

IZAN GOMES DE LACERDA

**DIRETRIZES PARA A REUTILIZAÇÃO DE ANCORAGEM ATIVA EM
LAJES DE EDIFICAÇÕES VERTICAIS DE MÚLTIPLO USO E/OU
PISOS INDUSTRIAIS PROTENDIDOS.**

**Projeto de pesquisa apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil do departamento de
Construção Civil do Setor de Tecnologia
da Universidade Federal do Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Mauro Lacerda Santos Filho

CURITIBA 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

TERMO DE APROVAÇÃO

IZAN GOMES DE LACERDA

DIRETRIZES PARA A REUTILIZAÇÃO DE ANCORAGEM ATIVA EM LAJES DE EDIFICAÇÕES VERTICAIS DE MÚLTIPLO USO E/OU PISOS INDUSTRIAIS PROTENDIDOS.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr Mauro Lacerda Santos Filho
Programa de Pós Graduação em Construção Civil - UFPR

Prof. Dr Marcos Antonio Marino
Programa de Pós Graduação em Construção Civil - UFPR

Prof. Dr Mounir Khalil El Debs
Departamento de Engenharia de Estruturas USP - São Carlos

Prof Manfred Theodor Schmid
Ex-Professor do Departamento de Construção Civil da UFPR

Curitiba, 22 de março de 2007.

DEDICATÓRIA

*Às minhas filhas,
Camila e Renata, e à minha netinha Luana.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelo amparo em todos os momentos vividos nesta trajetória, que com sua presença constante deu-me forças para não desistir, permitindo que eu tivesse saúde, disposição e perseverança para não perder de vista meu objetivo.

Aos meus pais José Luiz (in memorian) e Irian, que lutaram muito para permitir que a educação chegasse a seus filhos e pelo ensino dos fundamentos básicos de moral e ética.

Ao incentivo da Ana Helena (in memorian), sem o qual não teria sequer iniciado o desafio deste mestrado.

Às minhas filhas Camila e Renata, e à minha netinha Luana, que conviveram todos estes meses sabendo que às vezes meu tempo seria mais limitado do que o normal e souberam entender minha ausência.

A todos os familiares que me apoiaram em um momento muito difícil desta trajetória e sempre acreditaram na conclusão desta pesquisa.

À Mildred Ballin Hecke, minha atual esposa, que colaborou na estruturação desta dissertação com uma visão crítica do produto final e me incentivou de maneira decisiva na fase experimental.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Construção Civil, setor de Tecnologia, que sempre foram muito prestativos.

Aos colegas da disciplina preliminar do curso, Métodos de Pesquisas, que sempre colaboraram comigo, mesmo sem perceber que o faziam.

Aos colegas e professores das demais disciplinas cursadas no decorrer do mestrado, pelo apoio e ensinamentos.

Pela oportunidade de fazer e ter feito novos amigos.

Especial agradecimento ao professor Aguinaldo dos Santos que proporcionou o conhecimento dos critérios básicos para se fazer uma pesquisa científica.

Ao laboratório LAME-LACTEC e toda sua equipe de profissionais e funcionários, em especial ao Amauri, Luiz Felipe e ao Marcelo, que se dispuseram a trabalhar nesta pesquisa não medindo esforços para que sempre se obtivessem resultados fidedignos, utilizando toda a infra-estrutura necessária do laboratório.

Ao meu amigo e orientador professor Mauro Lacerda, pela paciência nas minhas dúvidas e questionamentos, e principalmente pelo incentivo em um momento crítico de minha continuidade nesta pesquisa.

Ao colega e amigo Jorge Luiz Silka Pereira que colaborou para esta pesquisa dimensionando as lajes que foram objeto de ensaio e trocando muitas idéias sobre o assunto.

À empresa, PROTENDE Sistemas e Métodos de Construções Ltda, pelo apoio técnico e fornecimento de grande parte dos materiais necessários para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como pelo empréstimo dos equipamentos de protensão e injeção.

Às empresas Concrebrás S.A. (empresa do Grupo Itambé) e JACP Produtos Industrializados que forneceram o concreto e os espaçadores de argamassa respectivamente, a título de colaboração com esta pesquisa.

Aos amigos que sempre tiveram uma palavra de incentivo quando mais eu precisava e que não vou nominar para não cometer o erro da omissão.

De uma forma mais genérica agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para que esta pesquisa chegasse ao seu final.

CITAÇÃO

O importante é não parar de questionar, nunca perca uma sagrada curiosidade.

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE GRÁFICO	xvi
LISTA DE FOTOS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
LISTA DE SIGLAS	xxiv
RESUMO	xxvi
ABSTRACT	xxvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 HIPÓTESES.....	3
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	4
1.3.1 Justificativa Tecnológica.....	4
1.3.2 Justificativa Econômica.....	5
1.3.3 Justificativa Social.....	6
1.3.4 Justificativa Ambiental.....	8
1.4 MÉTODO DE PESQUISA.....	11
1.4.1 Descrição do Método.....	11
1.4.2 Delimitação da Pesquisa.....	13
1.4.3 Delimitação do Ambiente.....	14
1.4.4 Variáveis.....	14
1.5 ESTRUTURA DO TEXTO DESTA DISSERTAÇÃO.....	15

CAPÍTULO 2 - CONCRETO PROTENDIDO	17
2 HISTÓRICO DO CONCRETO PROTENDIDO	18
2.1 HISTÓRICO DO CONCRETO PROTENDIDO	18
2.1.1 Conceito de Protensão	18
2.1.2 Concreto Protendido no mundo e no Brasil	20
2.2 SISTEMAS DO CONCRETO PROTENDIDO	24
2.2.1 Protensão com aderência inicial	29
2.2.2 Protensão com aderência posterior	34
2.2.3 Protensão sem aderência posterior	39
2.2.4 Forças de protensão	43
2.3 MATERIAIS COMPONENTES	45
2.3.1 Concreto	45
2.3.2 Aço de Alta Resistência	49
2.3.3 Calda de Cimento	55
2.4 ACESSÓRIOS E EQUIPAMENTOS	59
2.4.1 Acessórios	59
2.4.2 Equipamentos	66
2.5 PERDAS DE PROTENSÃO	70
2.6 REUTILIZAÇÃO DE ANCORAGENS ATIVAS	75
CAPÍTULO 3 - EXPERIMENTO	79
3 EXPERIMENTO	80
3.1 GENERALIDADES	80
3.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	82
3.3 DIMENSIONAMENTO DAS LAJES	83
3.3.1 Introdução	83
3.3.2 Características geométricas	84
3.3.3 Materiais utilizados	84
3.3.4 Força de protensão	85

