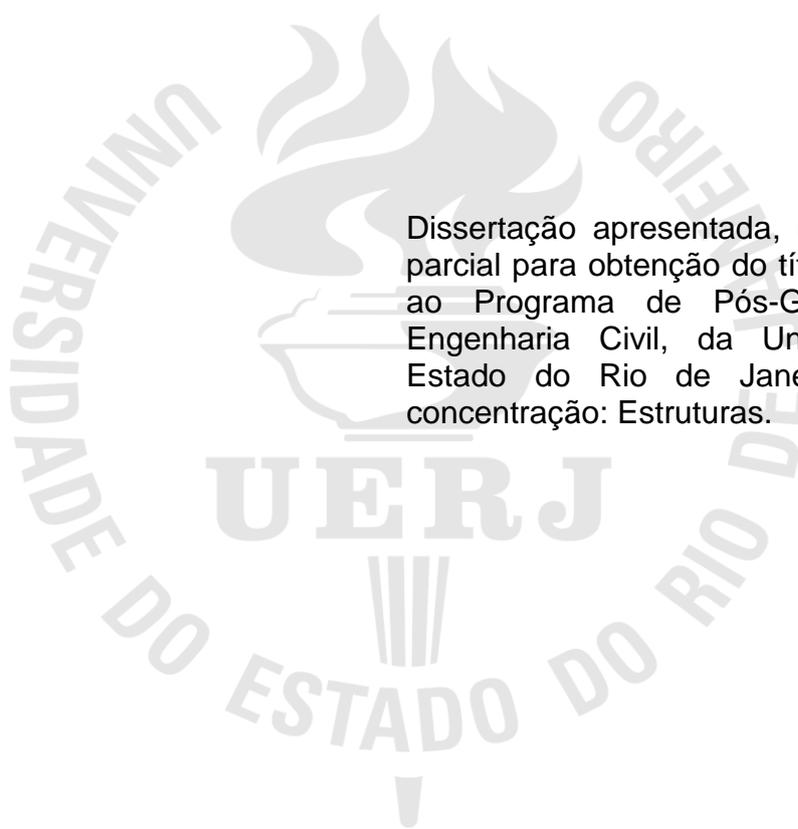
Bianca Cardoso Figueiredo

**Estudo do comprimento de transferência em peças de concreto
protendido**

Rio de Janeiro
2023

Bianca Cardoso Figueiredo

Estudo do comprimento de transferência em peças de concreto protendido



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

F475 Figueiredo, Bianca Cardoso.
Estudo do comprimento de transferência em peças de concreto protendido / Bianca Cardoso Figueiredo. – 2023.
172 f.

Orientadora: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Análise estrutural (Engenharia) - Teses.
3. Concreto protendido - Teses. 4. Deformações e tensões - Teses. I.
Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega. II. Universidade do Estado do Rio
de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.012.36

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bianca Cardoso Figueiredo

Estudo do comprimento de transferência em peças de concreto protendido

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 29 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof^a. Dr^a. Monique Cordeiro Rodrigues
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Claudia Maria de Oliveira Campos
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Dr. Leonardo de Souza Bastos
Calculus Projetos e Estruturas Ltda.

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

A José Paz Maropo, Glória Rodrigues Maropo, Murilo Rodrigues Maropo e Maurílio Rodrigues Maropo, pessoas maravilhosas cujo legado é o bem que fizeram ao próximo. Dedico também à minha amada família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda fé e força necessárias à conclusão desta etapa.

Ao meus pais, Marcelo e Lúcia, pelo acolhimento e incentivos diários. Por todo amor incondicional que me dedicam.

A minha irmã, companheira de vida e melhor amiga, Débora, sem cuja ajuda e palavras esse trabalho jamais seria possível.

Aos meus avós, por toda compreensão, amor e cuidado.

À professora Doutora Maria Elizabeth, pela paciência, orientação e por acreditar na elaboração deste trabalho.

À professora Monique Cordeiro e à equipe do Laboratório de Engenharia Civil, André, Danilo, Pedro, Paulo Barreto, Ramon, Paulo e Beatriz, por todo auxílio na elaboração e execução dos ensaios e apoio.

Aos meus companheiros de trabalho pela compreensão e ajuda e, em especial, ao meu chefe Marcelo Maxiamiano, pela confiança.

Aos meus primos Natasha, Lucas e Gustavo, pelo apoio e ajuda.

Aos meus amigos de uma vida toda, lasmin Sena, Luís Silvestre e Vinícius Uzêda. Suas amizades tornam qualquer jornada menos árdua. E à minha amiga Jéssica Castricini, pela ajuda nos estudos e companheirismo.

À empresa Protente MHK pelo fornecimento das cunhas e apoio à pesquisa, em especial ao funcionário Paulo, pela atenção e disposição em ajudar.

A todos aqueles, que embora não citados, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

A imaginação é mais importante que o conhecimento. Conhecimento auxilia por fora, mas só o amor socorre por dentro. Conhecimento vem, mas a sabedoria tarda.

Albert Einstein

RESUMO

FIGUEIREDO, Bianca Cardoso. *Estudo do comprimento de transferência em peças de concreto protendido*. 2023. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Em vista da falta de consenso em relação ao comprimento de transferência, esta pesquisa estuda a aderência das armaduras no nosso mercado, visando esclarecer seu comportamento em relação à aderência e a transferência da força de protensão. Os resultados das investigações são apresentados em duas partes, teórica e experimental, sobre a aderência de cordoalhas de sete fios com diâmetro de 15,2 mm, pré-tracionadas e pré-aderentes em concreto de classe de resistência C45. A primeira parte consiste em uma análise teórica sobre a determinação do comprimento de transferência. Para isso, foram utilizados modelos analíticos já estabelecidos na literatura corrente e nas normas técnicas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), FIB MODEL CODE (2010) e EUROCODE 2 (2004). Já a segunda parte da pesquisa consiste em três ensaios de laboratório, realizados no Laboratório de Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). O método de ensaio adotado foi o Método ECADA, o qual divide-se em três partes: (1) protensão e concretagem (2) medição do comprimento de transferência das vigas nas operações de retirada da protensão; (3) ensaios de arrancamento e análise do deslizamento da cordoalha em função da variação de força de protensão, nos quais estudou-se a tensão de aderência. Os resultados experimentais foram comparados aos resultados teóricos, podendo-se então avaliar o comportamento da força de protensão e o cálculo do comprimento de transferência em peças de concreto protendido pré-tracionadas. Para os ensaios realizados, foi possível medir os comprimentos de transferência, que apresentaram valor inferior ao previsto pelas normas, mostrando que estas estão a favor da segurança.

Palavras-chave: Concreto protendido; Comprimento de transferência; Aderência; Tensão de aderência.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, Bianca Cardoso. *Study of the transfer length in prestressed concrete members*. 2023. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Towards the lack of consensus regarding the transfer length, his research studies the bond of reinforcements in our market, aiming to clarify their behavior concerning bond and the transfer of prestressing force. The results of the investigations are presented in two parts, theoretical and experimental, on the bond of seven-wire strands with a diameter of 15.2 mm, pre-stressed and pre-bonded in C45 strength class concrete. The first part consists of a theoretical analysis of the determination of the transfer length. For this purpose, analytical models already established in the current literature and technical standards NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), FIB MODEL CODE (2010), and EUROCODE 2 (2004) were used. The second part of the research consists of three laboratory tests conducted at the Civil Engineering Laboratory of the State University of Rio de Janeiro (UERJ). The test method adopted was the ECADA Method, which is divided into three parts: (1) prestressing and concreting, (2) measurement of the transfer length of the beams during the prestressing removal operations, and (3) pull-out tests and analysis of strand slip as a function of prestressing force variation, in which bond stress was studied. The experimental results were compared to the theoretical results, allowing us to evaluate the behavior of prestressing force and the calculation of the transfer length in pre-stressed concrete members. For the tests conducted, it was possible to measure the transfer lengths, which showed values lower than those predicted by the standards, indicating that they favor safety.

Keywords: Prestressed concrete; Transfer length; Bond; Bond stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte de Luzancy sobre o rio Marne na França (Neto, 2016).....	21
Figura 2 – Exemplo de viga de concreto protendido aderente à pré-tração (Bastos <i>apud</i> Monteiro, 2016)	27
Figura 3 – Viga de concreto protendido não aderente na pós-tração (Bastos <i>apud</i> Monteiro, 2016)	28
Figura 4 – Variação da tensão na cordoalha ao longo do comprimento de transferência e do comprimento de aderência à flexão (Abrishami e Mitchell, 1993)	35
Figura 5 – Efeito Hoyer de um fio ancorado por aderência (Leonhardt, 1983).....	37
Figura 6 – Desenvolvimento das tensões no concreto (Adaptado de Leonhardt, 1983)	38
Figura 7 – Comprimento de transmissão e comprimento de regularização em ancoragem por aderência de um fio nervurado pré-tensionado (Adaptado de Leonhardt, 1983)	39
Figura 8 – Método de ensaio proposto por Cousins <i>et al.</i> (1992) (Dumêt, 2003).....	41
Figura 9 – Comparação de rupturas por (a) esmagamento e (b) fendilhamento do concreto (Caetano, 2008, adaptado de Thompson, 2002).	44
Figura 10 – Variação idealizada da tensão da armadura ao longo da viga protendida após liberação (Abrishami e Mitchell, 1993).....	45
Figura 11 – Variação idealizada da tensão na cordoalha ao longo da viga protendida sujeita a carregamento externo (Abrishami e Mitchell, 1993).....	46
Figura 12 – Representação esquemática da onda da tensão de aderência (Janney, 1954; <i>apud</i> Dumêt, 2003)	49
Figura 13 – Técnica de teste para simular comportamento da aderência ao longo do comprimento de transferência (Abrishami e Mitchell, 1993).....	52
Figura 14 – Determinação do comprimento de transferência pelo método 95% MAS (Oh <i>et al.</i> , 2014)	58
Figura 15 – Comprimentos de transferência medidos (Oh <i>et al.</i> , 2014)	58
Figura 16 – Diagrama de fases de teste do Método ECADA (Vargas, Caro e Serna, 2013a)	61
Figura 17 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da resistência à compressão do concreto segundo normas técnicas	76

Figura 18 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão segundo normas técnicas	77
Figura 19 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão segundo normas técnicas	77
Figura 20 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da resistência à compressão concreto	79
Figura 21 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão	80
Figura 22 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função do diâmetro da cordoalha.....	81
Figura 23 – Pórtico de reação	83
Figura 24 – Projeto do pórtico de reação	83
Figura 25 – Diagrama do Sistema AMA (Vargas, 2006)	84
Figura 26 – Vistas frontal e lateral dos dispositivos de ancoragem (a) Vista frontal da ancoragem (b) Vista lateral da ancoragem	85
Figura 27 – Vista da amostra como parte de extremidade da peça de concreto protendido (Vargas, 2013a).....	85
Figura 28 – Projeto de ensaio da Amostra 1	88
Figura 29 – Projeto de ensaio da Amostra 2	89
Figura 30 – Projeto de ensaio da Amostra 3	90
Figura 31 – Ilustração dos ensaios de caracterização do concreto (a) Ensaio de resistência à compressão da Amostra 1 (b) Ensaio de tração à compressão diametral da Amostra 1 (c) Ensaio de módulo de elasticidade da Amostra 1	96
Figura 32 – Detalhes da concretagem das amostras (a) Preparo da fôrma da viga (b) <i>Slump Test</i> (c) Concretagem da amostra.....	97
Figura 33 – Detalhe da concretagem dos corpos de prova.....	97
Figura 34 – Arranjo das ancoragens para protensão	99
Figura 35 – Arranjo de ensaio e instrumentação para protensão da cordoalha da Amostra 2.....	100
Figura 36 – Detalhe da posição da placa entre a célula de carga CEL02 e a ancoragem removível na Extremidade de <i>Pull-Out</i>	100
Figura 37 – Disposição para ensaio de transferência (a) Disposição dos extensômetros na cordoalha (ST03 e ST04) e no concreto (ST05 e ST06) (b)	

Disposição dos extensômetros na cordoalha (ST01 a ST04) e no concreto (ST05 a ST07) da Amostra 2, semelhante à Amostra 3.....	101
Figura 38 – Configuração de ensaio de arrancamento para a Amostra 1 (a) Configuração de ensaio (b) Detalhe do LVDT01 na Extremidade de Transferência (c) Detalhe da posição dos macacos e do LVDT02 dentro do Sistema AMA	103
Figura 39 – Primeira tentativa de <i>layout</i> de ensaio de arrancamento da Amostra 2	104
Figura 40 – Configuração de ensaio de arrancamento da Amostra 2 (a) Configuração de ensaio (b) Detalhe da posição dos macacos e do LVDT02 dentro do Sistema AMA (c) Detalhe da posição dos macacos e dos LVDTs para acompanhamento dos macacos durante execução do arrancamento.....	105
Figura 41 – Configuração da segunda tentativa de ensaio de arrancamento da Amostra 3 (a) Detalhe dos LVDTs do Sistema AMA (b) Detalhe da posição do macaco e da célula de carga (c) Detalhe do LVDT01	106
Figura 42 – Gráfico Deformação da cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a protensão	108
Figura 43 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a protensão	109
Figura 44 – Gráfico Força de protensão <i>versus</i> Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 1	110
Figura 45 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 na cravação e após cravação.....	112
Figura 46 – Gráfico Deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a protensão	113
Figura 47 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a protensão	114
Figura 48 – Gráfico Força de protensão <i>versus</i> Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 2	114
Figura 49 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 na cravação e após cravação.....	116
Figura 50 – Gráfico Deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a protensão	117
Figura 51 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a protensão	118

Figura 52 – Gráfico Força de protensão <i>versus</i> Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 3	118
Figura 53 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 na cravação e após cravação.....	120
Figura 54 – Gráfico comparativo Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade após a cravação para as três amostras.....	121
Figura 55 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a transferência.....	124
Figura 56 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a transferência	125
Figura 57 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 após estabilização da transferência	125
Figura 58 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 após estabilização da transferência	126
Figura 59 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência.....	128
Figura 60 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência.....	129
Figura 61 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência.....	129
Figura 62 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência	130
Figura 63 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência.....	130
Figura 64 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência.....	131
Figura 65 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência	131
Figura 66 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência	132
Figura 67 – Gráfico comparativo Tensão <i>versus</i> Distância da extremidade após estabilização da transferência para Amostra 2.....	132
Figura 68 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência.....	134

Figura 69 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência.....	134
Figura 70 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência.....	135
Figura 71 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência	135
Figura 72 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência.....	136
Figura 73 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência.....	136
Figura 74 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência	137
Figura 75 – Gráfico Tensão no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência	137
Figura 76 – Gráfico comparativo Tensão <i>versus</i> Distância da extremidade após estabilização da transferência para Amostra 3.....	138
Figura 77 – Gráfico Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade após transferência para Amostra 2	141
Figura 78 Gráfico – Tensão na cordoalha <i>versus</i> Distância da extremidade após transferência para Amostra 3	141
Figura 79 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 1 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas	142
Figura 80 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 2 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas	142
Figura 81 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 3 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas	143
Figura 82 – Gráfico Tensão de aderência <i>versus</i> Deslizamento da cordoalha para Amostra 1	147
Figura 83 – Gráfico Tensão de aderência <i>versus</i> Deslizamento da cordoalha para Amostra 2.....	149
Figura 84 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade no arrancamento por faixa de tensão de aderência para Amostra 2.....	149
Figura 85 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade no arrancamento por faixa de deslizamento para Amostra 2	150

Figura 86 – Gráfico Deformação no concreto <i>versus</i> Distância da extremidade no arrancamento para Amostra 3 por faixa de tensão de aderência.....	152
Figura 87 – Gráfico Tensão de aderência <i>versus</i> Deslizamento da cordoalha para Amostra 3.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto (ABNT NBR 6118, 2014)	30
Tabela 2 – Resultados para os comprimentos médios de transferência (<i>lt, médio</i>) (Cousins, Johnston e Zia, 1990 <i>apud</i> Dumêt, 2003)	51
Tabela 3 – Equações para o cálculo dos comprimentos de ancoragem (Cousins, Johnston e Zia, 1990 <i>apud</i> Dumêt, 2003)	51
Tabela 4 – Resultados dos testes ao longo do comprimento de transferência (Abrishami e Mitchell, 1993)	54
Tabela 5 – Resultados dos testes ao longo do comprimento de aderência à flexão (Abrishami e Mitchell, 1993)	54
Tabela 6 – Comparação entre os resultados da análise e ensaios para comprimento de transferência (Oh <i>et al.</i> , 2014)	59
Tabela 7 – Dados para cálculo dos comprimentos de transferência	75
Tabela 8 – Valores dos comprimentos de transferência, em metros (m)	75
Tabela 9 – Dados utilizados na análise comparativa	78
Tabela 10 – Dimensões das amostras	86
Tabela 11 – Parâmetros teóricos para projeto dos modelos	91
Tabela 12 – Características físicas do agregado miúdo da Amostra 1	92
Tabela 13 – Características físicas do agregado miúdo das Amostras 2 e 3	93
Tabela 14 – Características físicas do agregado graúdo para Amostra 1	93
Tabela 15 – Características físicas do agregado graúdo para Amostra 2 e 3	94
Tabela 16 – Propriedades do aditivo (adaptado de Sika, 2020)	95
Tabela 17 – Dosagem do concreto de 45 MPa	95
Tabela 18 – Caracterização do concreto	98
Tabela 19 – Características da cordoalha de 7 fios CP 190 (Arcelor Mittal, 2021) ...	98
Tabela 20 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 1	110
Tabela 21 – Leituras extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 1	111
Tabela 22 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 2	115

Tabela 23 – Leitura dos extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 2	115
Tabela 24 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 3.....	119
Tabela 25 – Leitura dos extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 3	119
Tabela 26 – Dados da protensão das cordoalhas	122
Tabela 27 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 1 .	123
Tabela 28 - Leitura da instrumentação da Amostra 1 após transferência	126
Tabela 29 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 2 .	127
Tabela 30 – Leitura da instrumentação da Amostra 2 após transferência	133
Tabela 31 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 3 .	133
Tabela 32 – Leitura da instrumentação da Amostra 3 após transferência	138
Tabela 33 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 1	139
Tabela 34 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 2.....	139
Tabela 35 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 3.....	140
Tabela 36 – Parâmetros obtidos experimentalmente para cálculo dos comprimentos de transferência das amostras	144
Tabela 37 – Análise comparativa dos valores experimentais de comprimento de transferência com as formulações teóricas	144
Tabela 38 – Dados para cálculo da Tensão de aderência da Amostra 1	146
Tabela 39 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 1	148
Tabela 40 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 1	148
Tabela 41 – Dados para cálculo da Tensão de aderência máxima da Amostra 2...	148
Tabela 42 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 2	150
Tabela 43 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 2.....	150
Tabela 44 – Dados para cálculo da Tensão de aderência da Amostra 3	151
Tabela 45 – Resumo da medição da primeira tentativa de arrancamento para a Amostra 3.....	152

Tabela 46 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 3	153
Tabela 47 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 3.....	154
Tabela 48 – Dados característicos do comportamento aderente das amostras.....	154
Tabela 49 – Comprimentos de ancoragem das amostras	155
Tabela 50 - Ensaio de resistência à compressão do concreto	167
Tabela 51 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 1 (ABNT NBR 8522:2017)	168
Tabela 52 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 2 (ABNT NBR 8522:2017)	169
Tabela 53 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 3 (ABNT NBR 8522:2017)	170
Tabela 54 - Identificação dos macacos hidráulicos	171
Tabela 55 - Planilha de calibração do Macaco Verde	171
Tabela 56 - Planilha de calibração do Macaco Amarelo	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta Resistência Inicial
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CP	Cimento Portland
ECADA	<i>Ensayo para Caracterizar la Adherencia mediante Destesado y Arrancamiento</i>
FIB	Fédération internationale du Béton
NBR	Normas Brasileiras
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{bpd}	Tensão de aderência de cálculo da armadura ativa
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{ci}	Resistência do concreto à compressão na idade i
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{ck28}	Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias
f_{ckj}	Resistência característica do concreto à compressão na idade j
f_{ctd}	Valor de cálculo da resistência do concreto à tração
f_{ctk28}	Resistência característica do concreto à tração aos 28 dias
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica inferior do concreto à tração
f_{ctkj}	Resistência característica do concreto à tração na idade j
$f_{ct,m}$	Resistência média do concreto à tração direta
f_{ptk}	Resistência característica da armadura ativa
f_{pyd}	Limite de escoamento de cálculo da armadura ativa
f_{pyk}	Limite de escoamento convencional da cordoalha
l_{bpt}	Comprimento de transferência
l_{bp}	Comprimento de ancoragem básico
t	Idade efetiva do concreto, em dias
E_{c28}	Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias
E_{ci}	Módulo de elasticidade do concreto na idade i
$E_{ci(t_0)}$	Módulo de elasticidade do concreto na idade t_0
E_p	Valor médio do módulo de elasticidade da armadura ativa
P_i	Força aplicada à armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão
σ_p	Tensão aplicada à armadura ativa
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
ϕ_p	Diâmetro da cordoalha

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
1.1 Concreto protendido	26
1.1.1 Concreto	28
1.1.2 Armadura ativa	31
1.1.3 Protensão	32
1.2 Aderência no concreto protendido	33
1.2.1 Tipos de aderência	36
1.2.2 Ancoragem por aderência	38
1.2.3 Tensão de aderência	39
1.2.4 Comprimento de ancoragem	42
1.2.5 Modos de ruptura por aderência	43
1.3 Comprimento de transferência	45
1.3.1 Pesquisas sobre comprimento de transferência	47
1.3.2 Comentários gerais	67
2 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	68
2.1 ABNT NBR 6118 (2014)	69
2.2 ACI 318 (2019)	70
2.3 CEB Model Code (2010)	71
2.4 Eurocode 2 (2004)	72
2.5 Comentários sobre as prescrições normativas	74
2.6 Análise comparativa das formulações teóricas	78
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
3.1 Programa de ensaio	82
3.1.1 Projeto dos modelos	85
3.1.2 Plano de execução dos ensaios	86
3.1.3 Análise de resultados	91
3.2 Ensaios de caracterização dos materiais	92
3.2.1 Agregado miúdo	92
3.2.2 Agregado graúdo	93

3.2.3 Cimento.....	94
3.2.4 Água.....	94
3.2.5 Aditivo.....	94
3.2.6 Dosagem do concreto	95
3.2.7 Caracterização mecânica do concreto	95
3.2.8 Caracterização das cordoalhas	98
3.3 Ensaio de transferência.....	98
3.4 Ensaio de arrancamento.....	102
4 RESULTADOS.....	108
4.1 Protensão.....	108
4.1.1 Amostra 1	108
4.1.2 Amostra 2	112
4.1.3 Amostra 3	117
4.1.4 Análise comparativa dos resultados experimentais.....	120
4.2 Transferência.....	122
4.2.1 Amostra 1	122
4.2.2 Amostra 2	127
4.2.3 Amostra 3	133
4.2.4 Análise comparativa dos resultados experimentais.....	138
4.3 Ensaio de Arrancamento	145
4.3.1 Amostra 1	146
4.3.2 Amostra 2	148
4.3.3 Amostra 3	151
4.3.4 Análise comparativa dos resultados experimentais.....	154
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	156
5.1 Conclusões.....	156
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	158
REFERÊNCIAS.....	159
APÊNDICE A – CÁLCULO DOS COMPRIMENTOS DE TRANSFERÊNCIA SEGUNDO AS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	162
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	167
APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DOS MACACOS DE PROTENSÃO	171

INTRODUÇÃO

Desde o surgimento do concreto, datado no início do século XIX, até os dias atuais, seu processo de execução tem passado por contínuo desenvolvimento, impulsionado tanto pela introdução de novas tecnologias quanto pelo advento de materiais inovadores.

A primeira sugestão de se pré-tensionar o concreto foi feita em 1886 por P.H. Jackson, nos Estados Unidos, com a patente para arcos de concreto. Seguiram-se novas patentes e ensaios, porém sem êxito, por causa da baixa resistência dos aços utilizados, uma vez que a baixa tensão aplicada ainda sofreria redução devido aos efeitos da retração e fluência do concreto, ainda não conhecidos naquela época.

O emprego do concreto protendido passou a ter melhores respostas a partir dos princípios fundamentais estabelecidos e delineados por Eugène Freyssinet, que pesquisou a retração e fluência do concreto. Em 1941, Freyssinet projetou a primeira obra de concreto protendido, uma ponte em pórtico biarticulado sobre o rio Marne, em Luzancy, França, com vão de 55 metros (Figura 1).



Figura 1 – Ponte de Luzancy sobre o rio Marne na França (Neto, 2016)

Seguiram-se então novas invenções e contribuições. Após a Segunda Guerra, devido à necessidade de reconstrução das pontes destruídas e da construção de novas pontes, a protensão ganhou grande impulso na Europa.

Peças de concreto protendido são projetadas e produzidas usando basicamente dois materiais: concreto e armadura ativa. Como Vargas *et al.* (2014) explica, dois principais estágios devem ser considerados: a transferência da força de

protensão e o carregamento. Esses dois estágios requerem a criação de dois comprimentos de aderência nas extremidades da peça: o comprimento de transferência e o comprimento de ancoragem.

A estimativa dos comprimentos de ancoragem e de transferência da força de protensão são importantes para o projeto de peças de concreto protendido.

Quando uma viga de concreto protendido tem um comprimento menor do que o comprimento de ancoragem necessário, isso pode resultar em problemas de desempenho estrutural e redução da eficiência da protensão. O comprimento de ancoragem se refere à extensão da região onde os cabos de protensão (fios ou barras de aço) são ancorados no concreto para transmitir a força de protensão para o concreto. Quando esse comprimento é inadequado, podem ocorrer redução da capacidade de carga, tensões não uniformes, deformações inesperadas e fragilização do concreto.

O comprimento de transferência é um parâmetro crítico em vigas de concreto protendido. Ele se refere à distância ao longo da viga onde a força de protensão é transferida efetivamente do aço para o concreto. Um comprimento de transferência adequado é essencial para garantir que a força de protensão aplicada seja eficientemente transmitida para o concreto. Isso ajuda a otimizar o desempenho estrutural da viga. Ou seja, se o comprimento de transferência for inadequado, pode ocorrer uma transferência ineficaz de força, o que pode resultar em fissuras, deformações excessivas e até mesmo falhas na viga. Um comprimento de transferência adequado contribui para a durabilidade da estrutura, minimizando o risco de corrosão do aço protendido e garantindo uma vida útil mais longa.

Vários trabalhos experimentais sobre aderência, transferência de protensão, comprimento de ancoragem e comprimento de transferência foram conduzidos ao longo dos anos. No entanto, não existe consenso sobre um método padrão para determinação das propriedades de aderência e o desempenho da aderência das armaduras ativas. Há ainda observações divergentes sobre os efeitos dos principais parâmetros no comprimento de ancoragem nas literaturas prévias.

Além disso, segundo Vargas *et al.* (2006), o desenvolvimento dos materiais, tanto para concreto quanto para a armadura, em adição a observação de algumas deficiências de aderência em peças de concreto protendido, justifica a necessidade de estudos adicionais.

É de fundamental importância que as normas acompanhem, o mais próximo possível, o desenvolvimento tecnológico, especialmente no que diz respeito ao dimensionamento das estruturas, para que não se cometam erros que possam levar essas estruturas a um desperdício de material ou, ainda pior, a um colapso da estrutura, seja ele total ou parcial.

Motivação

O comprimento de transferência é um parâmetro importante para o projeto estrutural de concreto protendido pré-tensionado, e deve ser determinado experimentalmente. A avaliação de diversos resultados de ensaios e equações reportadas a literatura científica indica que há uma grande dispersão entre os comprimentos de transferência medidos e os calculados, e não há padronização de ensaio. O conhecimento dos materiais e propriedades do concreto são essenciais para melhor avaliar as aplicações estruturais, e técnicas de medições e métodos experimentais precisam ser desenvolvidos.

Segundo Vargas, Taengua e Serna (2013) indicam, no entanto, não há consenso sobre os principais parâmetros a serem considerados. Alguns códigos e autores propõem equações para os comprimentos de ancoragem e de transferência nas quais as propriedades do concreto não são parâmetros, como o ACI 318 (2019). Somente a resistência à compressão do concreto é incluída quando as propriedades do concreto são consideradas.

Por outro lado, somado a definição do comprimento de ancoragem em termos de tensão, a tensão máxima na armadura ativa deve ser alcançada evitando o deslocamento da extremidade da armadura. Porém, não há limitação ou cálculo para o deslocamento da armadura nos principais códigos.

De acordo com Dumêt (2003), a compreensão da aderência e a avaliação dos comprimentos de ancoragem desempenham um papel de extrema importância no contexto de certos elementos pré-tracionados. Embora, em muitas estruturas protendidas projetadas para não fissurar em serviço a questão da aderência não seja um ponto de preocupação, existem casos em que ela se torna crucial para evitar falhas prematuras. Esse cenário se aplica a elementos de dimensões reduzidas, como lajes

alveolares, nos quais há a possibilidade de o ponto de momento máximo invadir a zona de transferência de forças.

Em vista da falta de consenso em relação ao comprimento de transferência, é que se pretende estudar a aderência das armaduras mais utilizadas no mercado nacional brasileiro, no caso a cordoalha de sete fios, com diâmetro de 15,2 mm, visando esclarecer o seu comportamento em relação à aderência e a transferência da força de protensão.

Objetivos

O propósito central desta pesquisa é a investigação teórico-experimental da transferência de protensão e, conseqüentemente, do comprimento de transferência, para cordoalhas de sete fios com diâmetro de 15,2 mm, pré-tracionadas e pré-aderentes em concreto de 45 MPa. Essa cordoalha foi escolhida por ser uma das mais usadas nas construções de concreto protendido.

Para isso, foi feito um estudo comparativo entre as equações encontradas na literatura técnica internacional, com os resultados obtidos nesta pesquisa, e com as diversas equações encontradas nos seguintes códigos e normas, nacionais e internacionais: ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), FIB CEB Model Code (2010) e Eurocode 2 (2004).

Desta forma, o presente trabalho pretende avaliar se a ABNT NBR 6118 (2014) apresenta uma formulação para cálculo do comprimento de transferência que corresponde à realidade e, caso não corresponda, se ela está a favor ou contra a segurança.

Estrutura da Dissertação

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, mais referências bibliográficas e apêndices.

O Capítulo 1 apresenta a revisão bibliográfica. Ele foi dividido em subitens que englobam diferentes assuntos abordados: Concreto protendido, aderência no concreto protendido e comprimento de transferência. No final do capítulo é feito um resumo dos aspectos mais relevantes da revisão bibliográfica para esta pesquisa.

O Capítulo 2 aborda a análise teórica sobre o comprimento de transferência. Nessa análise foram utilizadas formulações empíricas encontradas na literatura técnica internacional e as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), FIB CEB Model Code (2010) e Eurocode 2 (2004). Os resultados obtidos foram comparados entre si.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental desenvolvido neste trabalho. O método de ensaio adotado foi o Método ECADA, o qual divide-se em duas partes: (1) medição do comprimento de transferência das vigas nas operações de retirada da protensão; (2) ensaios de arrancamento e análise do deslizamento da cordoalha em função da variação de força de protensão. Também estão detalhados os arranjos de ensaio e a instrumentação utilizada, assim como a descrição e os resultados dos ensaios-pilotos e dos ensaios de caracterização dos materiais.

O Capítulo 4 contém a descrição e a análise de resultado dos ensaios. Esses resultados foram apresentados na forma de gráficos e de tabelas, e foram comparados entre si. Neste capítulo, é feita a análise comparativa entre os resultados teóricos e experimentais.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras, dentro do tema aqui abordado.

As referências bibliográficas incluem as obras consultadas.

Nos apêndices se encontram alguns cálculos complementares e a análise estatística dos dados dos ensaios de caracterização do concreto.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados os principais temas centrais deste estudo: concreto protendido, aderência e comprimento de transferência. Cada um desses tópicos é tratado em seções individuais.

1.1 Concreto protendido

De acordo com Pfeil (1983), a protensão pode ser descrita como “a técnica de introduzir antecipadamente um estado de tensões em uma estrutura, visando melhorar sua capacidade de resistência e seu desempenho diante das diferentes cargas impostas”. Desta forma, o concreto protendido consiste basicamente na utilização de cabos de aço no interior do concreto, os quais recebem um esforço de tração por meio de dispositivos hidráulicos. Então, esta tensão é transferida para o concreto com o uso de ancoragens, no caso da pós-tração, ou por atrito e aderência entre cabos e concreto, no caso da pré-tração.

Com a protensão, busca-se eliminar a tensão de tração no concreto, ou limitar esse esforço no valor da resistência à tração do concreto. Com isso, ocorre um uso mais racional do aço e do concreto.

Elementos de concreto protendido aderente dependem da aderência entre armadura ativa e concreto. Isso se deve ao fato da força de protensão na armadura ativa ser transferida para o concreto por meio da aderência na região final do elemento (Abrishami e Mitchell, 1993).

Para o concreto com armadura ativa com aderência inicial (pré-tracionada), antes do lançamento do concreto, a armadura ativa é pré-alongada com o auxílio de apoios independentes do elemento estrutural como apresentado na Figura 2, não persistindo a ligação dos apoios com a armadura após o endurecimento do concreto e, portanto, faz-se a ancoragem da armadura apenas por aderência.

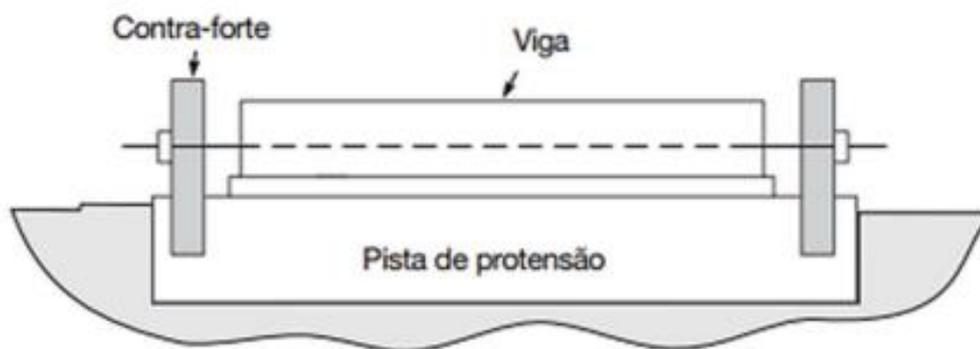


Figura 2 – Exemplo de viga de concreto protendida aderente à pré-tração (Bastos *apud* Monteiro, 2016)

Quando o concreto atinge a resistência especificada, inicia-se a transferência a partir da liberação dos cabos da ancoragem provisória. Após esta liberação, a força de protensão da armadura varia de zero nas extremidades do elemento até um valor máximo constante na zona central, chamado de força de protensão efetiva. O comprimento necessário para atingir a força de protensão efetiva é definido como comprimento de transferência (Vargas, Caro e Serna, 2013).

Ao contrário do concreto protendido aderente, onde a aderência entre o aço e o concreto é fundamental para transferir as forças de protensão, no concreto protendido não aderente, as forças são transmitidas principalmente por meio de dispositivos de ancoragem no final dos cabos de protensão.

As peças de concreto são fabricadas, geralmente em uma instalação de pré-fabricação. São utilizadas bainhas engraxadas para as cordoalhas de protensão. Esses cabos são tensionados posteriormente para aplicar as forças de protensão. Essas cordoalhas são temporariamente ancoradas em uma extremidade da peça, e a outra extremidade é deixada solta. Elas são então tensionadas para aplicar as forças de protensão projetadas. Essa etapa pode ser realizada usando macacos hidráulicos ou outros dispositivos de tensionamento. Após o tensionamento, a cordoalha é ancorada permanentemente. No concreto protendido não aderente, essa ancoragem é realizada por dispositivos específicos no final dos cabos, como cunhas de ancoragem. Esse processo é exemplificado na Figura 3.

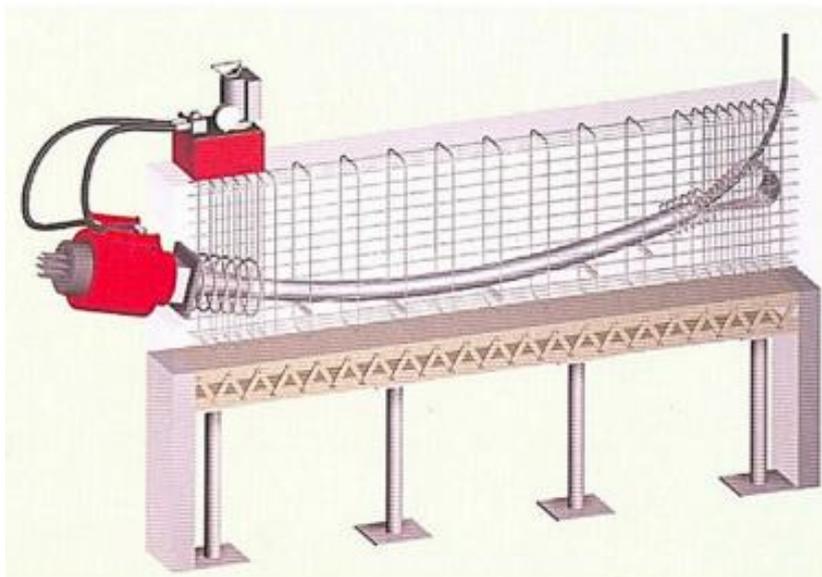


Figura 3 – Viga de concreto protendida não aderente na pós-tração (Bastos *apud* Monteiro, 2016)

No concreto protendido não aderente, as perdas por atrito são minimizadas, resultando em uma transferência mais eficiente das forças de protensão para a estrutura. A falta de aderência facilita o controle preciso das tensões no aço protendido, possibilitando uma distribuição mais uniforme das forças ao longo da estrutura.

O presente trabalho dá ênfase ao concreto protendido aderente, um vez que o método de protensão utilizado na pesquisa experimental é o da pré-tração. Todos os parâmetros apresentados para esse método serão abordados mais detalhadamente à frente, com suas importâncias e implicações.

1.1.1 Concreto

A execução da protensão pode causar solicitações prévias muito elevadas, frequentemente mais altas que as correspondentes a uma situação de serviço, sendo necessária uma atenção maior ao procedimento, assim, o controle de qualidade global é mais eficiente, o que estimula e permite o uso de concretos também de qualidade superior, conforme explica Hanai (2005).

Somado a isso, temos o fato de que a retração e a fluência do concreto, assumem, no concreto protendido, uma grande importância. No concreto protendido, a armadura de protensão trabalha e, ao se produzir o encurtamento, ela transfere ao concreto uma parte da energia armazenada do momento da protensão, o que favorece o encurtamento por retração e com isso a aderência não é solicitada, causando perda de protensão. O mesmo ocorre para a fluência (Leonhardt, 1983).

Além do controle da retração e da fluência, é importante que o concreto fresco apresente boa trabalhabilidade e baixa permeabilidade, proporcionando uma proteção eficaz à armadura ativa contra corrosão, uma vez que a mesma é mais suscetível, sobretudo à chamada “corrosão sob tensão”, devido às tensões elevadas a que está sujeita.

A baixa permeabilidade significa que o concreto tem uma menor capacidade de permitir a entrada de água, íons de cloreto e outros agentes agressivos. A água e os íons de cloreto são particularmente prejudiciais à armadura, pois podem iniciar processos corrosivos.

Do mesmo modo, a baixa permeabilidade também protege a armadura contra ataques químicos provenientes de substâncias agressivas presentes no ambiente circundante. Esses ataques químicos podem comprometer a integridade da armadura e acelerar a corrosão.

Já uma boa trabalhabilidade permite uma distribuição mais uniforme da armadura na estrutura de concreto. Isso é essencial para garantir que a armadura esteja devidamente envolvida pelo concreto, proporcionando uma barreira física eficaz contra a exposição direta a elementos corrosivos.

Além disso, a trabalhabilidade adequada contribui para a redução de vazios e fissuras no concreto. Vazios e fissuras podem facilitar a penetração de água e agentes agressivos, comprometendo a proteção da armadura.

Existe ainda, atualmente, uma tendência de utilizar concretos de alto desempenho, com resistências a partir de 50 MPa, tendo em vista especialmente a durabilidade (Hanai, 2005).

A esse respeito, a NBR 6118 de 2014 apresenta os requisitos mínimos de resistência à compressão e durabilidade, relacionados com a classe de agressividade ambiental (Tabela 1).

Tabela 1 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto
(ABNT NBR 6118, 2014)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Notas:					
1 - O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655					
2 – CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado					
3 – CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido					

Enfim, é necessário que o concreto tenha as melhores características tanto relacionado às propriedades mecânicas quanto à durabilidade e para isso é necessário que as recomendações da tecnologia do concreto sejam rigorosamente observadas.

Os agregados devem ser adequadamente selecionados quanto a origem mineralógica e granulometria e os aditivos usados não podem comprometer a integridade da armadura.

Além do cimento Portland comum, podem ser utilizados cimentos específicos, como o cimento de alta resistência inicial (ARI), o pozolânico, o de alto forno e o branco. Destaca-se aqui o uso do cimento ARI, que possibilita a diminuição do tempo de desfôrma das peças, sendo assim o mais utilizado.

No projeto de estruturas de concreto protendido, os seguintes dados são de particular interesse:

- a) f_{ckj} e f_{ctkj} : resistências características (especificadas) à compressão e a tração direta na idade de aplicação da protensão;
- b) f_{ck28} e f_{ctk28} : resistências características (especificadas) à compressão e a tração direta aos 28 dias;
- c) $E_{ci}(t_0)$: módulo de elasticidade do concreto na idade t_0 , em que se aplique uma ação permanente, como é o caso da protensão;
- d) E_{c28} : módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias;

e) Relação água/cimento em massa empregada na dosagem do concreto.

No presente trabalho, será adotado o concreto de resistência característica à compressão aos 28 dias de 45 MPa com cimento ARI.

1.1.2 Armadura ativa

Hanai (2005) explica que a armadura ativa é a armadura destinada a desenvolver forças de protensão, constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, na qual se aplica um pré-alongamento com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos e propiciar o melhor aproveitamento dos aços de alta resistência no Estado Limite Último (ELU).

Assim, apresentam-se nas seguintes formas:

- a) Fios trefilados de aço carbono, com diâmetro de 3 a 8 mm, fornecidos em rolos ou bobinas;
- b) Cordoalhas, compostas por fios enrolados em forma de hélice, com dois, três ou sete fios;
- c) Barras de aço-liga de alta resistência, laminadas a quente, com diâmetros superiores a 12 mm e com comprimento limitado.

Quanto às modalidades de tratamento, podem ser:

- a) Relaxação normal (RN): aços retificados por tratamento térmico que alivia as tensões internas de trefilação;
- b) Relaxação baixa (RB): aços trefilados que recebem tratamento termomecânico, que melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação do aço.

Para o concreto protendido, a deformação resultante da fluência sob tensão constante não desempenha um papel determinante. Isso ocorre porque, em estruturas protendidas, não é a tensão no aço que se mantém constante, mas sim o comprimento deformado obtido após a protensão, que permanece aproximadamente constante. Suas principais características mecânicas são:

- a) f_{ptk} : resistência característica à ruptura por tração;

- b) f_{pyk} : limite de escoamento convencional, correspondente à deformação residual após descarga de 0,2%. Para fios e cordoalhas, o limite de escoamento convencional é aproximadamente igual à tensão correspondente à deformação de 1%.
- c) E_p : valor médio do módulo de elasticidade.

Para o presente trabalho, foram adotadas cordoalhas de 15,2 mm de diâmetro, com relaxação baixa e resistência mínima à ruptura por tração de 190 kgf/mm².

1.1.3 Protensão

Como dito anteriormente, o sistema de protensão pode ser classificado quanto à aderência ou não aderência entre concreto e armadura ativa e quanto à ocasião que ela ocorre, se antes ou depois da concretagem e endurecimento do concreto. Este trabalho será especificamente para o caso da pré-tração.

Já os tipos de protensão estão relacionados aos estados limites de utilização para fissuração. Dessa forma, a protensão pode ser completa, limitada ou parcial. Quanto maior a agressividade do ambiente, maior será o nível de protensão exigido, pois menor deverá ser a probabilidade de fissuração da estrutura sob cargas em serviço.

Na protensão completa, a força de protensão é ajustada de modo que a resistência total do concreto seja completamente compensada pela protensão. Geralmente, é usada em situações onde é necessário um alto grau de controle sobre as deformações e fissuração.

Na protensão limitada, a força de protensão é ajustada para compensar apenas uma parte da resistência total do concreto. A estrutura não atinge o estado de equilíbrio apenas com as forças de protensão, exigindo a contribuição adicional de outras cargas de serviço. Pode ser usada quando se deseja um equilíbrio entre a eficiência da protensão e a economia de materiais.

Há, ainda, diferentes métodos de aplicação de protensão, como por macaco hidráulico, macaco mecânico e por torque, sendo o mais comum e o adotado pelo presente trabalho, a protensão mecânica, na qual nos aprofundaremos.

Conforme a NBR 6118 (2014), por ocasião da operação da protensão, o valor limite para armaduras pré-tracionadas é de tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites $0,77 f_{ptk}$ e $0,90 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação normal, e $0,77 f_{ptk}$ e $0,85 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação baixa.

As tensões induzidas no concreto pela ancoragem da armadura somente podem ser consideradas linearmente distribuídas na seção transversal do elemento estrutural a uma distância da extremidade dessas armaduras, chamada distância de regularização.

O projeto também deve considerar as perdas de força de protensão em relação ao valor inicial aplicado pelo macaco hidráulico. Essas perdas ocorrem antes da transferência da protensão para o concreto (perdas iniciais durante a pré-tração), durante o processo de transferência (perdas imediatas) e ao longo do tempo (perdas progressivas).

A NBR 6118 (2014) considera perdas iniciais aquelas decorrentes de atrito, do escorregamento dos fios na ancoragem, da relaxação inicial da armadura e da encurtamento do concreto.

A variação da força de protensão nesses elementos, por ocasião da aplicação da protensão ao concreto, e em razão do seu encurtamento, deve ser calculada em regime elástico, considerando-se a deformação da seção homogeneizada. O módulo de elasticidade do concreto a considerar é o correspondente à data de protensão, corrigido, se houver cura térmica.

As perdas progressivas não serão apresentadas pois não se aplicam a este trabalho.

1.2 Aderência no concreto protendido

O concreto protendido, da mesma forma que o concreto armado, é formado por dois materiais distintos, o concreto e o aço. Para estes dois materiais trabalharem como um conjunto solidário e garantir a transferência de esforços entre eles e assim o bom comportamento da estrutura, é necessário que haja aderência.

No caso do concreto protendido, a aderência pode se apresentar como aderência de peças pós-tracionadas (aderência posterior), nos aparelhos de ancoragem externos, ou, ainda, na ancoragem de peças pré-tracionadas. Neste item será tratada a aderência de cordoalhas de sete fios na pré-tração.

Conforme Dumêt (2003) apresenta, Lin e Burns (1981) afirmam que, para se determinarem as tensões de aderência existentes entre o concreto e os cabos, devem-se considerar dois estágios: antes e depois da fissuração do concreto. Na fase de pré-fissuração, é possível empregar a análise elástica para calcular as tensões de aderência. Isso significa que se assume um comportamento linear e elástico do material. Os estados limites associados a esta fase incluem o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS). No ELU, a estrutura deve suportar as máximas cargas de serviço sem colapsar, enquanto no ELS, as deformações devem ser limitadas para garantir o desempenho adequado da estrutura.

Entretanto, em situações práticas, se a estrutura não desenvolver fissuras, as tensões de aderência são insignificantes e não representam uma preocupação significativa. A grande parte das estruturas pré-tracionadas, em serviço, permanece livre de fissuras. Isso é especialmente relevante para o Estado Limite de Serviço, onde a fissuração excessiva pode impactar negativamente o desempenho da estrutura, mas a ausência de fissuras minimiza a preocupação com as tensões de aderência. A análise nesta fase pode incluir a verificação dos estados limites relacionados à fissuração controlada e ao desempenho durável da estrutura.

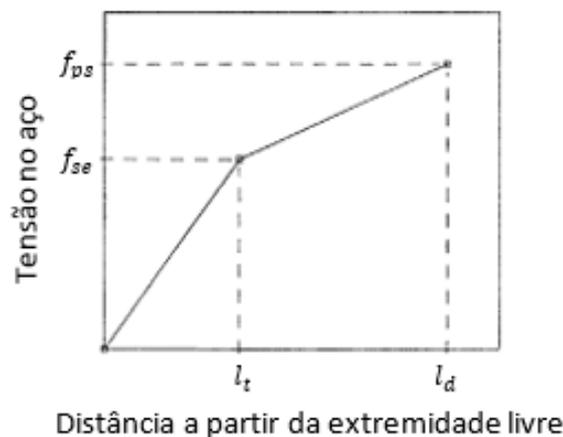
Nestes cenários, é essencial garantir os comprimentos necessários para transferência e ancoragem. Os comprimentos de ancoragem e transferência são críticos para assegurar que as forças de protensão sejam efetivamente transmitidas ao concreto, atendendo aos estados limites de serviço e último.

A tração no cabo no leito de protensão provoca uma redução no diâmetro do cabo devida ao Efeito de Poisson. Depois da liberação, a tensão nos cabos nas extremidades livres retorna a zero. Com essa redução da tensão do aço ao longo do comprimento de transferência, o diâmetro expande e exerce uma força contra o concreto circundante. Essa força atuante sobre o concreto causada pela expansão lateral, chamada de Efeito Hoyer, resulta na melhora do desempenho de aderência ao longo do comprimento de transferência (Abrishami e Mitchell, 1993).

Além disso, a transferência de protensão causa tensões de encurtamento elástico instantâneo no elemento de concreto, e a força de protensão diminui na

armadura. A compatibilidade das deformações entre a armadura e o concreto existe, e as tensões de aderência não são ativadas. Consequentemente, a força de protensão efetiva na zona central é ligeiramente inferior à força inicial de protensão (Vargas, Caro e Serna, 2013).

Quando o elemento de concreto é carregado, um comprimento de aderência complementar além do comprimento de transferência, que Abrishami & Mitchell (1993) chamam de comprimento de aderência à flexão, é necessário para desenvolver a tensão na armadura correspondente à tensão efetiva (Vargas, 2012). Dessa forma, um elemento de concreto protendido possui duas regiões com diferentes características de aderência (Abrishami e Mitchell, 1993), como mostra a Figura 4, e seu somatório resulta no comprimento de ancoragem (Vargas *et al.*, 2012).



Legenda: f_{ps} é a tensão na armadura pré-tracionada na seção crítica; f_{se} é a tensão efetiva; l_t é o comprimento de transferência; e l_d é o comprimento de aderência.

Figura 4 – Variação da tensão na cordoalha ao longo do comprimento de transferência e do comprimento de aderência à flexão (Abrishami e Mitchell, 1993)

Após a formação de fissuras no concreto, o cálculo das tensões de aderência adquire maior complexidade, uma vez que picos de tensão surgem nos locais das fissuras, o que inviabiliza a aplicação de análise elástica. Durante o serviço, mesmo vigas parcialmente protendidas exibem uma fissuração mínima. E mesmo que ocorram rupturas localizadas em pontos da cordoalha, na maioria das situações, a integridade da peça não é comprometida, desde que se tenham garantido os comprimentos de transferência e de ancoragem necessário.

Portanto, para as peças pré-tracionadas, o cálculo da aderência pode ser baseado na determinação dos comprimentos de ancoragem. Dumêt (2003) afirma que essa é a filosofia utilizada pelo ACI. Na realidade, para a tensão de aderência admitem-se valores constantes, e a favor da segurança, que são embutidos nos cálculos dos comprimentos de ancoragem. Já a ABNT NBR 6118 (2014) e a FIB Model Code (2010) apresentam o cálculo da tensão de aderência em função da resistência do concreto à tração, e a partir dela são calculados os comprimentos de ancoragem. O Capítulo 2 explica essa questão mais detalhadamente.

1.2.1 Tipos de aderência

A aderência entre cordoalha e concreto pode ser dividida em aderência química, por atrito e mecânica.

A aderência química, ou por adesão, é oriunda das ligações físico-químicas que se desenvolvem na zona de contato entre o aço e o concreto durante a pega do cimento. Segundo Tassios (1979 *apud* Dumêt, 2003), essa parcela tem um valor muito pequeno, sendo da ordem de 0,5 MPa a 1 MPa, para as peças de concreto armado.

A aderência por atrito é função do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, que depende da rugosidade da armadura, e é proveniente de pressões transversais que a barra sofre devido à retração do concreto, ou às forças externas de compressão, para o caso do concreto armado (Fusco, 1995 *apud* Dumêt, 2003). Além dessas, para o concreto protendido, as pressões transversais podem ser causadas pelo traçado helicoidal das cordoalhas, uma vez que o espaçamento da hélice varia conforme a variação de tensão na armadura, contribuindo para aumentar as pressões de compressão por contato.

A aderência por atrito tem valores maiores que a adesão. Segundo Eligehausen *et al.* (1983 *apud* Dumêt, 2003), para concretos com $f_{ck} = 30$ MPa em peças de concreto armado, a tensão de aderência por atrito pode variar de 0,4 MPa a 10 MPa.

No caso das cordoalhas de sete fios, a aderência mecânica depende da possibilidade, ou não, da armadura girar dentro do concreto. A cordoalha assume uma configuração helicoidal, o que resulta em reentrâncias ao longo de seu comprimento, semelhantes às nervuras das barras. Entretanto, para que ocorra o efeito de cunha, é

necessário impedir a rotação da cordoalha dentro do concreto, o que induz a manifestação de forças radiais que são responsáveis pelo surgimento das fissuras. Caso a rotação não seja impedida, a cordoalha irá girar dentro do concreto à medida que escorrega, o que não acionará a aderência mecânica. Por outro lado, a aderência mecânica também pode ser ativada pela presença de minúsculos grãos de agregados ou de cimento nos canais entre os fios da cordoalha e o concreto, o que pode levar a um certo travamento.

Não é possível determinar cada parcela de aderência. Adicionalmente, a aderência entre o aço e o concreto é significativamente influenciada pela retração, pela deformação lenta e pela fissuração do concreto (Dumêt, 2003).

No caso das peças de concreto pré-tracionado, há um fator adicional que contribui para a aderência da estrutura: é conhecido como o Efeito Hoyer. Segundo Fusco (1995 *apud* Dumêt, 2003), ao se transferir a força de protensão à peça de concreto por meio da liberação das ancoragens externas existentes no banco de protensão, na extremidade da peça, onde é nula a força de protensão, a cordoalha retoma o seu diâmetro inicial. A uma determinada distância da extremidade da peça, sob a ação da força de protensão, o diâmetro efetivo do fio reduz, devido ao efeito de Poisson. Ao longo do comprimento em que diâmetro é constante, exerce-se a pressão transversal de retração. No trecho inicial do fio, onde o diâmetro é variável, dá-se um efeito de cunha, capaz de solidarizar os dois materiais por meio de pressões radiais de compressão (Figura 5).

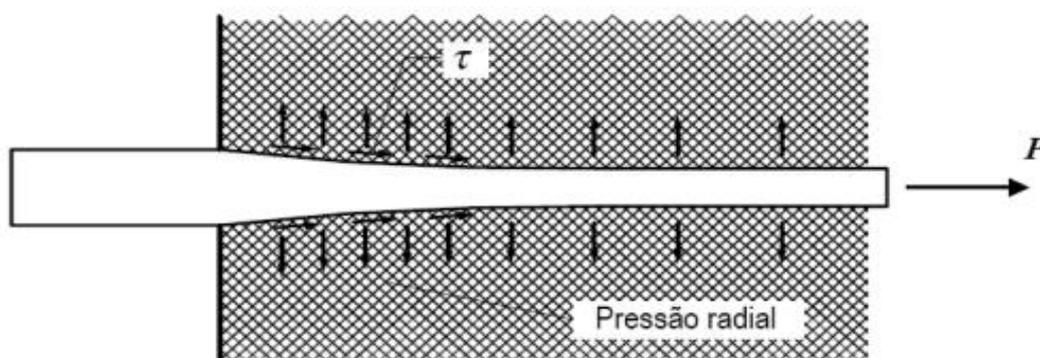
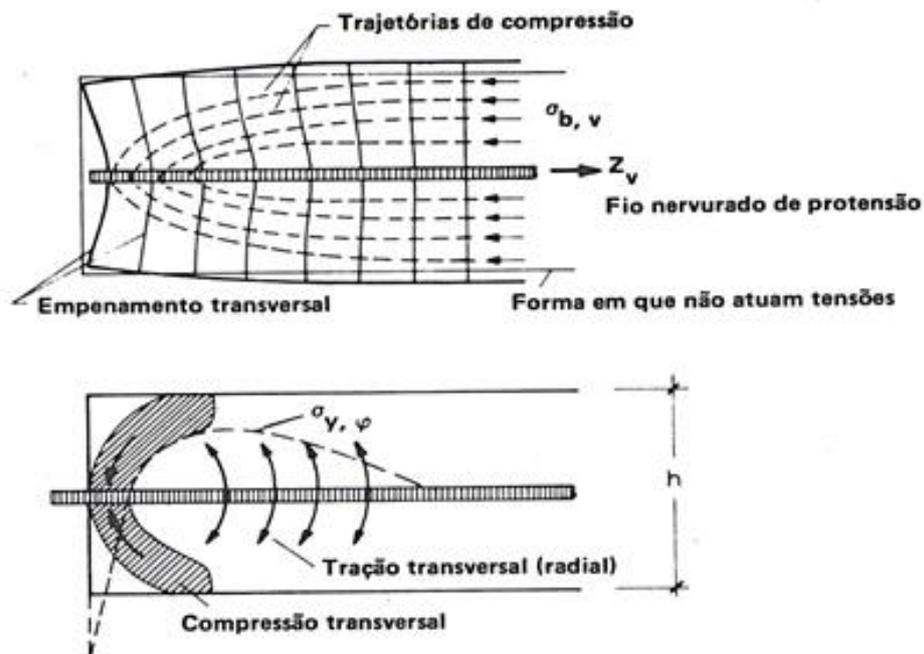


Figura 5 – Efeito Hoyer de um fio ancorado por aderência (Leonhardt, 1983)

1.2.2 Ancoragem por aderência

A ancoragem por aderência costuma ser empregada em casos de protensão com aderência inicial e só pode ser garantida pela aderência mecânica. No caso de cordoalhas de sete fios, o deslizamento é impedido pela efeito saca-rolha, devido às ondulações helicoidais de sua superfície.

Conforme Leonhardt (1983), a tensão na armadura produzida pela protensão deve ser absorvida dentro do trecho das extremidades do fio. Por conseguinte, o fio e suas nervuras se apoiam no concreto. A força de protensão é transferida para o concreto por meio das trajetórias de compressão, as quais se iniciam com uma certa inclinação e depois se desenvolvem com uma determinada curvatura. A curvatura das trajetórias de compressão origina uma tração espacial, isto é, em todas as direções radiais em torno da armadura de protensão surgem tração no concreto (Figura 6). A ancoragem só se mantém se o concreto não fendilhar devido a essas forças de tração transversais, também chamadas de forças de fendilhamento. No caso de forças relativamente altas e localizadas, é necessário adotar uma armadura transversal.



Legenda: $\sigma_{b,v}$ é a tensão no concreto devido à protensão; Z_v é a força de protensão considerada como força de tração na armadura de protensão

Figura 6 – Desenvolvimento das tensões no concreto (Adaptado de Leonhardt, 1983)

Para absorver a tensão na armadura de protensão de modo que seu valor na extremidade do fio seja zero, é necessário que exista um comprimento de transferência, que depende da resistência de aderência.

A força de protensão propaga-se pela seção de concreto e necessita de um certo comprimento de regularização até que seja atingida uma distribuição retilínea das tensões no concreto (Figura 7).

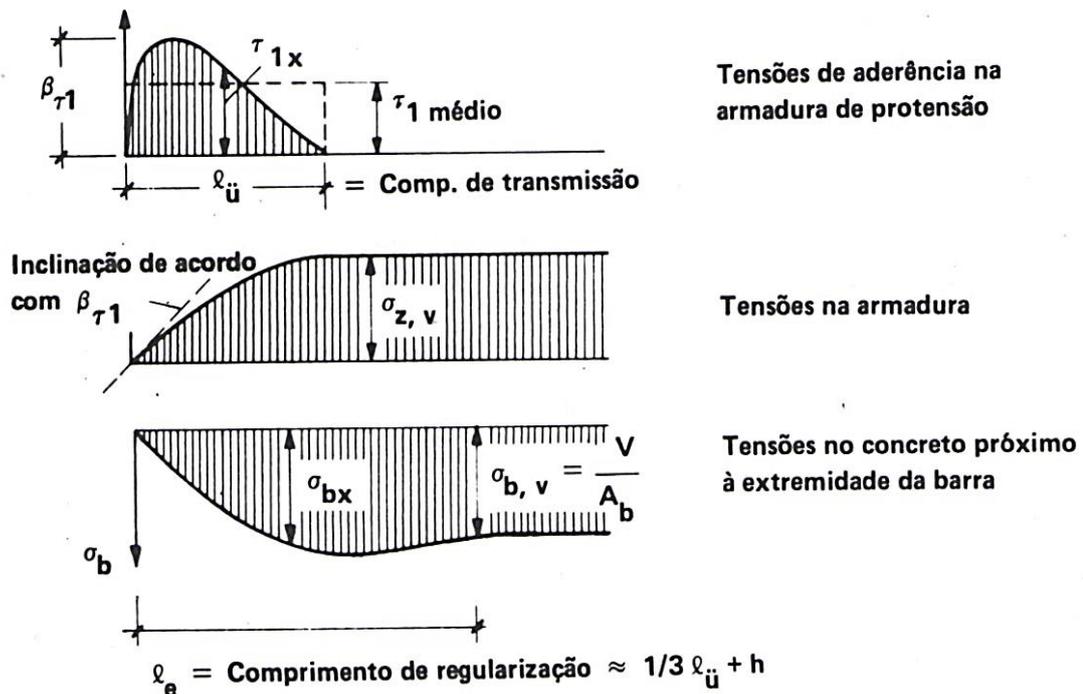


Figura 7 – Comprimento de transferência e comprimento de regularização em ancoragem por aderência de um fio nervurado pré-tensionado (Adaptado de Leonhardt, 1983)

1.2.3 Tensão de aderência

Como dito anteriormente, para se garantir um bom comportamento de peças de concreto armado e concreto protendido, é fundamental que seus elementos trabalhem de forma solidária, e assim, conseqüentemente, que se tenha uma excelente compreensão do fenômeno da aderência, para que elas sejam dimensionadas de modo a garantir a ancoragem das armaduras.

Na análise de peças de concreto armado, costuma-se usar três modelos distintos para estudar a tensão de aderência: o de viga à flexão, o de prisma carregado

axialmente, e o de arrancamento. O ensaio de arrancamento padrão tem sido o mais usado no estudo da aderência.

Conforme Dumêt (2003), esse ensaio é muito simples de ser executado e fornece uma leitura direta da tensão de aderência. Porém, há o inconveniente do concreto ficar comprimido, não havendo fissuração, o que faz com que os resultados obtidos não sejam muito representativos para outras peças, como as vigas, por exemplo. Além disso, há um confinamento da armadura devido ao cobrimento exagerado de concreto e há um impedimento da expansão transversal do corpo-de-prova, devido ao atrito com a placa de apoio da máquina de ensaio.

Apesar dessas questões, os testes de arrancamento ainda produzem resultados aceitáveis. Além dos resultados quantitativos, esses ensaios oferecem uma compreensão qualitativa do comportamento das estruturas em relação à aderência, especialmente quando se deseja avaliar diversos parâmetros que afetam a aderência. Portanto, apesar das limitações, esse tipo de teste continua sendo amplamente empregado. Independentemente do tipo de ensaio, o que se pretende obter é a representação do comportamento da aderência.

Segundo Ducatti (1993 *apud* Dumêt, 2003), “O modelo do comportamento da aderência é representado pela relação entre a tensão de aderência e o escorregamento. A primeira é identificada idealizadamente pela tensão de cisalhamento na interface barra-concreto, e o segundo pelo deslocamento relativo entre a armadura e o concreto, deslocamento este provocado pela diferença entre as deformações específicas do aço e do concreto”.

Ao longo do tempo, diversos trabalhos foram realizados buscando soluções para que o modelo seja mais representativo das peças de concreto armado e protendido, alguns deles sendo apresentados por Dumêt (2003). Entre eles, o de Cousins *et al.* (1992) possui grande relação com a presente pesquisa, uma vez que se assemelha bastante ao modelo adotado (Figura 8).

Nos ensaios de arrancamento padrão, por tração direta, o comprimento aderente é pequeno, em geral bem inferior ao comprimento de transferência. Conseqüentemente, a cordoalha não atinge a pré-tração completa nem apresenta o Efeito Hoyer, que é favorável à aderência. O método de ensaio proposto por Cousins *et al.* (1992), porém, leva em conta o Efeito Hoyer durante o arrancamento e, para tal, eles desenvolveram um ensaio em que o arrancamento se dá enquanto a cordoalha permanece pré-tracionada (Cousins *et al.*, 1992 *apud* Dumêt, 2003).

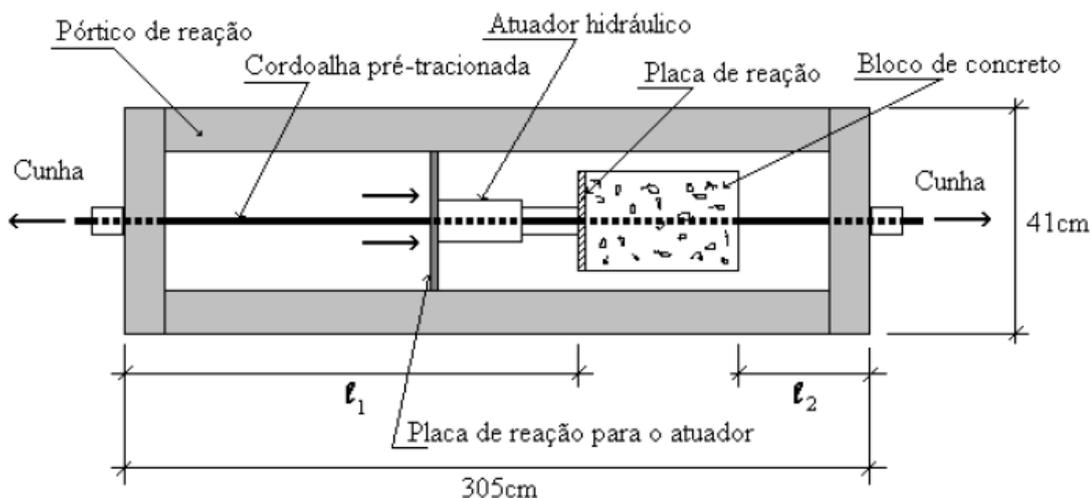


Figura 8 – Método de ensaio proposto por Cousins *et al.* (1992) (Dumêt, 2003)

O procedimento de ensaio, explicado por Dumêt (2003), é: (1) a cordoalha é pré-tracionada; (2) o bloco de concreto é confeccionado; (3) o atuador hidráulico é acionado, e empurra o bloco de concreto para a direita. À medida que o atuador hidráulico aplica uma força para a direita, a tensão na cordoalha ao longo de l_1 aumenta, ao passo que ao longo de l_2 a tensão diminui, mobilizando assim o Efeito Hoyer.

Um processo semelhante foi desenvolvido por Vargas (2001), que estudou a aderência de cordoalhas pré-tracionadas em concretos de altas resistências iniciais. O autor propõe um método de ensaio em que tanto a medição do comprimento de transferência como a execução do ensaio de arrancamento são feitos em sequência, no mesmo pórtico de protensão. Esse método de ensaio, que ele denomina ECADA (*Ensayo para Caracterizar la Adherencia mediante Destesado y Arrancamiento*), tem, segundo ele, como principal característica permitir que se determine o comprimento de ancoragem de uma armadura após a transferência da protensão. Com este método de ensaio, as operações de desprotensão e de arrancamento se realizam sobre a mesma peça de concreto, uma operação seguida da outra, sendo esta situação a que reflete mais fielmente o estado real dos elementos de concreto protendido com armaduras pré-tracionadas.

Estudos posteriores de Vargas com outros autores sobre o Método ECADA foram publicados, e o mesmo foi desenvolvido e aperfeiçoado. O presente trabalho adotou este método e, portanto, ele será abordado mais detalhadamente no Capítulo 3.

1.2.4 Comprimento de ancoragem

Todas as armaduras devem ser ancoradas de forma que seus esforços sejam completamente transferidos para o concreto. Na ancoragem por aderência, os esforços são ancorados por meio de um comprimento reto ou com grande raio de curvatura, seguido ou não de gancho. Com exceção das regiões situadas sobre apoios diretos, as ancoragens por aderência devem ser confinadas por armaduras transversais ou pelo próprio concreto (Leonhardt, 1983).

Para que os esforços sejam transferidos de maneira satisfatória é necessário que se garanta um comprimento mínimo para a peça atingir o equilíbrio, que é chamado de comprimento de ancoragem. Em outras palavras, o comprimento de ancoragem é o menor comprimento necessário para que a tensão na armadura varie de zero à tensão desejada. Caso o comprimento existente seja menor que o necessário, a cordoalha poderá sofrer um arrancamento antes de atingir o valor esperado.

Conforme a ABNT NBR 6118 (2014), os principais fatores que influenciam no comprimento de ancoragem são os mesmos que influenciam na tensão de aderência: as resistências do concreto à tração e à compressão, a retração, a presença de armadura de confinamento (estribos ou armaduras de fretagem), o cobrimento, o tipo e a distribuição das barras de aço, a posição das barras durante a concretagem, e o histórico de carregamento da peça. Esses fatores são considerados no cálculo do comprimento de ancoragem através de coeficientes, como pode ser visto no Capítulo 3, com as respectivas diferenças de uma norma para outra.

Na literatura técnica, encontram-se, para peças pré-tracionadas, as definições dos comprimentos de ancoragem:

- a) Comprimento de transferência: é o comprimento necessário para que a tensão na armadura vá de zero à tensão de protensão após todas as perdas, no momento da transferência da protensão, e, a partir desse ponto, enquanto a peça não entrar em serviço, a tensão na armadura permanecerá constante. O símbolo usado para esse comprimento varia de uma norma para a outra.
- b) Comprimento de ancoragem na flexão: é o comprimento necessário para que a tensão na armadura vá da tensão de protensão após todas as perdas até o valor final admitido. Esse valor limite varia de uma norma para a outra.

- c) Comprimento de ancoragem necessário: é a soma do comprimento de transferência com o comprimento de ancoragem na flexão.
- d) Comprimento de ancoragem básico: representa o comprimento necessário para a tensão na armadura ir de zero ao valor último admitido.
- e) Distância de regularização da força de protensão: distância a partir da qual as tensões induzidas no concreto podem ser consideradas linearmente distribuídas ao longo da seção transversal da peça. Esse comprimento é, normalmente, um pouco maior que o comprimento de transferência.

1.2.5 Modos de ruptura por aderência

De acordo com as diretrizes das normas, há essencialmente duas formas de falha associadas à perda de aderência: a ruptura por arrancamento e a ruptura por fissuração.

Existe, porém, uma grande variedade de modos de ruptura associados a esses dois, especialmente quando a peça é posta em serviço e passam a atuar as solicitações normais e tangenciais. O tipo de ruptura que uma peça irá sofrer é influenciado por vários fatores: o tipo da armadura (barra, fio, cordoalha), o tipo de conformação superficial da armadura (lisa ou nervurada), o diâmetro da barra, a existência ou não de armaduras de confinamento, a distância entre barras de uma mesma camada, o cobrimento, a tensão na armadura, a qualidade do concreto, e a condição superficial da barra, entre outros. Esses são fatores que, obviamente, influenciam na aderência das peças de concreto armado e protendido (Dumêt, 2003).

As áreas de concreto entre as nervuras da armadura são mobilizadas com a tentativa da barra se deslocar quando submetida a esforços de tração. Com o incremento dos esforços, começam a surgir fissuras inclinadas.

Esta configuração de esforços gera forças de compressão no concreto que podem ser decompostas em uma de atrito e uma de compressão perpendicular às nervuras. Essas forças de compressão podem provocar uma micro-fissuração e um micro esmagamento do concreto nessa região.

Se houver o desenvolvimento de tensões transversais e deformações de tração intensas, perpendiculares ao plano de compressão, pode ocorrer a ruptura do concreto (Caetano, 2008).

Este tipo de ruptura surge quando o confinamento não é adequado para assegurar a extração completa, ocorrendo em situações em que a tensão de tração causada pela aderência é superior à tensão de ruptura à tração do concreto.

As fissuras de fendilhamento tem orientação de acordo com o número de barras e sua configuração dentro do elemento e tendem a se propagar em direção às bordas, resultando na perda de cobrimento e de aderência.

Se os cobrimentos são maiores ou existem restrições, o fenômeno do fendilhamento pode ser inibido. Sob certas condições, ao invés da formação bem definida de fissuras, se formam várias fissuras menores e ocorre o esmagamento do concreto comprimido (Figura 9 (a)).

O arrancamento (Figura 9 (b)) ocorre principalmente quando a armadura está confinada, ou seja, quando o cobrimento do concreto é suficientemente grande para resistir às tensões radiais ou quando existe armadura transversal suficiente para impedir ou retardar a propagação da fissuração por fendilhamento e da fissuração decorrente da compressão dos concretos nos cones próximos às nervuras.

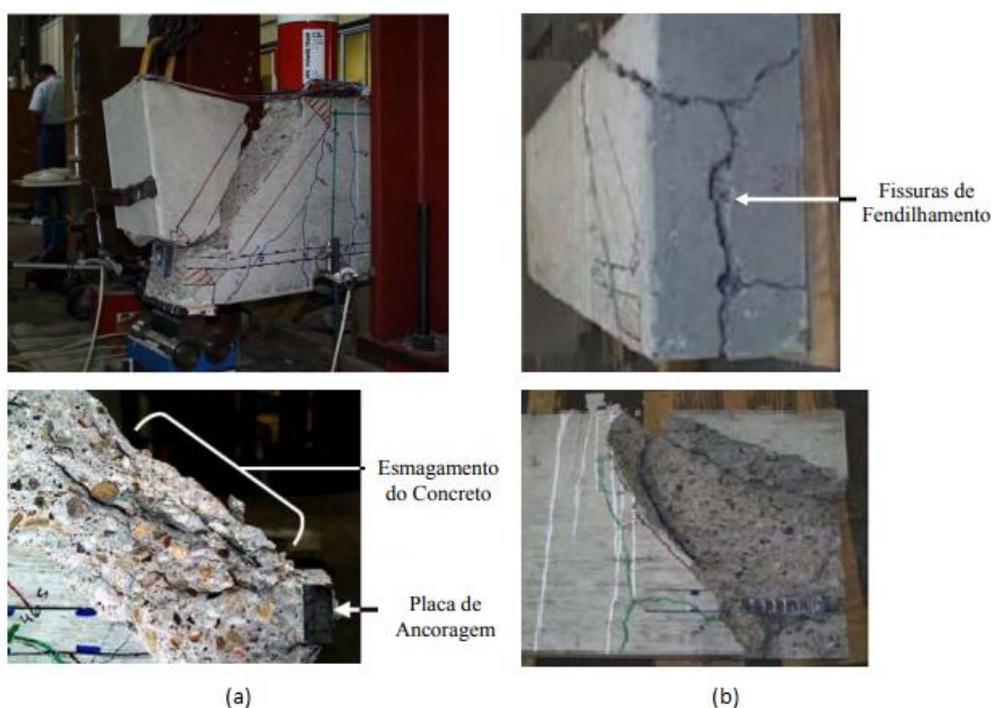


Figura 9 – Comparação de rupturas por (a) esmagamento e (b) fendilhamento do concreto (Caetano, 2008, adaptado de Thompson, 2002).

As cordoalhas apresentam um comportamento próprio, devido à forma helicoidal dos fios. Se for permitido que a cordoalha gire enquanto a aderência é perdida, sua ruptura ocorrerá por arrancamento, já que as tensões radiais de tração não serão ativadas. No entanto, se o giro for impedido, seja por meio de uma ancoragem externa ou pelo Efeito Hoyer, a cordoalha desenvolverá tensões radiais de tração, o que pode resultar em fendilhamento, como apontado por Dumêt (2003).

1.3 Comprimento de transferência

O comprimento de transferência é o comprimento necessário para produzir uma tensão constante de compressão na superfície de concreto (Abrishami e Mitchell, 1993). Dessa forma, a tensão na armadura ativa varia de zero na extremidade até o valor máximo (tensão efetiva) ao longo desse comprimento, conforme Figura 10.

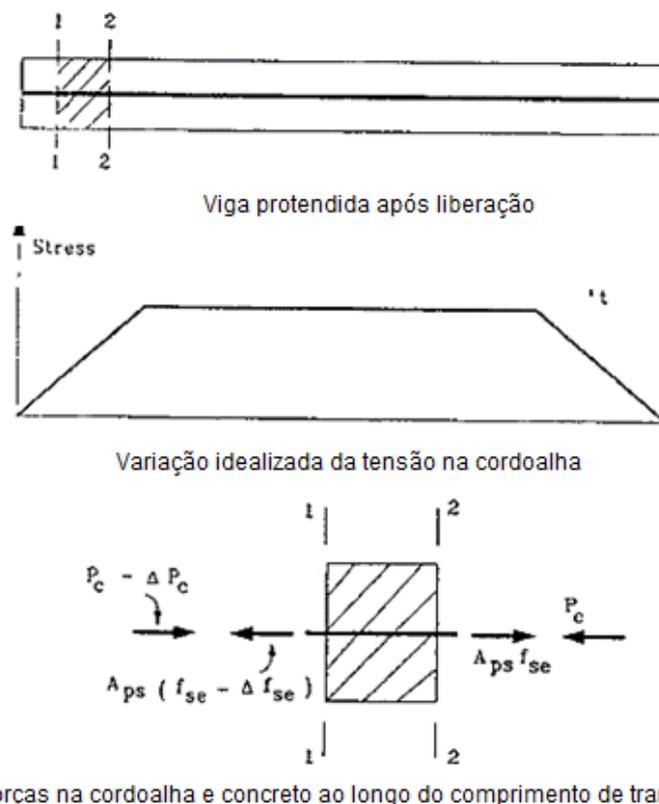


Figura 10 – Variação idealizada da tensão da armadura ao longo da viga protendida após liberação (Abrishami e Mitchell, 1993)

Esse processo consiste basicamente em três estágios:

- Protensão – a tensão inicial costuma ser em torno de 75% da capacidade nominal da armadura ativa;
- Concretagem da peça de concreto ao redor da armadura ativa;
- Liberação – Após a liberação da ancoragem provisória, a tensão na armadura varia de zero a tensão efetiva. Dependendo da compatibilidade de deformações entre a armadura ativa e o concreto, essa tensão será ligeiramente menor que a tensão inicial. A transferência de protensão causa um encurtamento elástico instantâneo no concreto, e a força de protensão diminui na armadura ativa. Depois do comprimento de transferência, há compatibilidade de deformação entre os elementos e as forças de aderência não são ativadas.

Como já se sabe, peças em concreto protendido dependem da aderência entre a armadura ativa e o concreto, meio pela qual é feita a transferência de esforços entre os elementos. A aderência, para o caso das cordoalhas, melhora ao longo do comprimento de transferência devido ao Efeito Hoyer.

A armadura ativa tem uma reserva de tensão igual a diferença entre a capacidade nominal e a tensão após a liberação. Essa reserva é ativada por forças externas e somente pode ser desenvolvida se a aderência entre concreto e aço permitir (Vargas *et al.*, 2006).

Quando a peça é carregada, a ativação da força de aderência aumenta a força na armadura ativa (Figura 11), então um comprimento complementar de aderência, chamado de comprimento de aderência à flexão, é necessário para desenvolver a tensão na armadura a partir da tensão efetiva (Vargas *et al.*, 2012).

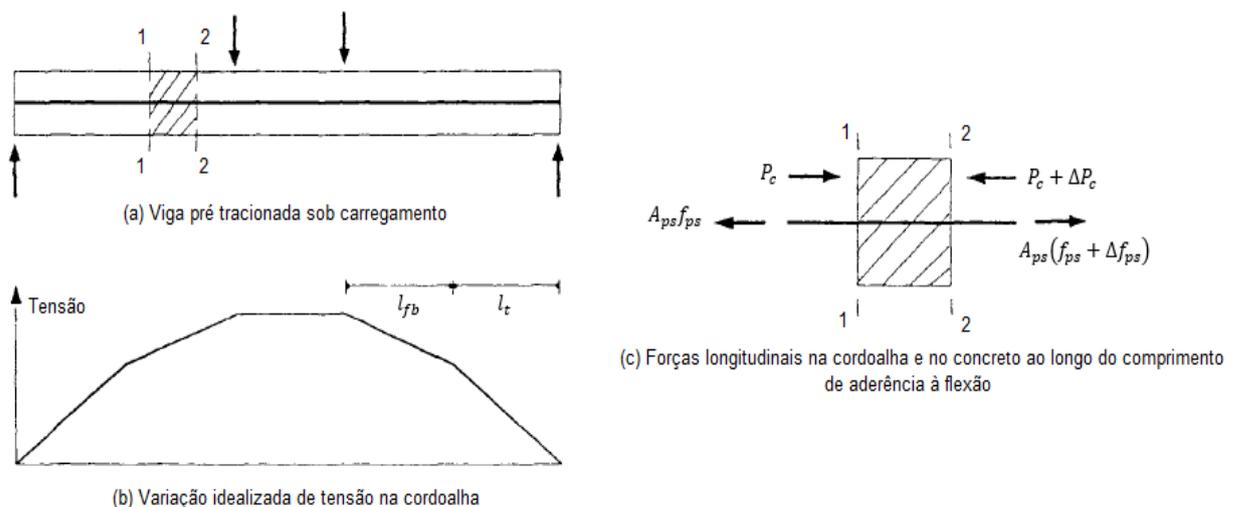


Figura 11 – Variação idealizada da tensão na cordoalha ao longo da viga protendida sujeita a carregamento externo (Abrishami e Mitchell, 1993)

De acordo com Guyon (1953 *apud* Vargas *et al.*, 2012) a hipótese de distribuição de tensão de aderência ser uniforme é inatingível, uma vez que uma zona elástica sempre existirá. Essas zonas elásticas são localizadas uma após a outra no fim do comprimento de transferência e também no início do comprimento de aderência à flexão. No entanto, foram reportadas respostas plásticas ao longo de quase todo o comprimento de transferência e uma pequena zona elástica no caso do comprimento de aderência à flexão (Vargas *et al.*, 2012).

Ainda assim, a distribuição uniforme da tensão de aderência é aceita por diversos códigos, normas e autores, assumindo uma variação linear da tensão nos comprimentos, resultando em um modelo bilinear.

O comprimento de ancoragem depende de vários fatores: resistência do concreto no momento da transferência de protensão, tensão inicial na armadura, cobertura de concreto, condição de transferência de protensão, geometria da armadura, resistência do concreto no momento do carregamento, etc. No entanto, não se chegou a um consenso sobre os principais parâmetros a serem considerados nas equações para calcular o comprimento (Vargas *et al.*, 2012).

1.3.1 Pesquisas sobre comprimento de transferência

A seguir são apresentados alguns dos principais trabalhos, escritos ao longo dos últimos setenta anos, referentes a este tema. Foi mantida a nomenclatura usada em cada trabalho, não sendo feita uma padronização dos símbolos utilizados.

a) JANNEY (1954)

Um dos primeiros e mais importantes trabalhos sobre aderência em concreto pré-tracionado foi o de Janney (1954). O autor realizou uma pesquisa que abordou a essência da aderência no concreto protendido pré-tracionado, utilizando testes de arrancamento e ensaios de flexão em vigas. Os primeiros ensaios tinham o objetivo de avaliar a aderência durante a transferência da protensão, enquanto os últimos se concentraram na análise da aderência em situações de flexão.

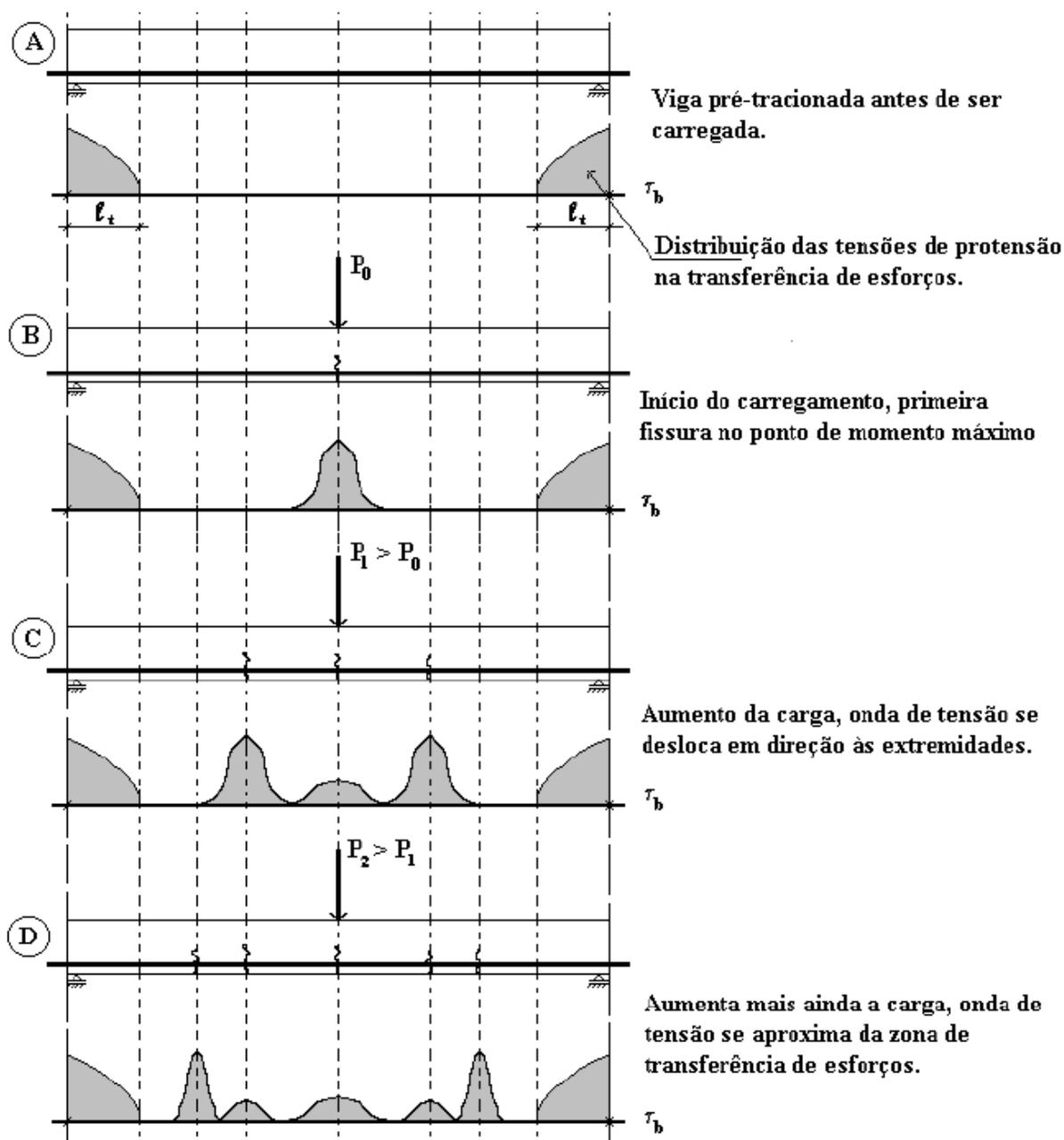
Janney (1954) notou que a armadura pré-tracionada desempenha um duplo papel. Uma porção da tensão de tração da armadura é empregada para pré-comprimir o concreto durante a etapa de protensão, antes que a peça seja colocada em uso.

Posteriormente, quando a peça é carregada além da resistência à fissuração, toda ou uma outra parte da tensão do aço à tração é utilizada para ajudar o concreto a resistir aos esforços solicitantes, ou seja, os momentos fletores.

Na fase inicial, após a avaliação dos resultados dos testes de arrancamento, Janney (1954) constatou que o diâmetro e as características superficiais das armaduras exercem uma influência significativa na definição do comprimento de transferência e na configuração da distribuição das tensões de aderência. Ele concluiu, também, que a transferência de esforços do aço para o concreto se dá, basicamente, devido à aderência por atrito entre os dois materiais. Para os diâmetros estudados ($2,5 \text{ mm} \leq \phi_p \leq 8 \text{ mm}$), o comprimento de transferência variou de 30 cm a 90 cm, aproximadamente.

Na segunda parte da pesquisa foram realizados 11 ensaios de flexão em vigas biapoiadas, com carga concentrada no meio do vão. A partir da análise do comportamento dessas vigas, Janney (1954) concluiu que a tensão máxima de aderência na flexão atua como uma onda ao longo da viga, partindo do ponto de momento máximo (ponto de introdução da carga), e se deslocando em direção às extremidades da peça (Figura 12).

Para a viga da Figura 12, antes da peça ser carregada, as únicas tensões de aderência atuantes são as provenientes da transferência da protensão, nas extremidades da viga (esquema A). A peça começa a ser carregada e quando a tensão ultrapassa a resistência à fissuração, surge a primeira fissura, e passa a atuar a tensão de aderência na flexão, até que esta atinja o seu valor máximo (esquema B). Quando isso ocorre, a cordoalha sofre um escorregamento local em relação ao concreto, resultando em uma diminuição na tensão de aderência nesse ponto específico e um deslocamento em direção à extremidade (esquema C). Esse fenômeno se repete até que a onda de pico de tensão de aderência atinja a zona de transferência de esforços (esquema D). Então, há uma redução brusca da capacidade de aderência na flexão na região da extremidade, pois a tensão na armadura tende a aumentar com o aumento do momento fletor. Isso faz com que haja a tendência de diminuição do diâmetro da cordoalha (efeito de Poisson), reduzindo assim a pressão transversal que a armadura exercia sobre o concreto (redução do Efeito Hoyer). Portanto, a ruptura deve ocorrer por aderência, quando a onda de pico de tensão atinge a zona de transferência de esforços, o que acontece antes da mesma atingir a extremidade da armadura ou a capacidade resistente da peça.



Legenda: (A) Viga pré-tensionada antes do carregamento (B) Início do carregamento (C) Primeiro aumento de carregamento (D) Segundo aumento de carregamento.

Figura 12 – Representação esquemática da onda da tensão de aderência (Janney, 1954; *apud* Dumêt, 2003)

De acordo com Janney (1954), os experimentos realizados em vigas conduziram à constatação de que o comprimento efetivo de aderência do aço na flexão é aproximadamente a diferença entre o comprimento total e o comprimento requerido para transmitir a força de pré-tração ao concreto. E que a distribuição da

aderência por transferência da protensão é significativa, pois ela limita a região onde as tensões de aderência na flexão podem ser acomodadas.

b) CASTRODALE, BURNS & KREGER (1988)

Os pesquisadores conduziram uma investigação acerca da aplicação de concretos de alta resistência (CAR) em vigas pré-tracionadas destinadas a pontes. O estudo foi dividido em duas partes: uma análise comparativa entre o comprimento de transferência de cordoalhas de sete fios com 0,5" (12,7 mm) de diâmetro em concretos de resistência normal e alta resistência. O objetivo foi avaliar a validade das equações de cálculo presentes nas diretrizes normativas para o CAR. Além disso, foram realizados ensaios em duas vigas pré-tracionadas de CAR em escala 1:3, com o intuito de verificar a aplicabilidade das prescrições normativas para o CAR. Foram feitos, também, vários ensaios de caracterização para o CAR. Foi utilizado um concreto de 83 MPa.

Para a análise do comprimento de transferência, foram ensaiados 22 corpos-de prova, cujos parâmetros estudados foram: a resistência à compressão (34 e 69 MPa); tipo de alívio da protensão (súbito e gradual); e o nível de tensão de compressão no concreto. A seção transversal dos modelos variou entre 10x10 cm e 15x15 cm.

Para as vigas, cuja seção transversal é apresentada na Figura 13, os aspectos estudados foram a capacidade última na flexão; o comportamento força *versus* deslocamento (que dá uma indicação da ductilidade); as deformações do concreto e da cordoalha em serviço e na ruptura; e a fluência. Os parâmetros do ensaio foram: a quantidade de cordoalha (13 \varnothing 3/8" e 9 \varnothing 3/8" – \varnothing 9,5mm) e a armadura de cisalhamento.

As principais conclusões do trabalho foram:

- O comprimento de transferência no CAR é aproximadamente 30% menor do que no concreto de resistência normal;
- O tipo de alívio da protensão, súbito ou gradual, não apresentou diferença significativa no comprimento de transferência do CAR;
- As prescrições da AASHTO fornecem valores conservadores, mas razoáveis, para a estimativa do comprimento de transferência;
- A deformação última de compressão do CAR é menor do que a do concreto de resistência normal, e ambas apresentaram valores menores do que o valor de 3‰;

- O valor de $f_c = 80$ MPa é o limite máximo que se deve utilizar para o CAR, no que diz respeito a sua produção comercial; a relação custo-benefício para valores maiores que 80MPa não é satisfatória.

c) COUSINS, JOHNSTON & ZIA (1990a), (1990b) e (1990c)

Os autores apresentaram dois estudos: um experimental para o comprimento de transferência e outro para desenvolvimento de equações analíticas para o cálculo dos comprimentos de transferência, de aderência na flexão, e de ancoragem necessário, para as cordoalhas com e sem revestimento epóxi, com diâmetros de 9,5 mm, 12,7 mm e 15,2 mm, com e sem revestimento epóxi. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados para os comprimentos médios de transferência ($l_{t,médio}$) (Cousins, Johnston e Zia, 1990 *apud* Dumêt, 2003)

Resistência do concreto à compressão, na transferência (f_{ci}) (MPa)	Tipo de revestimento	$l_{t,médio}$ (cm)	Número de medidas
30	Sem revestimento	127	20
	epóxi baixa-densidade	71	8
	epóxi média-densidade	48	16
	epóxi alta-densidade	43	8

Em Cousins, Johnston e Zia (1990b), foram desenvolvidas as equações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Equações para o cálculo dos comprimentos de ancoragem (Cousins, Johnston e Zia, 1990 *apud* Dumêt, 2003)

Comprimento de transferência (l_t)	Comprimento de ancoragem na flexão (l_b)	Comprimento de ancoragem necessário (l_d)
$0,5 \left(\frac{U'_t \sqrt{f'_{ci}}}{B} \right) + \frac{f_{se} A_p}{\pi d_b U'_t \sqrt{f'_{ci}}}$	$(f_{ps} - f_{se}) \left(\frac{\frac{A_p}{\pi d_b}}{U'_d \sqrt{f'_c}} \right)$	$l_t + l_b$

Na Tabela 3, tem-se:

$U'_t = 6,7$ (para cordoalhas de qualquer diâmetro, sem revestimento), psi;

$U'_d = 1,32$ (para cordoalhas de qualquer diâmetro, sem revestimento), psi;

f'_{ci} = resistência do concreto à compressão, na transferência (psi);

f'_c = resistência característica do concreto à compressão, na data de ensaio (psi);

B = Módulo da aderência (inclinação da curva de tensão de aderência na zona elástica (kPa/mm); adota-se um valor médio de 300 psi/in (81,5kPa/mm).