3.3.5 Verificação do ELU no ato da protensão	85
3.3.6 Cálculo das perdas	87
3.3.7 Cálculo dos alongamentos	88
3.3.8 Dimensionamento das armaduras passivas	89
3.4 CRONOGRAMA DOS ENSAIOS	89
3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	92
3.5.1 Concreto	92
3.5.2 Aços	96
3.5.3 Calda de cimento	97
3.6 EXECUÇÃO DAS LAJES PARA ENSAIOS	100
3.7 EXTENSÔMETROS	110
3.8 PROTENSÃO	115
3.9 INJEÇÃO DA CALDA DE CIMENTO	122
3.10 RETIRADA DAS ANCORAGENS ATIVAS	125
3.11 GERAÇÃO DOS RESULTADOS	127
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	146
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	147
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO	147
4.1.1 Deformação do concreto	153
4.1.2 Deformação do aço CP 190 RB	153
4.1.3 Custos das ancoragens	154
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	156
5 CONCLUSÕES	157
5.1 CONCLUSÕES	157
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	158

REFERÊNCIAS	160
ANEXOS	170

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	PILHA DE LIVROS COM APLICAÇÃO DE UMA FORÇA F	19
FIGURA 2.2	RODA DE CARROÇA	19
FIGURA 2.3	VIGA DE CONCRETO SUJEITA A UMA CARGA DISTRIBUÍDA, COM SURGIMENTO DE FISSURAS	22
FIGURA 2.4	TIPOS OU NÍVEIS DE PROTENSÃO	26
FIGURA 2.5	MODELO ESQUEMÁTICO DE UMA PISTA DE PROTENSÃO	30
FIGURA 2.6	SEÇÕES TÍPICAS DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS	31
FIGURA 2.7	ESQUEMA DE UMA EDIFICAÇÃO VERTICAL COM ELEMENTOS PRÉ- FABRICADOS	33

EIXO “X”	106
FIGURA 3.6 DESENHO ESQUEMÁTICO DO PURGADOR	107
FIGURA 3.7 MODELO GENÉRICO DE UM EXTENSÔMETRO	112
FIGURA 3.8 NOMENCLATURA DE UM EXTENSÔMETRO EXCEL SENSOR.....	113
FIGURA 3.9 ESQUEMA DAS REFERENCIAS DIMENSIONAIS DO CONCRETO	121
FIGURA 3.10 PONTOS DE MEDIÇÕES FÍSICAS	127
FIGURA 3.11 ESQUEMA DAS MARCAÇÕES.....	144
FIGURA 4.1 ESQUEMA DE MEDIDAS DAS CORDOALHAS	147
FIGURA 4.2 HELICÓIDE.....	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1	GERAÇÃO DE RESÍDUOS NAS PRINCIPAIS CIDADES BRASILEIRAS	10
TABELA 1.2	SITUAÇÕES RELEVANTES PARA DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PESQUISA	11
TABELA 2.1	CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	28
TABELA 2.2	EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	29
TABELA 2.3	DIMENSÕES DE BAINHAS UTILIZADAS EM LAJES E/OU PISOS	37
TABELA 2.4	CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO	47
TABELA 2.5	RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA IDADE, EM CONDIÇÕES NORMAIS DE CURA	49
TABELA 2.6	DADOS TÉCNICOS DE CORDOALHAS DE TRÊS E SETE FIOS.....	53
TABELA 2.7	COEFICIENTES DE μ	71
TABELA 3.1	DADOS DA MISTURA E DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO.....	94
TABELA 3.2	DADOS DO AÇO CP 190 RB.....	97
TABELA 3.3	RESULTADOS DAS CALDAS ENSAIADAS.....	99
TABELA 3.4	CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E COBRIMENTO NOMINAL PARA $\Delta c = 10mm$	103
TABELA 3.5	POSICIONAMENTO DOS NICHOS EM RELAÇÃO AO EIXO “X”	105
TABELA 3.6	CONTROLE DE DEFORMAÇÕES DO AÇO.....	120
TABELA 3.7	CONTROLE DIMENSIONAL DO CONCRETO.....	120
TABELA 3.8	DADOS DA EXTENSOMETRIA	124
TABELA 3.9	CORDOALHA C5 L1	128
TABELA 3.10	CORDOALHA C9 L1	128
TABELA 3.11	CORDOALHA C1 L1	129
TABELA 3.12	CORDOALHA C6 L1	129

TABELA 3.13	CORDOALHA C4 L1	130
TABELA 3.14	CORDOALHA C8 L1	130
TABELA 3.15	CORDOALHA C2 L1	131
TABELA 3.16	CORDOALHA C3 L1	131
TABELA 3.17	CORDOALHA C7 L1	132
TABELA 3.18	CORDOALHA C5 L2	132
TABELA 3.19	CORDOALHA C9 L2	133
TABELA 3.20	CORDOALHA C1 L2	133
TABELA 3.21	CORDOALHA C2 L2	134
TABELA 3.22	CORDOALHA C8 L2	134
TABELA 3.23	CORDOALHA C7 L2	135
TABELA 3.24	CORDOALHA C3 L2	135
TABELA 3.25	CORDOALHA C4 L2	136
TABELA 3.26	CORDOALHA C6 L2	136
TABELA 3.27	CORDOALHA C5 L3	137
TABELA 3.28	CORDOALHA C9 L3	137
TABELA 3.29	CORDOALHA C1 L3	138
TABELA 3.30	CORDOALHA C2 L3	138
TABELA 3.31	CORDOALHA C8 L3	139
TABELA 3.32	CORDOALHA C7 L3	139
TABELA 3.33	CORDOALHA C3 L3	140
TABELA 3.34	CORDOALHA C4 L3	140
TABELA 3.35	CORDOALHA C6 L3	141
TABELA 3.36	CORDOALHAS DA L1	141
TABELA 3.37	CORDOALHAS DA L2	142
TABELA 3.38	CORDOALHAS DA L3	142
TABELA 3.39	LEITURAS COM EXTENSÔMETROS EM DIFERENTES ETAPAS	143
TABELA 3.40	MEDIÇÕES DAS CORDOALHAS	144
TABELA 3.41	CONTROLE DIMENSIONAL DAS LAJES L1, L2 E L3	145