A_p = Área da seção transversal da armadura ativa, sq in;

d_b = Diâmetro da armadura ativa, in;

f_{ps} = Tensão na armadura ativa na força de flexão, psi;

f_{se} = Tensão efetiva na armadura ativa após perdas, psi.

c) ABRISHAMI & MITCHELL (1993)

Os autores apresentam um método para estudar as características de aderência de cordoalhas protendidas cuja chave é a determinação das tensões de aderência de um modo mais direto, a partir da medição das forças na cordoalha ao invés de deformações medidas na cordoalha ou no concreto de amostras de vigas.

A Figura 13 ilustra a técnica usada para estudo ao longo do comprimento de transferência.

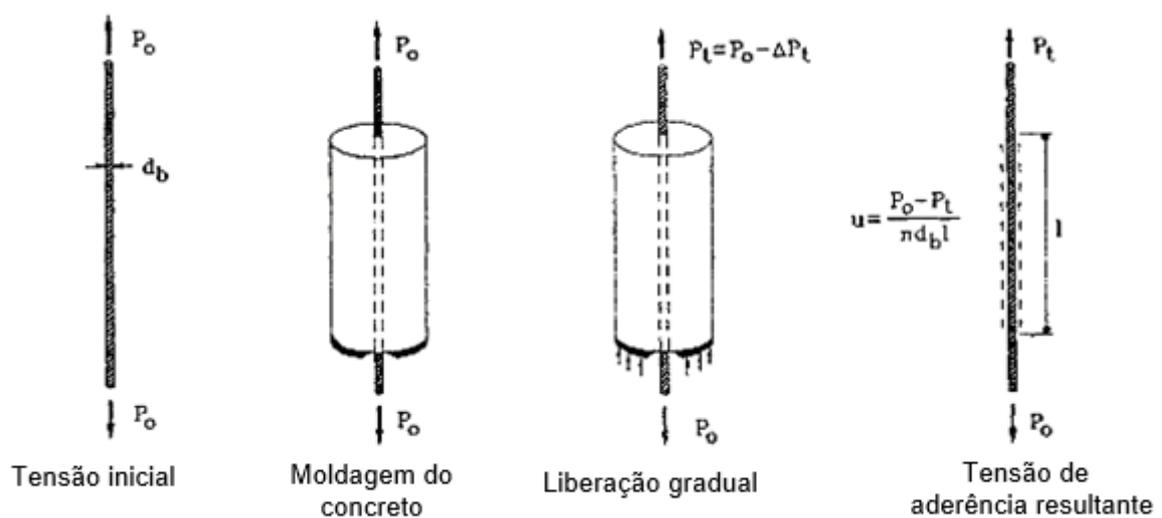


Figura 13 – Técnica de teste para simular comportamento da aderência ao longo do comprimento de transferência (Abrishami e Mitchell, 1993)

Esse procedimento simula as forças aplicadas de acordo com os passos:

Step 1 – A cordoalha de sete fios é tensionada a uma força inicial P_0 , como mostrado em (a);

Step 2 – É feita a concretagem ao redor da cordoalha e a cura até alcançar as propriedades desejadas antes do teste;

Step 3 – Para criar uma pequena tensão de aderência, a tensão no topo é reduzida de uma parcela ΔP_t . Neste estágio a tensão de aderência é dada por:

$$u = \frac{P_0 - P_t}{\pi d_b l} \quad (1)$$

Sendo:

P_0 = força de protensão na cordoalha;

P_t = força no topo da cordoalha;

l = comprimento da amostra de concreto.

d_b = Diâmetro da armadura ativa;

Step 4 – *Step 3* é repetido para aumento da redução da do carregamento no topo da amostra;

Step 5 – O escorregamento relativo entre concreto e aço na base e topo da amostra é medido para cada mudança de carregamento. A resposta completa de cada amostra é obtida plotando a tensão de aderência *versus* a média de escorregamento medida no topo e base para cada mudança de carregamento.

Para estudar as características de aderência ao longo do comprimento de aderência à flexão, os passos são os mesmos. No passo 3, no entanto, a tensão no topo é aumentada por uma pequena força ΔP_b e o escorregamento no topo e na base são medidos. Neste estágio a tensão de aderência é dada por:

$$u = \frac{P_b - P_0}{\pi d_b l} \quad (2)$$

Foi utilizado concreto de 35 MPa aos 28 dias, fôrma cilíndrica para concreto com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, e cordoalhas de sete fios com diâmetros 9,5 mm, 13 mm e 16 mm. Para cada cordoalha, foram ensaiadas três amostras.

As Tabela 4 e Tabela 5 mostram os resultados dos ensaios para comprimento de transferência e comprimento de aderência à flexão, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados dos testes ao longo do comprimento de transferência (Abrishami e Mitchell, 1993)

Amostra	d_b (mm)	Tensão Inicial P_0 (kN)	P_t na falha de aderência (kN)	P_b na falha de aderência (kN)	Tensão média de aderência (MPa)	Escorregamento no topo na falha de aderência (mm)
9.5A1	9,5	80	7	76	7,7	1,74
9.5A2	9,5	69	6	66	6,7	1,60
9.5A3	9,5	73	1	71	7,8	1,92
13A1	13	128	36	121	6,9	1,09
13A2	13	123	32	116	6,9	1,29
13A3	13	127	26	118	7,5	1,36
16A1	16	161	17	142	8,3	1,36
16A2	16	160	41	147	7,1	1,05
16A3	16	161	23	147	8,2	1,04

Tabela 5 – Resultados dos testes ao longo do comprimento de aderência à flexão (Abrishami e Mitchell, 1993)

Amostra	d_b (mm)	Tensão Inicial P_0 (kN)	P_t na falha de aderência (kN)	P_b na falha de aderência (kN)	Tensão média de aderência (MPa)	Escorregamento no topo na falha de aderência (mm)
9.5B1	9,5	37	39	77	4,2	0,68
9.5B2	9,5	20	22	70	5,4	1,35
9.5B3	9,5	19	21	65	4,9	1,27
13B1	13	62	66	110	3,6	0,71
13B2	13	62	67	110	3,5	0,72
13B3	13	62	67	107	3,3	0,68
16B1	16	90	95	150	3,6	0,54
16B2	16	90	98	154	3,7	0,78
16B3	16	61	67	114	3,1	0,59

Todas as falhas ocorreram por arrancamento da cordoalha. Nenhum fendilhamento foi observado na superfície dos cilindros de concreto. A tensão de aderência foi considerada a partir da diferença entre as forças no topo e na base da cordoalha.

A pesquisa teve as seguintes conclusões:

1. A técnica de teste é um método simples para determinar as características de aderência das cordoalhas protendidas ao longo dos comprimentos de transferência e de aderência à flexão.
2. Durante o teste, o carregamento na armadura protendida é ajustada pelo controle de deformação usando parafusos rosqueados. Essa técnica de carregamento possibilita a completa determinação da tensão de aderência *versus* escorregamento, incluindo a resposta pós pico.
3. Na simulação do comprimento de transferência, ocorreram aumento de valores de escorregamento na extremidade de liberação, enquanto na outra extremidade nenhum escorregamento ocorreu até o pico de tensão de aderência ser atingido.
4. Na simulação do comprimento de aderência à flexão, o aumento de valores de escorregamento ocorreu na extremidade carregada, e o pico de tensão de aderência é alcançado apenas depois que o escorregamento ocorre na outra extremidade.
5. Após atingir o pico de tensão de aderência nos comprimentos de transferência e de aderência à flexão, os aumentos no escorregamento em ambas as extremidades são aproximadamente aos mesmos. Isso indica o *pull-out* da cordoalha.
6. A tensão de aderência obtida no comprimento de transferência simulado foi maior que no comprimento de aderência à flexão. A razão entre eles foi de 1,5, 2,0 e 2,3 para as cordoalhas de diâmetro 9,5, 13 e 16mm, respectivamente. Essa razão aumenta com o aumento do diâmetro da cordoalha.
7. A rigidez da resposta tensão de aderência *versus* escorregamento é maior no comprimento de transferência do que comprimento de aderência à flexão.
8. Após a falha de aderência, as amostras de comprimento de aderência à flexão apresentam uma resposta mais dúctil, com uma tensão de aderência quase constante, enquanto o teste de comprimento de transferência exibe uma falha de aderência mais frágil.

d) DUMÊT (2003)

A autora apresenta investigações teórica e experimental sobre aderência de cordoalhas pré-tracionadas, em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço.

Foram utilizadas cordoalhas de sete fios com ϕ_p 12,7mm e fibras de aço curtas, com ganchos nas extremidades (DRAMIX) e fator de forma $l/d=45$. Foram realizados dois tipos de ensaios: arrancamento e flexão em viga. Os parâmetros estudados foram: comprimento de ancoragem ($5\phi_p$, $7\phi_p$ e $15\phi_p$), volume de fibra (zero, 40kg/m^3 e 60kg/m^3) e grau de protensão (zero e $0,8f_{ptk}$). O concreto apresentou resistências à compressão de 50 MPa no momento da transferência da protensão e 68 MPa na data de ensaio, aproximadamente.

A determinação experimental do comprimento de transferência de peças pré-tracionadas pode ser feita de duas maneiras: pela leitura direta das deformações na zona de transferência, seja na armadura seja no concreto; e através de expressões empíricas baseadas na penetração da cordoalha, que é medida na desprotensão. Na pesquisa, tentou-se analisar os dois processos.

As principais conclusões para os comprimentos de transferência são:

1. As fibras utilizadas em baixos teores não influem no comprimento de transferência das peças;
2. Os valores das prescrições normativas, para concretos de alta resistência, estão a favor da segurança em comparação com os valores desta pesquisa;
3. A qualidade do concreto, e não apenas a sua resistência à compressão, influi no comprimento de transferência das peças;
4. Para a medição da penetração da cordoalha no concreto, é muito importante estabelecer valores mínimos para a rigidez do sistema de sustentação da protensão, para que ele não influa nos resultados;
5. A medição das deformações por extensômetros elétricos colocados sobre a face externa das peças, no concreto, mostrou-se uma excelente opção. A colocação de extensômetros na armadura influi no comprimento de transferência, e a medição com o TENSOTAST, principalmente a de leitura analógica e manual, depende muito de fatores externos como a temperatura das peças e do ambiente, e a destreza, experiência e humor do pesquisador que está fazendo a leitura. Isso pode levar a resultados duvidosos. Por esses

motivos, eliminaram-se as leituras com o TENSOTAST para a pesquisa, já que os resultados obtidos não foram confiáveis;

6. Para o estudo apenas do comprimento de transferência, a utilização de modelos prismáticos, de preferência com seção transversal quadrada, com a armadura centrada deve fornecer resultados mais uniformes, já que apresentam tensão e deformação constantes ao longo de toda a seção, além de serem de execução mais simples, pois se pode eliminar as armaduras passivas.

e) OH, LIM, LEE & YOO (2014)

Os autores apresentaram um estudo dividido em duas partes: uma análise experimental e uma análise numérica. O objetivo era propor uma equação que previsse adequadamente o comprimento de transferência em peças de concreto protendido. Para isso, foram realizadas uma série de testes e uma análise em elementos finitos.

Os ensaios incluíram as variáveis: diâmetro da cordoalha (12,7 e 15,2 mm), resistência à compressão do concreto (35 e 50 MPa na transferência e 48,4 e 63 MPa aos 28 dias) e cobertura de concreto (3, 4 e 5 cm). As seções de concreto foram de 112,7 x 200 mm para as cordoalhas de diâmetro 12,7 mm e de 115,2 x 200 mm para cordoalhas de diâmetro 15,2 mm, e o comprimento das amostras era de 3000 mm.

A força de protensão foi transferida ao cortar a cordoalha na extremidade e teve valor inicial de 1862 MPa. Portanto, as tensões de compressão longitudinais na zona de aderência perfeita foi de 7,84 MPa para a cordoalha de diâmetro 12,7 mm e de 11 MPa para a de diâmetro 15,2 mm.

O comprimento de transferência foi determinado a partir da medição de deformações na superfície do concreto na altura das cordoalhas através de *strain gages* e a interseção da linha 95% AMS (*Average Maximum Strain*) com o diagrama de deformação. A Figura 14 mostra o resultado, já a Figura 15 mostra os comprimentos medidos na série de testes. Como pode ser visto, o comprimento de transferência diminui com o aumento da resistência do concreto e com o aumento da cobertura. Por outro lado, ele aumenta com o aumento do diâmetro da cordoalha.

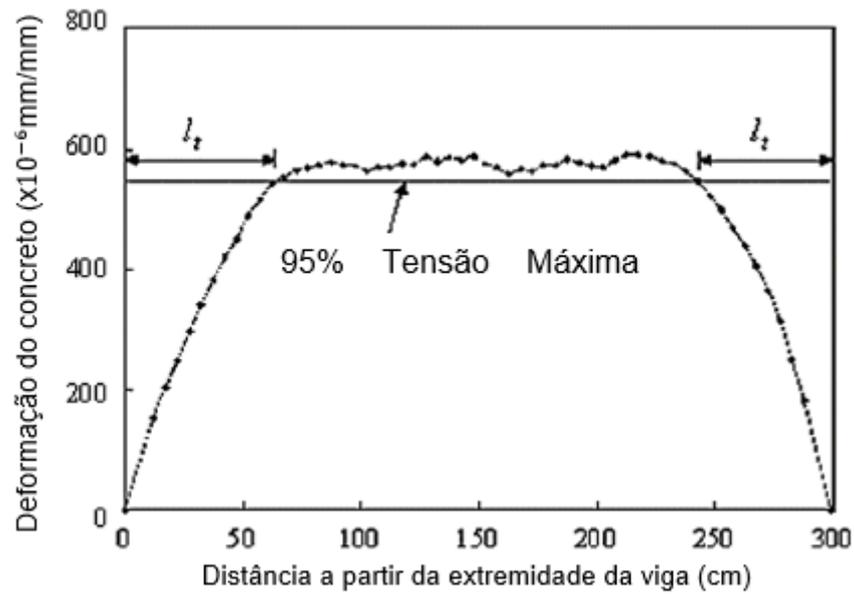


Figura 14 – Determinação do comprimento de transferência pelo método 95% MAS (Oh *et al.*, 2014)

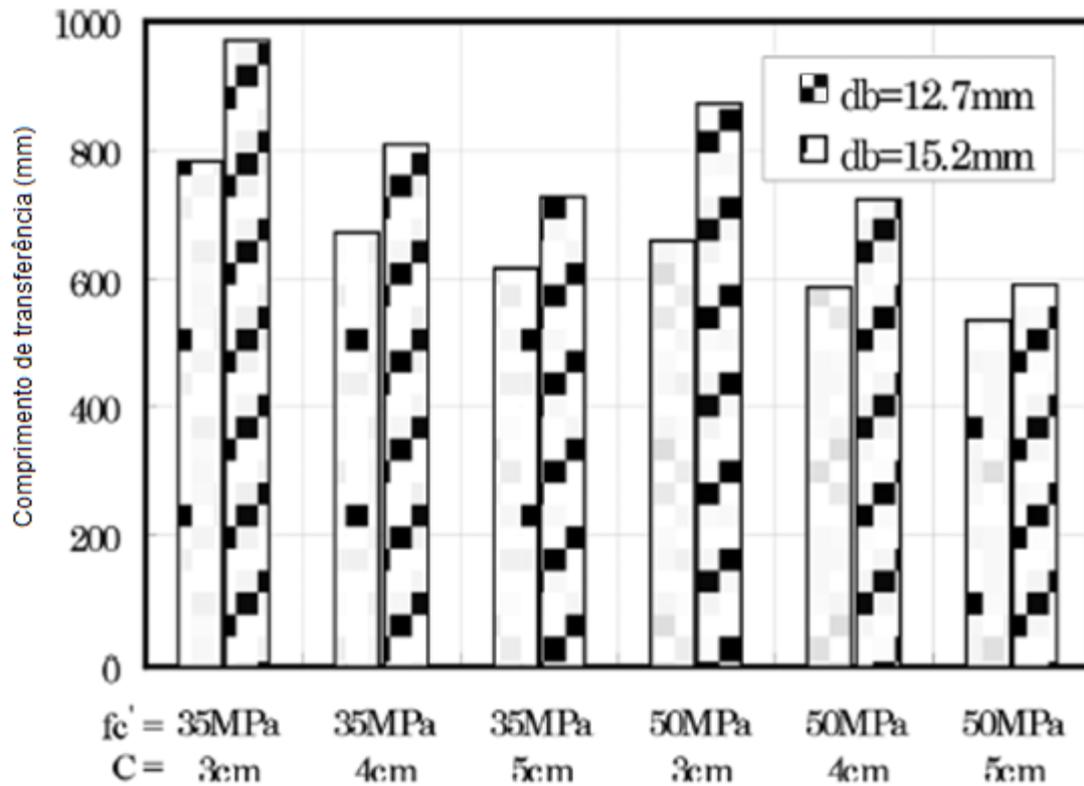


Figura 15 – Comprimentos de transferência medidos (Oh *et al.*, 2014)

A Tabela 6 mostra a comparação entre os comprimentos de transferência teóricos e experimentais. Como pode ser visto, há uma boa concordância entre os

resultados. No entanto, os comprimentos de transferência baseados no Código ACI 318 (2019) fornece um valor constante para diferentes coberturas e resistências de concreto, o que difere do real comportamento.

Tabela 6 – Comparação entre os resultados da análise e ensaios para comprimento de transferência (Oh *et al.*, 2014)

Diâmetro da cordoalha	Série de teste	Comprimento de transferência			
		Analítico (mm)	Experimental (mm)	Análise/Ensaio	Código (mm)
12,7 mm	N-3	747	781	0,96	724
	N-4	661	669	0,99	
	N-5	627	617	1,01	
	H-3	669	658	1,01	
	H-4	596	587	1,01	
	H-5	562	533	1,05	
15,2 mm	N-3	975	971	1,00	866
	N-4	823	809	1,02	
	N-5	779	727	1,07	
	H-3	873	872	1,00	
	H-4	735	722	1,02	
	H-5	697	591	1,17	

Com base nos resultados, foi proposta a equação para o comprimento de transferência:

$$l_t = 8\sqrt{f_{pe}} \left(\frac{1}{f_{ci}}\right)^{1/3} d_b^{1,28} \left(\frac{1}{C-20,0} + 0,25\right) \quad (3)$$

Onde:

l_t = comprimento de transferência (mm);

f_{pe} = tensão efetiva (MPa);

f_{ci} = resistência a compressão (MPa);

d_b = diâmetro da cordoalha (mm);

C = cobertura do concreto até o centro da cordoalha (mm).

Para os casos onde não há informações sobre a cordoalha, concreto e força de protensão, pode ser utilizada a equação:

$$l_t = 183\Delta + 340 \quad (4)$$

Onde Δ é o escorregamento final.

Desta forma, o trabalho apresenta as seguintes conclusões:

1. Foi derivada dos ensaios uma relação realista de tensão aderência e escorregamento. Essa relação foi incorporada nos elementos de interface, e o comprimento de transferência foi obtido de uma análise não linear de elementos finitos. O estudo indica que os resultados da análise concordam com os do ensaio.
2. O estudo indica que o comprimento de transferência aumenta com o aumento do diâmetro da cordoalha e a média desse aumento é de aproximadamente 30% quando o diâmetro passa de $\varnothing 12,7$ mm para $\varnothing 15,2$ mm.
3. O comprimento de transferência aumenta com o aumento da magnitude da protensão e a taxa de aumento é aproximadamente proporcional a raiz quadrada da força de pré-tração.
4. O comprimento de transferência diminui com a espessura da cobertura de concreto para todas as tensões de protensão. Esse efeito deve ser considerado nas fórmulas para um projeto mais racional de estruturas de concreto protendido.
5. O comprimento de transferência diminui com o aumento da resistência do concreto para todas as tensões de protensão e diâmetro de cordoalha. Isso significa que concretos de alto desempenho são mais efetivos para o comprimento de transferência, e esse efeito também deveria ser considerado nos projetos.
6. Uma equação realista foi proposta com base nas análises e ensaios. A equação considera não apenas os efeitos do diâmetro da cordoalha e da força de protensão, como também os efeitos da resistência do concreto e da cobertura. A equação proposta concorda bem com os ensaios.
7. O estudo também propõe uma equação realista para comprimento de transferência em termos de escorregamento final, que pode ser usada para calcular o comprimento de transferência em casos de não haver informação sobre o diâmetro da cordoalha, força de protensão, resistência do concreto e cobertura.
8. As normas e códigos para comprimento de transferência devem ser modificados para refletir os efeitos da cobertura e resistência do concreto mais realisticamente.

f) VARGAS *et al.* (2001, 2006, 2012, 2013a, 2013b, 2014)

Em sua tese de doutorado, Vargas (2001) apresenta um estudo sobre a aderência de cordoalhas pré-tracionadas em concretos de altas resistências iniciais. O trabalho compreende uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema e apresenta um novo método de ensaio, intitulado de Ensaio ECADA (*Ensayo para Caracterizar la Adherencia mediante Destesado y Arrancamiento*), para a determinação das propriedades aderentes de peças pré-tracionadas. A principal característica do ensaio é que ele permite que se determine o comprimento de ancoragem de uma armadura após a transferência da protensão. Com este método, as operações de desprotensão e de arrancamento se realizam sobre a mesma peça de concreto, uma operação seguida da outra, sendo esta situação a que reflete mais fielmente o estado real dos elementos de concreto protendido com armaduras pré-tracionadas (Vargas, 2001), como pode ser visto na Figura 16.

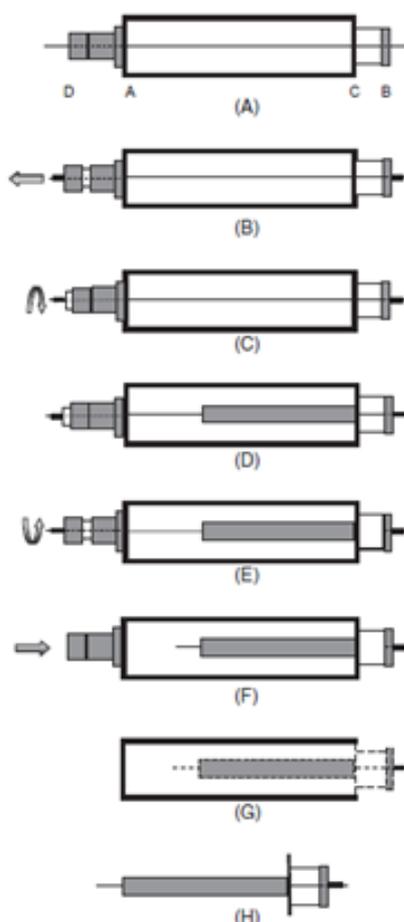


Figura 16 – Diagrama de fases de teste do Método ECADA (Vargas, Caro e Serna, 2013a)

O ensaio consiste na colocação da cordoalha passando por dentro da estrutura de protensão (A) seguido de sua protensão (B). Então é feita a ancoragem da cordoalha (C) e a concretagem da amostra no seu entorno (D). Após a cura do concreto, é feita a desprotensão (E e F) e, por fim, a viga é mantida para as leituras de ensaio (H).

Esse modelo ECADA criado por Vargas continua sendo seu objeto de estudo e o autor realiza posteriores trabalhos com outros autores, abordando sua metodologia, eficiência e aplicações.

As conclusões dos trabalhos são explicitadas abaixo.

Para Vargas *et al.* (2006), cuja função era apresentar o método:

1. O método ECADA permite a determinação do comprimento de transferência e de ancoragem de armaduras ativas de elementos nos quais a transmissão de pré-tensão foi realizada previamente.
2. O teste é sistemático e confiável.
3. O método de teste pode ser padronizado para diferentes propostas.
4. A instrumentação utilizada é simples, recuperável e não agressivo.
5. O método ECADA mostrou resultados mais confiáveis que procedimentos baseados na medição de deslocamento ou deformação longitudinal no concreto.
6. O comprimento das amostras é menor do que o necessário para quando são ensaiados elementos lineares, uma vez que o comprimento de ancoragem e de transferência é reproduzido apenas em uma extremidade.

Para Vargas *et al.* (2012), cujo trabalho apresenta um estudo experimental para determinar os comprimentos de ancoragem e transferência de uma cordoalha de sete fio de 13mm em diferentes concretos:

1. Um aumento na resistência à compressão do concreto no momento do ensaio resulta no aumento das tensões de aderência ao longo do comprimento de transferência e do comprimento de aderência à flexão.
2. A tensão média de aderência ao longo do comprimento de transferência como uma função da resistência do concreto à compressão no momento da transferência foi obtida por

$$U_T = 0,4f_{ci}^{2/3} \quad (5)$$

Onde:

f_{ci} = resistência a compressão (MPa).

3. A tensão média de aderência ao longo do comprimento de aderência à flexão transferência como uma função da resistência do concreto à compressão no momento do carregamento foi obtida por

$$U_C = 0,25f_{ci}^{2/3} \quad (6)$$

4. A razão U_T/U_C é 1,6, o que concorda com o resultado experimental de outros autores.
5. Com essa relação para U_T e U_C , a estimativa do comprimento de transferência, do comprimento de aderência à flexão e do comprimento de ancoragem é um bom ajuste para os comprimentos medidos para os 50 mm determinados na sequência de comprimento das amostras, e é confiável.
6. Foi proposta a seguinte equação para prever o comprimento de transferência de cordoalhas de 13 mm:

$$L_T = \frac{2,5A_p\sigma_{pi}}{\Sigma_p f_{ci}^{2/3}} \quad (7)$$

Onde:

d_b = diâmetro da cordoalha (mm);

Σ_p = perímetro na cordoalha (mm);

A_p = área da seção transversal da cordoalha (mm²).

7. Foi proposta a seguinte equação para prever o comprimento de ancoragem de cordoalhas de 13 mm quando o carregamento do teste coincide com o momento da transferência:

$$L_A = \frac{2,5A_p}{\Sigma_p f_{ci}^{2/3}} [\sigma_{pi}(\sigma_{pa} - \sigma_{pi})] \quad (8)$$

8. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com diferentes equações propostas por diversos autores e códigos para determinar os comprimentos de ancoragem e de transferência. As previsões dão comprimentos que variam consideravelmente e diferem de um para o outro.
9. O comprimento de transferência previsto geralmente superestima o comprimento de transferência medido, com previsões que fornecem valores mais do que o dobro do medido.
10. A partir dos resultados experimentais do estudo, foi obtido um alto valor de L_T/L_A .

Para Vargas, Caro e Serna (2013a), cujo trabalho apresenta um estudo experimental para determinar os efeitos da composição e resistência do concreto no comportamento da ancoragem por aderência para clarear os efeitos das propriedades que parecem contraditórias em literaturas prévias:

1. Valores de L_S (comprimento de ancoragem com escorregamento) são menores que os valores de comprimento de transferência L_T , principalmente quando a resistência do concreto à compressão é maior. Isso prova que altas tensões de aderência podem ser alcançadas devido a ação mecânica exercida pelo deslizamento da extremidade da cordoalha.
2. Os comprimentos de ancoragem L_A e L_S diminuem quando a resistência do concreto à compressão aumenta na idade de teste.
3. Os comprimentos de ancoragem L_A e L_S aumentam quando o fator a/c aumenta, mais significativamente quando o teor de cimento é maior.
4. O efeito do teor de cimento revela diferentes tendências a respeito do fator a/c :
 - Quando o teor de cimento aumenta, L_A tem grande aumento se a relação a/c for alta (0,50), aumenta pouco se a relação a/c é média (0,45 – 0,40), e não varia se a relação a/c é baixa (0,35);
 - Quando o teor de cimento aumenta, L_S tem grande aumento se a relação a/c é alta (0,50), e aumenta pouco se a relação a/c é média ou baixa (0,45 – 0,35), e não;
 - Para baixo teor de cimento (350 kg/m³), L_A e L_S praticamente não variam independentemente da relação a/c .

5. Exceto para baixo teor de cimento (350 kg/m^3), um aumento nas tensões médias de aderência U_A e U_S é observado para o mesmo teor de cimento quando a relação a/c diminui.
6. U_A e U_S assim como a taxa U_S/U_A aumenta quando a resistência à compressão do concreto na idade de teste aumenta.
7. Valores de U_S/U_T alcança de 1,13 a 1,78, com o valor médio de 1,45. Isso ocorre porque a ação mecânica exercida pelo desenvolvimento do escorregamento da cordoalha aumenta a força de aderência ao longo de L_S (comprimento de ancoragem com escorregamento) quando comparado a força de aderência L_A (comprimento de ancoragem – sem escorregamento). Essa contribuição pode realçar a força e ductilidade de membros protendidos através de uma capacidade potencial de aderência nas zonas finais após a falha de ancoragem de acordo com L_A ocorrer.

Para Vargas, Caro e Serna (2013b), cujo trabalho apresenta uma proposta e metodologia de ensaio para determinação da evolução do comprimento de transferência ao longo do tempo, com o objetivo de fornecer uma base para padronização, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. Uma metodologia experimental para estudar a evolução do comprimento de transferência ao longo do tempo e para determinar os comprimentos de transferência inicial e a longo prazo da armadura ativa em concreto protendido foi concebido.
2. O método de teste proposto é baseado na análise instantânea e ao longo do tempo do perfil da força na armadura ativa em apenas uma extremidade da peça de concreto protendido.
3. O método apresentado otimiza espaço, garante as condições de tensão de protensão para qualquer intervalo de tempo desejado e oferece a possibilidade de testar mais de um elemento na mesma estrutura desmontando uma parte dos elementos estruturais.
4. A instrumentação utilizada é simples e recuperável, e nenhum dispositivo de medição interno foi utilizado para não distorcer o fenômeno de aderência.

5. Os resultados experimentais obtidos usando a metodologia e equipamentos propostos permite uma análise da evolução do comprimento de transferência ao longo do tempo baseada na medição da força na armadura ativa.
6. A metodologia proposta torna possível estudar a influência de efeitos relacionados ao tempo no comprimento de transferência de variáveis como tipo de concreto, tipo de armadura ativa, seção transversal da amostra, idade de teste, nível de protensão, condições de armazenamento, entre outros.
7. Essa metodologia para teste do comprimento de transferência pode ser padronizada. Os critérios de padronização podem ser definidos em duas formas: para analisar o comprimento de transferência ao longo do tempo em um determinado conjunto de condições (para determinado tipo de concreto, nível de protensão, etc.) e para caracterizar o comportamento do tipo de armadura ativa sob condições padrões (material, traço do concreto, idade de liberação, condição de armazenamento, etc.).
8. A viabilidade da aplicação desse ensaio de comprimento de transferência e metodologia foi verificada em um programa experimental para verificar o comportamento da aderência de amostras de concreto protendido ao longo do tempo. Os resultados experimentais para duas condições diferentes de teste foram apresentados para dar suporte a essa declaração.
9. O método proposto forneceu resultados mais realistas do que aqueles baseados na medição das deformações longitudinais do concreto ou do escorregamento da armadura na extremidade livre.

Para Vargas *et al.* (2014), cujo trabalho apresenta uma técnica de teste para medir os parâmetros específicos relacionados à aderência aço-concreto e às perdas de protensão, obteve as seguintes conclusões:

1. Foi desenvolvida uma técnica de teste para medir simultaneamente forças e escorregamento na armadura ativa e deformações no concreto em amostras de concreto protendido. A técnica de teste reproduz sequencialmente a transferência de protensão e estágios de carregamento, e simula o comportamento em uma das extremidades da peça.

2. A partir dos resultados do teste, diretamente ou por cálculos retroativos usando a teoria de conceitos mecânicos, diversos parâmetros específicos podem ser determinados.
3. Essa técnica permite obter conhecimentos adicionais sobre o comportamento da aderência de armaduras protendidas e perdas de protensão para melhor determinação dos comprimentos de ancoragem e de transferência, e avaliar a força de protensão em diferentes seções transversais.
4. A técnica de teste mostrou resultados satisfatórios, possuindo boas qualidades para aplicação para a indústria de concreto pré-moldado.

O Método ECADA será melhor explicado no Capítulo 3, uma vez que é método adotado por este trabalho para realização dos ensaios e determinação dos comprimentos de transferência.

1.3.2 Comentários gerais

A grande maioria das pesquisas adota como parâmetros básicos, para a determinação dos comprimentos de ancoragem, o diâmetro das cordoalhas (ou fios), a tensão na armadura, o cobrimento e a resistência do concreto à compressão. Mesmo assim, as pesquisas apresentam grandes diferenças em seus resultados, chegando à diferentes equações.

No entanto, os autores afirmam que as normas técnicas tendem a serem conservadoras quanto ao cálculo do comprimento de transferência e, as mais recentes, ainda apontam que as normas não levam em consideração aspectos como o cobrimento e a diferença entre concreto normal e CAD.

Alguns dos resultados apresentados na literatura foram usados em comparação com os resultados desta pesquisa. Também para a análise teórica, foram utilizadas equações encontradas na revisão bibliográfica, algumas já citadas neste capítulo, para a caracterização do problema. Este estudo está apresentado no Capítulo 3.

2 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

O comprimento de transferência e o comprimento de ancoragem são parâmetros importantes a serem considerados no projeto de estruturas protendidas, especialmente ao utilizar protensão aderente.

O comprimento de transferência é a distância ao longo da qual a força de protensão aplicada aos cabos é transferida efetivamente para o concreto. Em outras palavras, é a região onde a aderência entre o aço de protensão e o concreto é suficientemente desenvolvida para garantir a transferência eficaz das forças de protensão.

Calcular o comprimento de transferência é crucial para assegurar que a força de protensão aplicada seja transmitida de maneira eficiente ao concreto. Se o comprimento de transferência for insuficiente, a força de protensão não será totalmente transmitida, comprometendo o desempenho da estrutura.

O comprimento de ancoragem refere-se à extensão adicional, além do comprimento de transferência, na qual os cabos de protensão são ancorados no concreto para garantir a fixação adequada. Esta região é necessária para evitar o deslizamento dos cabos após a protensão.

O comprimento de ancoragem é fundamental para garantir a segurança e estabilidade da estrutura. Se o comprimento de ancoragem for insuficiente, há o risco de deslizamento dos cabos, o que comprometeria a eficácia da protensão e, conseqüentemente, a capacidade de carga e o desempenho da estrutura.

Ambos os comprimentos são essenciais para evitar falhas na protensão, como deslizamento ou perda de força. Calcular ambos é crucial para assegurar o desempenho adequado da estrutura em termos de capacidade de carga, durabilidade e segurança.

Foram escolhidos os seguintes códigos e normas, nacionais e internacionais, para serem avaliados: NBR 6118 de 2014, ACI 318 de 2019 e CEB Model Code de 2010. A seguir são apresentados os cálculos para a determinação dos comprimentos de transferência.

2.1 ABNT NBR 6118 (2014)

Para o cálculo do comprimento de transferência (l_{bpt}) de cordoalhas de sete fios pré-tracionadas, com liberação gradual da protensão, a NBR 6118 (2014) fornece a seguinte equação:

$$l_{bpt} = 0,5l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (9)$$

Onde:

l_{bpt} = comprimento de transferência;

σ_{pi} = tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão;

f_{pyd} = limite de escoamento de cálculo da armadura de protensão;

l_{bp} = comprimento de ancoragem básico:

$$l_{bp} = \frac{7}{36} \emptyset \frac{f_{pyd}}{f_{bpd}} \quad (10)$$

\emptyset = diâmetro da cordoalha;

f_{bpd} = tensão de aderência de cálculo da armadura ativa:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{cta} \quad (11)$$

η_{p1} = 1,2 para cordoalhas de 7 fios;

η_{p2} = 1 para situações de boa aderência;

0,7 para situações de má aderência;

f_{cta} = valor de cálculo da resistência do concreto à tração, obtido na idade de aplicação da protensão, para a determinação do comprimento de transferência; e na idade de 28 dias, para a determinação do comprimento de ancoragem;

$$f_{cta} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (12)$$

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto = 1,4;

$f_{ctk,inf}$ = resistência característica inferior do concreto à tração:

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (13)$$

$f_{ct,m}$ = resistência média do concreto à tração direta (MPa):

$$\text{Para concreto até classe C50: } f_{ct,m} = 0,3f_{ckj}^{2/3} \quad (14)$$

$$\text{Para concreto a partir de C55: } f_{ct,m} = 2,12 \ln \ln (1 + 0,11f_{ckj}) \quad (15)$$

$$f_{ckj} = f_{ck} 10^{S \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right)} \quad (16)$$

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

f_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto aos j dias;

$S = 0,38$ para concreto de cimento CIII e IV;

0,25 para concreto de cimento CPI e II;

0,20 para concreto de cimento CPV-ARI;

t = idade efetiva do concreto, expressa em dias.

2.2 ACI 318 (2019)

Para o cálculo do comprimento de transferência (l_{tr}), o ACI 318 (2019) fornece a seguinte equação:

$$l_{tr} = \left(\frac{f_{se}}{3000} \right) d_b \quad (17)$$

Onde:

l_{tr} = comprimento de transferência;

f_{se} = tensão efetiva na cordoalha, após perdas de protensão (psi);

d_b = diâmetro da cordoalha (in).

2.3 CEB Model Code (2010)

Para o cálculo do comprimento de transferência (l_{bpt}), o Model Code (2010) fornece a seguinte equação:

$$l_{bpt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptd}} l_{bp} \quad (18)$$

Onde:

l_{bpt} = comprimento de transferência;

σ_{pi} = tensão na cordoalha após liberação;

α_{p1} = 1,0 para liberação gradual

1,25 para liberação repentina;

α_{p2} = 1,0 quando o momento fletor e o cisalhamento são considerados;

0,5 para verificação da tensão transversal na zona de ancoragem;

α_{p3} = 0,5 para cordoalhas;

0,7 para fios;

$$f_{ptd} = f_{ptk}/1,15 \quad (19)$$

l_{bp} = comprimento de ancoragem básico:

$$l_{bp} = \frac{7\phi f_{ptd}}{36 f_{bpd}} \quad (20)$$

f_{bpd} = tensão de aderência de projeto:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctd} \quad (21)$$

Onde:

η_{p1} = 1,4 para fios nervurados;

1,2 para cordoalhas de 7 fios.

η_{p2} = 1,0 para todas as cordoalhas com uma inclinação de 45°- 90° com em relação à horizontal durante a concretagem;

1,0 para todas as cordoalhas horizontais até 250 mm da base ou pelo menos 300 mm abaixo do topo da seção de concreto durante a concretagem;

0,7 para demais casos.

f_{ctd} = valor de cálculo da resistência do concreto à tração, obtido na idade de aplicação da protensão, para a determinação do comprimento de transferência; e na idade de 28 dias, para a determinação do comprimento de ancoragem;

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,min}}{\gamma_c} \quad (22)$$

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto = 1,5;

$f_{ctk,min}$ = menor resistência característica do concreto à tração:

$$f_{ctk,min} = 0,7f_{ct,m} \quad (23)$$

$f_{ct,m}$ = resistência média do concreto à tração direta (MPa):

$$\text{Para concreto até classe C50: } f_{ct,m} = 0,3f_{ckj}^{2/3} \quad (24)$$

$$\text{Para concreto a partir de C50: } f_{ct,m} = 1,12f_{ckj}^{1/3} \quad (25)$$

2.4 Eurocode 2 (2004)

Para o cálculo do comprimento de transferência (l_{pt}), o Eurocode 2 (2004) fornece a seguinte equação:

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}} \quad (26)$$

Onde:

l_{pt} = comprimento de transferência;

σ_{pm0} = tensão na cordoalha após liberação;

$\alpha_1 = 1,0$ para liberação gradual;

1,25 para liberação repentina;

$\alpha_{p3} = 0,19$ para cordoalhas;

0,25 para cabos de seção circular;

\emptyset = diâmetro da cordoalha;

$$f_{bpt} = \eta_{p1}\eta_1 f_{ctd} \quad (27)$$

$\eta_{p1} = 3,2$ para cordoalhas de 3 e 7 fios;

2,7 para fios;

$\eta_{p2} = 1,0$ para situações de boa aderência;

0,7 para situações de má aderência;

f_{ctd} = valor de cálculo da resistência do concreto à tração, obtido na idade de aplicação da protensão, para a determinação do comprimento de transferência; e na idade de 28 dias, para a determinação do comprimento de ancoragem;

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} 0,7 f_{ctm}(t)}{\gamma_c} \quad (8)$$

$\alpha_{ct} = 1,0$;

$\gamma_c = 1,5$;

$$f_{ctm}(t) = (B_{cc}(t))^\alpha f_{ctm} \quad (29)$$

$\alpha = 1,0$ para $t < 28$ dias;

2/3 para $t \geq 28$ dias;

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \text{ para } < \text{C50} \quad (30)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \ln [1 + (f_{cm})/10] \text{ para } > \text{C50} \quad (31)$$

$$B_{cc}(t) = e^{S[1-(28/t)^{1/2}]} \quad (32)$$

t = idade efetiva do concreto, expressa em dias;

$S = 0,38$ para concreto de cimento Classe S;

0,25 para concreto de cimento Classe N;

0,20 para concreto de cimento Classe R.

As classes de cimento S, N e R referem-se a diferentes tipos de cimentos portland utilizados na construção civil. Essas classes têm características específicas que atendem a requisitos particulares em diversos tipos de projetos.

O cimento de Classe S desenvolve resistências mecânicas mais rapidamente em comparação com outros tipos de cimento Portland. É frequentemente utilizado em situações em que é necessário que o concreto atinja rapidamente resistências elevadas, como em obras que necessitam de desforma rápida. Pode ser apropriado em condições de baixas temperaturas, onde o concreto precisa ganhar resistência mais rapidamente.

O cimento de Classe N é o tipo mais comum de cimento Portland, utilizado em uma ampla variedade de aplicações na construção civil. Possui características padrão e não é especialmente formulado para resistências iniciais elevadas ou resistências finais extremamente altas. É adequado para a maioria das aplicações convencionais de concreto.

O cimento de Classe R combina características de alta resistência inicial e final, ele desenvolve resistências iniciais rapidamente e continua a ganhar resistência ao longo do tempo. É utilizado em situações onde é necessário tanto um ganho rápido de resistência quanto resistências finais elevadas.

2.5 Comentários sobre as prescrições normativas

O ACI 318 (2019) considera apenas que a peça tenha capacidade resistente, ou seja, que não entrará em colapso, o que acontece depois da ruptura não interessa. Esta abordagem leva a um dimensionamento um pouco mais conservador, principalmente para os concretos de alta resistência. Por outro lado, apresenta uma formulação mais simples, baseada apenas nas tensões das armaduras, não se referindo, diretamente, à tensão de aderência, e sim admitindo para ela um valor constante médio, e a favor da segurança.

Como o cálculo pela ABNT NBR 6118 (2014) é baseado nas sugestões da FIB Bulletin 1 (1999), ela apresenta a mesma formulação para comprimento de transferência, com pequenas diferenças em alguns coeficientes em relação ao CEB

Model Code (2010) e ao Eurocode 2 (2004). Como Dumêt (2003) pontua, as três se interessam pelo desempenho do material, ou seja, as considerações sobre as deformações são de grande importância, pois não só a garantia da capacidade resistente deve ser satisfeita, mas também deve ser conhecido o nível de deformação a que a peça estará sujeita. Nesta abordagem, o comportamento pós-ruptura deve ser conhecido (a curva descendente do gráfico Tensão de aderência *versus* Escorregamento).

Os resultados obtidos segundo a NBR 6118 (2014), o CEB Model Code (2010), o ACI 318 (2019) e o Eurocode 2 (2004), para os dados desta pesquisa (Tabela 7), são apresentados na Tabela 8. Os cálculos completos dos comprimentos de transferência se encontram no Apêndice A. Já a análise comparativa entre as formulações para a variação de cada parâmetro é feita a partir dos gráficos da Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

Tabela 7 – Dados para cálculo dos comprimentos de transferência

f_{ck} (MPa)	f_{ck7} (MPa)	ϕ (mm)	f_{pyd} (MPa)	σ_{pi} (MPa)
45	32,75	15,2	1900	975,61

Tabela 8 – Valores dos comprimentos de transferência, em metros (m)

Prescrição normativa	NBR 6118 (2014)	CEB Model Code (2010)	ACI 318 (2019)	Eurocode 2 (2004)
Comprimento de transferência (mm)	720	770	710	820

Como se pode observar, para os resultados apresentados na Tabela 8, os valores para os comprimentos de transferência, para o concreto estudado, apresentam diferenças iguais ou superiores a 10 cm entre as normas ACI 318 e Eurocode 2, e entre o Eurocode 2 e a NBR 6118.

Como se pode observar, no gráfico da Figura 17, os valores de comprimento de transferência para o ACI 318 (2019) são valores médios. Para um valor de resistência do concreto aos 28 dias de até 46 MPa e 50 MPa, respectivamente, a formulação da NBR 6118 (2014) e do Model Code (2010) são mais conservadoras que o ACI 318 (2019), a favor da segurança, porém para resistências superiores e

CAD, essa relação se inverte. A diferença entre os valores da NBR 6118 (2014) e do CEB Model Code (2010) pode ser atribuída às diferenças nos coeficientes de segurança. O Eurocode 2 (2004) é a norma mais conservadora. Com exceção do ACI 318, as demais normas mostram uma relação inversamente proporcional entre comprimento de transferência e resistência do concreto à compressão, assim, quanto maior a resistência, menor será o comprimento.

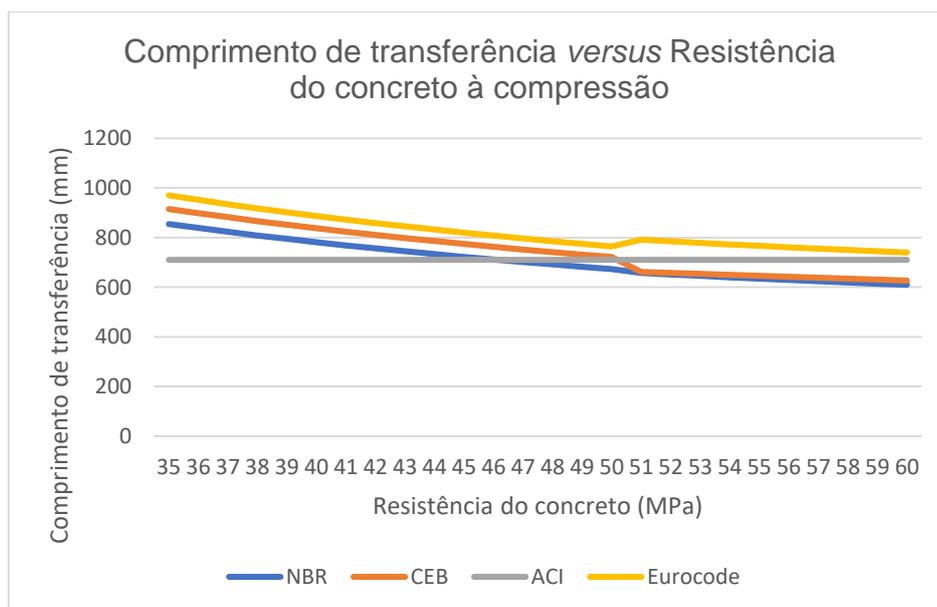


Figura 17 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da resistência à compressão do concreto segundo normas técnicas

Pelo gráfico da Figura 18, que mostra a relação entre o comprimento de transferência e a tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão, pode-se perceber que as normas apresentam uma relação diretamente proporcional entre eles. A inclinação levemente maior para as linhas do Eurocode 2 (2004), do Model Code (2010) e da NBR 6118 (2014), nessa ordem, revela uma tendência maior de crescimento do comprimento de transferência em função da tensão. O Eurocode 2 (2004) segue sendo a norma mais conservadora.

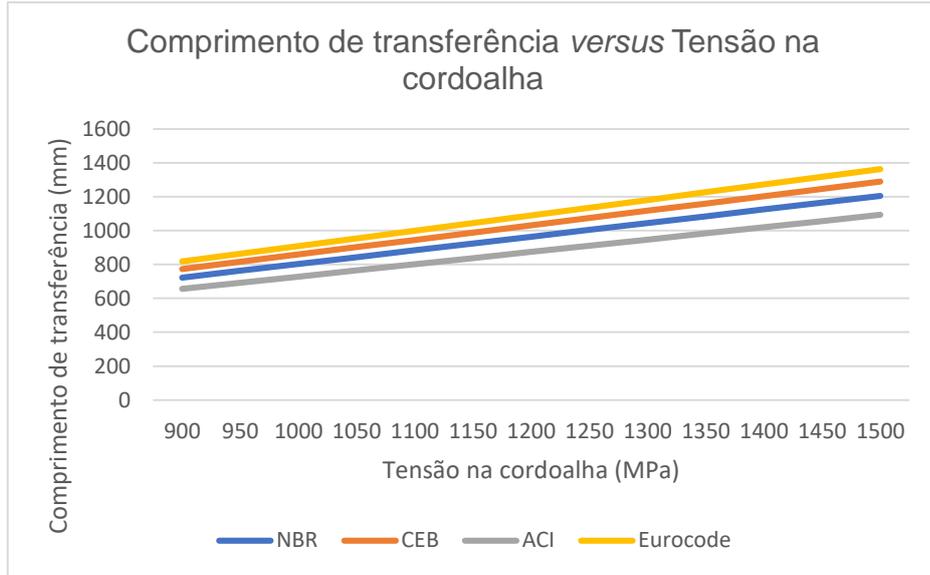


Figura 18 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão segundo normas técnicas

Pelo gráfico da Figura 19, pode-se ver que todas as normas e códigos apresentam uma relação inversamente proporcional entre comprimento de transferência e diâmetro da cordoalha, sendo que entre elas, o Eurocode 2 (2004) é o mais conservador. O ACI 318 (2019) é o que apresenta os menores comprimentos para ambos os casos, e o CEB Model Code (2010) é o que apresenta menor diferença entre os comprimentos de transferência para diâmetros diferentes.

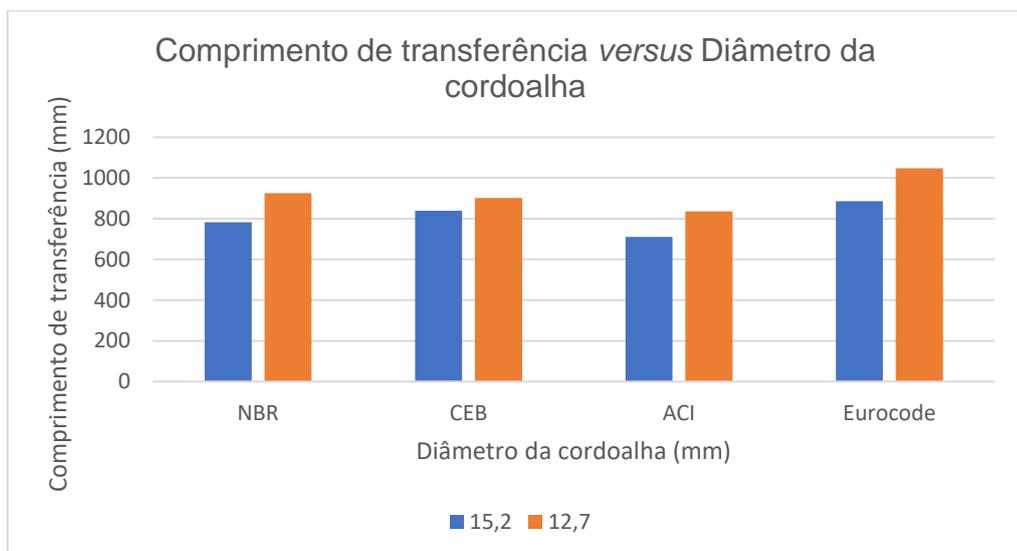


Figura 19 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão segundo normas técnicas

2.6 Análise comparativa das formulações teóricas

A análise comparativa das formulações teóricas visa, principalmente, verificar a margem de segurança das prescrições normativas em relação às expressões empíricas avaliadas, as quais se basearam em resultados de ensaios experimentais.

Foram elaborados três gráficos (Figura 20, Figura 21 e Figura 22) para a análise comparativa, levando em conta alguns dos parâmetros estudados anteriormente neste capítulo, para as normas apresentadas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), CEB Model Code (2010), Eurocode 2 (2004) e os autores apresentados Cousins, Johnston e Zia (1990c), Oh *et al.* (2014), Vargas *et al.* (2012). A Tabela 9 apresenta os dados que foram utilizados e mantidos constantes durante as comparações, exceto quando ele próprio era o parâmetro avaliado.

Tabela 9 – Dados utilizados na análise comparativa

$A_p = 143,5 \text{ mm}^2$	$f_{pyk} = 1710 \text{ MPa}$	$\sigma_{pi} = f_{se} = f_{pe} = 975,61 \text{ MPa}$
$\emptyset = d_b = 15,2 \text{ mm}$	$f_{pyd} = 1486,96 \text{ MPa}$	$f_{ckj} = f_{ci} = f'_{ci} = 32,75 \text{ MPa}$
$\Sigma_p = 42,46 \text{ mm}$	$f_{ptd} = 1652,17 \text{ MPa}$	$C_1 = 5 \text{ cm}$
$f_{ptk} = 1900 \text{ MPa}$	$B = 0,0815 \text{ MPa/mm}$	$C_2 = 4 \text{ cm}$

O gráfico da Figura 20 apresenta a variação dos comprimentos de transferência em função da resistência do concreto à compressão. De maneira geral, todas as formulações, com exceção do ACI 38 (2019), consideram que a resistência do concreto à compressão influencia no comprimento de transferência, sendo que, quanto maior a resistência, menor será o comprimento de transferência. O ACI 318 (2019), por outro lado, considera um comprimento de transferência constante para qualquer valor de resistência à compressão do concreto.

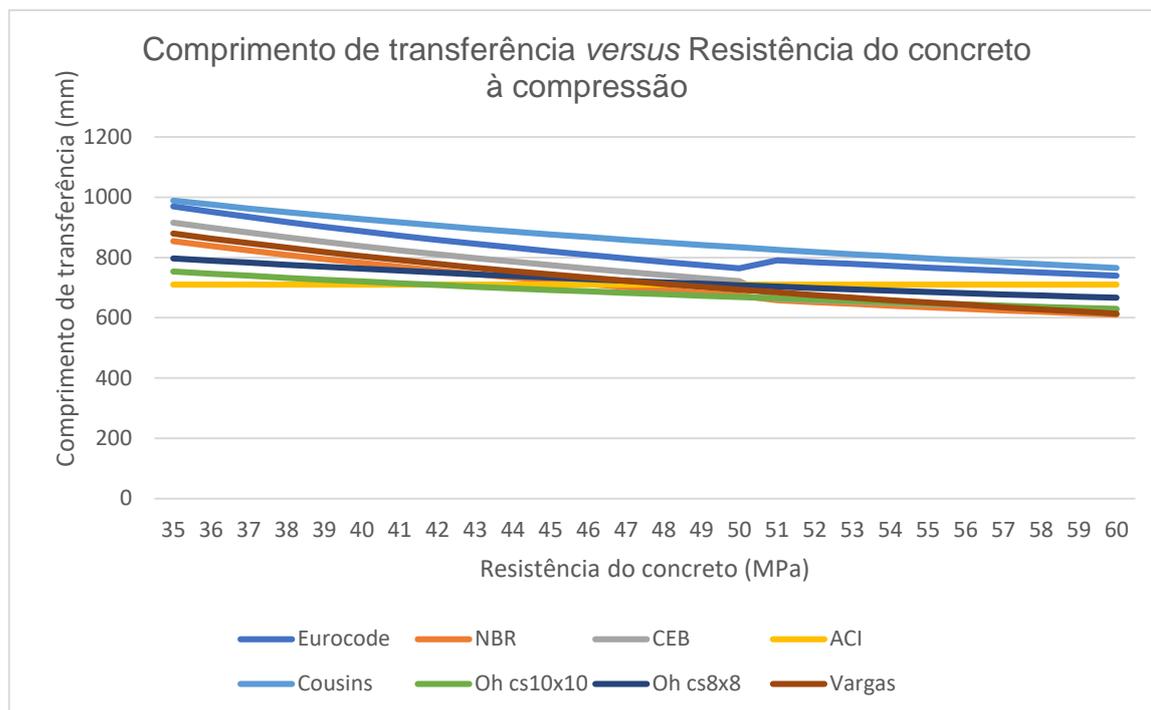


Figura 20 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da resistência à compressão concreto

Também podemos observar pelas inclinações, que a formulação que considera a maior influência da resistência do concreto no comprimento de transferência sendo a do FIB MODEL CODE (2010), seguida, em ordem decrescente, de Vargas (2012); NBR 6118 (2014); Eurocode 2 (2004); Cousins, Johnston e Zia (1990c); Oh *et al.* (2014) E ACI 318 (2019).

Outro ponto a ser notado é a diferença entre concreto convencional e de alta desempenho. Isto, na verdade, só é considerado para as normas FIB Model Code (2010) e Eurocode 2 (2004), que, no entanto, apresentam comportamentos diferentes. O Eurocode 2 (2004), a partir da resistência de 50 MPa, sofre um leve salto, mostrando um pequeno aumento no comprimento de transferência, porém mantendo a relação inversamente proporcional entre os parâmetros. Enquanto que para o FIB Model Code (2010), temos uma queda mais acentuada entre 50 MPa e 51 MPa. Temos, ainda, para este parâmetro, a formulação de Cousins, Johnston e Zia (1990c) como a mais conservadora. Dentre as formulações normativas, esta seria a Eurocode 2 (2004). Já a formulação menos conservadora, para o intervalo de 35MPa a 41 MPa, é do ACI 318 (2019), já para o intervalo de 42 MPa a 50 MPa, é a fornecida por Oh *et*

al (2014), e finalmente para o intervalo 51 MPa a 60 MPa, a proposta pela NBR 6118 (2014).

Já o gráfico da Figura 21 apresenta a variação dos comprimentos de transferência em função da tensão na cordoalha após as perdas imediatas. Por ele, pode-se ver que todas as formulações propõem que o comprimento de transferência aumenta proporcionalmente ao aumento da tensão, sendo esse aumento menos acentuado nos casos dos estudos de Cousins, Johnston e Zia (1990c) e de Oh *et al.* (2014). Tem-se ainda que a formulação mais conservadora para este parâmetro é a de Cousins, Johnston e Zia (1990c) e entre as normas técnicas, a do Eurocode 2 (2004).

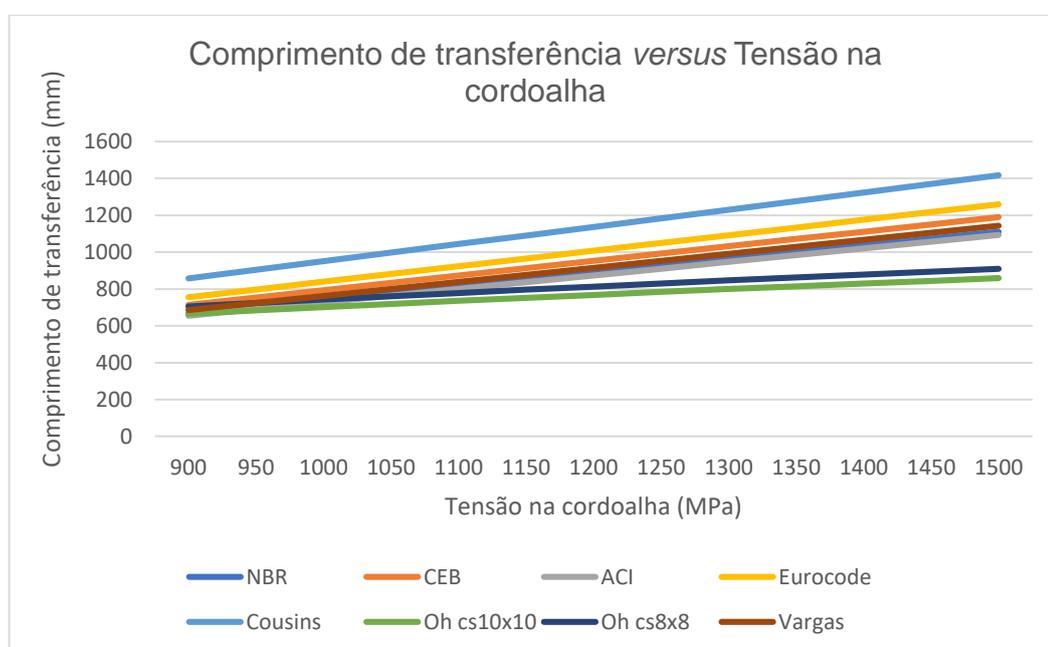


Figura 21 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função da tensão na armadura imediatamente após a protensão

Além disso, podemos observar pelas inclinações das funções que Cousins, Johnston e Zia (1990c) e o Eurocode 2 (2004), nesta ordem, são os que indicam maior impacto da tensão da cordoalha no comprimento de transferência. Enquanto Oh *et al.* (2014) e o ACI 318 (2019) apresentam as menores influencias.

O gráfico da Figura 22 apresenta a variação dos comprimentos de transferência em função do diâmetro da cordoalha.

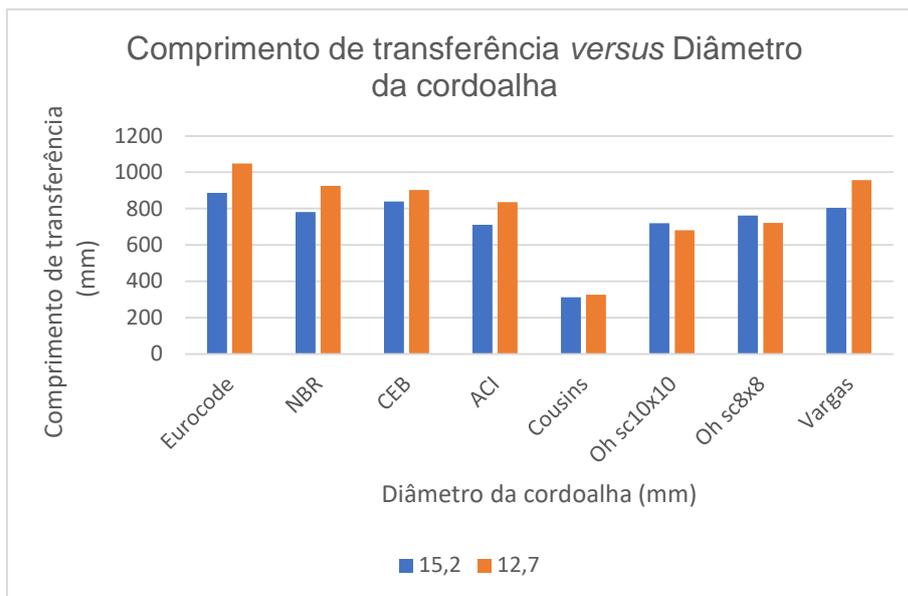


Figura 22 – Desenvolvimento do comprimento de transferência em função do diâmetro da cordoalha

A partir dele, podemos observar que todas as propostas consideram que este parâmetro tem influência. Apenas Oh *et al.* (2014) traz uma relação diretamente proporcional, ou seja, para os autores, quanto maior a diâmetro da cordoalha, maior o comprimento de transferência, enquanto que para as demais, quanto maior o diâmetro, menor será o comprimento.

A NBR 6118 (2014) apresenta valores próximos aos apresentados por Vargas *et al.* (2012), sendo o valor para a cordoalha de 15,2 mm ligeiramente menor. Em relação aos outros autores, tanto a NBR 6118 (2014) quanto o Eurocode 2 (2004) e o CEB Model Code (2010) apresentam valores mais conservadores. O ACI 318 (2019) apresenta valores inferiores ao de Vargas *et al.* (2012) para cordoalhas de 12,7 mm e valores inferiores ao de Vargas *et al.* (2012) e de Oh *et al.* (2014) para cordoalhas 15,2 mm, além de ter os menores comprimentos entre as normas.

Temos entre as normas técnicas, o Eurocode 2 (2004) como a mais conservadora e o ACI 318 (2019) como a menos. No geral, a formulação mais conservadora é a proposta por Cousins, Johnston e Zia (1990c). Já a formulação menos conservadora é de Oh *et al.* (2014).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho, foram realizados ensaios estáticos (monotônicos) de arrancamento e de viga pré-tracionada baseados no método desenvolvido por Vargas (2006), para análise da aderência e obtenção do comprimento de transferência, respectivamente.

Este capítulo descreve o programa experimental desta pesquisa, os ensaios de viga e os ensaios de caracterização.

Todos os ensaios aqui citados foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ.

3.1 Programa de ensaio

A pesquisa experimental foi composta das seguintes etapas:

- Projeto dos modelos;
- Plano de execução dos ensaios;
- Ensaios de caracterização dos materiais;
- Ensaios de transferência;
- Ensaios de arrancamento;
- Análise e comparação dos resultados.

A definição do programa de ensaios foi baseada no estudo de diversos artigos sobre o Método ECADA. Esses artigos já foram citados na Revisão Bibliográfica, apresentada no Capítulo 1. A escolha pela realização de ensaios baseados no método criado por Vargas (2006) deve-se ao fato dele reproduzir sequencialmente na mesma amostra de concreto a transferência de protensão e a aderência.

Foram realizados, no total, 3 ensaios de transferência e 3 ensaios de arrancamento, além dos ensaios de caracterização dos materiais.

Para a execução da protensão e o ensaio de transferência, foi utilizado o pórtico baseado no modelo elaborado por Vargas (2006) (Figura 23). Esse pórtico, cujo projeto é apresentado na Figura 24, é composto pela estrutura de reação e pelo Sistema AMA (*Anchorage Measurement Access*), que substitui uma parte da viga.



Figura 23 – Pórtico de reação

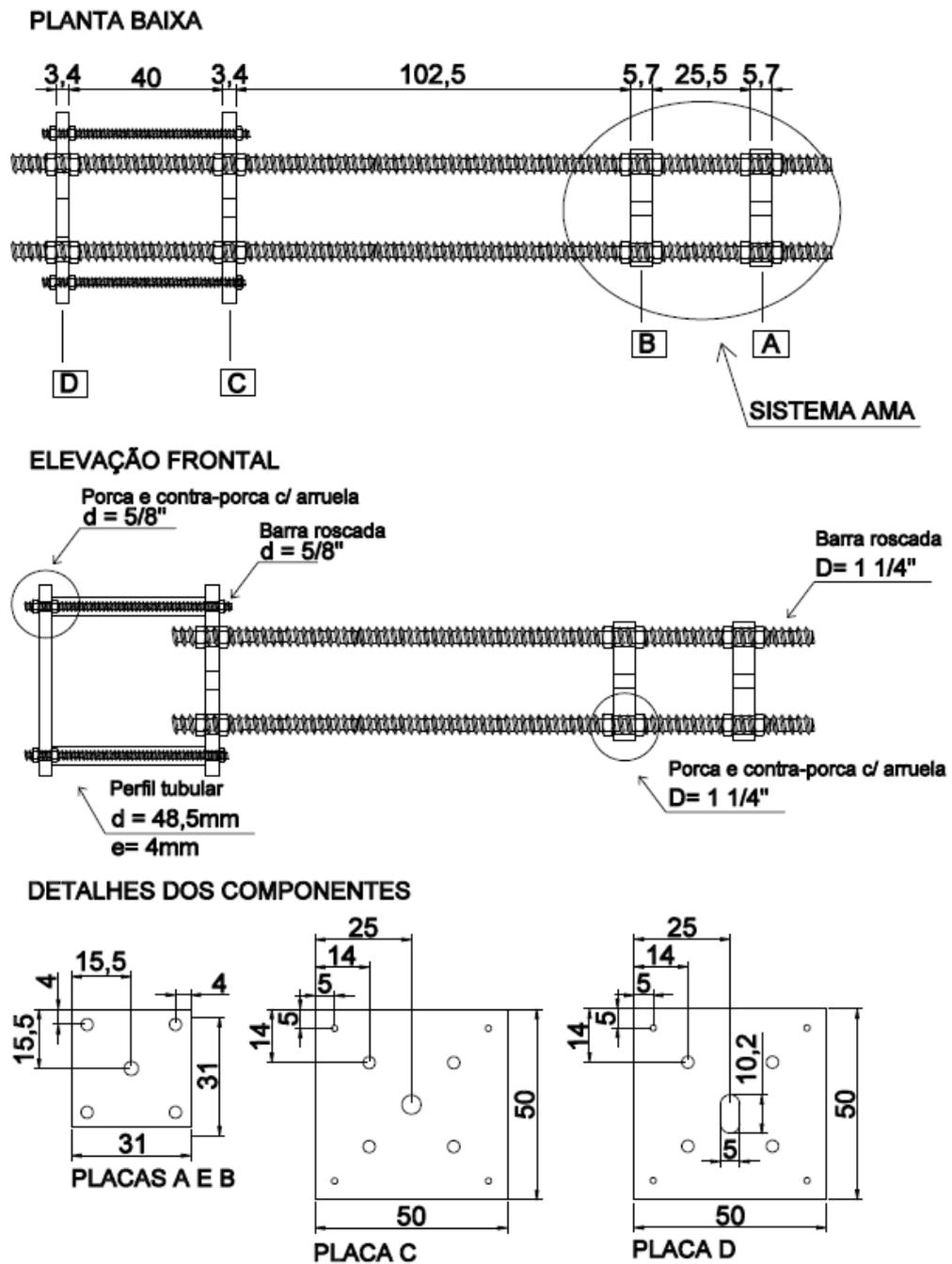


Figura 24 – Projeto do pórtico de reação

O Sistema AMA, ilustrado na Figura 25, tem como função: (a) servir como ancoragem para a armadura ativa, (b) permitir a medição da força suportada pela armadura ativa e (c) permitir o acesso para aumentar a tensão da armadura na fase de carregamento da ancoragem. Além disso, o Sistema AMA deve ter o mesmo comportamento da parte da viga que ele substitui e, para tanto, deve ter a mesma rigidez seccional ou superior à da viga e inibir os efeitos de confinamento na extremidade da amostra.

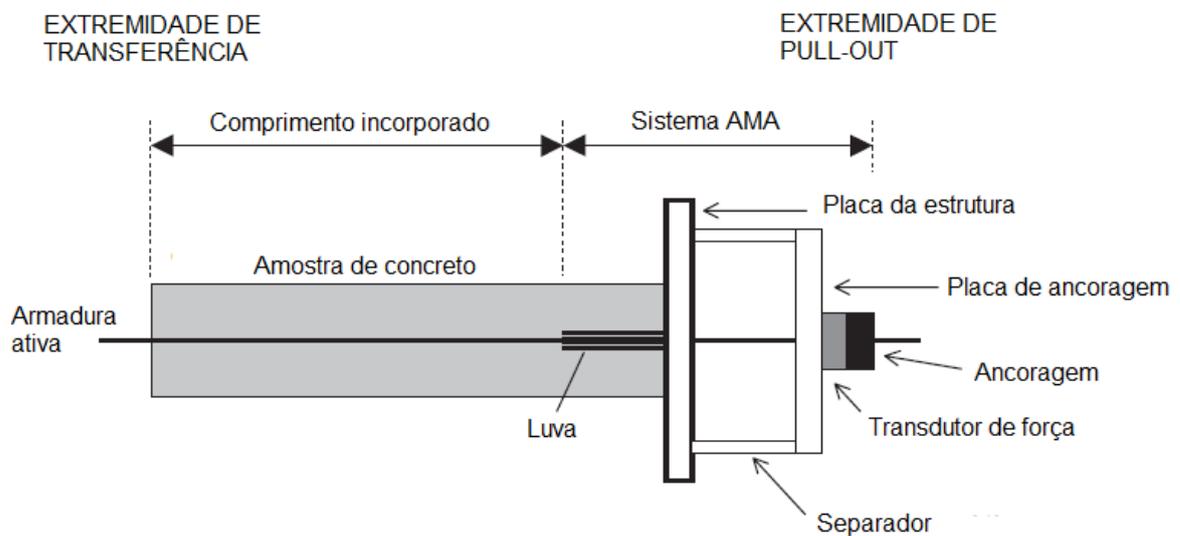


Figura 25 – Diagrama do Sistema AMA (Vargas, 2006)

Para que fosse possível a movimentação do macaco de protensão para diversas posições de acordo com a etapa do ensaio, para a execução do encunhamento no meio da peça após a protensão e para o seu posterior alívio a fim de que houvesse a transferência de tensão, foi desenvolvido um sistema de ancoragem provisório específico para o ensaio. Esse sistema consiste em uma peça de ancoragem bipartida aparafusada, projetada de acordo com as cunhas utilizada, e é apresentado na **Figura 26**.

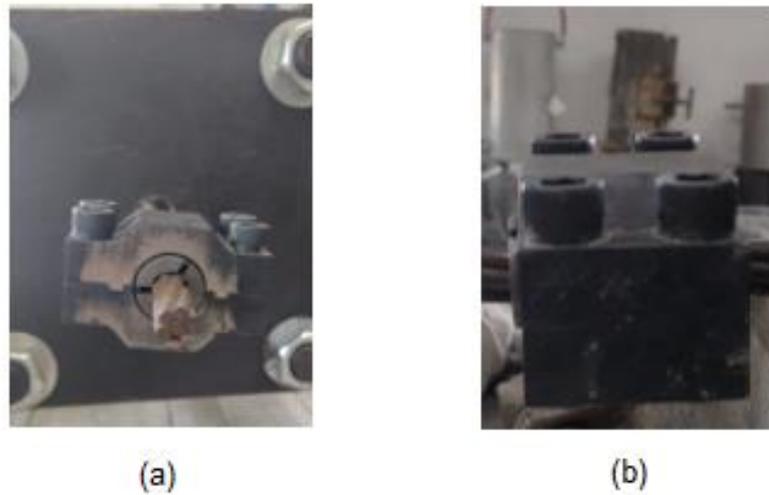


Figura 26 – Vistas frontal e lateral dos dispositivos de ancoragem (a) Vista frontal da ancoragem (b) Vista lateral da ancoragem

3.1.1 Projeto dos modelos

O projeto dos modelos consistiu na escolha da forma e no detalhamento das peças a serem ensaiadas.

Os modelos ensaiados são, na verdade, uma parte da viga em concreto protendido, localizada em uma das extremidades da mesma, como pode ser observado na Figura 27.

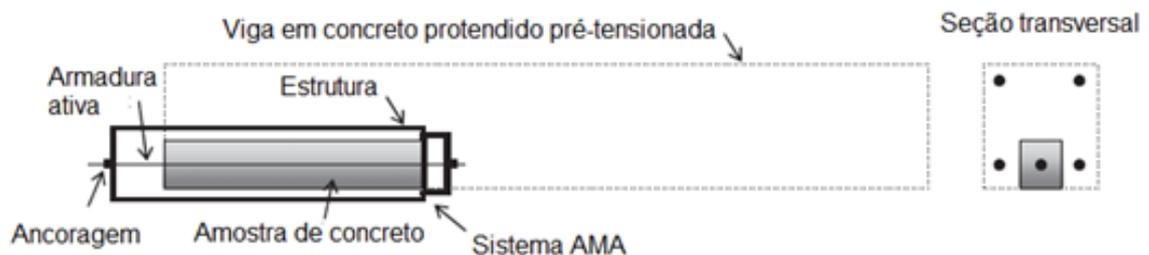


Figura 27 – Vista da amostra como parte de extremidade da peça de concreto protendido (Vargas, 2013a)

Se o comprimento incorporado da amostra for igual ou maior que o comprimento de transferência, a tensão medida no Sistema AMA alcançará a tensão

efetiva. Nesses casos, a força transmitida na Extremidade de *Pull-Out* será a mesma (a transferência total de protensão é alcançada).

No método ECADA, o comprimento de transferência é determinado testando uma série de amostras de diferentes comprimentos e medindo a tensão na Extremidade de *Pull-Out* após a desprotensão. O comprimento de transferência será o menor comprimento incorporado da amostra onde a força transferida alcança o valor máximo da série.

Para os ensaios, foram feitos modelos prismáticos com seções transversais de dimensões 100 x 100 mm.

Os comprimentos das amostras serão variáveis e tem como base o comprimento de transferência calculado segundo a NBR 6118 (2014). Para os valores dos parâmetros adotados nessa pesquisa, a NBR 6118 (2014) fornece um comprimento de transferência de 720 mm. Esse valor é considerado a base para o comprimento incorporado. O comprimento incorporado varia somando-se ou subtraindo-se 100 mm do comprimento de transferência calculado de 720 mm. Os comprimentos das amostras são compostos pelo comprimento incorporado mais o comprimento da luva (que é 120 mm).

As dimensões das três amostras ensaiadas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Dimensões das amostras

Amostra	Seção transversal (mm)	Comprimento da luva (mm)	Comprimento incorporado (mm)	Comprimento total da amostra (mm)
1	100 x 100	120	620	740
2	100 x 100	120	720	840
3	100 x 100	120	820	940

3.1.2 Plano de execução dos ensaios

Uma vez determinado o tipo de modelo, foram estabelecidos o melhor arranjo de ensaio e a instrumentação adequada, necessários para a obtenção dos resultados

desejados. Foram definidas, também, as séries de ensaios com seus respectivos parâmetros.

a) Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio segue o descrito no item 1.3.1.f deste trabalho. A descrição exata do que foi executado será apresentado nos itens 3.3 e 3.4.

b) Instrumentação

Para aquisição de dados foram utilizados extensômetros e transdutores conectados ao sistema de compilação de dados NATIONAL INSTRUMENTS, modelo PXI 1050, com capacidade de leitura de 12 canais de extensômetros e 8 canais de deslocamentos.

As deformações foram obtidas por meio de extensômetros de resistência elétrica da marca Excel, tipo PA-06-250BA-120-L colados ao longo da cordoalha em pontos estratégicos (após a luva, no centro do comprimento incorporado e na extremidade morta da amostra) para acompanhamento da protensão da cordoalha e, posteriormente, verificação da transferência de tensão da cordoalha para o concreto. Na cordoalha, foi usada para proteção dos extensômetros resina e borracha de silicone.

Para determinar a força na armadura ativa, foi utilizada uma célula de carga colocada entre a placa de ancoragem e o dispositivo de ancoragem da armadura ativa na extremidade do Sistema AMA, da marca Gefran, modelo CT-B-KN5C (capacidade de 50 toneladas). A célula de carga permite a medição da força durante todo o ensaio e, por fim, a força correspondente à tensão efetiva na viga. Com os valores medidos, foi determinado o comprimento de transferência.

Também foi usado uma célula de carga entre o macaco hidráulico e a placa de ancoragem na extremidade de transferência para controlar a força exercida pelo mesmo. Essas medições foram registradas para analisar a tensão de aderência e criar o gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha.

A instrumentação foi complementada com extensômetros da marca Excel, tipo PA-06-201BA-120L, ao longo da superfície da amostra de concreto, na altura da cordoalha, para determinar a deformação longitudinal da superfície do concreto e criar o gráfico Deformação longitudinal *versus* Distância da Extremidade de Transferência.

Para verificação do comportamento do pórtico, foram utilizados LVDTs apontados para as placas do mesmo. Também foi utilizada essa instrumentação presa

a cordoalha para acompanhamento do deslizamento da cordoalha no momento do ensaio de arrancamento.

Os projetos da instrumentação e arranjo de ensaio das amostras para as diferentes etapas são apresentados na Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

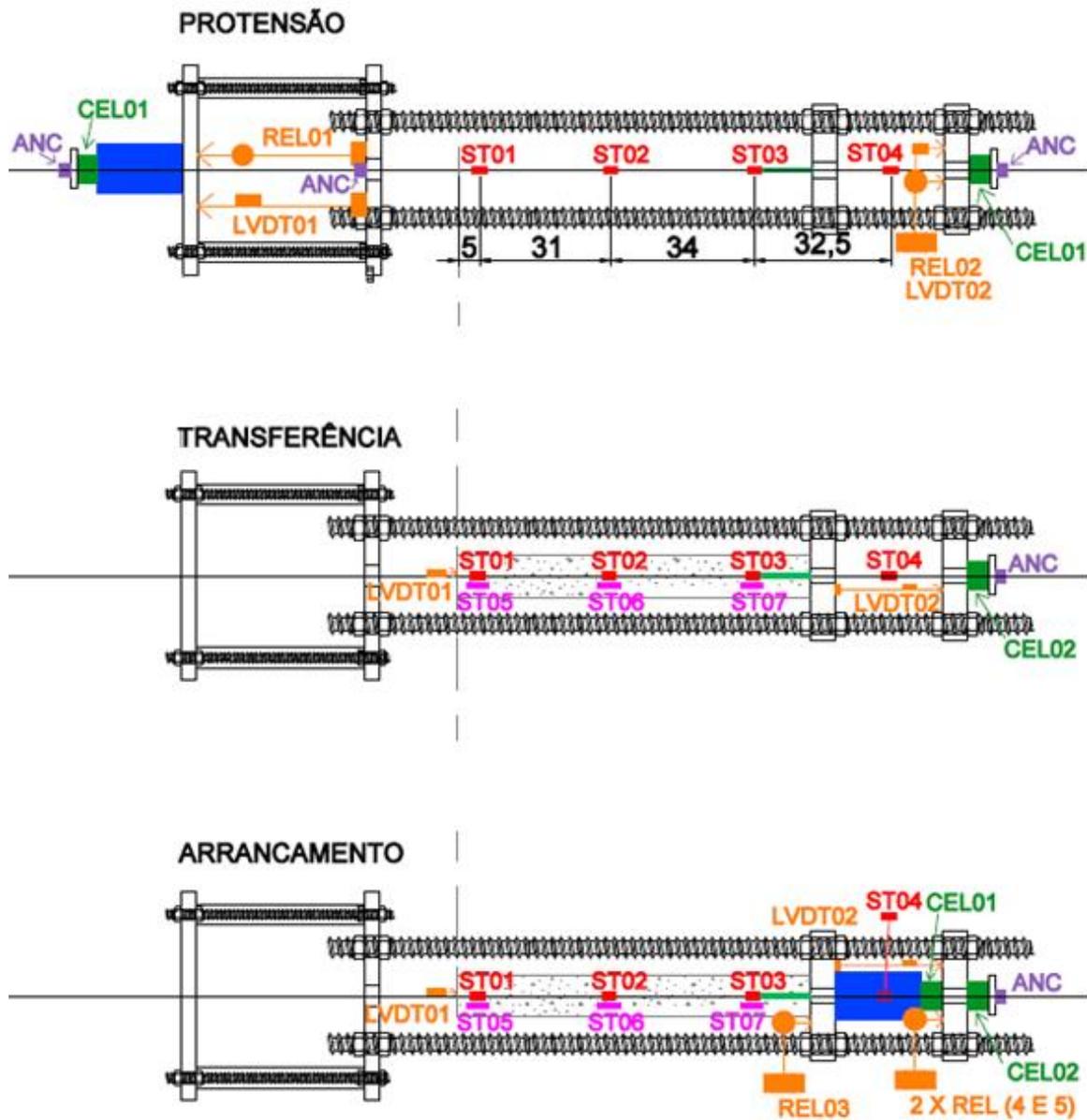


Figura 28 – Projeto de ensaio da Amostra 1

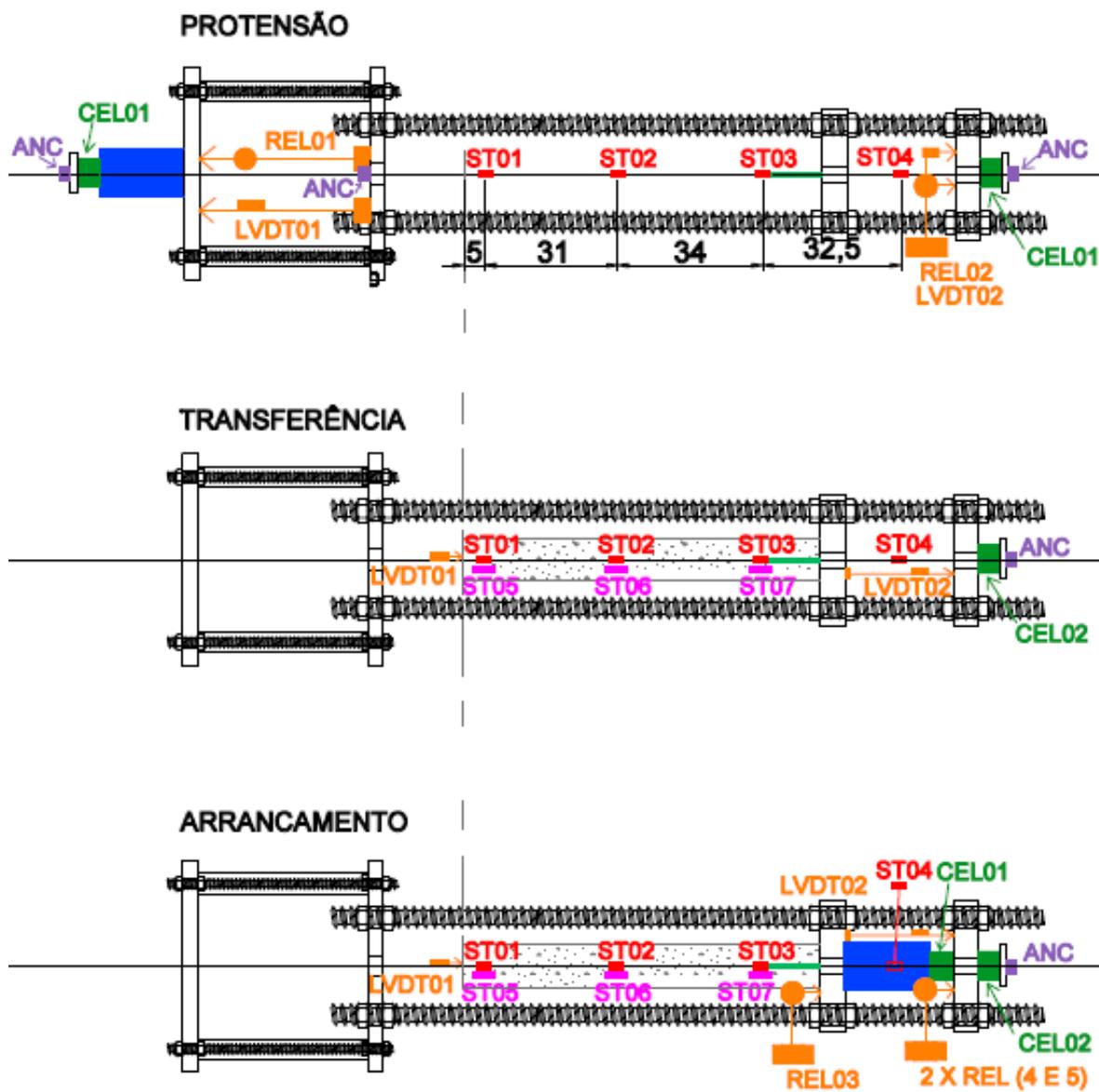


Figura 29 – Projeto de ensaio da Amostra 2

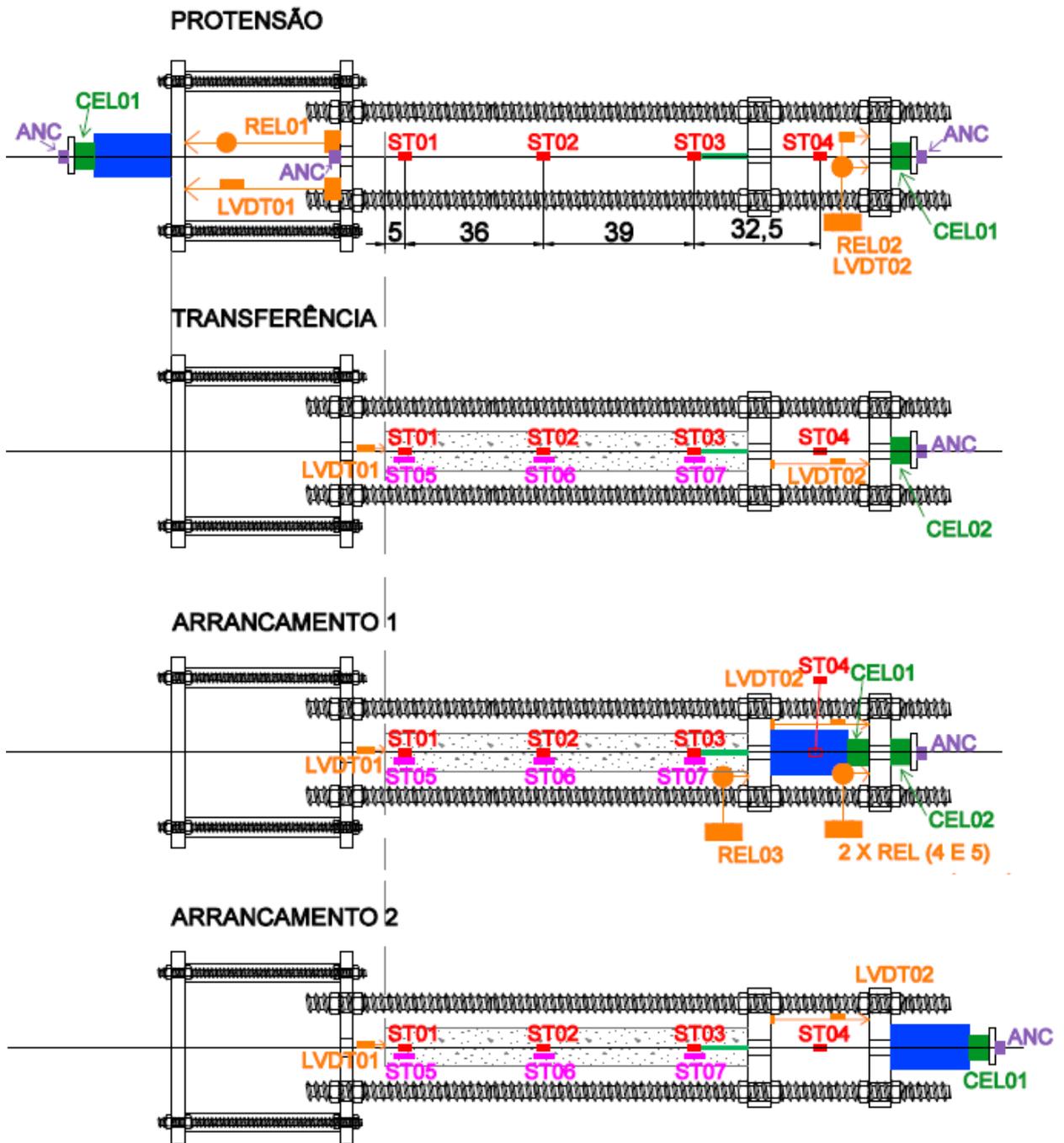


Figura 30 – Projeto de ensaio da Amostra 3

a) Parâmetros dos ensaios

Para a cordoalha, estipulou-se a tensão de 975,61 MPa, que está dentro dos limites de tensão máxima permitida pela NBR 6118 de $\sigma_{pi} = 0,80f_{ptk}$, o que resulta numa força de protensão de $P_i = 140$ kN. Para as amostras, foram utilizados 2,80 m de cordoalha. Essa força de protensão aplicada provoca um alongamento previsto de 10,76 mm na cordoalha.

A discriminação dos parâmetros teóricos considerados no projeto dos modelos de cada série, ou seja, para o cálculo do comprimento das amostras, estão apresentados na **Tabela 11**.

Tabela 11 – Parâmetros teóricos para projeto dos modelos

Amostra	Cordoalha	Concreto	Força de protensão (P_0)
1	Aço CP190RB	45 MPa	140 kN
2	7 fios		
3	$\phi 15,2\text{mm}$		

3.1.3 Análise de resultados

Os comprimentos de transferência serão determinados de duas formas. A primeira delas, é pelo método desenvolvido por Vargas (2006), por meio da comparação da tensão efetiva obtida nas três amostras ensaiadas, sendo considerado o comprimento de transferência o comprimento da menor amostra que atingiu a tensão efetiva.

O outro modo para a determinação do comprimento de transferência, é pelo “Método de 95% da Média das Deformações Máximas”, sugerido por RUSSEL & BURNS(1993), que consiste no seguinte procedimento:

- 1) É elaborado o gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade a partir da leitura da extensometria;
- 2) Determinam-se as médias das deformações máximas, que são as médias dos valores medidos no patamar correspondente à tensão efetiva;
- 3) Determina-se 95% do valor da média das deformações máximas, e traça-se uma linha paralela ao eixo da Distância da extremidade, que corta o eixo das Deformações no ponto correspondente a esse valor.
- 4) Determina-se o comprimento de transferência pela interseção da linha de 95% das médias com a curva das deformações medidas.

Já a tensão de aderência máxima será determinada a partir do gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha. Os valores de tensão de aderência assim como os comprimentos de ancoragem básico e ancoragem necessário, serão calculados a partir da aplicação das formulações previstas na ABNT NBR 6118 (2014) para os dados obtidos experimentalmente nos ensaios de arrancamento e caracterização de materiais.

Os resultados dos ensaios foram apresentados na forma de gráficos e tabelas, no Capítulo 4 do presente trabalho.

3.2 Ensaios de caracterização dos materiais

3.2.1 Agregado miúdo

Na fabricação do concreto utilizado, utilizou-se areia natural lavada que foi caracterizada com base nas normas vigentes, que apresentou os resultados da Tabela 12 e da Tabela 13.