TABELA 4.1	COMPRIMENTO EFETIVO DAS CORDOALHAS.....	147
TABELA 4.2	DETERMINAÇÃO DOS DIÂMETROS DOS FIOS DE UMA CORDOALHA.....	151
TABELA 4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO NO FIO CENTRAL DE UMA CORDOALHA.....	152

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1.1	EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO RELATIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO PIB BRASILEIRO	7
GRÁFICO 1.2	POPULAÇÃO OCUPADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL E PARTICIPAÇÃO RELATIVA DO SETOR NA POPULAÇÃO OCUPADA BRASILEIRA	8
GRÁFICO 2.1	CONSUMO DE CORDOALHAS EM EDIFICAÇÕES.....	41
GRÁFICO 2.2	CONSUMO DE CORDOALHAS PARA PÓS-TRAÇÃO COM E SEM ADERÊNCIA POSTERIOR	42
GRÁFICO 2.3	RELAÇÃO TENSÃO X DEFORMAÇÃO AÇO CP	54
GRÁFICO 2.4	DEFORMAÇÕES POR RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO CONCRETO.....	74
GRÁFICO 3.1	GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO AÇO CA	111
GRÁFICO 3.2	REGRESSÃO LINEAR	118
GRÁFICO 3.3	CORDOALHA C5 L1	128
GRÁFICO 3.4	CORDOALHA C9 L1	128
GRÁFICO 3.5	CORDOALHA C1 L1	129
GRÁFICO 3.6	CORDOALHA C6 L1	129
GRÁFICO 3.7	CORDOALHA C4 L1	130
GRÁFICO 3.8	CORDOALHA C8 L1	130
GRÁFICO 3.9	CORDOALHA C2 L1	131
GRÁFICO 3.10	CORDOALHA C3 L1	131
GRÁFICO 3.11	CORDOALHA C7 L1	132
GRÁFICO 3.12	CORDOALHA C5 L2	132
GRÁFICO 3.13	CORDOALHA C9 L2	133
GRÁFICO 3.14	CORDOALHA C1 L2	133
GRÁFICO 3.15	CORDOALHA C2 L2	134
GRÁFICO 3.16	CORDOALHA C8 L2	134
GRÁFICO 3.17	CORDOALHA C7 L2	135
GRÁFICO 3.18	CORDOALHA C3 L2	135

GRÁFICO 3.19	CORDOALHA C4 L2.....	136
GRÁFICO 3.20	CORDOALHA C6 L2.....	136
GRÁFICO 3.21	CORDOALHA C5 L3.....	137
GRÁFICO 3.22	CORDOALHA C9 L3.....	137
GRÁFICO 3.23	CORDOALHA C1 L3.....	138
GRÁFICO 3.24	CORDOALHA C2 L3.....	138
GRÁFICO 3.25	CORDOALHA C8 L3.....	139
GRÁFICO 3.26	CORDOALHA C7 L3.....	139
GRÁFICO 3.27	CORDOALHA C3 L3.....	140
GRÁFICO 3.28	CORDOALHA C4 L3.....	140
GRÁFICO 3.29	CORDOALHA C6 L3.....	141
GRÁFICO 3.30	CORDOALHAS DA L1.....	141
GRÁFICO 3.31	CORDOALHAS DA L2.....	142
GRÁFICO 3.32	CORDOALHAS DA L3.....	142
GRÁFICO 4.1	DEFORMAÇÃO DO FIO CENTRAL DE UMA CORDOALHA.....	152

LISTA DE FOTOS

FOTO 2.1	ADUELAS PRÉ-MOLDADAS DO TABULEIRO DE UMA PONTE NA ÁSIA	20
FOTO 2.2	PISTA DE VIGAS TIPO “I” DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADO	32
FOTO 2.3	ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS	32
FOTO 2.4	ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS	32
FOTO 2.5	ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS	33
FOTO 2.6	BOBINAS DE CORDOALHAS DE SETE FIOS	53
FOTO 2.7	FABRICAÇÃO DE BAINHAS	59
FOTO 2.8	CABOS ENROLADOS PARA UTILIZAÇÃO EM LAJE	60
FOTO 2.9	BAINHAS METÁLICAS E LUVA DE EMENDA	61
FOTO 2.10	CORDOALHAS ENGRAXADAS E NUAS	61
FOTO 2.11	ANCORAGEM MONO-CORDOALHA UTILIZADA NO SISTEMA DE PÓS- TRAÇÃO SEM ADERÊNCIA POSTERIOR	64
FOTO 2.12	ANCORAGEM MONO-CORDOALHA UTILIZADA NO SISTEMA DE PÓS- TRAÇÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR	64
FOTO 2.13	CUNHAS UTILIZADAS NOS SISTEMAS DE PÓS-TRAÇÃO COM E SEM ADERÊNCIA POSTERIOR	65
FOTO 2.14	LIXADEIRA MANUAL	66
FOTO 2.15	MÁQUINA DE DOBRAR CORDOALHA	66
FOTO 2.16	MACACO MONOCORDOALHA	67
FOTO 2.17	MACACO MULTI TENSÃO	67
FOTO 2.18	BOMBA DE ALTA PRESSÃO	68
FOTO 2.19	MISTURADOR DE CALDA DE CIMENTO	68
FOTO 2.20	AGITADOR DE CALDA DE CIMENTO	69
FOTO 2.21	BOMBA INJETORA DE CALDA DE CIMENTO	69
FOTO 3.1	CENTRAL DOSADORA	93
FOTO 3.2	CAMINHÃO BETONEIRA	93
FOTO 3.3	CONTROLE AUTOMATIZADO	93