Tabela 12 – Características físicas do agregado miúdo da Amostra 1

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
3/8"	9,5	0	0
1/4"	6,3	0	0
4	4,8	1	2
8	2,4	6	8
16	0,2	19	27
30	0,6	34	61
50	0,3	26	87
100	0,15	9	97
Fundo	<0,15	3	100
Módulo de finura			2,81
Dimensão máxima característica (mm)			4,8
Massa específica (g/cm ³)			2,54
Teor de umidade (%)			0,15
Massa unitária (g/cm ³)			1,44

Tabela 13 – Características físicas do agregado miúdo das Amostras 2 e 3

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
3/8"	9,5	0	0
1/4"	6,3	0	0
4	4,8	1	1
8	2,4	5	6
16	0,2	24	29
30	0,6	39	68
50	0,3	23	91
100	0,15	7	99
Fundo	<0,15	1	100
Módulo de finura			2,94
Dimensão máxima característica (mm)			4,8
Massa específica (g/cm ³)			2,55
Teor de umidade (%)			1,07
Massa unitária (g/cm ³)			1,47

3.2.2 Agregado graúdo

Como agregado graúdo, empregou-se a brita tipo 0 que foi caracterizada conforme as normas vigentes, com os resultados apresentados na Tabela 14 e na Tabela 15.

Tabela 14 – Características físicas do agregado graúdo para Amostra 1

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
1/2"	12,5	0	0
3/8"	9,5	1,65	2
1/4"	6,3	55,13	57
4	4,8	41,76	99
8	2,4	1,38	100
16	1,2	0	100
30	0,6	0	100
50	0,3	0	100
100	0,15	0	100
Fundo	<0,15	0,08	100
Módulo de finura			6,00
Dimensão máxima característica (mm)			9,5
Massa específica (g/cm ³)			2,49
Teor de umidade (%)			0
Massa unitária (g/cm ³)			1,29

Tabela 15 – Características físicas do agregado graúdo para Amostra 2 e 3

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
1/2"	12,5	0	0
3/8"	9,5	1	1
1/4"	6,3	50	52
4	4,8	35	86
8	2,4	13	99
16	0,2	0	100
30	0,6	0	100
50	0,3	0	100
100	0,15	0	100
Fundo	<0,15	0	100
Módulo de finura			5,86
Dimensão máxima característica (mm)			9,5
Massa específica (g/cm ³)			2,65
Teor de umidade (%)			0
Massa unitária (g/cm ³)			1,38

3.2.3 Cimento

Na dosagem do concreto foi utilizado o cimento Holcim CPV - ARI.

3.2.4 Água

A água utilizada para amassamento da mistura foi água potável da rede de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro – RJ.

3.2.5 Aditivo

Foi usado o aditivo plastificante Sika Concreto Forte, cujas propriedades fornecidas pelo fabricante estão especificadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades do aditivo (adaptado de Sika, 2020)

Recomendações	Dosagem	Aspecto/cor	pH	Massa Específica (Kg/L)
Melhora do acabamento superficial e da homogeneidade, reduz a retração e a fissuração, aumento da trabalhabilidade, da impermeabilidade e da resistência final do concreto	1L para cada 50 kg de cimento	Líquido marrom escuro	6,0 ± 1,0	1,06 ± 0,02

3.2.6 Dosagem do concreto

O consumo de materiais por metro cúbico de concreto e o traço em massa para concreto de 45 MPa está resumido na **Tabela 17**.

Tabela 17 – Dosagem do concreto de 45 MPa

Material para 1 m ³					
Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Fator a/c	Plastificante (l)
513,38	661,05	1025,35	163,78	0,45	10,27

3.2.7 Caracterização mecânica do concreto

No total, foram feitas 3 concretagens. De cada uma foram retirados corpos-de-prova para a caracterização do concreto para obtenção das principais propriedades dos materiais, tais como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral, seguindo os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 5739 (2018), NBR 8522 (2021) e NBR 7222 (2011), respectivamente. A Figura 31 ilustra a realização desses ensaios.

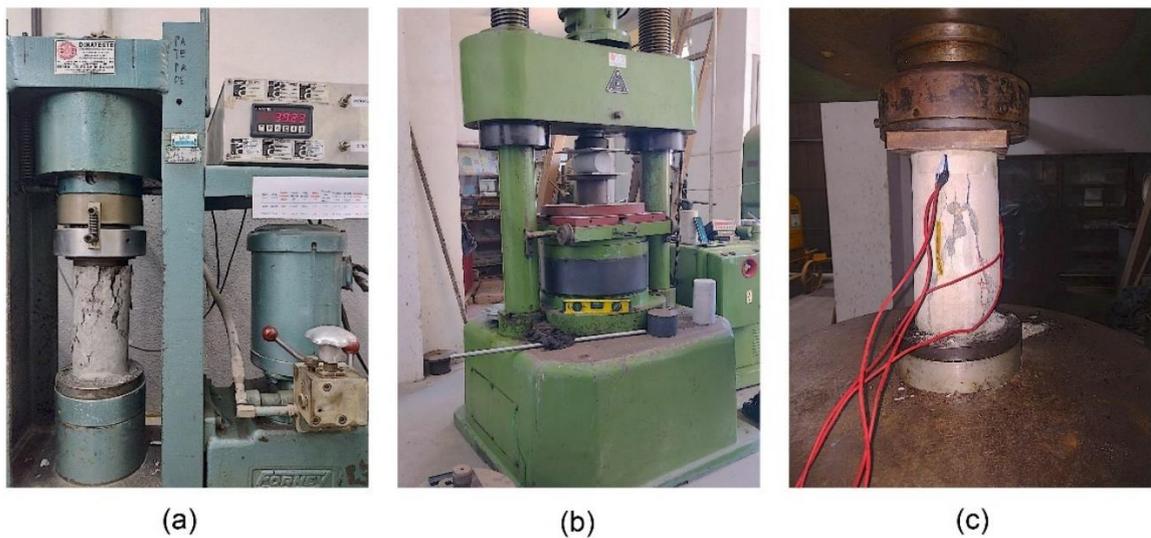


Figura 31 – Ilustração dos ensaios de caracterização do concreto (a) Ensaio de resistência à compressão da Amostra 1 (b) Ensaio de tração à compressão diametral da Amostra 1 (c) Ensaio de módulo de elasticidade da Amostra 1

Para as concretagens das amostras, houve uma variação no volume de concreto, pois a quantidade de corpos-de-prova retirados e o comprimento das amostras sofreram variações.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte: brita 0, areia, cimento, ligava a betoneira e deixava misturar um pouco, depois acrescentava, com a betoneira girando, água, plastificante.

A concretagem dos corpos-de-prova foi realizada no chão, e a vibração foi realizada por meio de mesa vibratória. As amostras foram concretadas dentro do pórtico, com a fôrma apoiada de modo que a cordoalha pré-tracionada ficasse centralizada na seção transversal. O adensamento das vigas pré-tracionadas foi feito com vibrador de imersão. Não houve problemas na confecção dos corpos-de-prova e das amostras.

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam detalhes das concretagens e da confecção dos corpos-de-prova. A cura das vigas de amostra foi feita com a colocação de tecido molhado sobre as peças, já a cura dos CPs deu-se com a criação de uma estrutura de sustentação coberta com lona plástica preta, com vasilha com água dentro até a desfôrma, sendo estes movidos para a câmara úmida após.

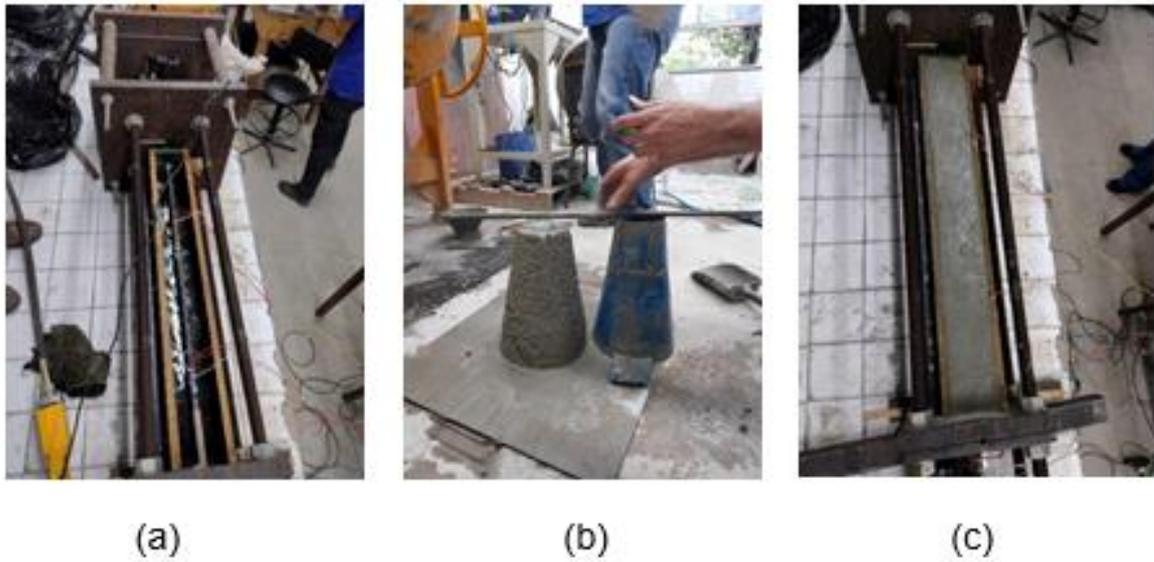


Figura 32 – Detalhes da concretagem das amostras (a) Preparo da fôrma da viga (b) *Slump Test* (c) Concretagem da amostra



Figura 33 – Detalhe da concretagem dos corpos de prova

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a relação dos corpos-e-prova, ensaios e resultados. Os dados obtidos de todos os ensaios de caracterização do concreto e os cálculos dos resultados se encontram no Apêndice C.

Tabela 18 – Caracterização do concreto

Amostra	Slump	f_{ck}		E_c		f_{ctd}	
		Idade	(MPa)	Idade	(MPa)	Idade	(MPa)
1	2,5	21	43,56	-	-	21	4,32
		28	40,15	55	34,01	-	-
2	2,0	7	45,34	-	-	7	2,93
		14	50,59	-	-	14	4,29
		28	54,8	30	30,73	-	-
3	2,0	7	44,52	-	-	-	-
		28	55,72	32	30,87	28	4,72

3.2.8 Caracterização das cordoalhas

A **Tabela 19** apresenta as características da cordoalha de 7 fios CP 190 conforme catálogo do fabricante.

Tabela 19 – Características da cordoalha de 7 fios CP 190 (Arcelor Mittal, 2021)

Produto	Diâmetro Nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Massa aprox. (kg/1.000m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
CP 190 RB 15,20	15,2	143	1126	261	235	3,5

3.3 Ensaio de transferência

O modelo de viga para os ensaios foi o mesmo apresentado na Figura 22 e Tabela 9 e os ensaios foram executados conforme item 3.1.2.

Para a Amostra 1 ensaiada o comprimento é de 740 mm. Os demais parâmetros são apresentados no item 3.1.2.c.

A preparação do ensaio inicia-se com a montagem do pórtico, conforme projeto da Figura 24. Para fixação das placas do mesmo, foram utilizadas porcas e contraporcas. A isso, segue-se o posicionamento da cordoalha, que era presa por duas cunhas, uma na Extremidade de *Pull-Out* e outra no macaco hidráulico.

Como se pode notar, a protensão na cordoalha era dada ao ancorá-la no macaco de protensão, que a tracionava ao empurrar a ancoragem conforme a saída de seu êmbolo. A Placa D funciona como apoio de reação ao macaco. Desta forma, foram utilizados no ensaio ao todo 3 conjuntos de cunha e ancoragem, conforme indicado na Figura 34.

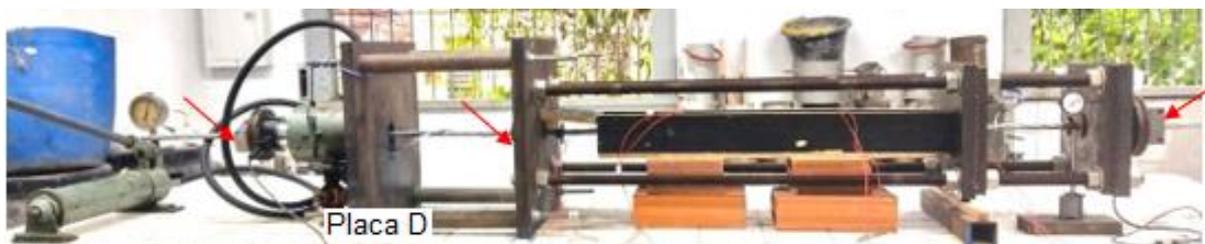


Figura 34 – Arranjo das ancoragens para protensão

A instrumentação da Amostra 1 foi feita como apresentado no item 3.1.2.b e pode ser observada na Figura 28 para durante a protensão.

Para a Amostra 1, o extensômetro ST01 ficou posicionado na cordoalha, fora da viga de concreto. Isso ocorreu pois inicialmente seria utilizado concreto com resistência de 40 MPa, que fornecia um comprimento de transferência e, conseqüentemente, de amostras maiores. Não sendo possível instrumentar devidamente as mesmas para o ensaio de arrancamento, a resistência foi alterada para 45 MPa.

Devido a um problema em um dos cartões do NATIONAL INSTRUMENTS, para a Amostra 1 só haviam 4 canais disponíveis para extensometria. Também não foram utilizados transdutores de deslocamento.

Para as Amostras 2 e 3 foram colocados transdutores de deslocamento para verificarmos a movimentação do pórtico durante a protensão. O arranjo de ensaio e a instrumentação dessas vigas estão apresentados nas Figura 35 e Figura 36.



Figura 35 – Arranjo de ensaio e instrumentação para protensão da cordoalha da Amostra 2

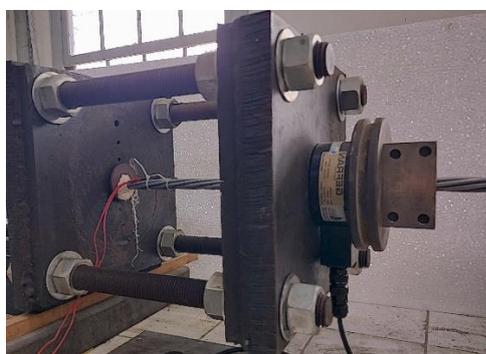


Figura 36 – Detalhe da posição da placa entre a célula de carga CEL02 e a ancoragem removível na Extremidade de *Pull-Out*

Esse acompanhamento teve como objetivo avaliar a perda de força no macaco ao comparar a leitura da célula com o valor correspondente da calibração do macaco ao que indicava o manômetro do mesmo.

A distribuição da tensão ao longo da cordoalha foi acompanhada durante todo o processo de protensão por meio da leitura dos extensômetros.

A leitura da força na célula de carga na Extremidade de *Pull-Out* (CEL02), no momento da protensão, indicava a força que chegava àquele comprimento. Após a transferência, ela fornece o parâmetro para cálculo da tensão, cujo valor é o resultado do ensaio e seria analisado em comparação com a tensão efetiva de cálculo fornecida pela ABNT NBR 6118.

No entanto, para a Amostra 1, as leituras da CEL02 forneciam valores improváveis e por isso não foram considerados. Para o acompanhamento desta amostra então foram utilizadas as leituras do extensômetro ST04, no Sistema AMA.

Ainda sobre a Amostra 1, ao chegar à tensão de 1602,55 MPa, um dos fios da

cordoalha se rompeu na ancoragem. O rompimento causou uma pequena queda na tensão, então o macaco foi carregado novamente até tensão de 1008 MPa para cravação da cordoalha. Após a cravação foi feita uma última leitura.

As concretagens das amostras são realizadas no mesmo dia da protensão e seguem o traço especificado no item 3.2.6. A resistência do concreto pode ser verificada em 3.2.7.

A Amostra 1, tendo sido concretada no último dia útil do ano de 2022, e devido ao recesso do laboratório, foi desformada aos 21 dias. Os extensômetros colados na cordoalha foram testados, sendo notado que o extensômetro ST03 foi perdido. Foram então colados os extensômetros na superfície lateral da amostra de concreto, na altura da linha da cordoalha. A Figura 37 mostra a disposição dos modelos para o prosseguimento do ensaio.

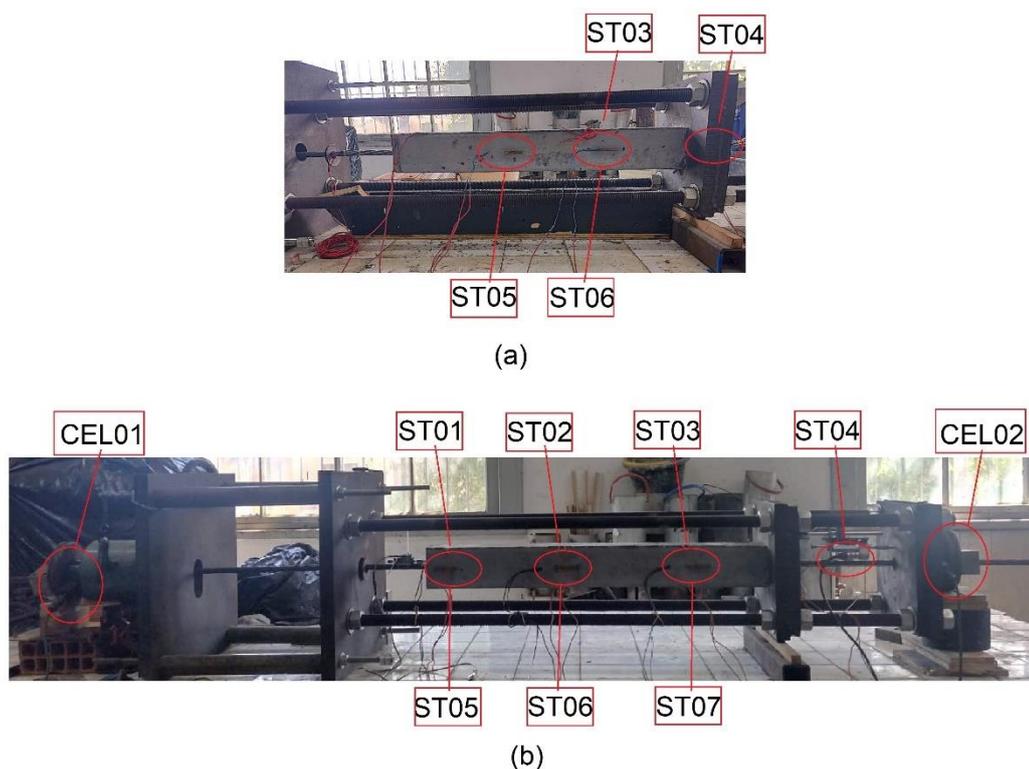


Figura 37 – Disposição para ensaio de transferência (a) Disposição dos extensômetros na cordoalha (ST03 e ST04) e no concreto (ST05 e ST06) (b) Disposição dos extensômetros na cordoalha (ST01 a ST04) e no concreto (ST05 a ST07) da Amostra 2, semelhante à Amostra 3

A transferência da Amostra 1 foi realizada aos 28 dias, através do aparafusamento das porcas de apoio da Placa C (vide Figura 24), de modo lento e

sequencial, o que permitiu uma transferência também lenta, conforme sugere Vargas (2006). Durante todo o processo, foi feito o controle da tensão através das leituras dos extensômetros. No entanto, a organização dos dados obtidos revelou-se difícil uma vez que a placa de apoio da ancoragem é apoiada por quatro porcas, sendo necessário aparafusar uma de cada vez.

Por isso, para as Amostras 2 e 3, cujas transferências foram realizadas aos 7 dias, optou-se por fazer acoplando o macaco de protensão na Extremidade de Transferência do pórtico (mesma configuração da protensão), como pode ser visto na Figura 37. O macaco foi carregado até que fosse atingida a força P_0 aplicada na protensão. Recuperada essa força, era possível observar que a ancoragem provisória da Extremidade de Transferência aliviou a Placa de Ancoragem C, podendo então ser removida. A cordoalha, no entanto, manteve-se tracionada pela ancoragem do macaco hidráulico, apenas sendo aliviada, de modo lento e controlado, a partir do alívio do próprio macaco, realizando assim a transferência de tensão.

Concluído o alívio, seguiu-se um intervalo de período de estabilização de 2 horas, quando foi realizada a leitura final para registro da tensão na cordoalha e no concreto.

3.4 Ensaio de arrancamento

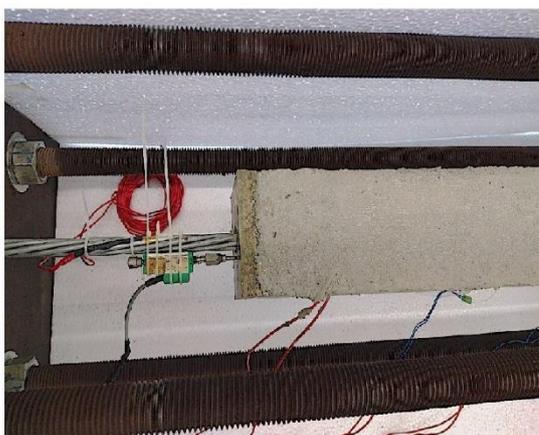
O ensaio de arrancamento é executado após o ensaio de transferência de protensão. A amostra é mantida dentro do pórtico e a cordoalha é puxada pela Extremidade de *Pull-Out*.

Para a Amostra 1, o arrancamento da cordoalha foi realizado com a colocação de dois macacos hidráulicos da marca Bovenau, de capacidade individual de 4 toneladas, entre as placas A e B, ou seja, dentro do Sistema AMA. A Placa A é solta afrouxando-se as porcas externas ao Sistema AMA, enquanto a Placa B permanece travada. Em um dos macacos, foi colocada uma célula de carga (CEL01) para leitura da força aplicada. Foram utilizados dois macacos a fim de se manter a placa alinhada. Os macacos são bombeados e empurram a Placa A. As Figura 28 e Figura 38 mostram a posição dos macacos. Também pode-se observar que o arrancamento é

realizado com a cordoalha ainda ancorada e, portanto, tracionada, na Extremidade de *Pull-Out*.



(a)



(b)



(c)

Figura 38 – Configuração de ensaio de arrancamento para a Amostra 1 (a) Configuração de ensaio (b) Detalhe do LVDT01 na Extremidade de Transferência (c) Detalhe da posição dos macacos e do LVDT02 dentro do Sistema AMA

A instrumentação do ensaio consistiu, além das células de carga, nos extensômetros já colados na cordoalha e no concreto, em um transdutor de deslocamento fixado à cordoalha, posicionado em relação à superfície da amostra de concreto na Extremidade de Transferência, conforme Figura 38. Para complementar, foi colocado um transdutor de deslocamento na Placa A com base na Placa B, para se saber seu movimento relativo.

Uma dificuldade na execução do arrancamento para a Amostra 1 foram que os macacos utilizados possuíam curso pequeno e tinham dificuldade de manter a carga

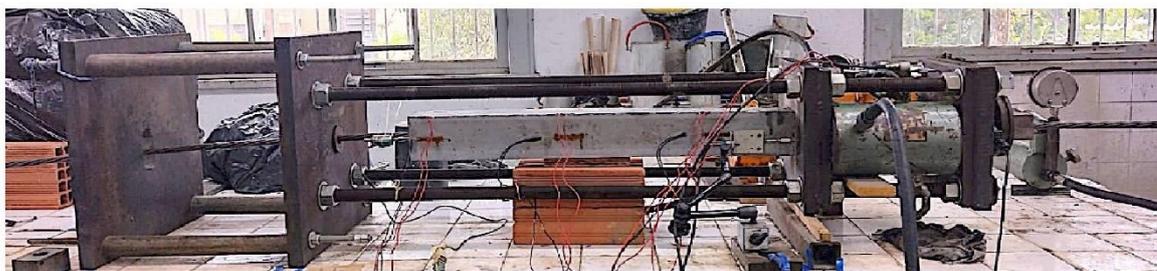
ao trabalharem na horizontal. Isso acabou por gerar alguns picos na leitura da instrumentação. Por isso, os dados precisaram ser tratados.

O ensaio de arrancamento da Amostra 2 foi realizado aos 7 dias. Com isso em vista, para a Amostra 2, tentou-se fazer usando o mesmo macaco da protensão, posicionando a frente da ancoragem da Extremidade de *Pull-Out*, conforme Figura 39. No entanto, embora tivéssemos atingido cargas de até 18 toneladas na leitura da célula CEL01, equivalente à 176,52 kN, não houve deslizamento da cordoalha, enquanto que a mesma sofreu alongamento dentro Sistema AMA.



Figura 39 – Primeira tentativa de *layout* de ensaio de arrancamento da Amostra 2

Essa configuração foi desmontada e fez-se uma nova tentativa aos 14 dias, posicionando esse mesmo macaco agora dentro do Sistema AMA. Para manter o alinhamento da placa durante o arrancamento, foi colocado um segundo macaco, semelhante ao primeiro. E para que os dois trabalhassem juntos e sincronizados, foram colocadas placas nas laterais com transdutores de deslocamento. Como esses macacos são maiores que os utilizados na Amostra 1, não foi possível colocar a célula de carga em um deles. O acompanhamento da força aplicada foi realizado por meio da célula CEL02 entre a ancoragem e a Placa de Ancoragem na Extremidade de *Pull-Out* (Placa A). A nova configuração é apresentada na Figura 40.



(a)



(b)



(c)

Figura 40 – Configuração de ensaio de arrancamento da Amostra 2 (a) Configuração de ensaio (b) Detalhe da posição dos macacos e do LVDT02 dentro do Sistema AMA (c) Detalhe da posição dos macacos e dos LVDTs para acompanhamento dos macacos durante execução do arrancamento

Já a Amostra 3 seguiu a mesma configuração da Amostra 2 para arrancamento. No entanto, como o comprimento da amostra é maior, quando colocado o LVDT01, não foi possível posicioná-lo corretamente e o mesmo acabou travando. Por isso, não foi possível identificar o deslizamento da cordoalha no primeiro ensaio de arrancamento, realizado aos 7 dias.

Por fim, optou-se por realizar um novo ensaio de arrancamento para ver como a amostra se comportaria. Para essa nova tentativa, foi usado para instrumentação uma célula de carga no macaco hidráulico, um transdutor de deslocamento preso a cordoalha em relação ao concreto e dois transdutores de deslocamento dentro do Sistema AMA para verificar a movimentação das placas. Também foi lixada a superfície do concreto a fim de se garantir que o LVDT01 não ficasse preso em nenhuma irregularidade.

A configuração de ensaio de arrancamento para a segunda tentativa da Amostra 3 pode ser vista na Figura 41.

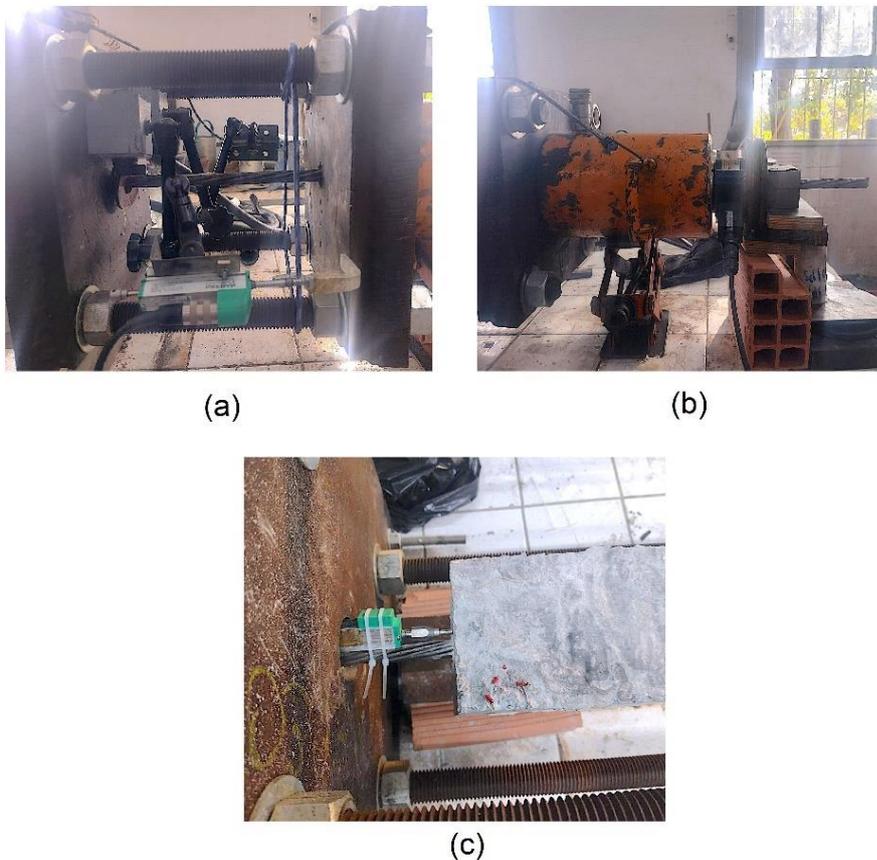


Figura 41 – Configuração da segunda tentativa de ensaio de arrancamento da Amostra 3 (a) Detalhe dos LVDTs do Sistema AMA (b) Detalhe da posição do macaco e da célula de carga (c) Detalhe do LVDT01

Para os cálculos das tensões de aderência das amostras foi usada a equação básica:

$$\tau_b = \frac{P}{\phi_{eq} \times \pi \times l_{ef}} \quad (33)$$

Sendo:

$$\phi_{eq} = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \quad (34)$$

Onde:

τ_b = tensão de aderência

P = força de arrancamento registrada

ϕ_{eq} = diâmetro equivalente

l_{ef} = comprimento aderente disponível

Para determinação do comprimento de ancoragem básico (l_{bp}) das amostras, foi utilizada a NBR 6118 (2014), que estabelece para cordoalhas de três ou sete fios pré-tracionadas e pré-aderentes a Equação 10 apresentada no Capítulo 2, item 2.1 deste trabalho.

Para o cálculo do comprimento de ancoragem necessário (l_{bpd}), para as cordoalhas de sete fios pré-tracionadas, tem-se:

$$l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bp} \times \left(\frac{f_{pyd} - \sigma_{p\infty}}{f_{pyd}} \right) \quad (35)$$

Onde:

l_{bpt} = comprimento de transferência

l_{bp} = comprimento de ancoragem básico

f_{pyd} = limite de escoamento de cálculo da armadura de protensão

$\sigma_{p\infty}$ = tensão na armadura ativa, após todas as perdas ao longo do tempo

4 RESULTADOS

4.1 Protensão

4.1.1 Amostra 1

Para acompanhamento da tensão ao longo da cordoalha, foram elaborados os gráficos em função da posição dos extensômetros tendo como referência (distância 0) a extremidade da amostra de concreto para o lado da Extremidade de Transferência, como mostra o projeto da amostra da Figura 28. No caso da Amostra 1, o extensômetro ST01, localizado à distância da extremidade de -130mm, tem sua posição com valor negativo pois o mesmo se encontra fora do comprimento da amostra de concreto, como explica o item 3.3.

Os dados coletados na instrumentação da Amostra 1 durante a execução da protensão são mostrados na Figura 42.

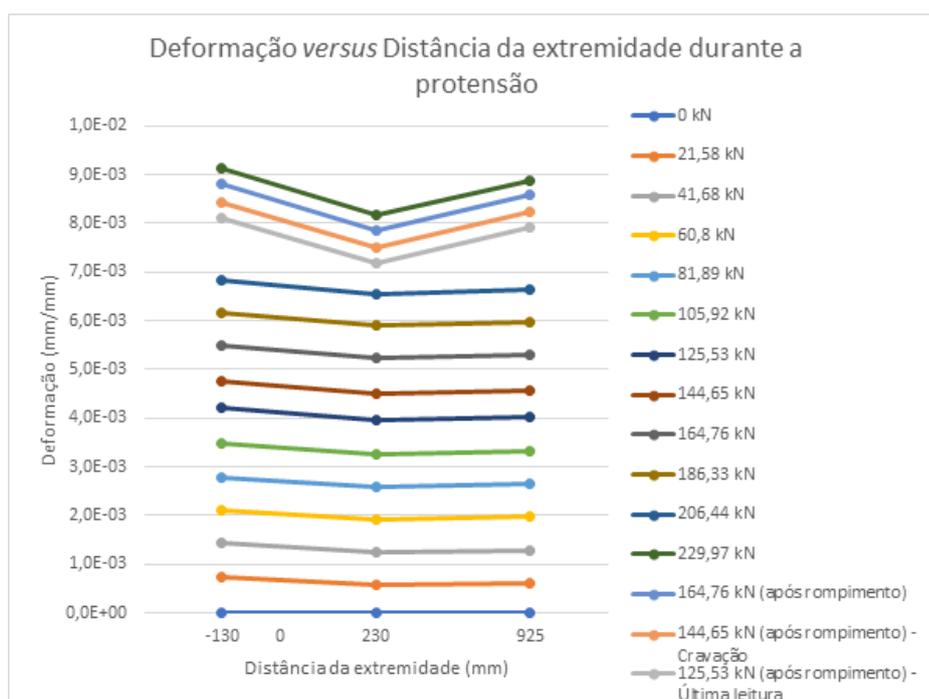


Figura 42 – Gráfico Deformação da cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a protensão

Foram descartados os resultados do extensômetro ST03, que apresentou problema após o rompimento do fio no qual estava preso, conforme explicado no item 3.3 deste trabalho

Os valores de tensão de tração para as deformações registradas foram calculadas e são apresentadas no gráfico da Figura 43.

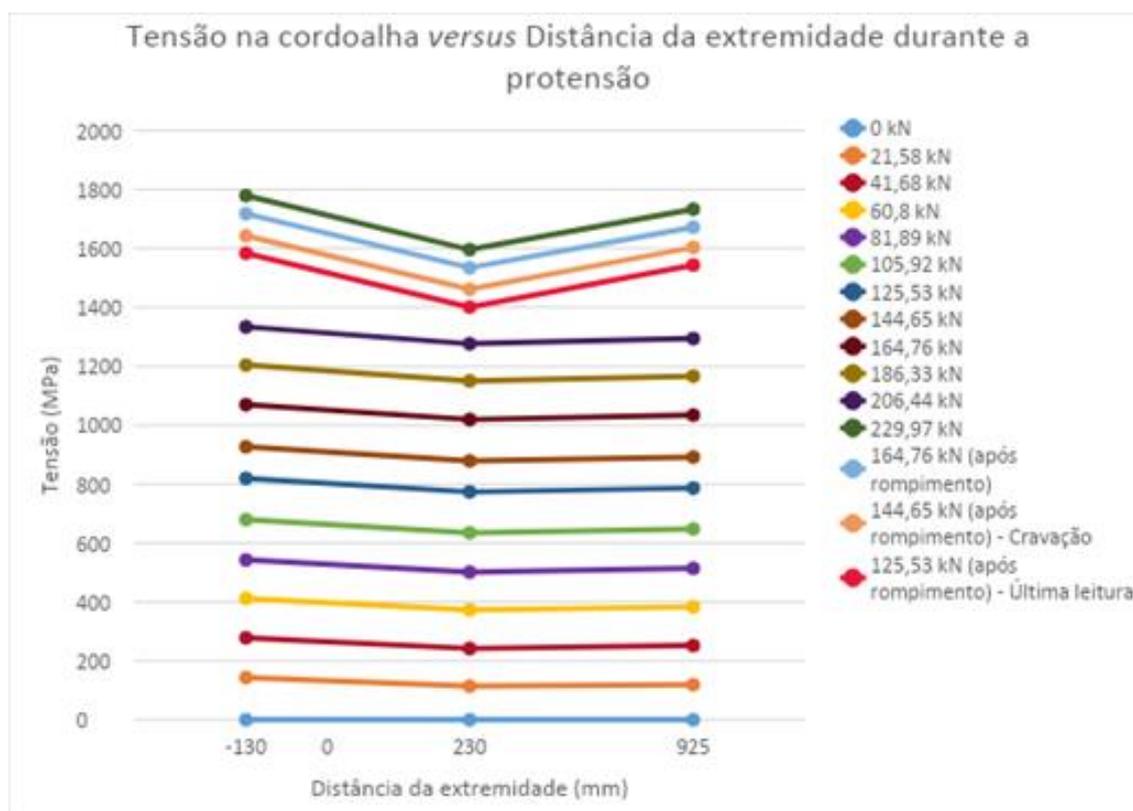


Figura 43 – Gráfico Tensão na cordoalha versus Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a protensão

O gráfico da Figura 44 mostra a relação entre a força de protensão aplicada, registrada pela célula de carga no macaco hidráulico (CEL01) e a tensão de tração média na cordoalha. Os valores fornecidos originalmente pelas células de cargas são negativos, uma vez que as células são comprimidas entre o êmbolo do macaco e a ancoragem, porém, para melhor visualização do aumento da força de protensão, o gráfico da Figura 44 apresenta esses valores com sinal positivo.

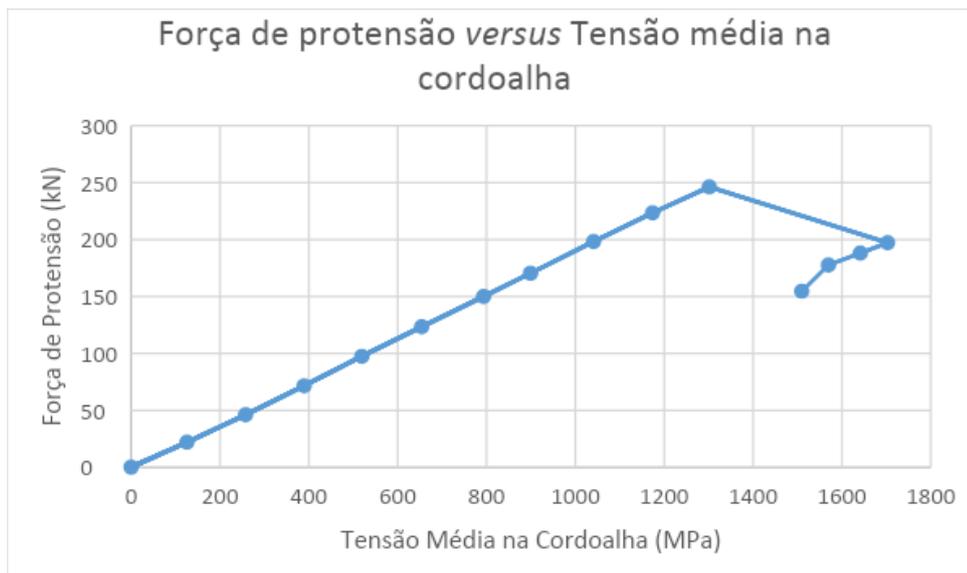


Figura 44 – Gráfico Força de protensão *versus* Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 1

As leituras de deformação com as respectivas tensões no momento da cravação da cordoalha e imediatamente após são apresentadas na Tabela 20 e Tabela 21, respectivamente. Como se pode ver, a leitura do ST03 fornece um valor em torno de 50% do valor de tensão média dos demais pontos de extensometria, sendo um indicativo do rompimento do fio.

Tabela 20 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 1

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	177,51	1237
CEL02	0,02	0,11
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	8,43E-03	1643,09
ST02	7,50E-03	1461,8
ST03	3,70E-03	721,99

ST04	8,22E-03	1603,61
------	----------	---------

Tabela 21 – Leituras dos extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 1

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	165,54	1153,67
CEL02	0,029	0,24
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	8,12E-03	1583,99
ST02	7,18E-03	1400,69
ST03	3,43E-03	668,85
ST04	7,92E-03	1543,82

Para a Amostra 1, tem-se então uma tensão média final na cordoalha encunhada de 1509,50 MPa (desconsiderando o extensômetro ST03), contra os 975,61 MPa para tensão efetiva (após todas as perdas imediatas) considerada no cálculo do comprimento de transferência para determinação do comprimento das amostras de concreto.

Também é possível concluir que houve uma perda média na cravação de 60,02 MPa, equivalente a 3,82% da tensão. O gráfico da Figura 45 compara as curvas desses dois momentos, que quase se sobrepõem.

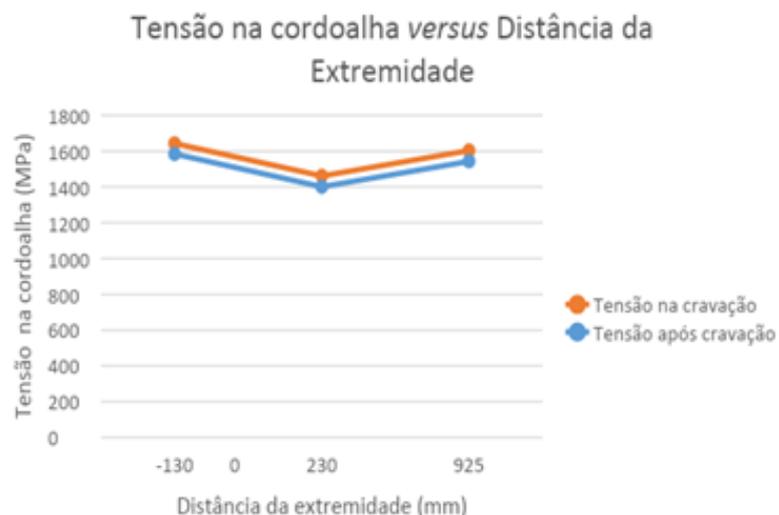


Figura 45 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 na cravação e após cravação

4.1.2 Amostra 2

Para acompanhamento da tensão ao longo da cordoalha, foram elaborados os gráficos em função da posição dos extensômetros tendo como referência (distância 0) a extremidade da amostra de concreto para o lado da Extremidade de Transferência, como mostra os projetos das amostras da

Figura 29.

Os dados coletados na instrumentação da Amostra 2 durante a execução da protensão são mostrados na Figura 46. Já os valores de tensão de tração para as deformações registradas foram calculadas e são apresentadas no gráfico da Figura 47.

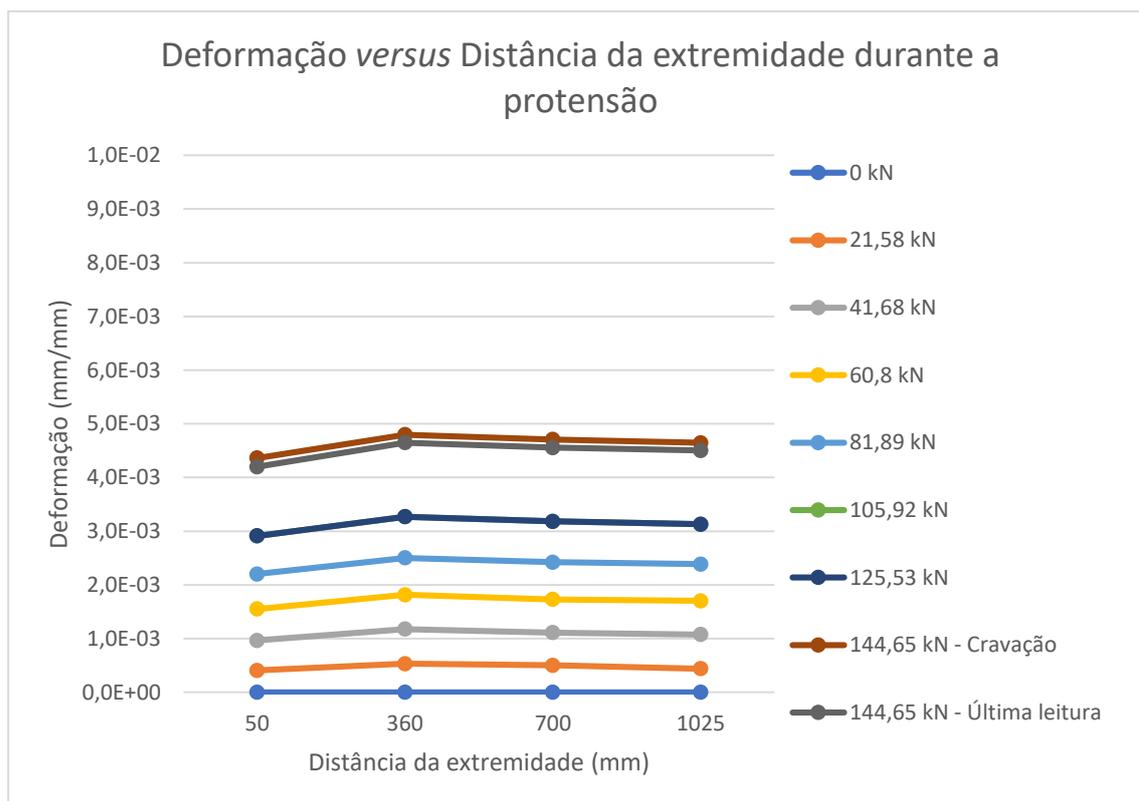


Figura 46 – Gráfico Deformação na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a protensão

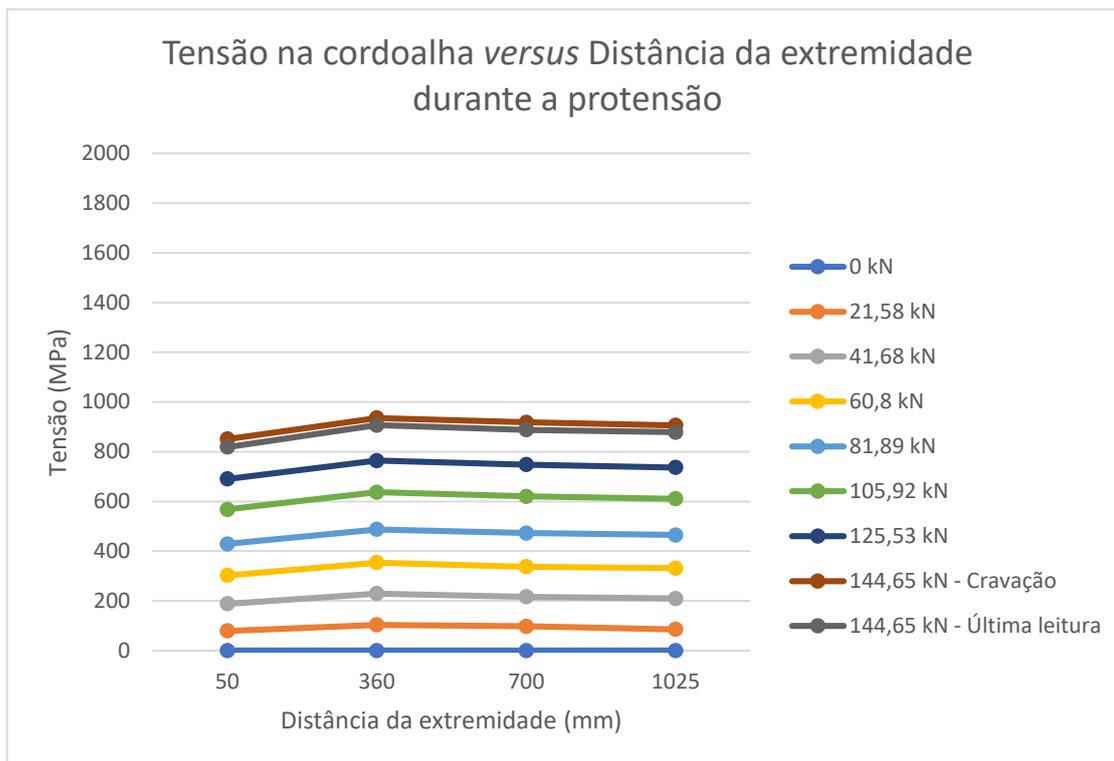


Figura 47 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a protensão

O gráfico da Figura 48 mostra a relação entre a força de protensão aplicada, registrada pela célula de carga no macaco hidráulico (CEL01), e a tensão de tração média na cordoalha. Para melhor visualização do aumento da força de protensão, o gráfico foi elaborado com os valores positivos, como feito para o gráfico da Figura 44.

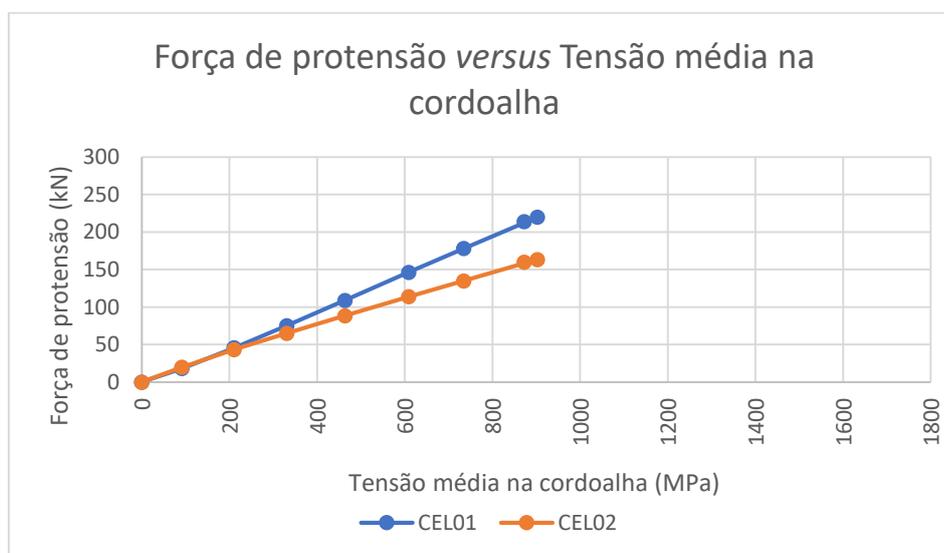


Figura 48 – Gráfico Força de protensão *versus* Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 2

As leituras de deformação com as respectivas tensões no momento da cravação da cordoalha e imediatamente após são apresentadas na Tabela 22 e Tabela 23, respectivamente.

Tabela 22 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 2

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	219,87	1532,15
CEL02	163,48	1139,21
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	4,36E-03	850,59
ST02	4,80E-03	935,42
ST03	4,71E-03	918,06
ST04	4,65E-03	906,17

Tabela 23 – Leitura dos extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 2

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	213,99	1491,07
CEL02	159,95	1114,27
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	4,20E-03	819
ST02	4,65E-03	906,56
ST03	4,56E-03	888,23
ST04	4,50E-03	878,28

Para a Amostra 2, temos uma tensão máxima na cordoalha encunhada de 906,56 MPa, contra os 975,61 MPa previsto para tensão efetiva (após todas as perdas imediatas) considerado no cálculo do comprimento de transferência para determinação do comprimento das amostras de concreto.

Como pode-se observar, os valores de tensão na cordoalha para a Amostra 2 ficaram abaixo do esperado. Também é possível notar que as forças registradas nas células de carga são superiores ao previsto para o valor registrado no manômetro do macaco hidráulico, uma vez que, pela calibração do macaco realizada, para uma força de 144,65 kN, equivalente a uma tensão de 175 kgf/cm² no manômetro do macaco, era esperado uma leitura na célula CEL01 de 144,65 kN. No entanto, tivemos uma leitura 213,99kN, que seria o equivalente a aproximadamente 258,02 kgf/cm². Tendo em vista o acontecimento durante a protensão da Amostra 1, foi decidido não elevar o carregamento para verificação da tensão inferior ao longo da cordoalha, devido ao risco a que ficariam expostos os colaboradores do ensaio e ao risco de se perder a cordoalha.

Também é possível concluir que houve uma perda média na cravação de 29,54 MPa, equivalente a 3,27% da tensão. O gráfico da Figura 49 compara as curvas desses dois momentos.

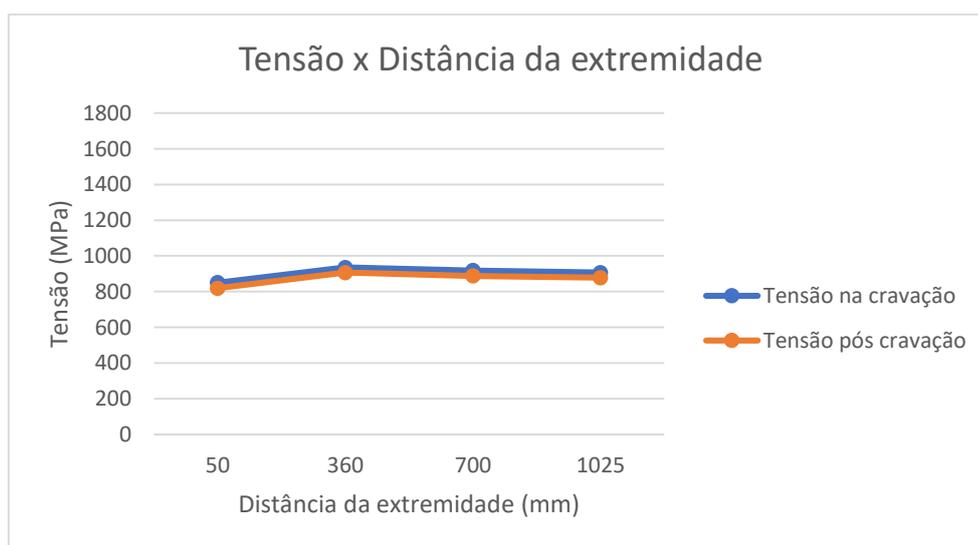


Figura 49 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 na cravação e após cravação

4.1.3 Amostra 3

Para acompanhamento da tensão ao longo da cordoalha, foram elaborados os gráficos em função da posição dos extensômetros tendo como referência (distância 0) a extremidade da amostra de concreto para o lado da Extremidade de Transferência, como mostra os projetos das amostras da Figura 30.

Como a Amostra 2 apresentou valores baixos de tensão na cordoalha, para a Amostra 3, optou-se por subir a força aplicada na protensão para 192,21 kN, mantendo assim uma margem de segurança de 50 kN.

Os dados coletados na instrumentação da Amostra 3 durante a execução da protensão são mostrados na Figura 50.

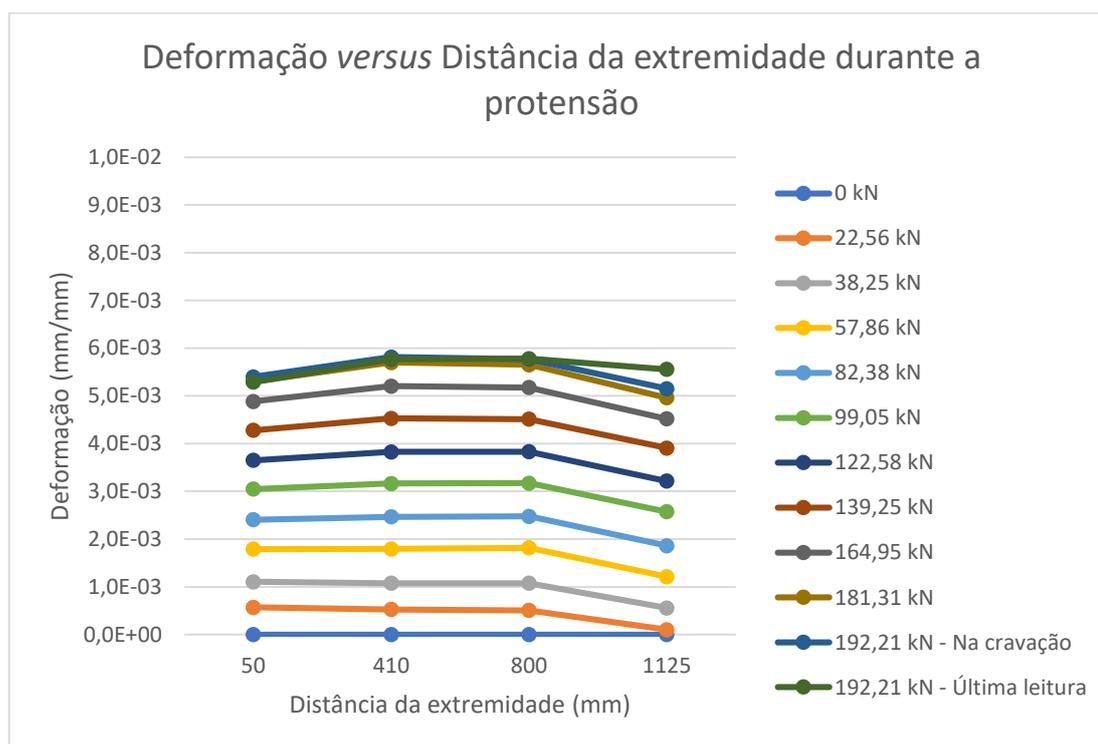


Figura 50 – Gráfico Deformação na cordoalha versus Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a protensão

Os valores de tensão de tração para as deformações registradas foram calculadas e são apresentadas no gráfico da Figura 51.

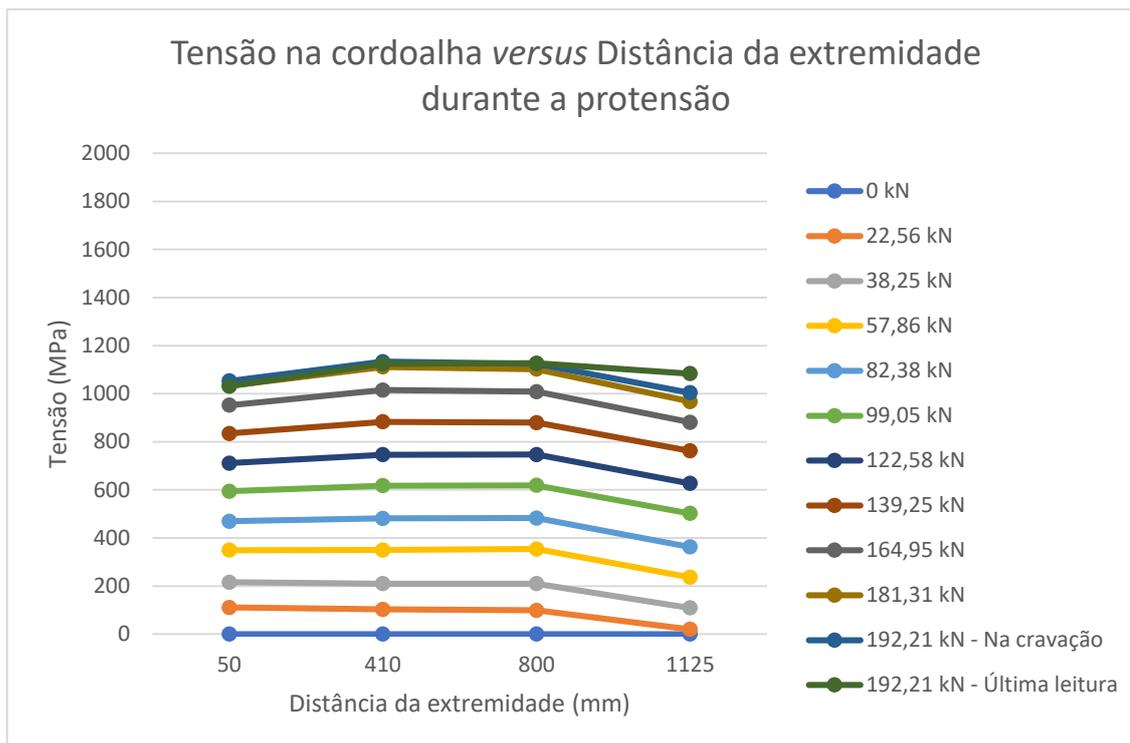


Figura 51 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a protensão

O gráfico da Figura 52 mostra a relação entre a força de protensão aplicada, registrada pela célula de carga no macaco hidráulico (CEL01), cujos valores tiveram seus sinais invertidos para melhor visualização, e a tensão de tração média na cordoalha.

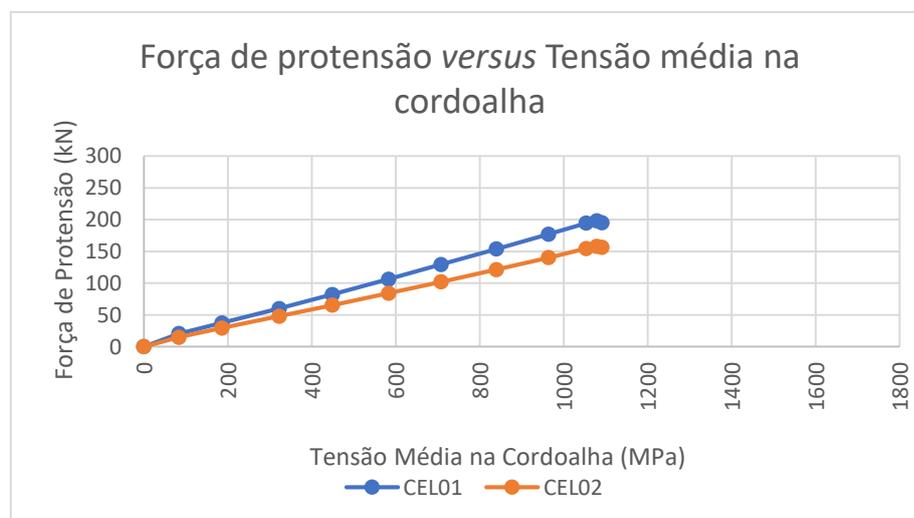


Figura 52 – Gráfico Força de protensão *versus* Tensão média na cordoalha para a viga da Amostra 3

As leituras de deformação com as respectivas tensões no momento da cravação da cordoalha e imediatamente após são apresentadas na Tabela 24 e Tabela 25, respectivamente.

Tabela 24 – Leitura dos extensômetros na cordoalha no momento da cravação da mesma para a viga da Amostra 3

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	198,3	1381,66
CEL02	157,98	1101,94
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	5,40E-03	1053
ST02	5,81E-03	1133,54
ST03	5,77E-03	1125,15
ST04	5,15E-03	1004,25

Tabela 25 – Leitura dos extensômetros na cordoalha após a cravação da mesma para a viga da Amostra 3

Medição		
Força de protensão		
Célula de carga	F (kN)	σ (MPa)
CEL01	195,26	1360,84
CEL02	156,52	1088,72
Extensometria		
Extensômetro	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
ST01	4,20E-03	1030,97
ST02	4,65E-03	1124,37
ST03	4,56E-03	1127,1
ST04	4,50E-03	1083,6

Para a Amostra 3, tem-se uma tensão média final na cordoalha encunhada de 1091,52 MPa, contra os 975,61 MPa previsto para tensão efetiva (após todas as

perdas imediatas) considerado no cálculo do comprimento de transferência para determinação do comprimento das amostras de concreto.

Não foi possível determinar perda comparando as tensões médias quando considerando o extensômetro ST04, pois o mesmo apresenta valor maior para após a cravação do que no antes da mesma, fazendo com que a tensão média após a cravação fosse maior do que na cravação. Fazendo o mesmo cálculo, mas desconsiderando o ST04, tem-se uma perda de tensão de 9,75kN, o que corresponde a 0,88% da tensão média. O gráfico da Figura 53 compara as curvas desses dois momentos.

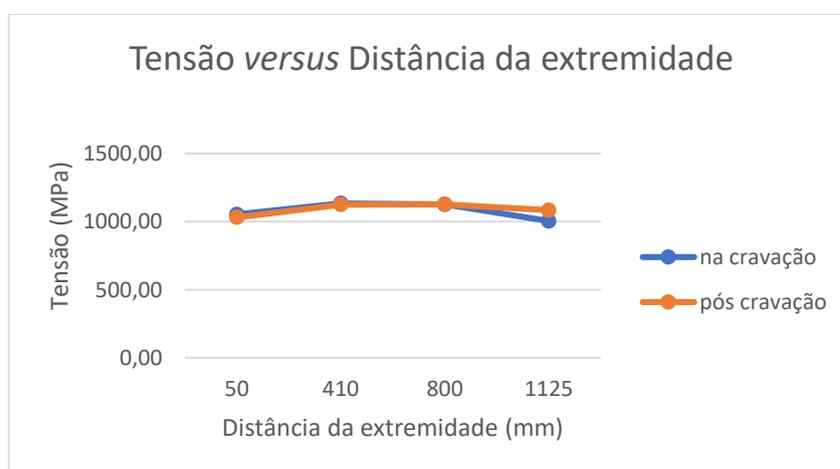


Figura 53 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 na cravação e após cravação

4.1.4 Análise comparativa dos resultados experimentais

Foram obtidos de dados na etapa de protensão os valores de deformação e tensão nas cordoalhas. Esses dados são base para a determinação do comprimento de transferência das amostras e foram apresentados nos itens 4.1.1 a 4.1.3.

Comparando os Gráficos de Tensão *versus* Distância da Extremidade Durante a Protensão, pode-se observar que as leituras dos extensômetros estão coerentes, com exceção do ST04 da Amostra 3. Porém, esse mesmo gráfico para a Amostra 1 (Figura 43)(uma vez que a Amostra 2 não chega a ter essa força aplicada), nota-se que a leitura dos demais extensômetros apresentam valores muito próximos. O

extensômetro ST03 da Amostra 1 apenas apresentou valores incoerentes após o rompimento do fio.

Para a Amostra 2, cujo valor da força na célula CEL01 é maior que o das demais amostras, enquanto as deformações na cordoalha fornecem valores mais baixos de tensão, comparando os gráficos de deformação e tensão na cordoalha durante a protensão das amostras para as faixas de força aplicada na Amostra 2, vê-se que a leitura da extensometria segue coerente. O que, somada a análise da planilha de calibração do macaco de protensão no Apêndice C, leva à conclusão de ter havido algum problema nas células ou na ancoragem.

No mais, a leitura das células para as Amostras 1 e 3 validam as Planilhas de Calibração dos macacos utilizados em ambos os ensaios.

As diferentes tensões na cordoalha na protensão e seu impacto no comprimento de transferência das amostras serão melhor avaliadas no item 4.2 deste capítulo, após verificadas as perdas imediatas. As tensões após a cravação para as três amostras são apresentadas juntas no gráfico da Figura 54 para melhor visualização dessa diferença. Nela, pode-se ver que o segundo extensômetro da Amostra 1 apresenta valor levemente inferior aos demais, possivelmente devido a alguma influência do rompimento do fio.

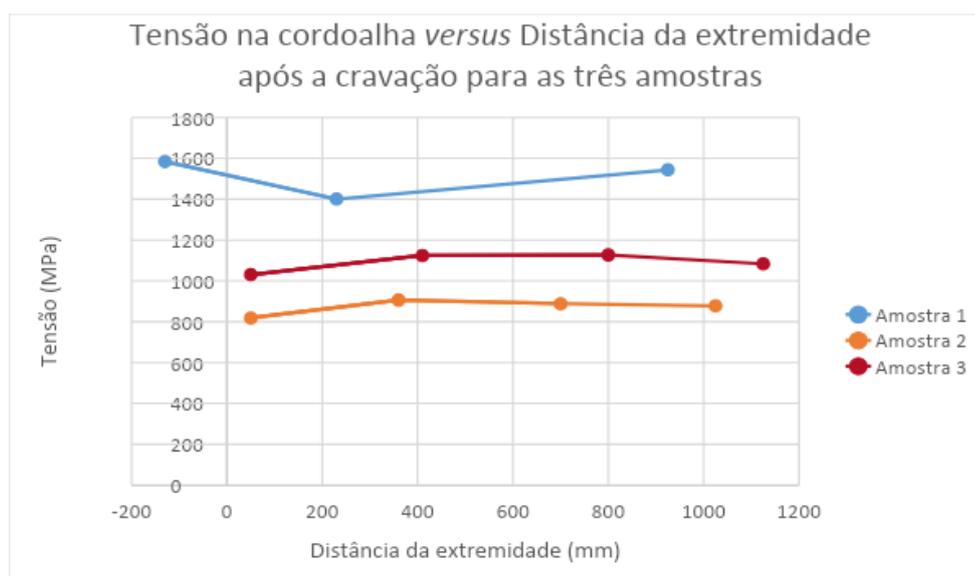


Figura 54 – Gráfico comparativo Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade após a cravação para as três amostras

A Tabela 26 apresenta um resumo do estado da protensão da cordoalha ao final da etapa de protensão, a qual se seguirá a etapa de transferência.

Tabela 26 – Dados da protensão das cordoalhas

Amostra	Força de protensão (CEL01) (tf)	Força na ancoragem da Extremidade de Pull-Out (CEL02) (tf)	Tensão média na cordoalha (MPa)
1	16,88	-	1509,50
2	21,82	16,31	873,02
3	19,91	15,93	1216,66

4.2 Transferência

4.2.1 Amostra 1

A transferência de tensão da cordoalha para o concreto para a Amostra 1 foi realizada aos 28 dias.

Nesta etapa, a instrumentação foi complementada com extensômetros no concreto e a sua configuração é apresentada no projeto da Figura 28. Como explicado no capítulo anterior, para a Amostra 1 haviam apenas 4 canais de extensometria disponíveis. Assim, os extensômetros ST01 e ST03 da cordoalha não foram ligados ao NATIONAL, para usar seus canais para os dois extensômetros no concreto. Optou-se por esses extensômetros uma vez que o ST03 já não estava funcionando corretamente desde a protensão e o ST01 tem posição na qual a tensão após a transferência deve ser zero.

Conforme explicado em 3.1.2.b, o sistema de compilação de dados utilizado neste trabalho, o NATIONAL INSTRUMENTS, zera a leitura da instrumentação quando desligado. Como as etapas de ensaio de protensão e transferência teve um intervalo entre si de 28 dias, e considerando a infraestrutura do laboratório, não é possível manter o equipamento ligado. Desta forma, os valores aqui registrados partem de uma leitura inicial zero. Para os valores lidos pela instrumentação do concreto, não haveria impacto, no entanto, para as leituras da célula CEL02 e dos extensômetros ST02 e ST04, a referência da última leitura após a cravação é perdida, assim como as perdas na acomodação da cunha na ancoragem nesse intervalo de

tempo entre as etapas. Desta forma, as leituras obtidas pela instrumentação na cordoalha e nas ancoragens nessa etapa de ensaio, tanto para a Amostra como para as demais, na verdade representam a variação de deformação e força, e, conseqüentemente, de tensão.

Os dados coletados resumidos da instrumentação da Amostra 1 durante a execução da transferência são mostrados na **Tabela 27**, na qual os extensômetros ST02 e ST04 estão na cordoalha, e os extensômetros ST05 e ST06 estão no concreto. Na tabela, pode-se ver que os extensômetros da cordoalha também apresentam sinal negativo. No entanto, isso não significa que a mesma encontra-se comprimida. Tendo em consideração que esses valores obtidos correspondem a variação, esse sinal representa apenas a movimentação a cordoalha, que relaxa após a retirada da ancoragem provisória na extremidade de transferência.

Para acompanhamento da transferência nas amostras, foram elaborados gráficos de Deformação versus Distância da extremidade durante a transferência. No caso da Amostra 1, as curvas dos gráficos são as últimas leituras feitas após completada $\frac{1}{4}$ de volta de aparafusamento nas quatro porcas. No entanto, como podemos observar na Tabela 27, os valores registrados pelo extensômetro ST02 a partir 1 volta completa (360°) das porcas são valores positivos e altos. Retirando as leituras do extensômetro ST02, tem-se apenas o ponto do extensômetro ST04, não sendo possível, portanto, fazer o gráfico.

Tabela 27 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 1

Giro das porcas	CEL02 (kN)	Cordoalha		Concreto	
		ST02 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST 04 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST05 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST06 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$
90°	0,0418	-4,70E-04	-1,42E-04	-6,07E-05	-7,43E-05
180°	0,0506	-7,93E-04	-7,27E-04	-5,49E-05	-5,00E-05
270°	0,0389	-1,03E-03	-9,79E-04	-5,93E-05	-5,99E-05
360°	0,0459	1,07E-01	-1,44E-03	-5,95E-05	-4,58E-05
450°	0,0267	1,07E-01	-1,95E-03	-6,88E-05	-6,77E-05
540°	0,0471	1,07E-01	-2,35E-03	-6,77E-05	-6,57E-05
630°	0,0296	1,07E-01	-2,80E-03	-7,54E-05	-8,17E-05
720°	0,0436	1,07E-01	-2,85E-03	-8,05E-05	-8,30E-05
720° *	0,0662	1,07E-01	-2,99E-03	-8,14E-05	-8,70E-05

* Leitura da transferência após período de estabilização de 2h

Ao final da transferência, após a estabilização, tem-se na cordoalha pelo extensômetro ST04 no Sistema AMA a variação de tensão de 583,83 MPa.

Para deformação no concreto, o gráfico é apresentado na Figura 55, no qual os valores de deformação apresentados correspondem a encurtamento.

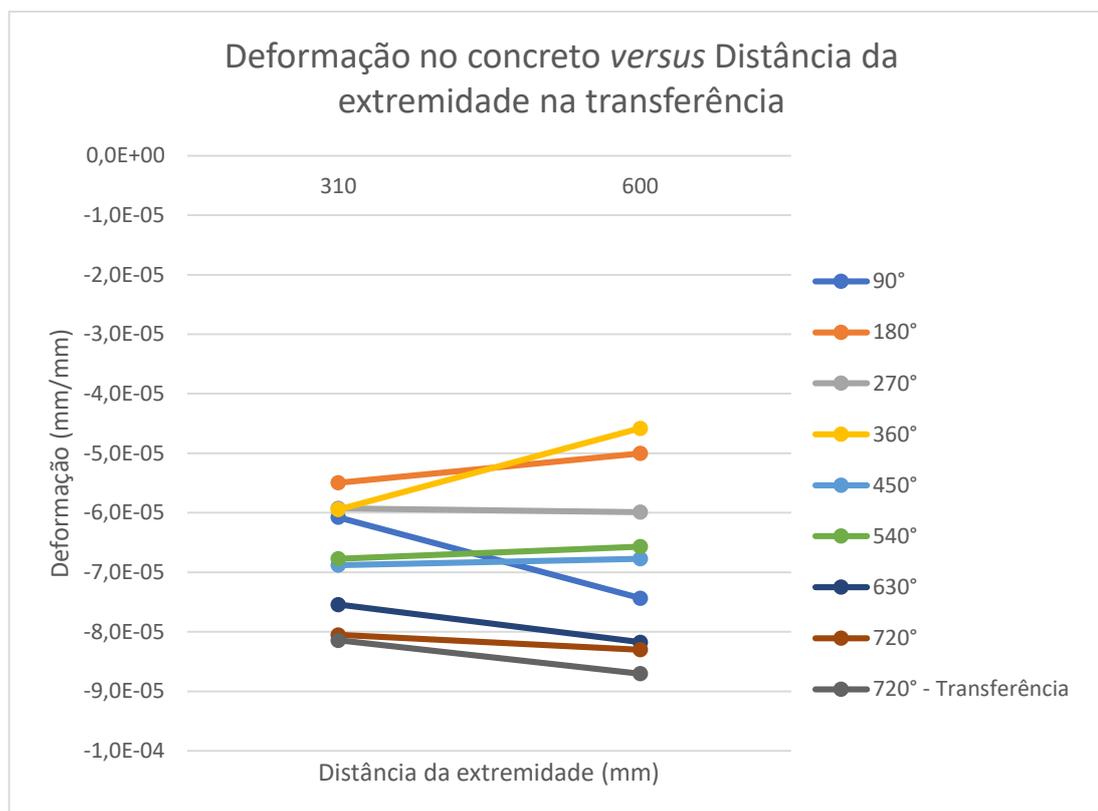


Figura 55 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a transferência

Os valores de tensão no concreto para as deformações registradas foram calculadas e são apresentadas no gráfico da Figura 56.

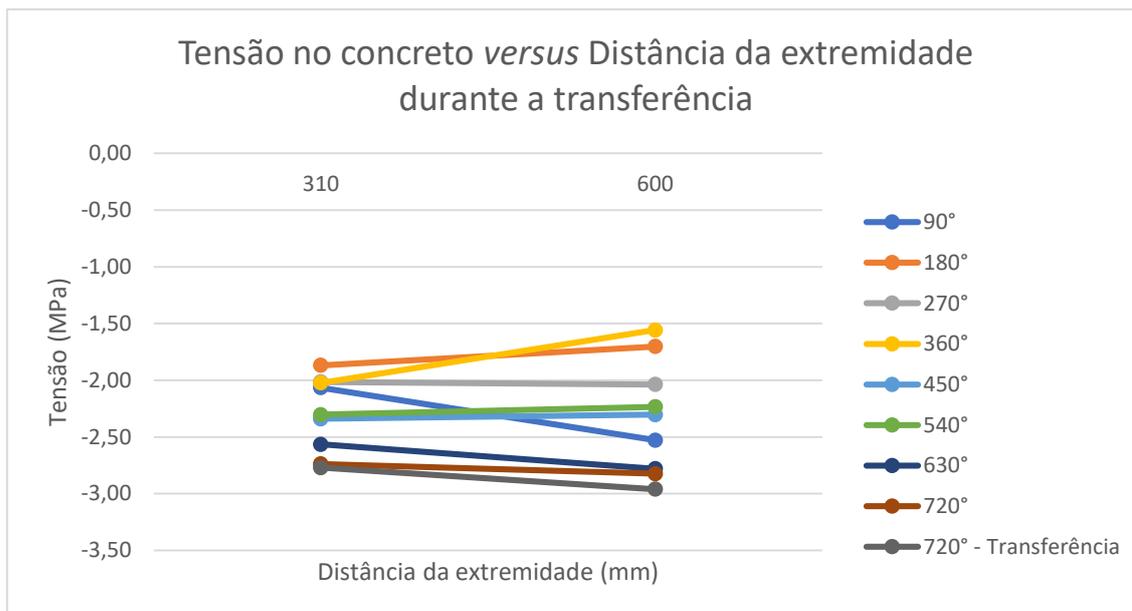


Figura 56 – Gráfico Tensão no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 durante a transferência

A Figura 57 e a Figura 58 trazem os gráficos de deformação e tensão no concreto após a estabilização da transferência. Não foram feitos os gráficos para a cordoalha pois havia apenas 2 extensômetros nela e um deles não apresentou leitura com valor coerente.

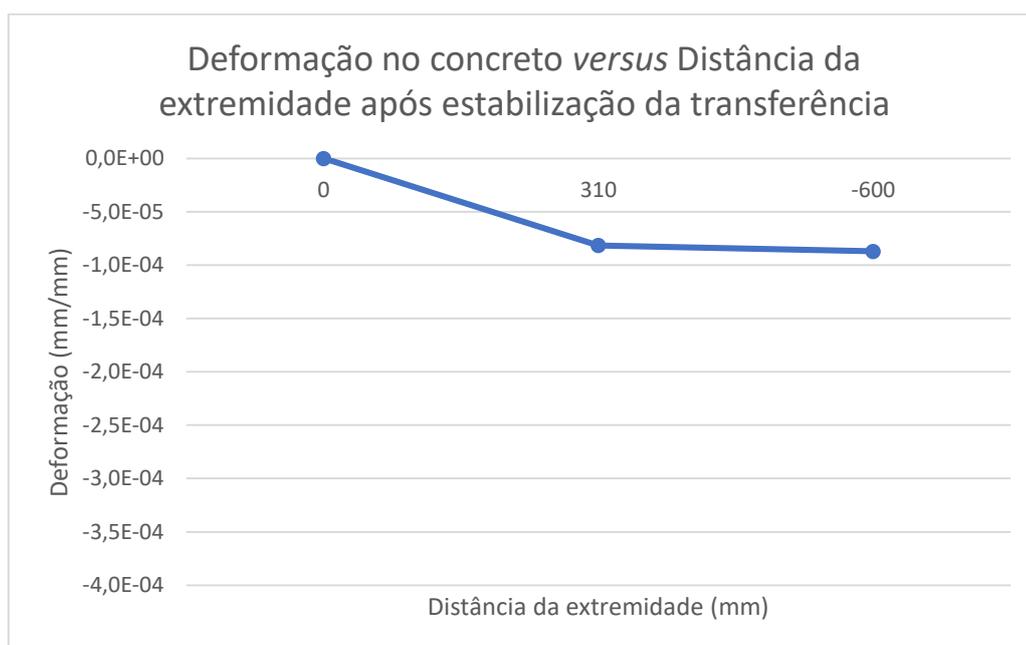


Figura 57 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 após estabilização da transferência

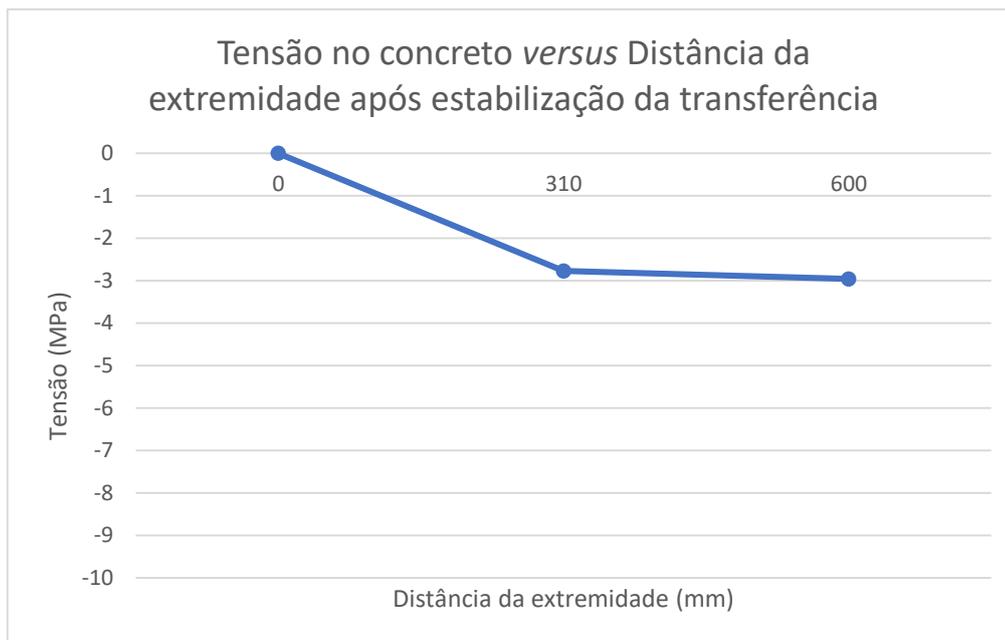


Figura 58 – Gráfico Tensão no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 1 após estabilização da transferência

As leituras de deformação com as respectivas tensões após a estabilização da transferência, com os sinais conforme leitura original, são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Leitura da instrumentação da Amostra 1 após transferência

Extensômetro		Distância da extremidade (mm)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
Variação na Cordoalha	ST02	230	1,07E-01	20906,54
	ST04	925	-2,99E-03	-583,83
Real no Concreto	ST05	310	-8,10E-05	-2,77
	ST06	600	-8,70E-05	-2,96

4.2.2 Amostra 2

A transferência de tensão da cordoalha para o concreto para a Amostra 2 foi realizada aos 7 dias.

A configuração da instrumentação da Amostra 2 para transferência é apresentada no projeto da

Figura 29. Essa configuração é diferente da Amostra 1, uma vez que observada a dificuldade da execução da desprotensão através do aparafusamento das porcas, para os demais ensaios optou-se por usar o macaco hidráulico na mesma posição da protensão. Dessa forma, além da CEL02 na ancoragem e dos extensômetros, tem-se também a célula CEL01 no macaco.

Os dados coletados resumidos da instrumentação da Amostra 2 durante a execução da transferência são mostrados na Tabela 29. Como as etapas de ensaio de protensão e transferência teve um intervalo entre si de 7 dias, o equipamento foi desligado. Desta forma, os valores aqui registrados partem de uma leitura inicial zero. Assim, a leitura para os extensômetros no concreto correspondem à realidade da peça, enquanto as leituras da instrumentação da cordoalha e células de carga são valores de variação de deformação e de força, respectivamente, não sendo o sinal negativo um indicativo de que o elemento está comprimido.

Tabela 29 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 2

CEL01 (kN)	CEL02 (kN)	Cordoalha				Concreto		
		ST01 ($\frac{mm}{mm}$)	ST02 ($\frac{mm}{mm}$)	ST03 ($\frac{mm}{mm}$)	ST04 ($\frac{mm}{mm}$)	ST05 ($\frac{mm}{mm}$)	ST06 ($\frac{mm}{mm}$)	ST07 ($\frac{mm}{mm}$)
-138,8	-12,04	3,7E-04	3,6E-05	3,1E-04	4,3E-04	7,3E-06	3,2E-05	1,4E-05
-100,1	1,67	-2,0E-04	-2,5E-05	1,1E-04	-4,5E-05	-1,3E-05	-5,3E-05	-8,8E-05
-52,94	5,39	2,9E-04	-1,3E-04	-1,1E-04	-1,6E-04	-3,0E-05	-1,5E-04	-1,8E-04
-5,27	8,49	-3,4E-04	-2,6E-04	-1,4E-04	-2,7E-04	-3,2E-05	-2,5E-04	-2,7E-04
-9,46*	9,13	2,4E-04	-3,4E-04	-1,7E-04	-2,9E-04	-4,3E-05	-2,9E-04	-3,0E-04

* Leitura da transferência após período de estabilização de 2h

Para acompanhamento da transferência também foram elaborados os gráficos de deformação e tensão, tanto para cordoalha quanto para o concreto, apresentados na Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62. No caso da Amostra 2, as curvas dos gráficos são as leituras registradas a cada 50 kN de descarga.

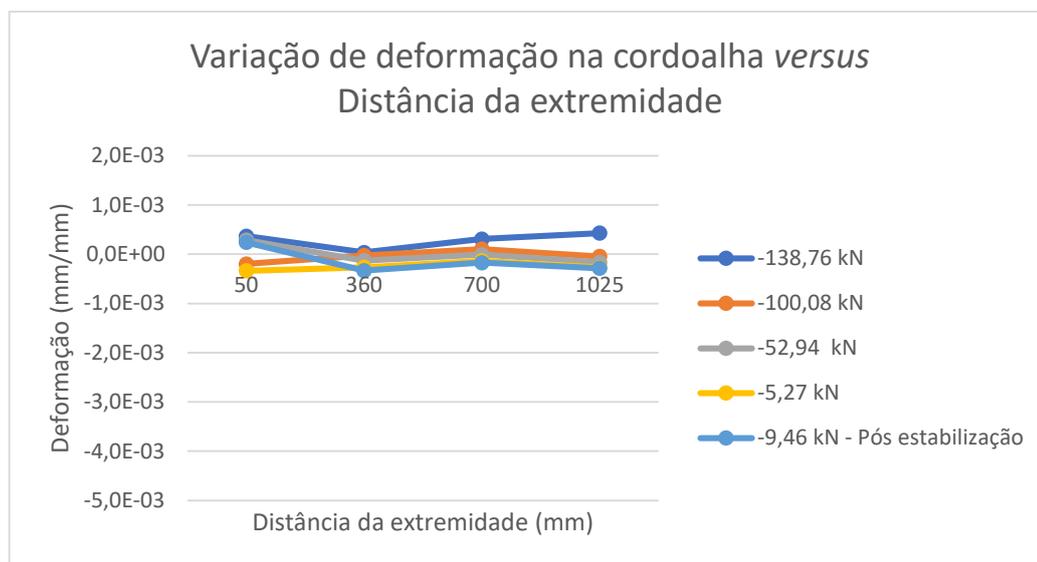


Figura 59 – Gráfico *Varição de deformação na cordoalha versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência

Como se pode observar na Figura 59, o extensômetro ST01 apresenta comportamento instável, com seus valores oscilando entre positivo e negativo. Desta forma, para análise do comprimento de transferência, foi usado como parâmetro apenas as leituras de deformação no concreto.

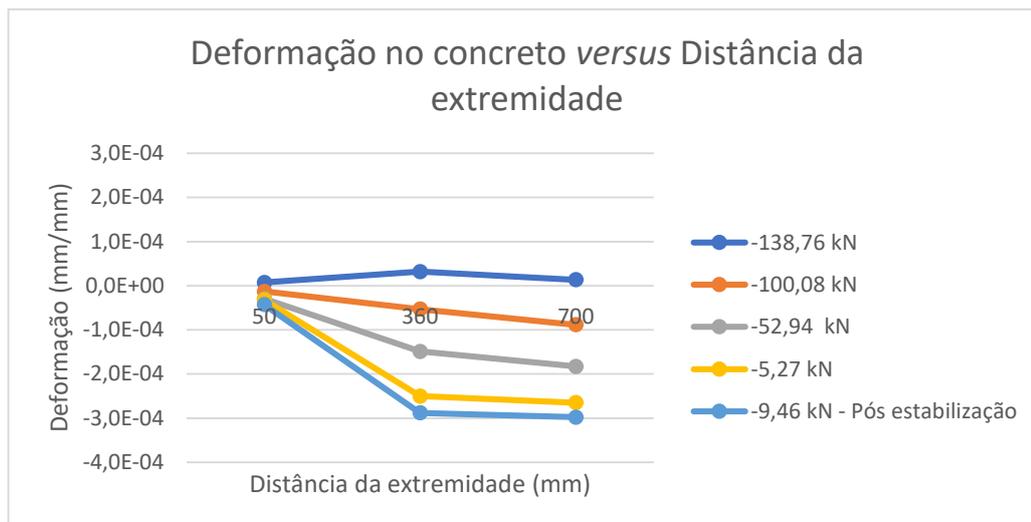


Figura 60 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência

Os valores de tensão para as deformações registradas na cordoalha a e no concreto foram calculadas e são apresentadas, respectivamente, nos gráficos da Figura 61 e Figura 62. As tensões na cordoalha tiveram o sinal correto mantido.

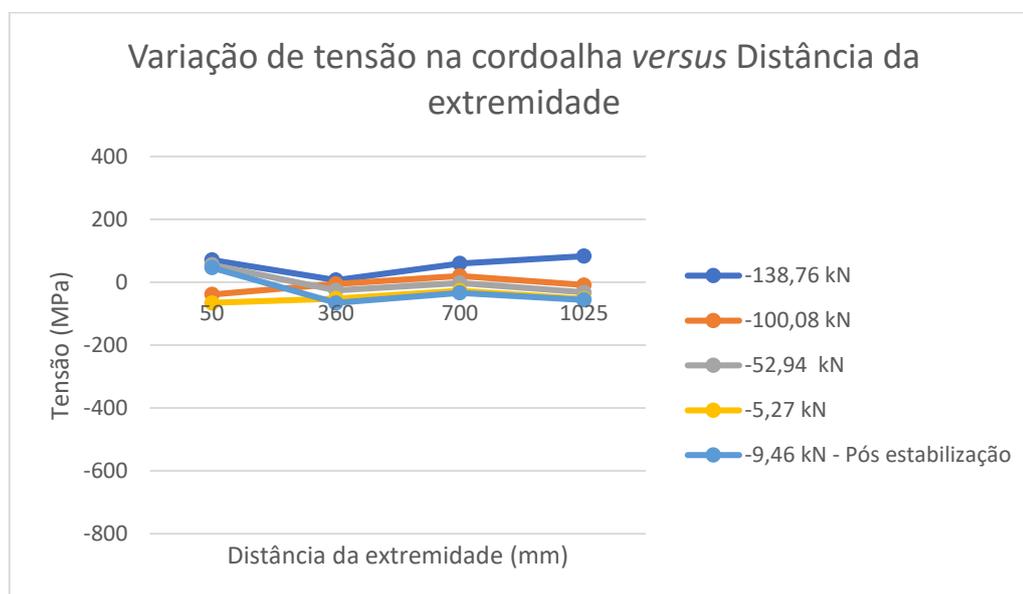


Figura 61 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência

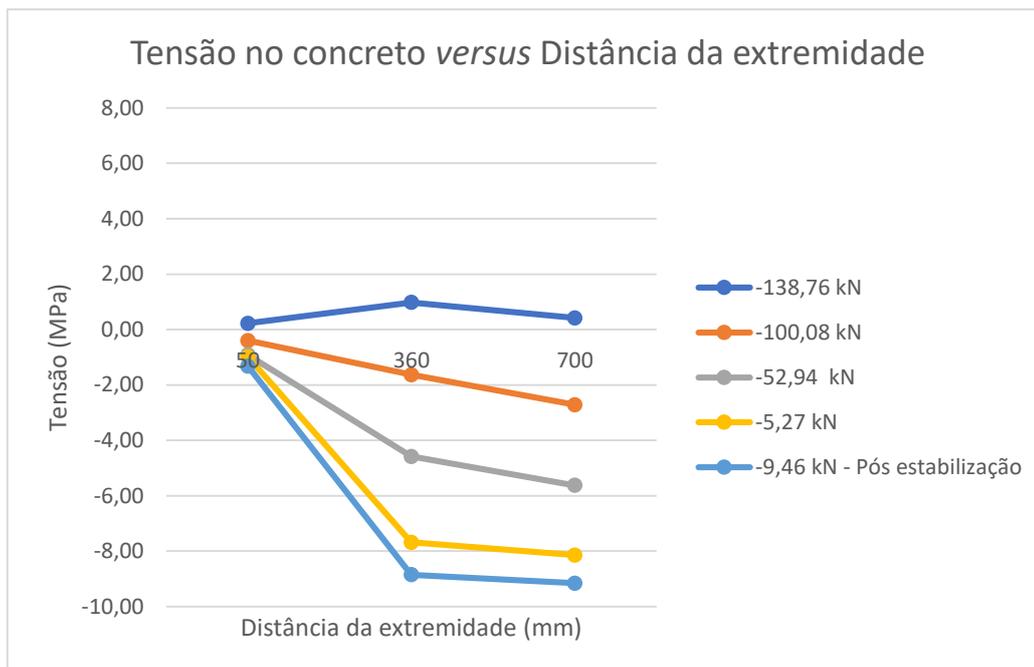


Figura 62 – Gráfico Tensão no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 durante a transferência

A Figura 63 e Figura 64 trazem os gráficos de deformação e tensão na cordoalha após a estabilização da transferência, para os quais os valores de deformação e tensão tem sinal correto conforme leitura.