FOTO 3.4	ENSAIO DE CALDA	98
FOTO 3.5	ENSAIO DE CALDA	98
FOTO 3.6	ENSAIO DE CALDA	98
FOTO 3.7	ENSAIO DE CALDA	99
FOTO 3.8	ENSAIO DE CALDA	99
FOTO 3.9	ENSAIO DE CALDA	99
FOTO 3.10	EXECUÇÃO DAS FORMAS.....	100
FOTO 3.11	EXECUÇÃO DAS FORMAS.....	100
FOTO 3.12	EXECUÇÃO DAS FORMAS.....	101
FOTO 3.13	EXECUÇÃO DAS FORMAS.....	101
FOTO 3.14	DESMOLDANTE.....	101
FOTO 3.15	DESMOLDANTE.....	101
FOTO 3.16	EXTREMIDADE FORMAS	102
FOTO 3.17	EXTREMIDADE FORMAS	102
FOTO 3.18	ARMAÇÃO LAJES.....	102
FOTO 3.19	ARMAÇÃO LAJES.....	102
FOTO 3.20	ARMAÇÃO LAJES.....	103
FOTO 3.21	ARMAÇÃO LAJES.....	103
FOTO 3.22	ESPAÇADORES	104
FOTO 3.23	ESPAÇADORES	104
FOTO 3.24	FORMA DOS NICHOS.....	105
FOTO 3.25	FORMA DOS NICHOS.....	105
FOTO 3.26	COLOCAÇÃO DE PURGADORES	106
FOTO 3.27	COLOCAÇÃO DE PURGADORES	106
FOTO 3.28	SLUMP TEST	108
FOTO 3.29	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	108
FOTO 3.30	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	108
FOTO 3.31	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	109
FOTO 3.32	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	109

FOTO 3.33	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	109
FOTO 3.34	CONCRETAGEM DAS LAJES.....	109
FOTO 3.35	NICHOS DESFORMADOS	109
FOTO 3.36	EXTENSÔMETROS	112
FOTO 3.37	EXTENSÔMETROS	112
FOTO 3.38	COLAGEM DE EXTENSÔMETROS	113
FOTO 3.39	LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS	114
FOTO 3.40	LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS	114
FOTO 3.41	FATOR DE SENSIBILIDADE	114
FOTO 3.42	DISPOSITIVO MECÂNICO.....	117
FOTO 3.43	AFERIÇÃO MANOMÉTRICA.....	117
FOTO 3.44	REFERENCIAIS METÁLICOS.....	121
FOTO 3.45	PONTE DE LIGAÇÃO PARA INJEÇÃO	122
FOTO 3.46	VEDAÇÃO DOS ESPAÇOS VAZIOS COM DUREPOXI.....	123
FOTO 3.47	PROCESSO DE DESATIVAÇÃO.....	126
FOTO 3.48	MARCAÇÃO DAS CORDOALHAS	126
FOTO 4.1	MEDIDA EXPEDITA DO FIO HELICOIDAL.....	149
FOTO 4.2	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FIOS DE UMA CORDOALHA.....	151
FOTO 5.1	ROMPIMENTO DA CORDOALHA C1 L3	158

f_{ckj}	Resistência característica à compressão do concreto a j dias
f_{ctkj}	Resistência característica à tração do concreto a j dias
f_{ck28}	Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias
f_{ctk28}	Resistência característica à tração do concreto aos 28 dias
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração do concreto
$E_{ci(t_0)}$	Módulo de elasticidade do concreto no instante idade $t=0$
$E_{ci(28)}$	Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias
E_p	Módulo de elasticidade do aço de armadura ativa
e	Base do logaritmo Neperiano
μ	Coefficiente de atrito aparente entre cordoalha e bainha
Σ	Somatório
α	Ângulo de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa x , em radianos
k	Coefficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo
h	Espessura da laje de ensaio
b_w	Largura da base da laje de ensaio
ℓ	Comprimento
c	Cobrimento da armadura
A_s	Área da seção transversal da armadura
$A_{s,min}$	Área mínima da seção transversal da armadura
A_c	Área da seção transversal do concreto
γ_p	Coefficiente de ponderação das cargas oriundas da protensão
γ_f	Coefficiente de ponderação das ações
ρ_p	Taxa geométrica da armadura de protensão
ρ_{min}	Taxa de armadura mínima
ϕ	Diâmetro nominal
ε	Deformação
σ	Tensão
E_{pt}	Módulo de elasticidade teórico do aço de armadura ativa
E_{pr}	Módulo de elasticidade real do aço de armadura ativa

A_{st}	Área teórica da seção transversal da armadura
A_{sr}	Área real da seção transversal da armadura
$\Delta\ell_t$	Alongamento teórico do aço de armadura ativa
$\Delta\ell_r$	Alongamento real do aço de armadura ativa
$\Delta\ell$	Alongamento do aço de armadura ativa
P_m	Pressão manométrica
A_{mac}	Seção do êmbolo do macaco hidráulico
E	Módulo de elasticidade ou de Young
L_f	Leitura final no data logger
L_i	Leitura inicial no data logger
f_{dl}	Fator do data logger
f_s	Fator de sensibilidade do extensômetro
V	Volume
D	Diâmetro externo da bainha
d	Diâmetro externo do aço de armadura ativa
π	Constante de valor 3,1415
p	Passo
r	Raio

LISTA DE SIGLAS

EEUU	Estados Unidos da América
CA.....	concreto armado
PIB	Produto Interno Bruto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DO	Diário Oficial da União
CP	concreto protendido
RB.....	relaxação baixa
NBR.....	Norma Brasileira
ASTM.....	American Society for Testing and Materials
FIP	Federation Internationale de la Precontrainte
PTI	Post Tensioning Institute
PNB	Projeto de Norma Brasileira
CEB	Comite Euro Internacional du Beton
ELU	estado limite último
ELS-D.....	estado limite de descompressão
ELS-DP.....	estado limite de descompressão parcial
ELS-F	estado limite de formação de fissuras
ELS-W	estado limite de abertura de fissuras
ABCI.....	Associação Brasileira da Construção Industrializada
RN.....	relaxação normal
ARI	alta resistência inicial
AF	alto forno
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP I.....	cimento portland comum
CP II - F	cimento portland com filer
CP II - E.....	cimento portland com escória de alto forno
UHE	usina hidroelétrica

pH	potencial hidrogeniônico
www	web world wide
LAME.....	Laboratório de Materiais e Estruturas
UFPR	Universidade Federal do Paraná
LACTEC.....	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
INMETRO.....	Instituto Nacional de Metrologia
RBLE.....	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio
ISO.....	International Organization for Standardization
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
CDC.....	central dosadora de concreto
CV.....	cavalo vapor
MCC	materiais componentes do concreto
SANEPAR.....	Companhia de Saneamento do Paraná
CESP.....	Centrais Elétricas de São Paulo

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade avaliar o nível de perda da força de protensão aplicada a uma cordoalha ao se retirar a ancoragem ativa, para reutilização da mesma.