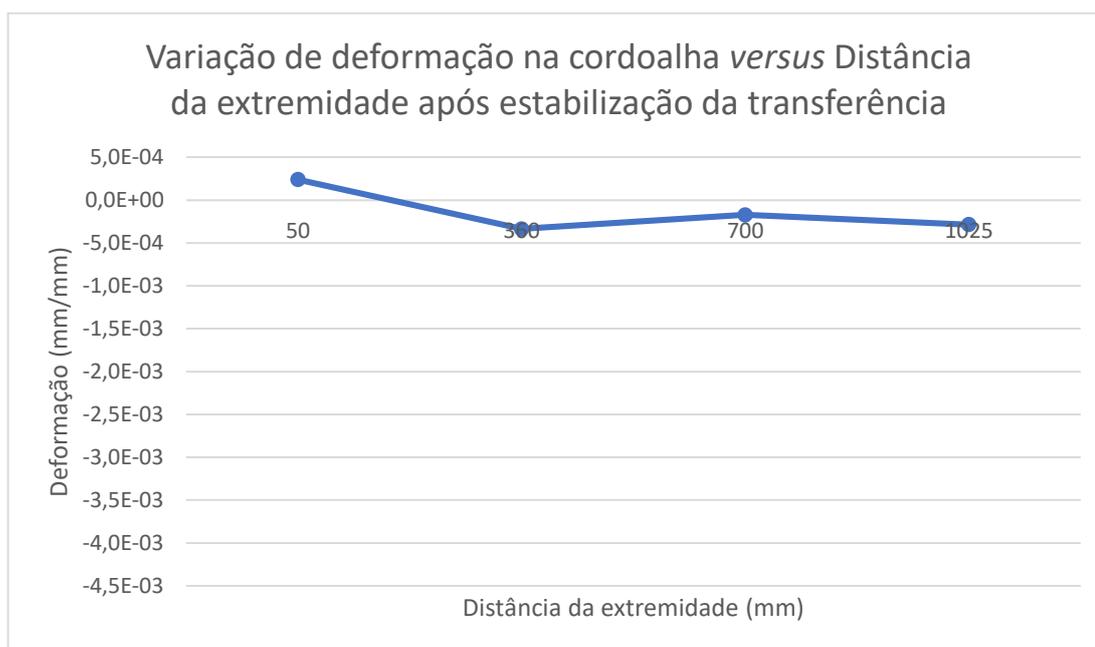


Figura 63 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência

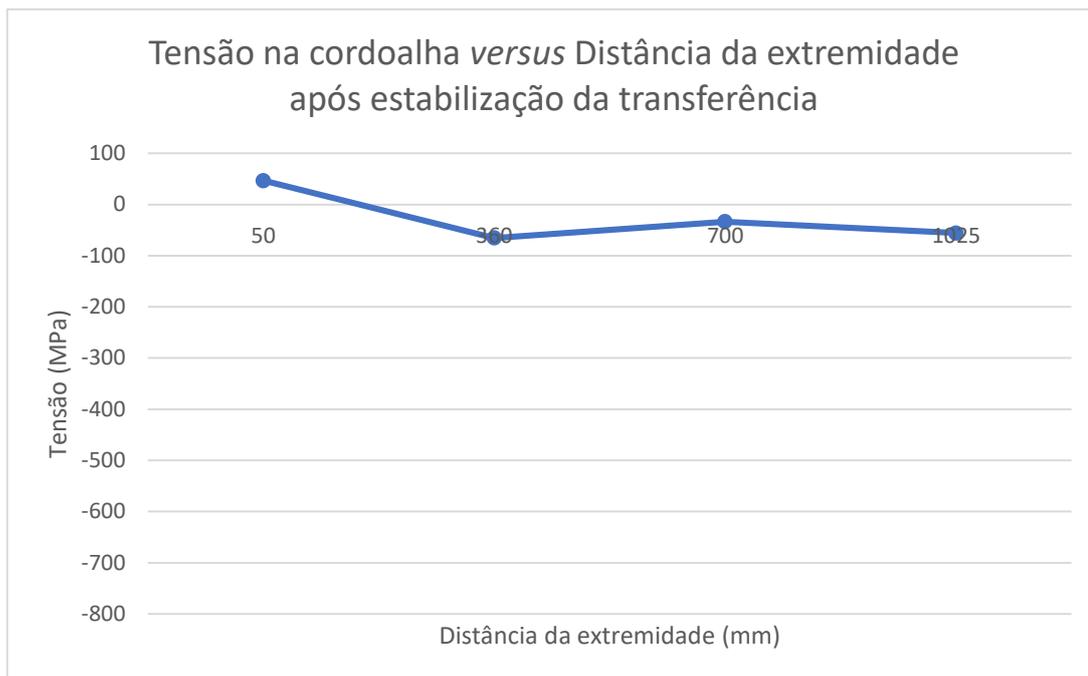


Figura 64 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência

A Figura 65 e Figura 66 trazem os gráficos de deformação e tensão no concreto após a estabilização da transferência.

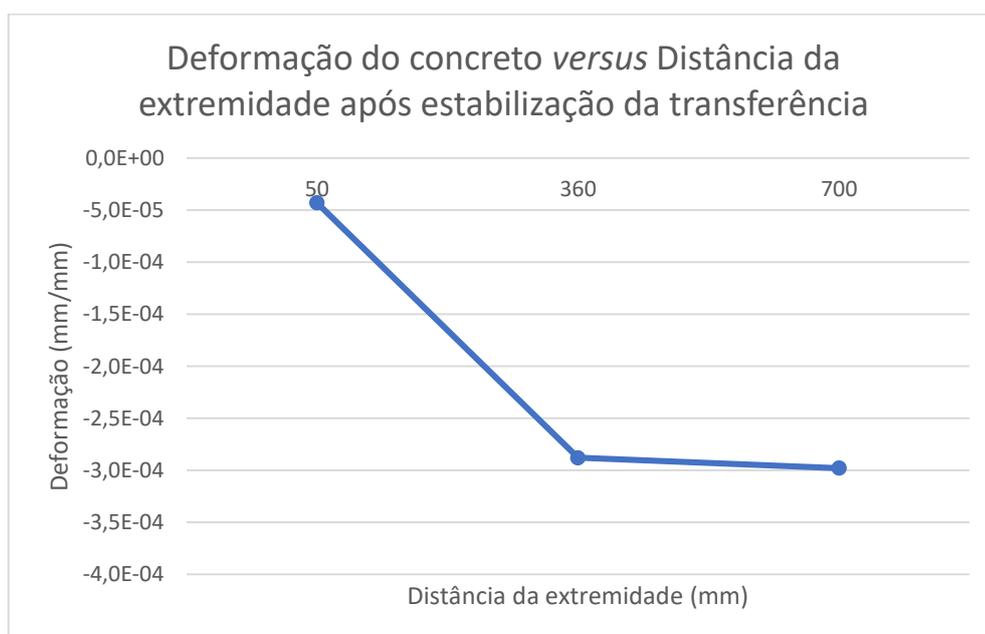


Figura 65 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência

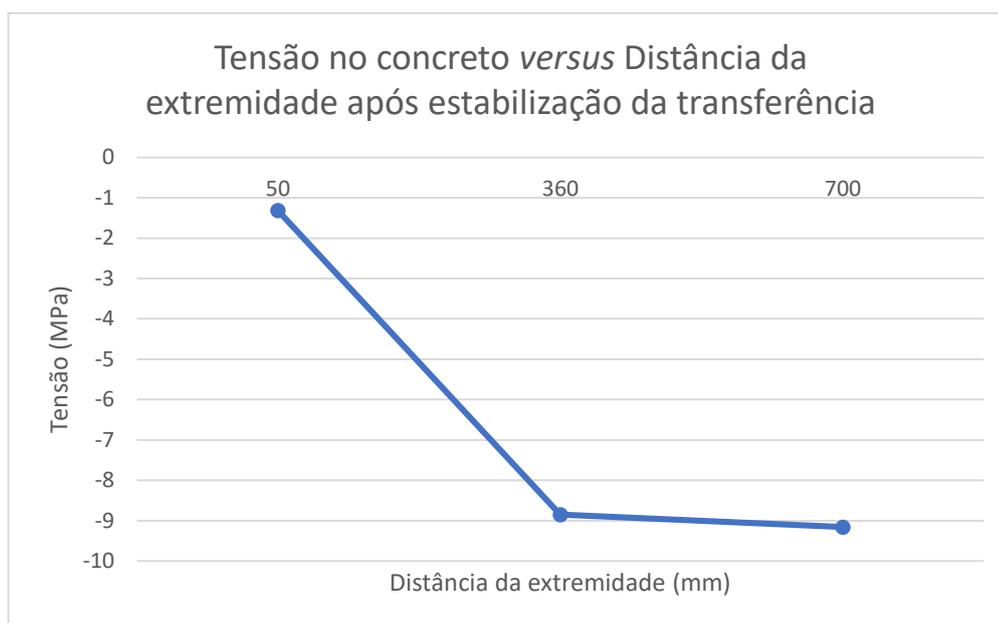


Figura 66 – Gráfico Tensão no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 2 após estabilização da transferência

A Figura 67 apresenta as curvas para tensão na cordoalha e no concreto após a estabilização da transferência.

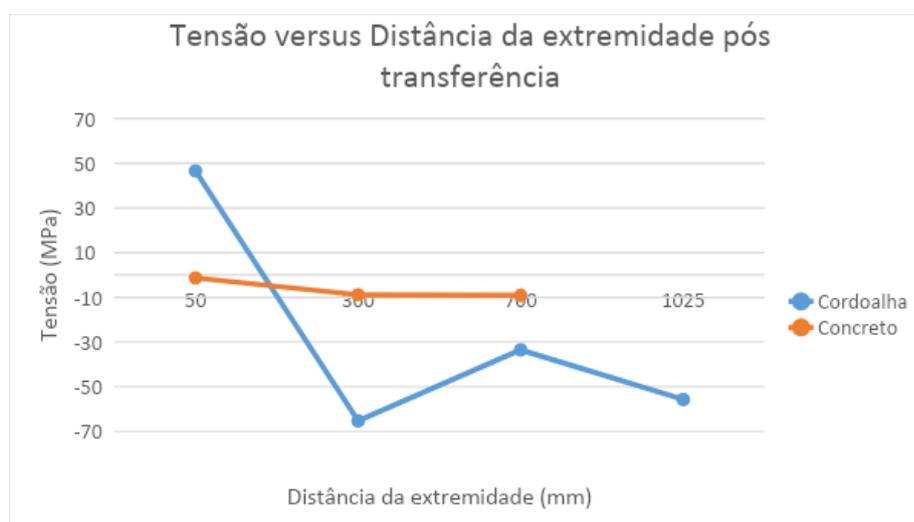


Figura 67 – Gráfico comparativo Tensão versus Distância da extremidade após estabilização da transferência para Amostra 2

As leituras de deformação com as respectivas tensões após a estabilização da transferência, com os sinais conforme leitura original, são apresentadas na Tabela 30.

Tabela 30 – Leitura da instrumentação da Amostra 2 após transferência

Extensômetro		Distância da extremidade (mm)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
Variação na Cordoalha	ST01	50	2,39E-04	46,61
	ST02	360	-3,35E-04	-65,33
	ST03	700	-1,72E-04	-33,54
	ST04	1025	-2,86E-04	-55,77
Real no Concreto	ST05	50	-4,29E-05	-1,32
	ST06	360	-2,88E-04	-8,85
	ST07	700	-2,98E-04	-9,16

4.2.3 Amostra 3

A transferência de tensão da cordoalha para o concreto para a Amostra 3 foi realizada aos 7 dias. A configuração da instrumentação da Amostra 3 para transferência é apresentada no projeto **Figura 30**. Como se pode ver, essa configuração segue o executado para a Amostra 2.

Os dados coletados resumidos da instrumentação da Amostra 3 durante a execução da transferência são mostrados na Tabela 31. Como as etapas de ensaio de protensão e transferência tiveram um intervalo entre si de 7 dias, o equipamento foi desligado. Desta forma, os valores aqui registrados partem de uma leitura inicial zero. Como explicado anteriormente, esse mecanismo não impacta nos dados para o concreto, no entanto, para a cordoalha, os valores registrados referem-se à variação de deformação e tensão.

Tabela 31 – Resumo dos dados coletados durante a transferência da Amostra 3

CEL01 (kN)	CEL02 (kN)	Cordoalha				Concreto		
		ST01 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST02 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST03 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST04 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST05 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST06 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$	ST07 $\left(\frac{\text{mm}}{\text{mm}}\right)$
-178	-10,54	1,6E-03	3,6E-04	5,2E-04	4,1E-04	2,7E-05	2,4E-04	1,9E-04
-159,85	-2,08	1,2E-03	3,1E-04	4,2E-04	1,2E-04	2,3E-05	2,0E-04	1,6E-04
-105,72	0,53	-2,3E-05	1,4E-04	2,9E-04	1,8E-05	1,7E-05	8,1E-05	5,4E-05
-54,33	2,76	-1,5E-03	-2,0E-04	1,8E-04	-5,3E-05	1,0E-06	-4,0E-06	-3,2E-05
5,88	4,87	-3,6E-03	-1,4E-03	2,3E-05	-1,4E-04	-8,0E-06	-6,4E-05	-1,3E-04
11,67	5,77	-3,9E-03	-1,5E-03	4,0E-06	-1,5E-04	-8,0E-06	-6,7E-05	-1,3E-04

* Leitura da transferência após período de estabilização de 2h

Para acompanhamento da transferência também foram elaborados os gráficos da Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71. No caso da Amostra 3, as curvas dos gráficos são as leituras registradas a cada 50 kN de descarga. Os gráficos para a deformação no concreto tiveram seus valores de deformação apresentados com sinais corretos mantidos.

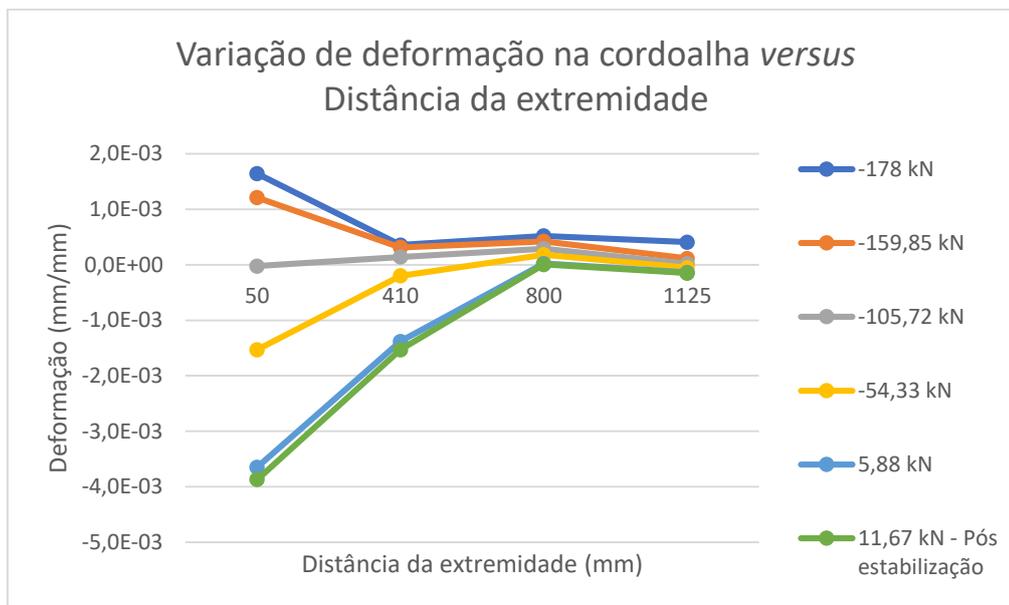


Figura 68 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência

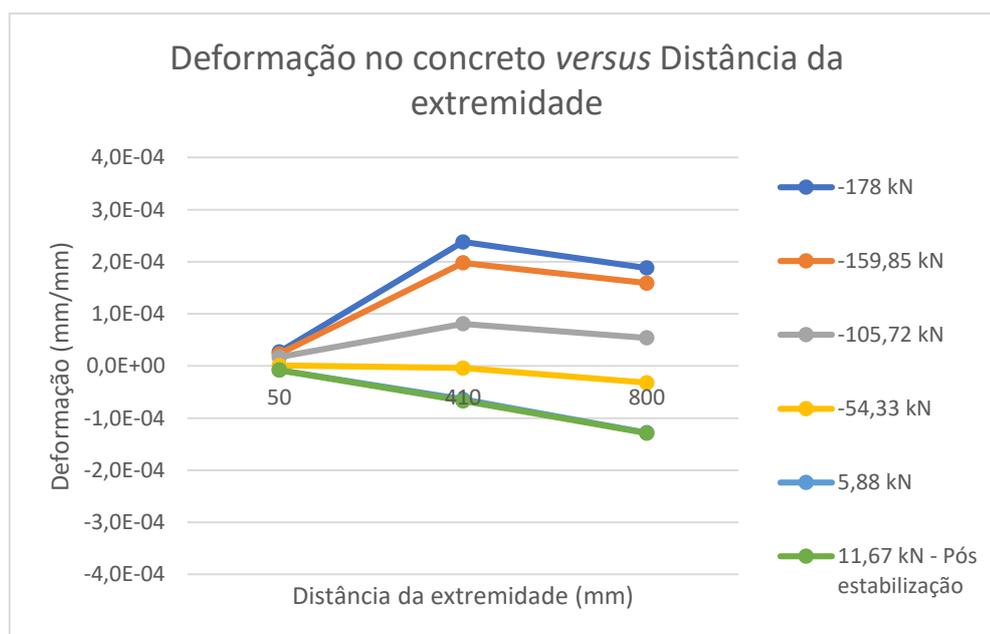


Figura 69 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência

Os valores de tensão para as deformações registradas na cordoalha e no concreto foram calculadas e são apresentadas, respectivamente, nos gráficos das Figura 70 e Figura 71. As tensões na cordoalha tiveram o sinal correto mantido.

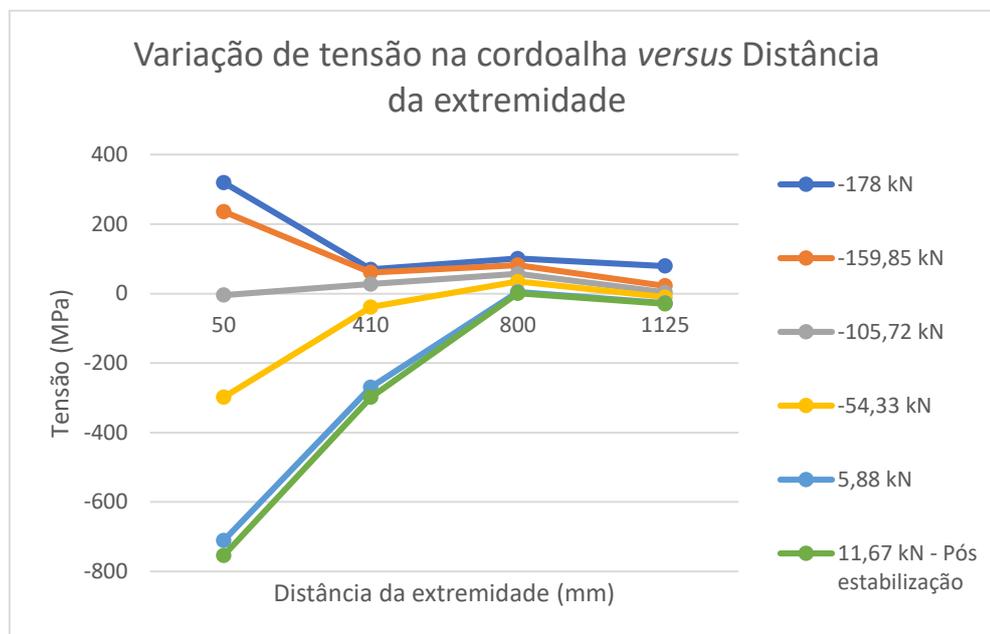


Figura 70 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência

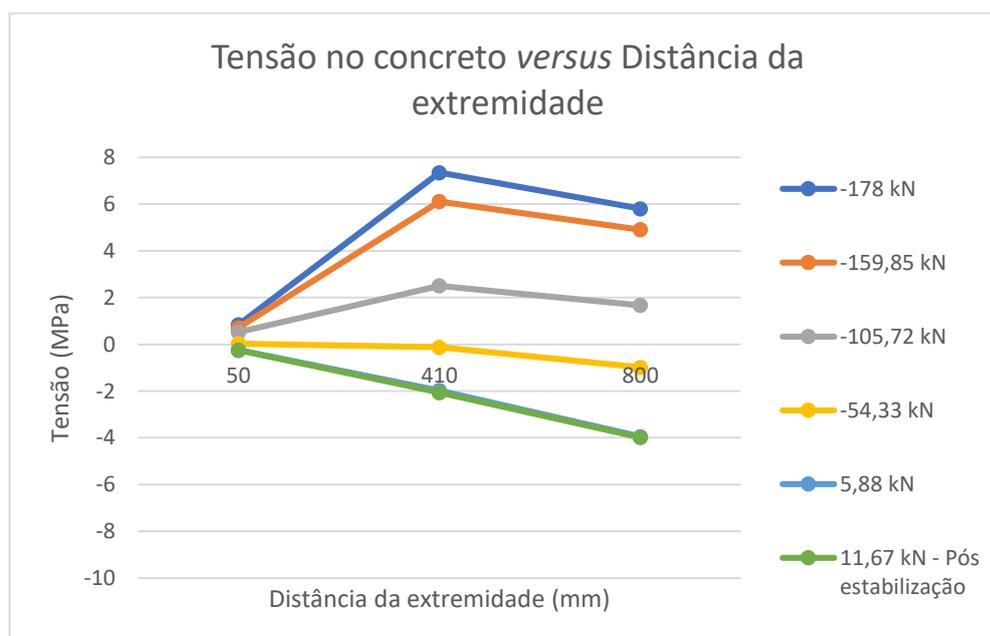


Figura 71 – Gráfico Tensão no concreto *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 durante a transferência

A Figura 72 e a Figura 73 trazem os gráficos de deformação e tensão na cordoalha após a estabilização da transferência, para os quais os valores de deformação e tensão tem sinal correto conforme leitura.

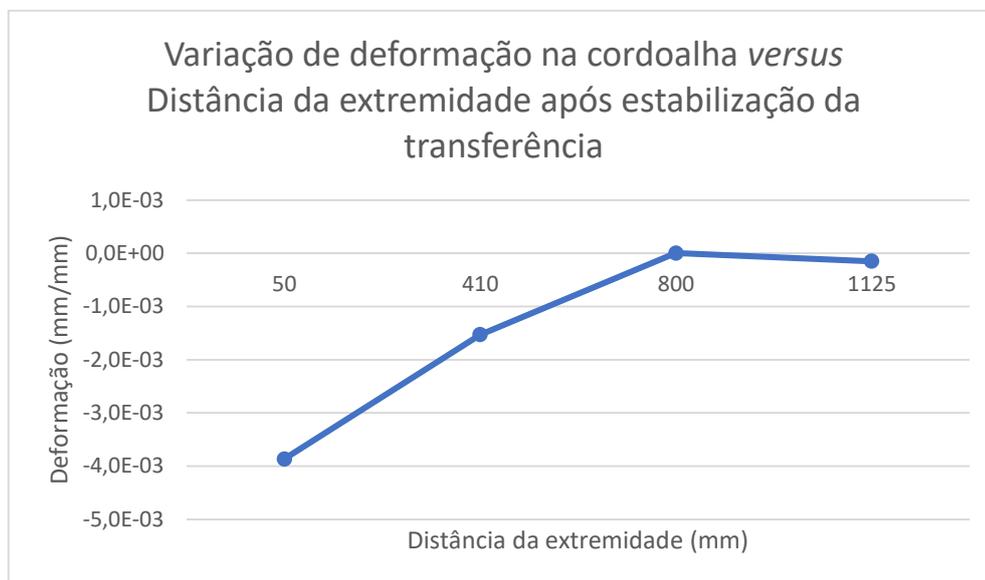


Figura 72 – Gráfico Variação de deformação na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência

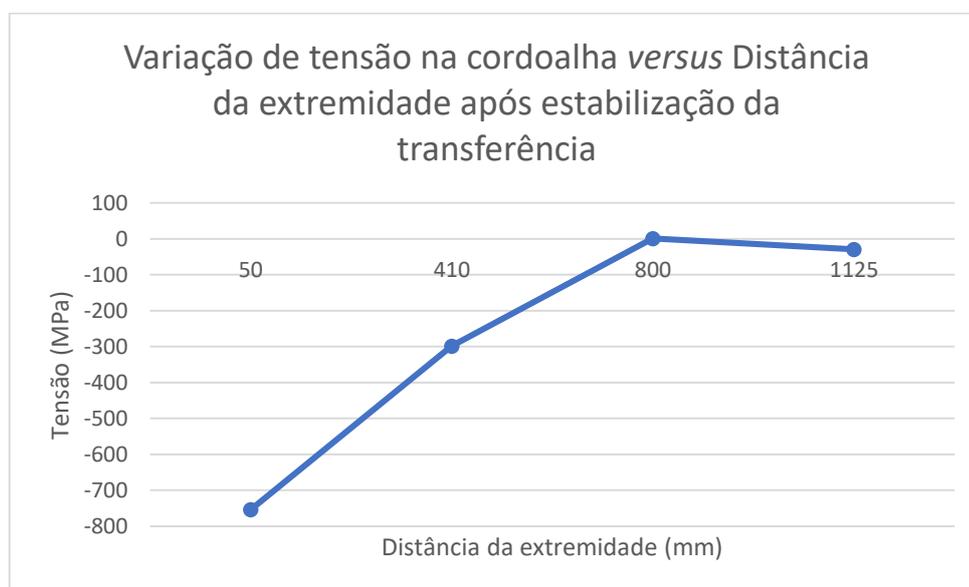


Figura 73 – Gráfico Variação de tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência

A Figura 74 e a Figura 75 trazem os gráficos de deformação e tensão no concreto após a estabilização da transferência.

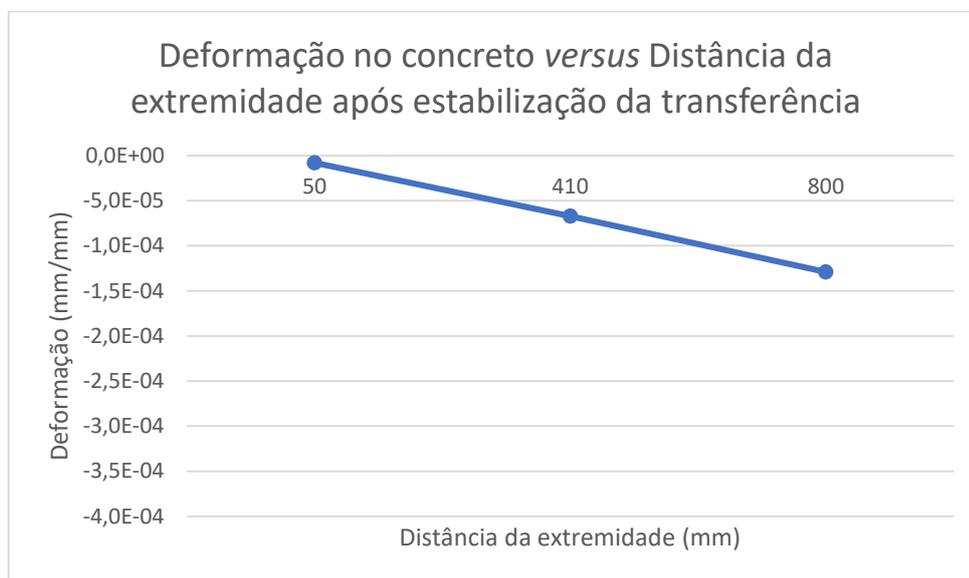


Figura 74 – Gráfico Deformação no concreto versus Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência

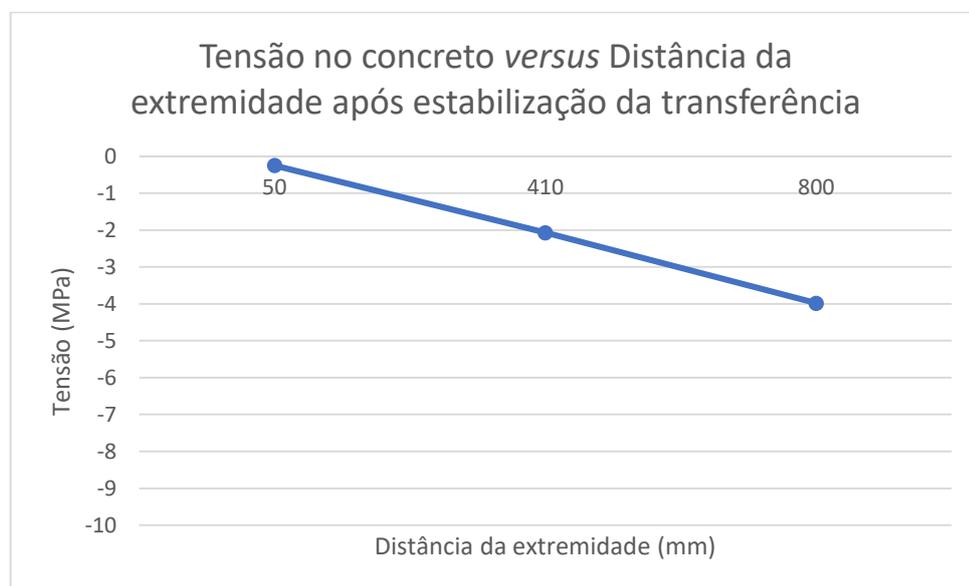


Figura 75 – Gráfico Tensão no concreto versus Distância da extremidade para a viga da Amostra 3 após estabilização da transferência

A Figura 76 a seguir apresenta as curvas para tensão na cordoalha e no concreto após a estabilização da transferência.

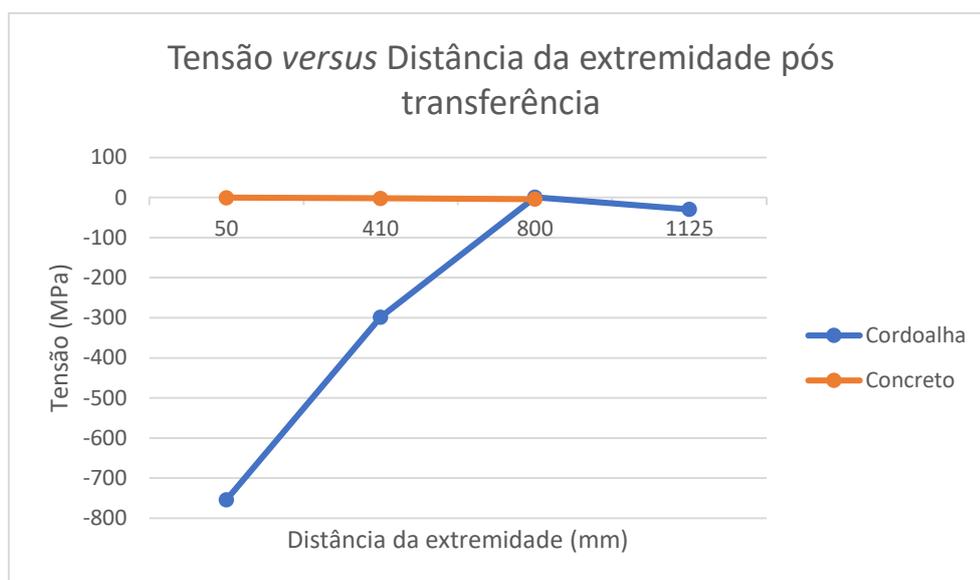


Figura 76 – Gráfico comparativo Tensão *versus* Distância da extremidade após estabilização da transferência para Amostra 3

As leituras de deformação com as respectivas tensões após a estabilização da transferência, com os sinais conforme leitura original, são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Leitura da instrumentação da Amostra 3 após transferência

Extensômetro		Distância da extremidade (mm)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
Variação na Cordoalha	ST01	50	-3,87E-04	-754,07
	ST02	410	-1,53E-04	-298,35
	ST03	800	4,00E-06	0,78
	ST04	1125	-1,51E-04	-29,45
Real no Concreto	ST05	50	-8,00E-06	-0,25
	ST06	410	-6,70E-05	-2,07
	ST07	800	-1,27E-04	-3,98

4.2.4 Análise comparativa dos resultados experimentais

A análise do comprimento de transferência foi realizada a partir da comparação do resultado do Método de 95% da Média das Deformações Máximas com os valores obtidos de tensão ao longo da cordoalha.

4.2.4.1 Tensão ao longo da cordoalha após transferência

Como já explicado anteriormente, entre a execução da protensão da transferência há um intervalo de dias, tornando necessário desligar o equipamento do NATIONAL, que zera as leituras da instrumentação. Dessa forma, as tensões ao longo da cordoalhas nas amostras serão determinadas a partir da última leitura da instrumentação após o encunhamento na fase de protensão considerando ainda uma perda de protensão de 10% no período entre encunhamento e execução da transferência. Os resultados obtidos para cada amostra são apresentados na Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35.

Tabela 33 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 1

Distância da extremidade (mm)		-130	230	925
Extensômetro		ST01	ST02	ST04
Protensão	Deformação (mm/mm)	8,12E-03	7,18E-03	7,92E-03
	Tensão (MPa)	1583,99	1400,69	1543,82
Transferência (variação)	Deformação (mm/mm)	*	1,07E-01	-2,99E-03
	Tensão (MPa)	*	20906,50	-583,83
Tensão após Transferência c/ 10% de perdas imediatas (σ_{pi}) (MPa)		*	*	805,60

Tabela 34 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 2

Distância da extremidade(mm)		50	360	700	1025
Extensômetro		ST01	ST02	ST03	ST04
Protensão	Deformação (mm/mm)	4,20E-03	4,65E-03	4,56E-03	4,50E-03
	Tensão (MPa)	819,00	906,56	888,23	878,28
Transferência (variação)	Deformação (mm/mm)	2,39E-04	-3,35E-04	-1,72E-04	-2,86E-04
	Tensão (MPa)	46,61	-65,33	-33,54	-55,77
Tensão após Transferência c/ 10% de perdas imediatas (σ_{pi}) (MPa)		*	750,57	765,86	734,68

Tabela 35 – Determinação da tensão ao longo da cordoalha após a transferência para a Amostra 3

Distância da extremidade (mm)		50	360	700	1025
Extensômetro		ST01	ST02	ST03	ST04
Protensão	Deformação (mm/mm)	5,29E-03	5,77E-03	5,78E-03	5,56E-03
	Tensão (MPa)	1030,97	1124,37	1127,10	1083,62
Transferência (variação)	Deformação (mm/mm)	-3,87E-03	-1,53E-03	4,00E-06	-1,51E-04
	Tensão (MPa)	-754,07	-298,35	0,78	-29,45
Tensão após Transferência c/ 10% de perdas imediatas (σ_{pi}) (MPa)		173,80	713,58	1015,17	945,81

A Amostra 1 apresenta variação de tensão elevada, possivelmente decorrente do fato da cordoalha utilizada ser originalmente engraxada e, embora tenha sido realizada minuciosa limpeza da mesma, a graxa presente entre os fios do entorno e o fio central pode ter influenciado no resultado. Isso pode ser observado também ao comparar as leituras dos extensômetros ST04, localizado no Sistema AMA, para as três amostras.

Para as Amostras 2 e 3, pode-se notar que ambas apresentam o mesmo comportamento, com a tensão aumentando conforme maior a distância da extremidade, o que é esperado. É possível ver também que o extensômetro ST03 apresenta um leve pico, podendo ser algo com o cartão, uma vez que para ambos os ensaios, os extensômetros ST03 utilizaram o mesmo canal, ou um indicativo de patamar de tensão (tensão efetiva).

Os comprimentos de transferência das amostras 2 e 3 serão analisados a partir da comparação dos gráficos obtidos pela deformação do concreto ao longo da viga com os valores de comprimento de transferência calculados com os dados obtidos nos ensaios, compilados nos gráficos da Figura 77 e Figura 78. Já para a Amostra 1, será analisado a partir do gráfico de deformação do concreto, uma vez que não há informações suficientes para plotar o gráfico da tensão na cordoalha após a transferência para comparação.

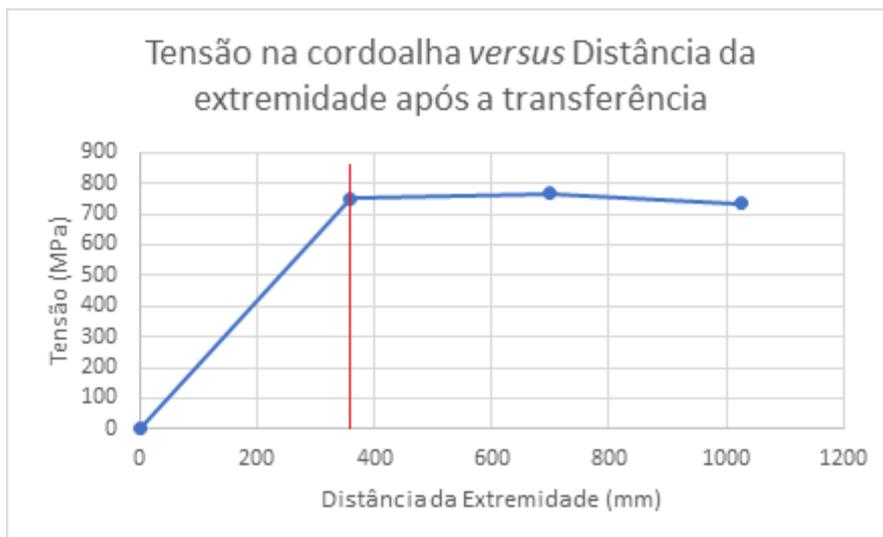


Figura 77 – Gráfico Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade após transferência para Amostra 2

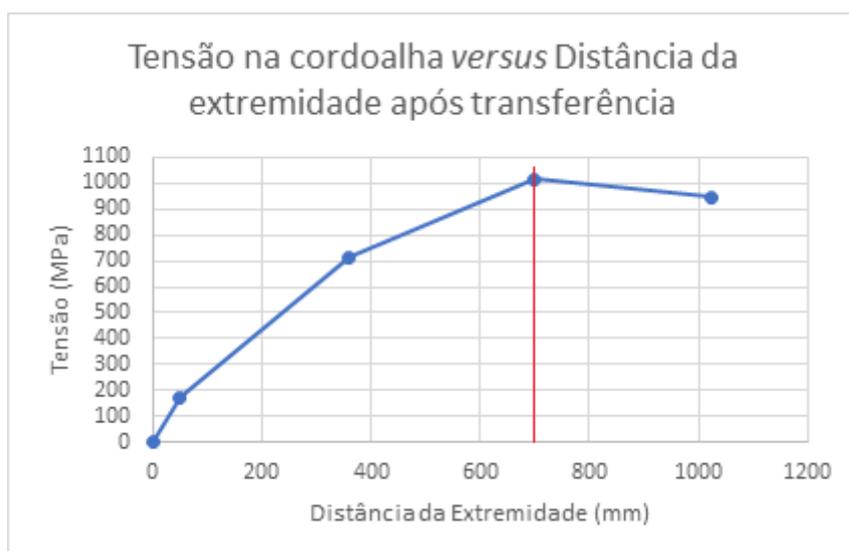


Figura 78 Gráfico – Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade após transferência para Amostra 3

4.2.4.2 Método de 95% da média das deformações máximas

A seguir são apresentados os gráficos de Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade após a estabilização da transferência para cada amostra

(Figura 79, Figura 80 e Figura 81), com sinal das deformações positivo para melhor visualização do comprimento de transferência. A esses gráficos foi acrescentada uma linha horizontal que corta o eixo y (Deformação no concreto) em 95% da média das deformações máximas registradas na amostra, conforme o método sugerido por Russel e Burns (1993), intitulado de “Método de 95% da Média das Deformações Máximas”.

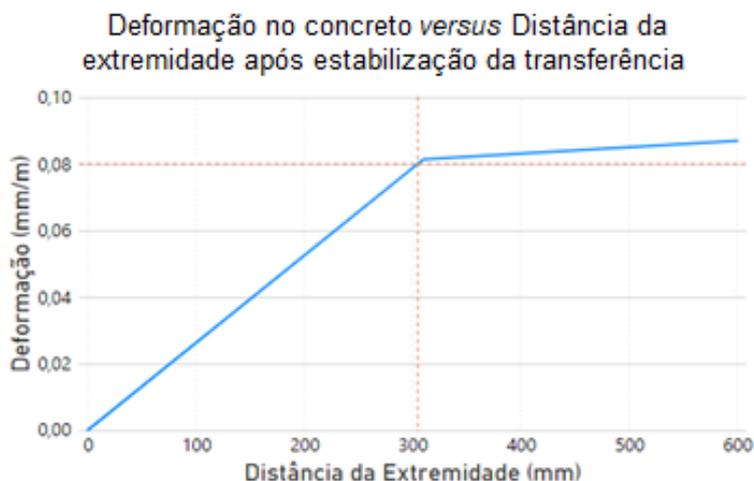


Figura 79 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 1 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas

O gráfico da Figura 79, mostra que a Amostra 1 alcança um patamar, o que significa que teria atingido uma tensão constante no comprimento de 306mm.

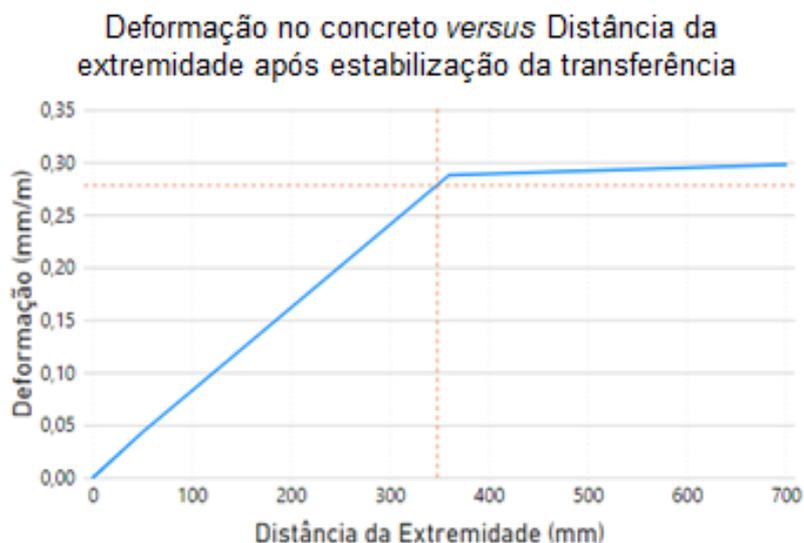


Figura 80 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 2 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas

Os gráficos da Figura 77 e da Figura 80 sugerem que a Amostra 2 atingiu a tensão efetiva e teria valor próximo à faixa de 750 MPa considerando a perda estimada de 10% no intervalo entre encunhamento e transferência. Assim, temos o comprimento de transferência de 348 mm para a Amostra 2.

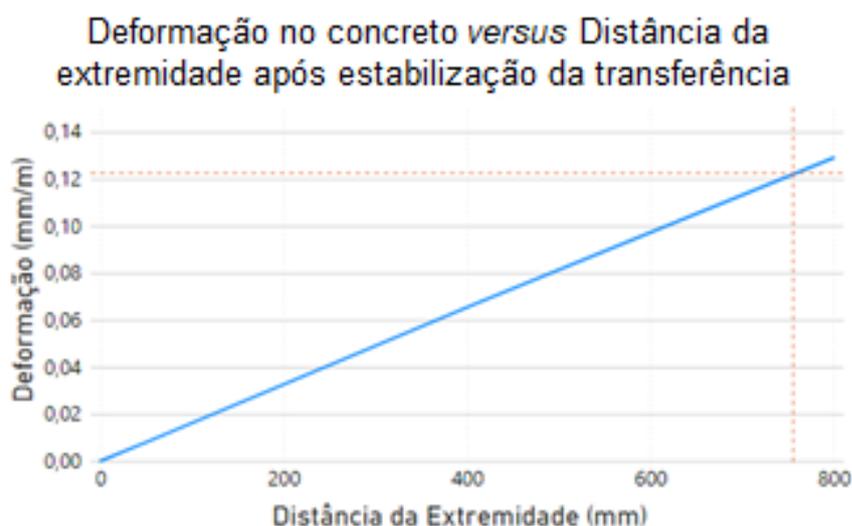


Figura 81 - Determinação do comprimento de transferência para Amostra 3 pelo Método de 95% da Média das Deformações Máximas

A Amostra 3, como se pode ver na Figura 81, não apresenta patamar pela deformação do concreto. Já pelo gráfico da Figura 78, seu comprimento de transferência seria de 700 mm. Como os gráficos não concordam, não é possível afirmar categoricamente o comprimento de transferência. Uma das possibilidades, é que a estabilização da transferência ainda não teria sido alcançada no momento da última leitura do ensaio.

4.2.4.3 Conclusões

Os valores adotados para os parâmetros das fórmulas são os dados coletados ao final da estabilização da transferência, apresentados na Tabela 36. Essa análise foi feita com o intuito de se verificar se os valores convergem ou divergem e em que grau isso acontece.

Tabela 36 – Parâmetros obtidos experimentalmente para cálculo dos comprimentos de transferência das amostras

Amostra	f_{ck} (MPa)	f_{ck} (MPa)	ϕ (mm)	f_{ptk} (MPa)	σ_{pi} (MPa)
1	40,15	40,15	15,2	1900	805,60
2	54,8	45,34	15,2	1900	750,37
3	55,72	44,52	15,2	1900	980,49

Os valores obtidos experimentalmente para comprimento de transferência para as amostras 1, 2 e 3 nos itens 4.2.1 a 4.2.3 são apresentados na Tabela 37, onde esses valores são comparados aos valores de comprimento de transferência calculados a partir das formulações teóricas expostas neste trabalho.

Tabela 37 – Análise comparativa dos valores experimentais de comprimento de transferência com as formulações teóricas

Fonte	Amostra	l_{bpt}	$\frac{l_{bpt,i}}{l_{bpt,NBR}}$	$\frac{l_{bpt,i}}{l_{bpt,exp'}}$
Experimental	1	306	0,54249	1
	2	348	0,71827	1
	3	700	1,09233	1
NBR	1	564,07	1	1,84336
	2	484,50	1	1,39223
	3	640,83	1	0,91547
Eurocode	1	969,72	1,71915	3,16902
	2	951,68	1,96426	2,73471
	3	934,45	1,45819	1,33493
FIB CEB	1	604,36	1,07143	1,97503
	2	519,10	1,07143	1,49168
	3	686,60	1,07143	0,98086
ACI	1	586,64	1,04001	1,91711
	2	546,42	1,1278	1,57016
	3	713,99	1,11416	1,01999
Cousins	1	699,15	1,23947	2,28479
	2	616,84	1,27316	1,77253
	3	805,86	1,25753	1,15123
Oh cs10x10	1	611,85	1,08471	1,99951
	2	567,05	1,1704	1,62947
	3	652,15	1,01767	0,93165
Vargas	1	580,51	1,02914	1,89708
	2	498,62	1,02914	1,43281
	3	659,51	1,02914	0,94215

Onde:

l_{bpt} é o comprimento de transferência, calculado ou obtido experimentalmente;

$l_{bpt,i}$ é o comprimento de transferência da fonte considerada;

$l_{bpt,NBR}$ é o comprimento de transferência calculado pela formulação da ABNT NBR 6118;

$l_{bpt,exp}$ é o valor obtido experimentalmente.

A partir da Tabela 37, pode-se observar que a Amostra 1 foi a amostra que apresentou maior divergência entre o valor obtido experimentalmente e as formulações teóricas. Seria interessante fazer novo ensaio com os mesmos valores de parâmetros porém com cordoalha não engraxada para validação do ensaio realizado neste trabalho, da mesma forma que o ideal é que a instrumentação siga ligada e acompanhando o processo durante todo o período entre as etapas de ensaio.

Já a Amostra 2 apresentou valor experimental de comprimento de transferência menor que os valores calculados, estando seu valor mais próximo do calculado segundo a NBR 6118 (2014). No entanto, para as demais fontes, seu valor é quase metade do calculado.

Para a Amostra 3, houve divergência entre os gráficos da Figura 78 Gráfico – Tensão na cordoalha *versus* Distância da extremidade após transferência para Amostra 3 Figura 78 e Figura 81, onde a Figura 81 não nos fornece um valor de comprimento de transferência. No entanto, pela análise da tensão ao longo da cordoalha na Figura 78, tem-se um valor de comprimento de transferência, que foi adotado para a Tabela 37. Com base nesse valor, a Amostra 3 é a que apresenta valor mais convergente aos propostos pelas normas e autores, sendo o mais próximo o do FIP CEB Model Code (2010).