Uma revisão bibliográfica de conotação acadêmica, sobre o concreto protendido desde sua origem, é apresentada para dar embasamento ao experimento desenvolvido. Os sistemas existentes até o momento, largamente difundidos, são os de armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial) e armadura ativa pós-tracionada (protensão com ou sem aderência posterior). As perdas que ocorrem nesses processos, durante e após a aplicação das forças de protensão em um elemento estrutural, foram exaustivamente estudadas e encontram-se devidamente registradas nas bibliografias técnicas inerentes ao assunto.

Para este experimento foi desenvolvido um sistema híbrido que envolve os conceitos da protensão com aderência inicial e posterior, simultaneamente. Foi mensurado o nível de perda da força de protensão (após ter sido efetuada a injeção da calda de cimento no interior da bainha metálica, com a respectiva cura para atingir uma resistência mecânica pré-estabelecida no dimensionamento) ao se aliviar uma carga instalada na armadura ativa.

A concepção desse sistema híbrido permite supor que cada cabo estudado se comporte inicialmente como um elemento de pós-tração, para posteriormente ser considerado como uma pista de pré-tração onde os contrafortes são as suas extremidades. A solução para a compensação das eventuais perdas devido a retirada das ancoragens ativas, assim como as demais perdas já conhecidas, poderá ser feita com o acréscimo de armadura passiva na região apropriada ou com uma majoração no cálculo das forças a serem aplicadas na armadura ativa.

Palavras chave: concreto protendido, protensão, laje protendida, ancoragem ativa, aderência.

ABSTRACT

This paper has the target of evaluate the losses of the prestressed forces applied to a tendon, when an active anchorage is taken off for reusing purposes.

This experiment was developed and based in a bibliographic revision as an academic connotation about the prestressed concrete since its beginning .The existent systems so far, widespread, are the pretensioning system (initial bonded tendon) or postensioning system (bonded or unbonded tendon). The losses witch occur in those processes, during and after the application of the prestressed forces on a structural element, were exhaustively studied and they are duly registered at the technical bibliographies inherent to the subject.

A hybrid system was developed for this experiment, involving the concepts of pretensioning and postensioning bonded system, simultaneously. The value of the loss of the prestressed force was measured (after being accomplished the injection of grout in the interior of the duct, with the respective hardening of the grout pre-established in the project), when the load in the active anchorage is relieved.

The conception of this hybrid system allows the assumption that each studied tendon behaves in the beginning as a pos-tension element, so afterwards to be considered as a track of pre-tension where the abutments are its endings. The solution to compensate the eventual losses due to the retreat of the actives anchorages, as well as all the others losses known, can be done adding non prestressed reinforcement bars on the proper region or with the use of a specification factor over the calculation of the prestressed forces applied to the tendons.

Keywords: prestressed concrete, prestressed, active achorage, bond and unbonded tendon.

1 INTRODUÇÃO

A definição de um sistema estrutural a ser adotado, tanto em edificações verticais de múltiplo uso como em pisos industriais tem diversas alternativas, tais como: estrutura de concreto simples (somente no caso de pisos), de concreto armado, metálica, mista ou estrutura de concreto protendido.

No caso do sistema estrutural ser concebido em concreto armado ou protendido, pode-se dizer que o projeto dessa estrutura, independente de ser em concreto armado ou em concreto protendido, tem essencialmente a mesma base teórica, (AGOSTINI, 1983).

1.1 OBJETIVOS

Para efeitos de estudo considerou-se o sistema estrutural baseado no processo construtivo de concreto protendido para lajes em edificações verticais de múltiplo uso, além do crescente desenvolvimento do parque industrial brasileiro (o que gera a necessidade de uma maior área de pisos nos diversos setores de nossas indústrias).

Esta pesquisa terá como um de seus objetivos principais a avaliação do nível de perda da força de protensão aplicada nas ancoragens ativas no processo de pós-tração com aderência posterior, após a retirada da ancoragem ativa.

O outro objetivo será uma avaliação da diferença de custos entre uma ancoragem ativa incorporada ao elemento estrutural protendido no sistema de pós-tração com aderência posterior e uma ancoragem ativa reutilizável, também denominada ancoragem ativa de longa vida.

1.2 HIPÓTESES

Com o intuito de se comprovar ou não, os objetivos propostos nesta pesquisa, será necessário que se estabeleçam algumas premissas básicas que permitirão nortear a obtenção de alguns parâmetros comparativos:

- a) A perda de tensão observada com a retirada da ancoragem ativa, após a injeção e respectiva cura da calda de cimento, não compromete as forças de protensão previamente estabelecidas no cálculo estrutural a serem incorporadas ao elemento estrutural.

- b) A redução no custo final de uma ancoragem ativa, considerando sua reutilização e comparando ao custo de uma ancoragem ativa incorporada ao elemento estrutural, é significativa para disseminar esse processo.

1.3 JUSTIFICATIVAS

1.3.1 JUSTIFICATIVA TECNOLÓGICA

Esta pesquisa pretende obter os parâmetros efetivos das perdas das forças de protensão aplicadas nas ancoragens ativas, através de estudos experimentais que serão realizados em laboratório, e que permitirão medir a eficiência da distribuição das forças de protensão ao longo da armadura ativa.

O foco principal dos parâmetros a serem avaliados será quanto ao percentual da perda de tensão ao se aliviar a força de protensão aplicada na ancoragem ativa, o que possibilitará ou não a sua retirada para posterior reutilização.

Avaliado o percentual da perda das forças de protensão aplicadas nas ancoragens ativas, decorrente da retirada dessas ancoragens, deverá ser efetuada uma comparação efetiva para verificar a necessidade de se fazer uma compensação da perda dessa força através da utilização de uma armadura passiva complementar constituída por aço comum, tipo CA (concreto armado).

Esse reforço poderá ser executado no perímetro das lajes das edificações verticais de múltiplos usos e/ou pisos industriais, e em outras regiões adjacentes onde o cálculo estrutural determinar.

Pretende-se demonstrar que essas perdas de força não são representativas.

Uma vez devidamente parametrizadas, será possível adotar um coeficiente de correção no método de cálculo a ser utilizado, de forma que haja uma compensação no

procedimento do dimensionamento a ser aplicado, obtendo-se a necessária força de protensão a ser incorporada ao elemento estrutural, levando-se em consideração essa nova perda.

O aspecto tecnológico desta pesquisa é a disseminação do uso de um sistema de protensão com a reutilização de ancoragens ativas.

Outro fator será o de agregar conhecimento científico ao estudo do processo de utilização do concreto protendido, largamente difundido e divulgado através de periódicos como *Cement and Concret Composites*, *Cement and Concrete Research*, *NDT & E. International*, *Structure Engineering* entre outros, e inúmeras dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos de congressos e livros técnicos já publicados.

1.3.2 JUSTIFICATIVA ECONÔMICA

Em função da possibilidade de se industrializar um componente que possa ser utilizado diversas vezes em uma mesma obra (ou em outras), sem que o mesmo seja incorporado ao elemento estrutural, subentende-se que seu custo, sendo diluído em inúmeras utilizações, será conseqüentemente minimizado.

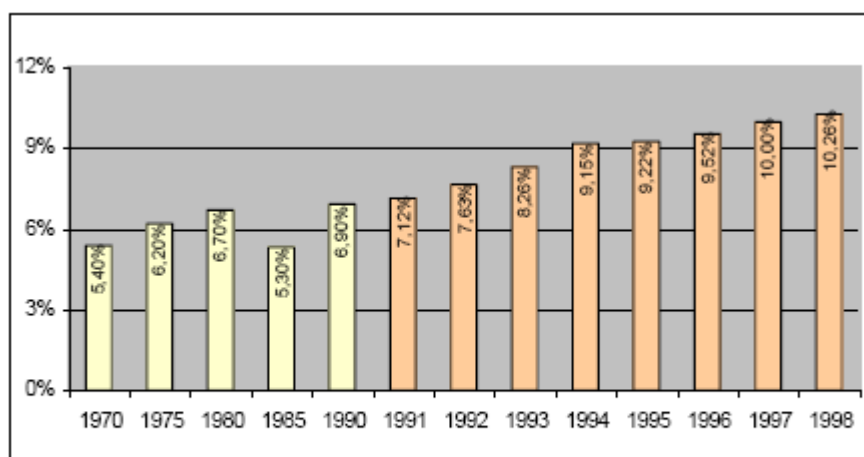
A justificativa econômica ganha uma proporção muito maior quando se avaliam todas as etapas do processo produtivo de uma ancoragem e seus componentes, estando, portanto, na razão direta da minimização dos custos de cada uma das diversas fases envolvidas na cadeia produtiva.

Essa minimização de custos engloba desde a extração do minério, transporte, fundição, manufatura, etc..., envolvendo todos os demais aspectos inerentes a cada uma dessas etapas.

A proposta de se fazer uma avaliação de custos comparativos entre ancoragem ativa incorporada ao elemento estrutural e ancoragem ativa reutilizável possibilitará fundamentar esta pesquisa no seu aspecto econômico, contribuindo com a

validação e disseminação de um novo sistema.

Não apenas a análise direta do custo dos produtos deve ser levada em consideração na avaliação mais criteriosa da comparação econômica, mas também deverão ser contemplados todos os aspectos envolvidos nas



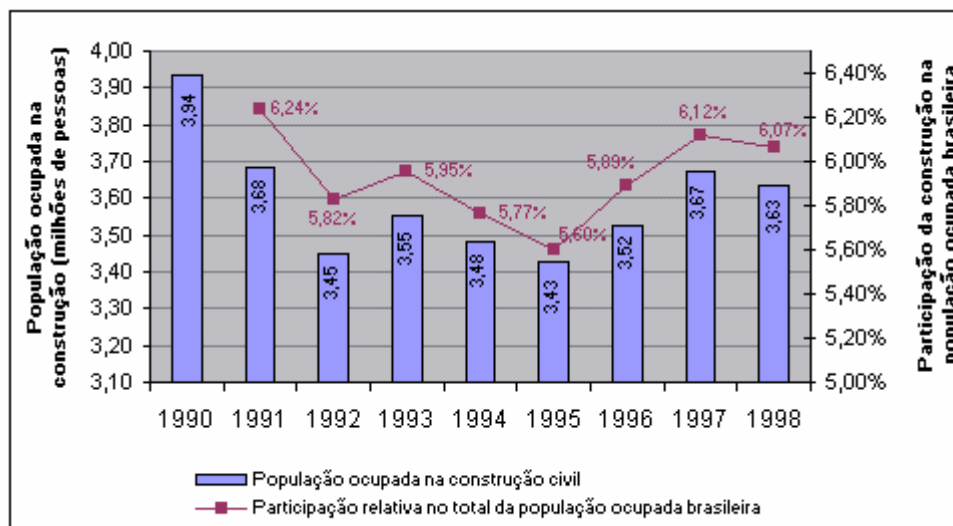
Fontes: 1970 – 1979: Anuário Estatístico do Brasil – (IBGE, 1990)
 1980 – 1990: Anuário Estatístico do Brasil – (IBGE, 1991)
 1991 – 1998: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de Contas Nacionais (IBGE, 2000)

GRÁFICO 1.1: Evolução da participação relativa da construção civil no PIB brasileiro
 FONTE: Projeto Simultâneo da Construção de Edifícios - FABRÍCIO, Marcio M., 2002

Refletindo sua participação no PIB, a construção civil tem um importante papel na geração de empregos e de renda, sendo responsável por pouco mais de seis por cento da população ocupada no país em 1998 (GRÁFICO 1.2).

O setor se destaca como atividade intensiva em mão-de-obra, demandando muitos empregos de baixa qualificação, que atendem às camadas menos instruídas e mais carentes da sociedade.

Além disso, o setor ocupa uma posição estratégica na geração de empregos, uma vez que a criação de um posto de trabalho na construção demanda reduzidos investimentos, quando comparado à criação de emprego nas indústrias mais intensivas em capital.