De modo geral, é necessário fazer novos ensaios para validação dos resultados obtidos.

4.3 Ensaio de Arrancamento

Os ensaios de arrancamento tem como objetivo complementar o ensaio de transferência, de modo a melhor elucidar os fenômenos ocorridos na execução

daqueles. Além disso, a partir deles serão elaborados os gráficos Tensão de aderência *versus* Deslizamento, Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de tensão de aderência e Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de deslizamento da cordoalha. Também será determinado o comprimento de ancoragem das amostras.

A execução do ensaio seguiu o descrito no Capítulo 3, e os modelos das amostras e a configuração do ensaio podem ser vistos na Figura 28,

Figura 29 e Figura 30.

4.3.1 Amostra 1

4.3.1.1 Tensão de aderência

Para o cálculo da tensão de aderência da Amostra 1, foram utilizados os dados da Tabela 38. Para a força de arrancamento registrada foram utilizadas as leituras do extensômetro ST04, localizado no interior do Sistema AMA, pois as leituras das células apresentaram valores inconsistentes.

Tabela 38 – Dados para cálculo da Tensão de aderência da Amostra 1

P (kN)	A_p (mm ²)	ϕ_{eq} (mm)	l_{ef} (mm)
25,25	143,5	13,52	620

Desta forma, temos o gráfico apresentado na Figura 82. Para sua elaboração, foi necessário fazer uma limpeza nos dados lidos, uma vez que esses apresentaram quedas acentuadas devido à instabilidade dos macacos hidráulicos utilizados.

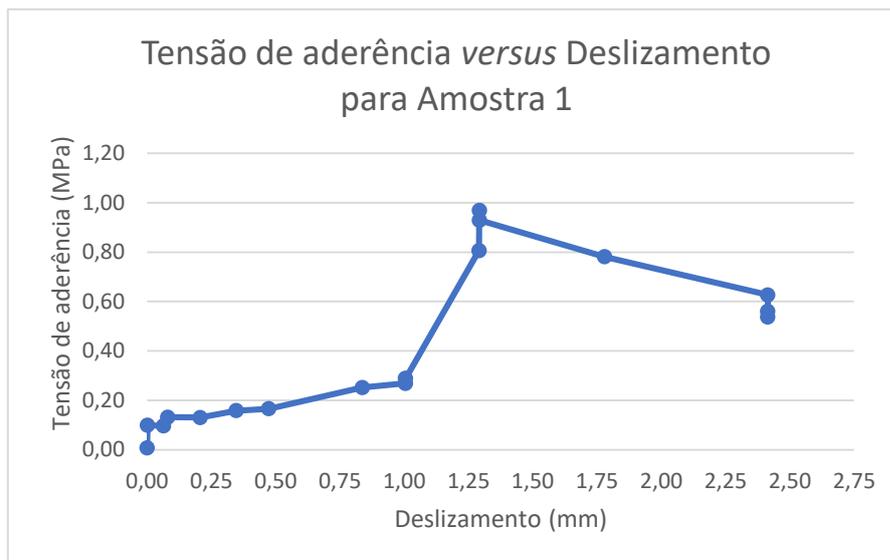


Figura 82 – Gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha para Amostra 1

A partir do cálculo, e como pode ser observado no gráfico da Figura 82, a tensão máxima de aderência para a Amostra 1 foi de 0,969 MPa. O deslizamento de 1mm ocorre a uma tensão de aderência de 0,269 MPa. Devido às leituras feitas durante o ensaio de transferência, esse resultado já era esperado.

Na execução do ensaio de arrancamento, o extensômetro ST05 no concreto não funcionou. Portanto, não foi possível fazer os gráficos Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de tensão de aderência e Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de deslizamento da cordoalha.

Tendo em vista os resultados dos ensaios de transferência e arrancamento, em contrapartida da leitura final de tensão na cordoalha após a protensão, podemos concluir que a amostra apresentou problemas na aderência.

4.3.1.2 Comprimento de ancoragem

Para o cálculo dos comprimentos de ancoragem básico e necessário, foram utilizados para a Amostra 1 os dados experimentais da Tabela 39.

Tabela 39 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 1

ϕ_d (MPa)	f_{ckj} (MPa)	$\sigma_{p\infty}$ (MPa)	f_{pyd} (MPa)	l_{bpt} (mm)
15,2	40,15	805,6	1486,96	306

Os comprimentos de ancoragem básico e necessário, obtidos pelas Equações 33 e 34 e a Tabela 39, são apresentadas na Tabela 40.

Tabela 40 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 1

l_{bp} (mm)	l_{bpd} (mm)
2082,30	1260,16

Como se pode ver pela Tabela 40, a Amostra 1 possui comprimento aderente de 620mm e comprimento total de 740 mm, ambos inferiores aos comprimentos de ancoragem básico e necessário.

4.3.2 Amostra 2

4.3.2.1 Tensão de aderência

Para o cálculo da tensão de aderência da Amostra 2, foram utilizados os dados da Tabela 41. Para a força de arrancamento registrada foram utilizadas as leituras da célula de carga CEL02, localizada na ancoragem da extremidade de *Pull-out*.

O gráfico Tensão de aderência versus Deslizamento da cordoalha para a Amostra 2 é apresentado na Figura 83.

Tabela 41 – Dados para cálculo da Tensão de aderência máxima da Amostra 2

P (kN)	A_p (mm ²)	ϕ_{eq} (mm)	l_{ef} (mm)
99,60	143,5	13,52	720

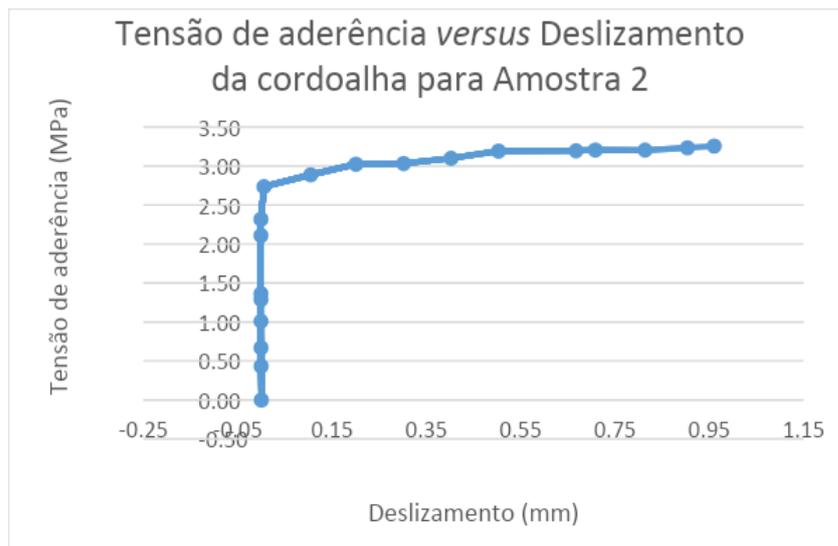


Figura 83 – Gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha para Amostra 2

A partir do cálculo, e como pode ser observado no gráfico da Figura 83, a tensão máxima de aderência para a Amostra 2 foi de 3,26 MPa, quando ocorre o deslizamento de 1mm. Devido a dificuldades de execução, o ensaio foi interrompido.

Na Figura 84 e Figura 85, respectivamente, são apresentados os gráficos Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento para cada faixa de Tensão de aderência e para cada faixa de Deslizamento. Os valores de tensão de aderência encontram-se com sinal invertido pois foram calculados em cima da leitura da célula de carga CEL02, na ancoragem da extremidade de *Pull-out*, que é comprimida à medida que o macaco hidráulico empurra a placa de ancoragem.

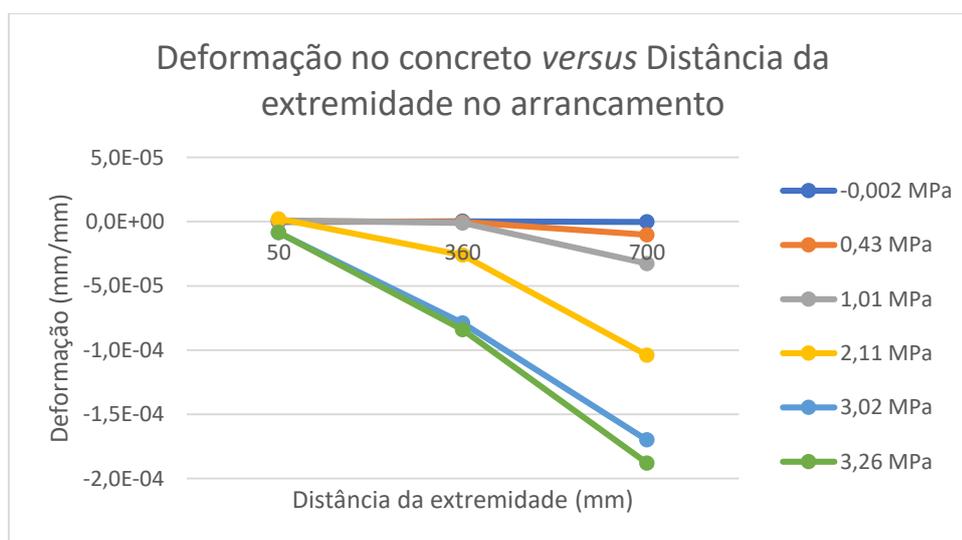


Figura 84 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de tensão de aderência para Amostra 2

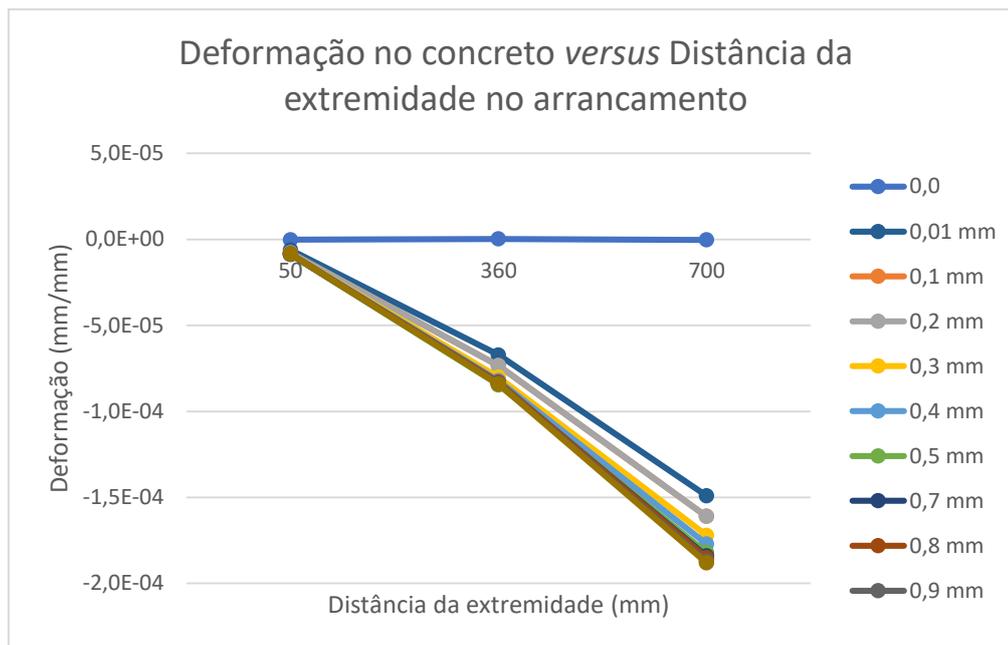


Figura 85 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento por faixa de deslizamento para Amostra 2

4.3.2.2 Comprimento de ancoragem

Para o cálculo dos comprimentos de ancoragem básico e necessário foram utilizados para a Amostra 2 os dados experimentais da Tabela 42.

Tabela 42 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 2

ϕ_d (MPa)	f_{ckj} (MPa)	$\sigma_{p\infty}$ (MPa)	f_{pyd} (MPa)	l_{bpt} (mm)
15,2	50,59	750,37	1486,96	348

Os comprimentos de ancoragem básico e necessário, obtidos pelas Equações 33 e 34 e a **Tabela 42**, são apresentadas na Tabela 43.

Tabela 43 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 2

l_{bp} (mm)	l_{bpd} (mm)
1784,94	1232,20

Como podemos ver pela Tabela 43, a Amostra 2 possui comprimento aderente de 720mm e comprimento total de 840 mm, ambos inferiores aos comprimentos de ancoragem básico e necessário.

4.3.3 Amostra 3

4.3.3.1 Tensão de aderência

Para a Amostra 3, foram realizadas duas tentativas de arrancamento. Na primeira tentativa, realizada aos 7 dias, o LVDT01, responsável por medir a deslizamento da cordoalha em relação ao concreto, apresentou valores inconsistentes.

Para o cálculo da tensão de aderência da Amostra 3, cujos resultados são apresentados na **Tabela 45**, foram utilizados os dados da Tabela 44. Para a força de arrancamento registrada foram utilizadas as leituras do extensômetro ST04, localizado na cordoalha dentro do Sistema AMA.

Tabela 44 – Dados para cálculo da Tensão de aderência da Amostra 3

P (kN)	A_p (mm ²)	ϕ_{eq} (mm)
143,5	13,52	820

Tabela 45 – Resumo da medição da primeira tentativa de arrancamento para a Amostra 3

Força de arrancamento (kN)	Deslizamento (mm)	Tensão de aderência (MPa)
0,06	0,000000	0
15,61	0,028819	-0,45
34,87	0,038430	-1,00
37,41	0,003451	1,07
81,35	0,003771	2,34
104,29	0,003367	3,00
115,04	0,003973	3,30
52,47	0,043851	1,51
77,2	0,003771	2,22

Como pode-se observar na **Tabela 45**, para uma força máxima aplicada de 115kN, cuja tensão de aderência correspondente seria de 3,30 MPa, valor para o qual na Amostra 3 já havia um deslizamento de 1mm, o LVDT faz uma medição de 0,004mm. Desta forma, não foi possível fazer o gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento para essa amostra.

Para melhor entendimento do transcorrido no ensaio, foi elaborado o gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade por faixa de tensão de aderência, apresentado na Figura 86.

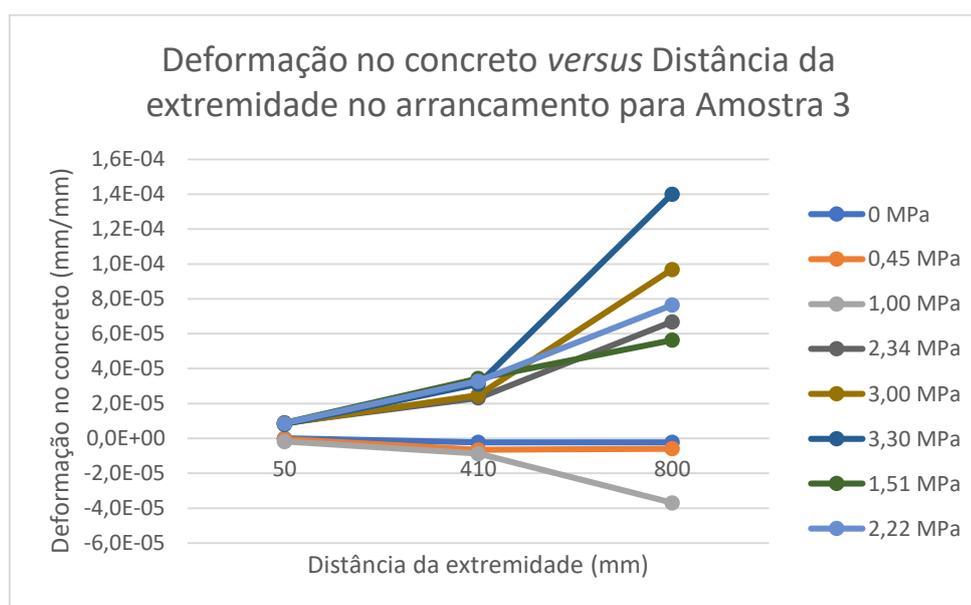


Figura 86 – Gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento para Amostra 3 por faixa de tensão de aderência

Na segunda tentativa, foi decidido fazer o arrancamento sem a cordoalha estar protendida na Extremidade de *Pull-Out*, ou seja, a ancoragem dessa extremidade foi removida, a fim se verificar se haveria diferença no comportamento da viga para aderência. A **Figura 87** apresenta o gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha resultante do ensaio.

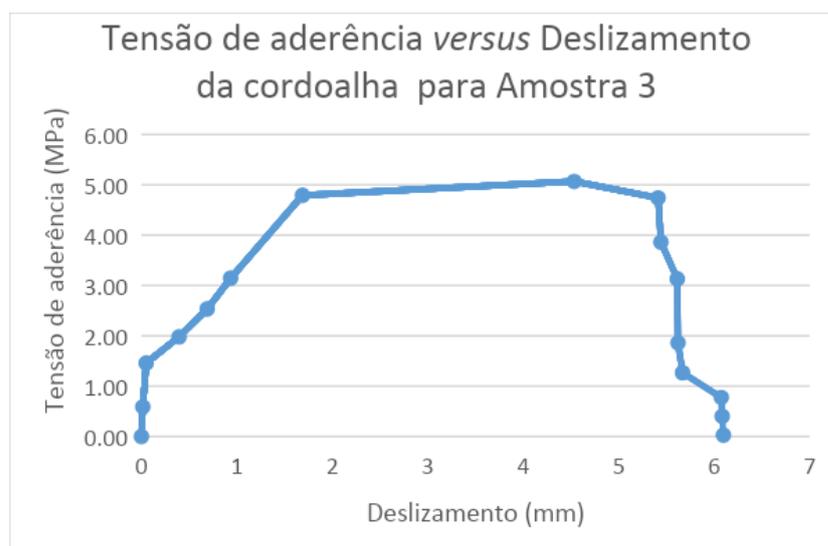


Figura 87 – Gráfico Tensão de aderência *versus* Deslizamento da cordoalha para Amostra 3

A partir do cálculo, e como pode ser observado no gráfico da Figura 87, a tensão máxima de aderência para a Amostra 3 na segunda tentativa foi de 5,07 MPa, quando ocorre o deslizamento de 4,5 mm.

4.3.3.2 Comprimento de ancoragem

Para o cálculo dos comprimentos de ancoragem básico e necessário foram utilizados para a Amostra 3 os dados experimentais da Tabela 46.

Tabela 46 – Dados para cálculo dos comprimentos de ancoragem para Amostra 3

ϕ_d (MPa)	f_{ck7} (MPa)	f_{ck28} (MPa)	$\sigma_{p\infty}$ (MPa)	f_{pyd} (MPa)	l_{bpt} (mm)
15,2	44,52	55,72	980,49	1486,96	700

Os comprimentos de ancoragem básico e necessário, obtidos pelas Equações 33 e 34 e a Tabela 46, são apresentadas na Tabela 47.

Tabela 47 – Comprimento de ancoragem calculado da Amostra 3

Amostra	l_{bp} (mm)	l_{bpd} (mm)
3-1	1943,7	1362,04
3-2	1673,63	1270,05

Como podemos ver pela Tabela 47, a Amostra 3 possui comprimento aderente de 820mm e comprimento total de 940 mm, ambos inferiores aos comprimentos de ancoragem básico e necessário.

4.3.4 Análise comparativa dos resultados experimentais

A Tabela 48 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento das amostras.

Tabela 48 – Dados característicos do comportamento aderente das amostras

Amostra	f_{cm} (MPa)	Idade (dias)	$\tau_{b,0.1}$ (MPa)	$\tau_{b,1}$ (MPa)	$\tau_{b,max}$ (MPa)	$S_{tb,max}$ (mm)
1	45,70	42	0,132	0,269	0,969	2,41
2	53,72	14	2,89	3,26	3,26	1,00
3 - 1	45,58	7	-	-	3,30	0,004
3 - 2	57,10	70	2,69	3,29	5,07	4,50

Já a Tabela 49 apresenta os valores de comprimento de transferência determinado experimentalmente (l_{bpti}), e o comprimento de ancoragem básico (l_{bp}) e o comprimento de ancoragem necessário (l_{bpd}) calculados a partir dos dados experimentais obtidos.

Tabela 49 – Comprimentos de ancoragem das amostras

Amostra	l_{bp} (mm)	l_{bpt} (mm)	l_{bpd} (mm)
1	2082,30	306	1260,16
2	1784,94	348	1232,20
3	1943,70	700	1362,04
3	1673,63	700	1270,05

A comparação entre os resultados apresentados nos itens 4.3.1 a 4.3.3 sugere que a Amostra 1 pode ter tido problema na aderência. Isso se deve, provavelmente, ao fato da cordoalha ser originalmente engraxada e, embora tenha disso limpa, a quebra de um de seus fios pode ter contribuído para essa influência.

Já a Amostra 2, apresentou comportamento característico, com suas curvas do gráfico Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade no arrancamento, apresentado na Figura 84 muito semelhante às curvas do mesmo gráfico para o segundo ensaio de arrancamento da Amostra 3, da Figura 86.

Quanto a Amostra 3, pelo gráfico da Figura 86, pode-se perceber um comportamento coerente até a tensão de aderência da 1 MPa. Ainda, se considerarmos o gráfico da Figura 87, referente à segunda tentativa de arrancamento, nota-se que o mesmo apresenta curva com formato muito semelhante ao da Amostra 2, e registra tensão máxima de aderência ainda maior que o da segunda amostra.

Além disso, o valor maior de tensão de aderência para a Amostra 3 pode se dar devido à sua força de protensão e f_{ckj} também terem sido superiores e que este ensaio foi realizado sem a protensão na cordoalha dentro do Sistema AMA. Todos esses fatores tem influência sobre este resultado, não sendo possível determinar a sua magnitude sem realização de novos ensaios.

Todas as amostras possuem comprimento aderente inferior ao comprimento de ancoragem necessário, o que pode influenciar na transferência de tensão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo central a investigação teórico-experimental da transferência de protensão e, conseqüentemente, do comprimento de transferência.

A análise teórica abrangeu as formulações propostas pelas normas técnicas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2019) e CEB Model Code (201), e por autores cujas propostas se baseiam em suas pesquisas experimentais.

Essa análise foi realizada comparando-se os parâmetros considerados por cada fonte ou autor, além da verificação do grau de influência atribuído a cada um desses parâmetros.

Baseado na análise teórica, conclui-se que:

- A resistência do concreto à compressão é um importante parâmetro para a determinação do comprimento de transferência e, por tanto, deve ser considerado nas formulações. Outros parâmetros que influenciam no comprimento de transferência são a tensão efetiva na cordoalha após transferência, o diâmetro da cordoalha e o cobrimento de concreto.
- A resistência do concreto à compressão, o diâmetro da cordoalha e o cobrimento do concreto são parâmetros cuja relação com o comprimento de transferência é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será o comprimento de transferência.
- A tensão de protensão é o único parâmetro cuja relação com o comprimento de transferência é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior ser valor, maior será o comprimento de transferência.

A análise experimental consistiu no ensaio de transferência e de arrancamento, realizados sucessivamente para cada amostra, conforme o Método ECADA adotado, no total de três amostras.

As amostras apresentavam a mesma seção transversal, e foram projetadas para ter a mesma resistência do concreto, mesma tensão de protensão e mesmo diâmetro de cordoalha, variando somente os comprimentos.

O ensaio de transferência tinha como objetivo a determinação do comprimento de transferência. Essa determinação foi realizada a partir do Método de 95% das deformações máximas no concreto, em comparação para validação com a plotagem em gráfico da tensão de protensão ao longo da cordoalha, após a transferência.

O ensaio de arrancamento teve como objetivo a determinação da tensão de aderência.

Os dados coletados experimentalmente também foram utilizados para o cálculo do comprimento de ancoragem.

A partir da análise experimental, conclui-se:

- A Amostra 1 não apresentou resultado dentro do esperado, possivelmente decorrente do uso de cordoalha originalmente engraxada e do rompimento de um de seus fios.
- A Amostra 2 apresentou coerência de valor de comprimento de transferência pela tensão na cordoalha e pela deformação do concreto, após a transferência. No entanto, esse valor diverge da proposta das formulações. Já o valor de tensão de aderência para essa amostra ficou dentro do esperado.
- A Amostra 3 apresentou divergência na determinação do seu comprimento de transferência, embora um dos resultados obtidos esteja muito próximo ao que propõe as formulações teóricas apresentadas neste trabalho. O valor de tensão de aderência para essa amostra ficou dentro do esperado.
- O método de ensaio proposto por Vargas (2006) e utilizado como base para o presente trabalho, se mostrou um método mais complexo do que o esperado, uma vez que requer ótimo controle de qualidade durante a execução. O controle da tensão de protensão e da resistência do concreto é imprescindível para que o comprimento de transferência seja determinado através da comparação dos resultados das amostras, conforme ele sugere.
- O uso de extensômetros na superfície do concreto na altura da cordoalha, mostrou-se uma excelente opção para verificação do comprimento de transferência. Quanto mais extensômetros forem possíveis de utilizar, maior será a precisão da curva Deformação no concreto *versus* Distância da extremidade para determinação do comprimento de transferência. Também

seu uso foi importante para acompanhamento da execução dos ensaios e como forma de validação e verificação em caso de problemas nas células de carga e LVDTs.

- O extensômetro ST04 (dentro do Sistema AMA) mostrou-se um importante recurso para validação das leituras da célula de carga da Extremidade de *Pull-Out*.
- A instrumentação do pórtico é essencial para controle da execução dos ensaios e verificação da perda de protensão.
- Uma grande dificuldade enfrentada no decorrer do trabalho foi o fato do equipamento NATIONAL zerar as leituras. Isso causa a perda da referência de dados importantes.
- Para os parâmetros adotados nesta pesquisa, Chegou-se aos valores de comprimento de transferência das três amostras, sendo eles: 306 mm para a Amostra 1, 348 mm para a Amostra 2 e 700 mm para a Amostra 3.
- É possível a realização de ensaios com a utilização desse método e a obtenção de resultados para análise.
- Sendo esta conhecidamente a primeira vez que esse método de ensaio é reproduzido, considerando ainda as adequações na configuração e execução do ensaio necessárias devido a disponibilidade de material e infraestrutura do laboratório, é necessária a realização de mais ensaios para aprimoramento e padronização do método.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Extensão do programa experimental de determinação do comprimento de transferência através do Método utilizado neste trabalho variando os parâmetros de resistência à compressão do concreto, tensão de protensão e seção da amostra.

REFERÊNCIAS

- [1] ABRISHAMI. H.H.; MITCHELL, D. *Bond characteristics of pretensioned strand*. ACI Materials Journal, May-June 1993. p. 228-235.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI COMMITTEE 318. *Building Code Requirements For Structural Concrete And Commentary* Farmington Hills, 2019.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estatística e Diagrama Tensão-Deformação*. Rio de Janeiro, 1984.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7810: Agregado em Estado Compactado e Seco – Determinação da Massa Unitária*. Rio de Janeiro, 1983.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9776: Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos Por Meio do Frasco de Chapman*. Rio de Janeiro, 1987.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9937: Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo*. Rio de Janeiro, 1987.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16916: Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação de Massa Específica e Massa Específica Aparente*. Rio de Janeiro, 1996.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – Especificação*. Rio de Janeiro, 2014.

- [13] BASTOS, P.S.S. *Ancoragem e emenda de armaduras*: notas de aula. São Paulo: UNESP, 2018.
- [14] BASTOS, P.S.S. *Fundamentos do concreto protendido*: notas de aula. São Paulo: UNESP, 2018.
- [15] CAETANO, L.F. *Estudo do comportamento da aderência de elementos de concreto armado em condições extremas*. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Porto Alegre: UFRGS, 2008.
- [16] CASTRODALE, R. W.; BURNS, N. H.; KREGER, M. E. *A study of pretensioned high strength concrete girders in composite highway bridges – Laboratory tests*. Texas: University of Texas, 1988.
- [17] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB – FIP Model Code 2010. V1. Bulletin 55, March, 2010.
- [18] COUSINS, T. E. ; BADEUX, M.H. ; MOUSTAFA, S. – *Proposed test for determining bond characteristics of prestressing strand*. PCI Journal, January-February, 1992.
- [19] COUSINS, T. E. ; JOHNSTON, D. W. ; ZIA, P. (1990a) *Transfer length of epoxy-coated prestressing strand*. ACI Materials Journal, V. 87, n. 3, May-June 1990.
- [20] COUSINS, T. E. ; JOHNSTON, D. W. ; ZIA, P. (1990b) *Development length of epoxycoated prestressing strand*. ACI Materials Journal, V. 87, n. 3, May-June 1990.
- [21] COUSINS, T. E. ; JOHNSTON, D. W. ; ZIA, P. (1990c) *Transfer and development length of epoxy coated and uncoated prestressing strand*. PCI Journal, July-August 1990.
- [22] DUMÊT, T. B. *Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- [23] EUROCODE 2: Design of concrete structures, Part 1-1 General Rules and Rules for Building, 2004.
- [24] FILHO, J. C.; BELLA. J.C.D. *Estudo da transferência da força de proteção para o concreto em peças pré-tracionadas*. I Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto em Concreto Pré-Moldado. São Carlos, 2005.
- [25] HANAI, J. B. *Fundamentos do concreto protendido*: notas de aula para o curso de engenharia civil. São Carlos: EESC, 2005.
- [26] JANNEY, J. R. *Nature of bond in pre-tensioned prestressed concrete*. Journal of the ACI, May 1954.

- [27] JUNIOR, H.A.G. *Vigas protendidas: Estudo da norma e modelagem com auxílio de programa de análise comercial*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.
- [28] LEONHARDT, F. *Construções de concreto: concreto protendido*. Trad. por João Luís Escosteguy Merino. v.5. Rio de Janeiro: Interciência, 1983.
- [29] LIN, T. Y.; BURNS, N. H. *Design of prestressed concrete structures*. John Wiley & Sons Inc. 1981.
- [30] MONTEIRO, J. M. A. *Simulação numérica para dimensionamento de peças de concreto protendido submetidas à flexão*. Pernambuco: UFPE, 2016.
- [31] NETO, G. M .P. *Projeto e execução de vigas protendidas com monocordoalhas engraxadas em edificações*. Pernambuco: UFPE, 2016.
- [32] OH, B.H. *et al. Analysis and prediction of transfer length in pretensioned, prestressed concrete members*. ACI Structural Journal. May, 2014.
- [33] PFEIL, Walter. *Concreto Protendido: Processos Construtivos, Perdas de Protensão, Sistemas Estruturais*. 2 V. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- [34] VARGAS, J. R. M. *Estudio experimental de la adherencia de cordones pretesos em hormigones de altas prestaciones iniciales*. Tese (Doutorado) – E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- [35] VARGAS, J. R. M.; CARO, L.A.; SERNA, P. *Experimental technique for measuring the long-term transfer length in prestressed concrete*. Strain , 2013a. p. 125-134.
- [36] VARGAS, J. R. M *et al. Bond of 13mm prestressing steel strands in pretensioned concrete members*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2012.
- [37] VARGAS, J. R. M *et al. Measuring specific parameters in pretensioned concrete members using a single testing technique measurement*. Leeds: University of Leeds, 2014. p. 421-432.
- [38] VARGAS, J. R. M *et al. Teste method for determination of the transmission and anchorage lengths in prestressed reinforcement*. Magazine of concrete research, 58, N°1. February, 2006. p. 21-29.
- [39] VARGAS, J.R.M.; TAENGUE, E.G.; SERNA, P. *Influence of concrete composition on Anchorage bond behavior of prestressed reinforcement*. Construction and building materials, 48.pp. University of Leeds, 2013b. p. 1156-1164.

APÊNDICE A – CÁLCULO DOS COMPRIMENTOS DE TRANSFERÊNCIA SEGUNDO AS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Foram calculados os comprimentos de transferência segundo a NBR 6118 (2014), o CEB Model Code (2010) e o ACI 318 (2019).

Para este trabalho, foram feitas as transformações de unidades baseadas nas seguintes relações:

- 1 mm = 0,039 in;
- 1 MPa = 145,038 Psi.

Na Tabela 49 a seguir estão apresentados os dados gerais para o cálculo dos comprimentos de transferência.

A.1. NBR 6118 (2014)

1º) Calcular a tensão de aderência de cálculo da armadura ativa pela Equação 11:

$$f_{bpd} = \eta_{p1}\eta_{p2}f_{ctd}$$

Onde:

$$\eta_{p1} = 1,2 \text{ (cordoalha de 7 fios)}$$

$$\eta_{p2} = 1,0 \text{ (condição de boa aderência)}$$

Para achar f_{ctd} :

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ckj}^{2/3} = 0,3 \times 36,90^{2/3} = 3,325 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} = 0,7 \times 3,072 = 2,328 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{2,15}{1,4} = 1,66 \text{ MPa}$$

Então:

$$f_{bpd} = 1,2 \times 1,0 \times 1,54 = 2,00 \text{ MPa}$$

2º) Calcular comprimento de ancoragem básico pela Equação 10:

$$l_{bp} = \frac{7}{36} \phi \frac{f_{pyd}}{f_{bpd}}$$

Onde:

$$\phi = 15,2 \text{ mm};$$

$$f_{bpd} = 2,00 \text{ MPa};$$

$$f_{pyd} = \frac{f_{pyk}}{1,15} = \frac{0,9 \times f_{pyk}}{1,15} = \frac{0,9 \times 1900}{1,15} = 1486,96 \text{ MPa}$$

Então:

$$l_{bp} = \frac{7}{36} \times 15,2 \times \frac{1486,96}{1,84} = 2202,90 \text{ mm}$$

3º) Calcular comprimento de transferência pela Equação 9:

$$l_{bpt} = 0,5 l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}}$$

Onde:

$$l_{bp} = 2202,90 \text{ mm};$$

$$f_{pyd} = 1486,96 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{pi} = 140000/143,5 = 975,61 \text{ MPa}$$

Então:

$$l_{bpt} = 0,5 \times 2202,90 \times \frac{975,61}{1486,96} = 722,67 \text{ mm} = 0,72 \text{ m}$$

A.2. CEB Model Code (2010)

1º) Calcular tensão de aderência de cálculo da armadura ativa pela Equação 21:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{cta}$$

Onde:

$$\eta_{p1} = 1,2 \text{ (cordoalha de 7 fios);}$$

$\eta_{p2} = 1,0$ (cordoalhas horizontais até 250 mm da base ou pelo menos 300 mm abaixo do topo da seção de concreto durante a concretagem);

Para achar f_{cta} :

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ckj}^{2/3} = 0,3 \times 36,90^{2/3} = 3,325 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,min} = 0,7f_{ct,m} = 0,7 \times 3,325 = 2,328 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,min}}{\gamma_c} = \frac{2,15}{1,5} = 1,55 \text{ MPa}$$

Então:

$$f_{bpd} = 1,2 \times 1,0 \times 1,55 = 1,86 \text{ MPa}$$

2º) Calcular comprimento de ancoragem básico pela Equação 20:

$$l_{bp} = \frac{7\phi f_{ptd}}{36 f_{bpd}}$$

Onde:

$$\phi = 15,2 \text{ mm};$$

$$f_{bpd} = 1,86 \text{ MPa};$$

$$f_{ptd} = \frac{f_{ptk}}{1,15} = \frac{1900}{1,15} = 1652,17 \text{ MPa}$$

Então:

$$l_{bp} = \frac{7}{36} \times 15,2 \times \frac{1652,17}{1,86} = 2625,31 \text{ mm}$$

3º) O comprimento de transferência é calculado pela Equação 18:

$$l_{bpt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptd}} l_{bp}$$

Onde:

$$\alpha_{p1} = 1,0 \text{ (liberação gradual);}$$

$$\alpha_{p2} = 1,0 \text{ (momento fletor e o cisalhamento são considerados);}$$

$$\alpha_{p3} = 0,5 \text{ (cordoalhas);}$$

$$\sigma_{pi} = 975,61 \text{ MPa};$$

$$f_{ptd} = 1652,17 \text{ MPa};$$

$$l_{bp} = 2625,31 \text{ mm}$$

Então:

$$l_{bpt} = 1,0 \times 1,0 \times 0,5 \times \frac{975,61}{1652,17} \times 2625,31 = 775,13 \text{ mm} = 0,78 \text{ m}$$

A.3. ACI 318 (2019)

O comprimento de transferência é calculado pela Equação 17:

$$l_{tr} = \left(\frac{f_{se}}{3000} \right) d_b$$

Onde:

$$f_{se} = \sigma_{pi} = 975,61 \text{ MPa} = 141500,52 \text{ Psi};$$

$$d_b = \varnothing = 15,2 \text{ mm} = 0,593 \text{ in.}$$

Então:

$$l_{tr} = \left(\frac{141500,52}{3000} \right) \times 0,593 = 27,97 \text{ in} = 0,71 \text{ m}$$

A.4. Eurocode 2 (2014)

1º) Calcular tensão de aderência de cálculo da armadura ativa pela Equação 27:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}$$

Onde:

$$\eta_{p1} = 2,7$$

$$\eta_1 = 1,0$$

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} 0,7 f_{ctm}(t)}{\gamma_c}$$

$$\alpha_{ct} = 1,0;$$

$$\gamma_c = 1,5;$$

$$f_{ctm}(t) = (B_{cc}(t))^\alpha f_{ctm}$$

$\alpha = 1,0$ para $t < 28$ dias

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 36,90^{2/3} = 3,325 \text{ MPa}$$

$$B_{cc}(t) = e^{s[1-(28/t)^{1/2}]} = e^{0,2[1-(28/7)^{1/2}]} = 0,82 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm}(t) = (B_{cc}(t))^\alpha f_{ctm} = 3,325 \times 0,82 = 2,73 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} 0,7 f_{ctm}(t)}{\gamma_c} = \frac{1,0 \times 0,7 \times 2,73}{1,5} = 1,27 \text{ MPa}$$

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd} = 2,7 \times 1,0 \times 1,27 = 3,44 \text{ MPa}$$

2º) Calcular comprimento de transferência pela Equação 26:

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}}$$

Onde:

$$\alpha_1 = 1,0;$$

$$\alpha_2 = 0,19;$$

$$\phi = 15,2 \text{ mm};$$

$$\sigma_{pm0} = 975,61 \text{ MPa};$$

$$f_{bpt} = 3,44 \text{ MPa}$$

$$l_{pt} = 1,0 \times 0,19 \times 15,2 \times \frac{975,61}{3,44} = 819,06 \text{ mm} = 0,82 \text{ m}$$

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A seguir são apresentados resultados em forma de tabelas e gráficos, para os ensaios do concreto. As tabelas foram divididas por concretagem.

Tabela 50 - Ensaio de resistência à compressão do concreto

Nº do CP	Amostra	Idade (dias)	F (Tf)	fc (MPa)	fcm (MPa)	1.1) Avaliação estatística de desempenho do ensaio (Anexo B - NBR 5739:2007)			fck (MPa)
						Ai (MPa)	1.1.1) Desvio padrão (Se)	1.1.2) Coeficiente de variação do ensaio (CVe)(%)	
1	Amostra 1	21	39,23	48,46	46,47	1,99	1,7662259	3,800691583 Muito bom	43,56
2		21	35,81	44,48		1,99			
3		28	39,82	49,50	45,70	3,80	3,3652313	7,363561213 Deficiente	
4		28	33,34	41,91		3,80			
1	Amostra 2	7	37,15	45,72	45,49	0,23	0,0918816	0,201996784 Excelente	45,34
2		7	37,42	45,45		0,04			
3		7	37,27	45,29		0,20			
4		14	41,09	51,58	53,72	2,14	1,8927305	3,523653535 Muito bom	
5		14	45,08	55,85		2,14			
6		28	45,86	56,87	55,63	1,24	0,5027236	0,903745745 Excelente	
7		28	45,01	55,66		0,03			
8		28	44,63	54,35		1,28			
1	Amostra 3	7	35,51	44,05	45,58	1,53	0,6392334	1,402545407 Excelente	44,52
2		7	38,32	47,20		1,62			
3		7	36,89	45,48		0,10			
4		28	45,35	55,86	57,1	1,24	0,8387478	1,468910306 Excelente	
5		28	44,68	56,21		0,89			
6		28	46,08	59,23		2,13			

LEGENDA:
 F: força máxima alcançada
 fc: resistência à compressão, calculada pela fórmula: $fc = (4F) / \pi \times d^2$
 fcm: resistência média à compressão (em MPa)

Tabela 51 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 1 (ABNT NBR 8522:2017)

Relatório de Ensaio de módulo de elasticidade			
Identificação do corpo de prova		1	
Resistência média (Fc med 28 d) (MPa)		45,70	45,70
Ø1 do Corpo de Prova (mm)		100,11	100,11
Ø2 do Corpo de Prova (mm)		100,13	100,13
Ø3 do Corpo de Prova (mm)		101,15	101,15
Ømed do Corpo de Prova (mm)		100,46	100,46
Área da face do CP (mm ²)		7926,93	7926,93
Fc% eficiente (MPa)	1,2	54,84	54,84
	0,8	36,56	36,56
Velocidade de aplicação (Tf/s)	0,4 5	0,364	0,364
	0,1 5	0,121	0,121
Tensão σ A (MPa)		0,5	0,5
Tensão σ B (MPa)		13,71	13,71
Força para σ A (Tf)		0,404	0,404
Força para σ B (Tf)		11,082	11,082
Deformação em σ A (mm)		0,0000690	0,0000860
Deformação em σ B (mm)		0,0004790	0,0004550
Força max aplicada (Tf)		43,25	43,25
Tensão maxima aplicada (MPa)		53,51	53,51
Módulo de elasticidade (GPa)		32,21951	35,79946
Módulo de elasticidade (GPa)		30,87 GPa	

Tabela 52 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 2 (ABNT NBR 8522:2017)

Relatório de Ensaio de módulo de elasticidade						
Identificação do corpo de prova	1		2		3	
Resistencia média (Fc med 28 d) (MPa)	55,63	55,63	55,63	55,63	55,63	55,63
Ø1 do Corpo de Prova (mm)	100,93	100,93	100,69	100,69	100,84	100,84
Ø2 do Corpo de Prova (mm)	99,82	99,82	101,66	101,66	101,36	101,36
Ø3 do Corpo de Prova (mm)	100,11	100,11	100,93	100,93	100,14	100,14
Ømed do Corpo de Prova (mm)	100,29	100,29	101,09	101,09	100,78	100,78
Área da face do CP (mm ²)	7899,08	7899,08	8026,66	8026,66	7976,98	7976,98
Fc%eficiente (MPa)	1,2	66,756	66,756	66,756	66,756	66,756
	0,8	44,504	44,504	44,504	44,504	44,504
Velocidade de aplicação (Tf/s)	0,45	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362
	0,15	0,121	0,121	0,121	0,121	0,121
Tensão σ A (MPa)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tensão σ B (MPa)	16,689	16,689	16,689	16,689	16,689	16,689
Força para σ A (Tf)	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403
Força para σ B (Tf)	13,443	13,443	13,443	13,443	13,443	13,443
Deformação em σ A (mm)	0,00004	0,00006	0,0001	0,0001	0,00009	0,00012
Deformação em σ B (mm)	0,00058	0,00059	0,0006	0,0006	0,00063	0,00063
Força máxima aplicada (Tf)	50,45	50,45	45,50	45,50	44,20	44,20
Tensão máxima aplicada (MPa)	62,63	62,63	55,59	55,59	54,34	54,34
Módulo de elasticidade (GPa)	30,1139	30,3505	31,669	30,545	30,1079	31,6191
Módulo de elasticidade (GPa)	30,73 GPa					

Tabela 53 - Módulo de deformação secante do concreto da Amostra 3 (ABNT NBR 8522:2017)

Relatório de Ensaio de módulo de elasticidade							
Identificação do corpo de prova	1		2		3		
Resistência média (Fc med 28 d) (MPa)	57,10	57,10	57,10	57,10	57,10	57,10	
Ø1 do Corpo de Prova (mm)	100,34	100,34	98,47	98,47	100,78	100,78	
Ø2 do Corpo de Prova (mm)	100,16	100,16	100,39	100,39	100,71	100,71	
Ø3 do Corpo de Prova (mm)	99,47	99,47	99,80	99,80	100,66	100,66	
Ømed do Corpo de Prova (mm)	99,99	99,99	99,55	99,55	100,72	100,72	
Área da face do CP (mm ²)	7852,41	7852,41	7783,98	7783,98	7966,96	7966,96	
Fc%eficiente (MPa)	1,2	68,52	68,52	68,52	68,52	68,52	
	0,8	45,68	45,68	45,68	45,68	45,68	
Velocidade de aplicação (Tf/s)	0,45	0,360	0,360	0,360	0,360	0,360	
	0,15	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	
Tensão σ A (MPa)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Tensão σ B (MPa)	17,13	17,13	17,13	17,13	17,13	17,13	
Força para σ A (Tf)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	
Força para σ B (Tf)	13,716	13,716	13,716	13,716	13,716	13,716	
Deformação em σ A (mm)	0,000123	0,00008	0,00014	0,00009	0,000030	0,000120	
Deformação em σ B (mm)	0,000728	0,00058	0,00081	0,00057	0,000545	0,000632	
Força max aplicada (Tf)	47,20	47,20	44,05	44,05	44,05	44,05	
Tensão maxima aplicada (MPa)	58,95	58,95	55,50	55,50	54,22	54,22	
Módulo de elasticidade (GPa)	27,4876	33,6136	24,8952	34,4460	32,31372	32,48047	
Módulo de elasticidade (GPa)	30,87 GPa						

APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DOS MACACOS DE PROTENSÃO

Tabela 54 - Identificação dos macacos hidráulicos

Amostra	Ensaio	Macaco Hidráulico
1	Protensão	Verde
	Transferência	-
	Arrancamento	-
2	Protensão	Verde
	Transferência	Verde
	Arrancamento	Verde e Amarelo
3	Protensão	Amarelo
	Transferência	Amarelo
	Arrancamento 1	Verde e Amarelo
	Arrancamento 2	Amarelo

Tabela 55 - Planilha de calibração do Macaco Verde

Manômetro do macaco (kgf/cm²)	Célula de carga (tf)	kN	MPa
25	2,2	21,58	150,35
50	4,25	41,68	290,45
75	6,2	60,80	423,72
100	8,35	81,89	570,65
125	10,8	105,92	738,09
150	12,8	125,53	874,77
175	14,75	144,65	1008,04
200	16,8	164,76	1148,14
225	19	186,33	1298,49
250	21,05	206,44	1438,59
275	23,45	229,97	1602,61
300	25,55	250,57	1746,12
325	27,55	270,18	1882,81
350	29,5	289,31	2016,07
375	31,65	310,39	2163,01
400	34,3	336,38	2344,11

Tabela 56 - Planilha de calibração do Macaco Amarelo

Manômetro do macaco (kgf/cm²)	Célula de carga (tf)	kN	MPa
25	2,3	22,56	157,18
50	3,9	38,25	266,52
75	5,9	57,86	403,20
100	8,4	82,38	574,05
125	10,1	99,05	690,22
150	12,5	122,58	854,24
175	14,2	139,25	970,41
200	16,82	164,95	1149,46
225	19,6	192,21	1339,44
250	21,2	207,90	1448,79
275	23,3	228,49	1592,30
300	26	254,97	1776,81
325	27,5	269,68	1879,32