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de Contas Nacionais (IBGE, 2000)

GRÁFICO 1.2: População ocupada na construção civil e participação relativa do setor na população ocupada brasileira

FONTE: Projeto Simultâneo da Construção de Edifícios - FABRÍCIO, Marcio M., 2002

1.3.4 JUSTIFICATIVA AMBIENTAL

Uma visão ambiental que se pode dar a esta pesquisa, é que devido ao fato de poderem ser reutilizadas as ancoragens ativas, haverá uma conseqüente diminuição no consumo desses produtos, que deixarão de ser incorporados ao elemento estrutural.

A cadeia produtiva completa, que envolve diversos segmentos da economia, para a produção das ancoragens ativas e seus componentes, será minorada em escala nacional, pois as ancoragens ativas e seus componentes terão seu consumo diminuído em função do novo conceito de reutilização, enfoque a ser confirmado por esta pesquisa.

A menor necessidade desses produtos e subprodutos acarretará, mesmo que em pequena escala, uma menor quantidade de extração de minérios.

Haverá uma relação direta na queda do consumo de energia em todas as

fases do processo produtivo, independente da fonte geradora de energia para a produção ser eólica, hidráulica, gás natural, diesel, biodiesel ou outra alternativa, muitas delas oriundas de recursos naturais não renováveis.

Há que se considerar também os sistemas de transportes com os respectivos consumos de seus materiais (pneus, óleo, entre outros) e a diminuição da necessária manutenção dos equipamentos e das vias de tráfego, com conseqüente diminuição dos custos e a possibilidade de aplicação desses recursos em novas vias.

Devido ao fato desse tipo de ancoragem ser fabricada à base de minerais ferrosos (aço e/ou ferro fundido), mesmo ao terem sua vida útil comprometida pelo número de ciclos de reutilizações, sendo necessária a sua substituição, o resíduo das mesmas poderá ser totalmente reciclado.

A definição do modelo estrutural em concreto protendido para lajes em edificações verticais de múltiplo uso, independente do sistema de protensão a ser adotado, por não possuírem vigas intermediárias, proporciona uma melhor racionalização das formas de madeira e conseqüentemente um maior índice de reaproveitamento das mesmas, com menor consumo de madeira/m² de laje concretada.

SCHENINI (2004) esclarece que a construção civil é uma das maiores fontes geradoras de resíduos sólidos de toda a sociedade.

Os valores internacionais para o volume de resíduo sólido gerado pela construção e demolição oscilam entre 0,7 e 1,0 toneladas por habitante/ ano, (JOHN, 1996).

PINTO (1999), apud SCHENINI, estima que nas cidades brasileiras de médio e grande porte, o volume de resíduos gerados varia entre 41% (quarenta e um por cento) a 70% (setenta por cento) do volume total de resíduos sólidos urbanos.

Na TABELA 1.1, apresenta-se uma visão genérica da dimensão do problema em algumas das grandes cidades brasileiras, através de um quadro elaborado por PINTO (1987) apud SCHENINI.

TABELA 1.1: GERAÇÃO DE RESÍDUOS NAS PRINCIPAIS CIDADES BRASILEIRAS

CIDADE GERADORA	GERAÇÃO ESTIMADA (ton/mês)
São Paulo	372.000
Belo Horizonte	102.000
Brasília	85.000
Curitiba	74.000
Porto Alegre	58.000
Fortaleza	50.000
Salvador	44.000
Florianópolis	33.000
Rio de Janeiro	27.000
Recife	18.000

FONTE: SCHENINI P., 2004

Devido à abrangência do impacto que a atividade da construção civil exerce sobre o meio ambiente, sobre a economia e sobre o homem, é necessário que a sociedade em todos os segmentos (governamental, privada e organizações não governamentais), contribua para a constante busca de soluções, visando manter o equilíbrio entre a economia e a sustentabilidade.

Outra importante consideração ambiental é com relação à diminuição da geração de resíduos na construção, por que de acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 307/02, publicada no Diário Oficial da União (DO) em 17/07/2002, que vigora desde janeiro de 2005, a responsabilidade pela destinação dos resíduos gerados pela indústria da construção civil é da empresa geradora, incluindo nessa responsabilidade: o armazenamento, transporte e disposição final dos resíduos.

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

1.4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A definição da estratégia da pesquisa a ser utilizada depende basicamente da avaliação de quatro condições básicas, a saber:

- a) Tipo de formulação do problema proposto.
- b) Controle que o pesquisador tem sobre os eventos comportamentais.
- c) Quanto ao enfoque ser sobre dados históricos ou contemporâneos.
- d) Por ser explanatória em função de muita pesquisa já efetuada sobre o tema.

A TABELA 1.2, abaixo, mostra algumas condicionantes importantes entre cinco estratégias possíveis, (YIN, 94).

TABELA 1.2: SITUAÇÕES RELEVANTES PARA DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PESQUISA

estratégia	forma da questão de pesquisa	exige controle sobre eventos comportamentais?	focaliza acontecimentos contemporâneos?
experimento	como, por que	sim	sim
survey	quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim
análise de arquivos	quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim/não
pesquisa histórica	como, por que	não	não
estudo de caso	como, por que	não	sim

FONTE: COSMOS Corporation - YIN R., 1994

Por se tratar de um estudo explanatório muito focado, com intenso conhecimento científico já publicado em diversos meios acadêmicos, além de uma manipulação direta de algumas variáveis e conhecimento empírico sobre o tema, o método a ser adotado será o experimental.

Segundo FERRARI (1982), o método no qual as variáveis são manipuladas de uma forma pré-estabelecida e cujos efeitos são suficientemente controlados, se denomina método experimental.

Outros métodos de pesquisas como: estudo de caso, survey, análise de arquivos ou pesquisa histórica não se aplicam a este caso por não terem as características básicas necessárias para sua utilização.

A pesquisa experimental tem uma característica fundamental que a difere completamente dos outros métodos de pesquisa, pois para atingir os resultados pretendidos deve-se fazer uso de aparelhos e instrumentos, alguns da mais alta tecnologia atual, ou de procedimentos que tornam perceptíveis as relações entre as variáveis envolvidas no objeto de estudo.

CERVO e BERVIAN (1996) esclarecem que não existe uma correlação direta entre uma pesquisa experimental e uma pesquisa de laboratório, como também uma pesquisa descritiva não significa ser uma pesquisa de campo.

Os termos laboratório e campo representam apenas o contexto do ambiente no qual se realiza tal pesquisa.

Ainda segundo CERVO e BERVIAN (1996) são em pesquisas relacionadas ao contexto de laboratório, onde se realizam mais pesquisas de natureza experimental. Uma pesquisa experimental tem a finalidade de avaliar como, ou por que causas, um determinado fenômeno é produzido.

A pesquisa experimental, segundo FERRARI (1982), pode ser realizada em qualquer lugar desde que apresente características como:

- manipulação - onde pelo menos uma das características dos elementos estudados deve ser manipulada pelo pesquisador,

- controle - o pesquisador deve criar um grupo de controle para ser introduzido na pesquisa,
- distribuição aleatória - que trata da designação dos elementos para participar dos grupos experimentais e de controle.

Já para CHIOZZOTTI (1991) uma pesquisa realizada pelo método experimental consiste em submeter um determinado fato à experimentação. Devendo controlar algumas variáveis para apreciá-lo coerentemente, criando um protocolo de coleta de dados que permita mensurar a constância das ocorrências e suas exceções, admitindo como científicos somente os conhecimentos passíveis de apreensão em condições de controle, validado pela experimentação e comprovado pela coleta de dados.

modelo estrutural de dimensionamento como o processo de protensão de pós-tração com aderência posterior.

O aço para concreto protendido (CP) a ser utilizado será a cordoalha constituída por 7 fios, do tipo CP 190 RB (relaxação baixa), com diâmetro nominal de 12,7 mm e que deverá obedecer à norma NBR-7483/83, categoria 190, que corresponde ao grau ASTM-270.

Não serão consideradas as taxas de armaduras passivas de aço convencional de concreto armado, tipo CA, para a compensação de eventuais perdas de forças de protensão aplicadas na armadura ativa.

1.4.3 DELIMITAÇÃO DO AMBIENTE

Uma pesquisa experimental pode ser realizada tanto em campo quanto em laboratório, mantendo-se o controle sobre as variáveis.

Com relação à validação dos resultados, a pesquisa realizada em campo possibilita uma maior generalização dos resultados obtidos, (ROBSON, 93).

Esta pesquisa será executada como experimento de laboratório, e não de campo, o que permitirá um maior controle sobre as variáveis, (FERRARI, 1982).

A decisão foi tomada levando-se em consideração o tempo necessário para obtenção dos resultados dos experimentos e o valor estimado de investimento, que é menor em laboratório que em campo.

1.4.4 VARIÁVEIS

O método de pesquisa adotado - método experimental - permite a

operacionalização das variáveis, sendo necessário defini-las teoricamente, (GIL, 2002).

KOCHE (1997) apresenta uma classificação de variáveis que é aqui exemplificada com as variáveis deste projeto, evidenciadas entre parêntesis:

- *variável independente*: é aquela que é fator determinante para que ocorra um determinado resultado (ex: força de protensão na armadura ativa).
- *variável dependente*: é o fator que é resultado de algo que foi estimulado (ex: recuo/deformação do aço CP).
- *variável moderadora*: é aquele fator que também é causa para a ocorrência de determinado efeito, porém de menor importância que a variável independente.
- *variável de controle*: é o fator que poderia afetar a variável dependente, mas que é anulado através de sua manipulação deliberada para não interferir na relação entre a variável independente e a variável dependente (ex: resistência, fluidez, exsudação, expansibilidade e pressão de injeção da calda de cimento).
- *variável interveniente*: é aquele fator que teoricamente afeta o fenômeno observado, mas não pode ser mensurado (ex: porosidade da calda de cimento, operador do sistema).

1.5 ESTRUTURA DO TEXTO DESTA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação esta dividida em cinco capítulos.

Capítulo 1 - “Introdução”, onde está apresentada uma breve introdução; uma

explicação dos objetivos; hipóteses; justificativas; método da pesquisa e estrutura da pesquisa.

Capítulo 2 - “Concreto Protendido”, onde está apresentado no histórico do concreto protendido um conceito de protensão e a história do concreto protendido no mundo e no Brasil; sistemas de protensão; materiais componentes; acessórios e equipamentos; perdas de protensão e reutilização de ancoragens ativas.

Capítulo 3 - “Experimento”, onde consta uma descrição da metodologia desenvolvida em laboratório e todas as fases do experimento.

Capítulo 4 - “Resultados”, onde estão apresentados todos os dados coletados em laboratório, das deformações do aço de protensão, do concreto e das eventuais perdas das forças de protensão aplicadas, após a retirada das ancoragens ativas, devidamente parametrizados.

Capítulo 5 - “Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros”, onde está apresentada uma análise dos resultados obtidos e descritos no Capítulo 4, bem como sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade a esta pesquisa.

Referências

Anexos

2 CONCRETO PROTENDIDO

2.1 HISTÓRICO DO CONCRETO PROTENDIDO

2.1.1 CONCEITO DE PROTENSÃO

Para melhor conceituar o que é “*protensão*”, procurou-se no dicionário Aurélio de língua portuguesa, a sua definição, encontrando-se como sendo: um processo pelo qual se aplicam tensões prévias a um concreto.

Entretanto na engenharia costuma se dizer que a protensão é a aplicação ou introdução de um estado prévio de tensões em elementos estruturais.

Os exemplos classicamente utilizados para demonstrar o resultado positivo do uso da protensão na prática, é o carregamento de um ponto a outro (transporte) de uma pilha horizontal de livros ou uma simples roda de carroça.

No primeiro exemplo (mostrado esquematicamente na FIGURA 2.1), para que seja possível carregar (transportar de um ponto a outro) uma pilha horizontal de livros sem que eles caiam ao serem erguidos, é necessário que se exerça sobre os mesmos uma força horizontal de compressão F , capaz de superar o peso próprio, impossibilitando que a pilha se desfaça e que seja possível o seu carregamento (transporte).

Esse processo só é possível se a força horizontal F for aplicada antes de se tentar carregar os livros, havendo, portanto, uma aplicação prévia de tensões na pilha horizontal de livros.

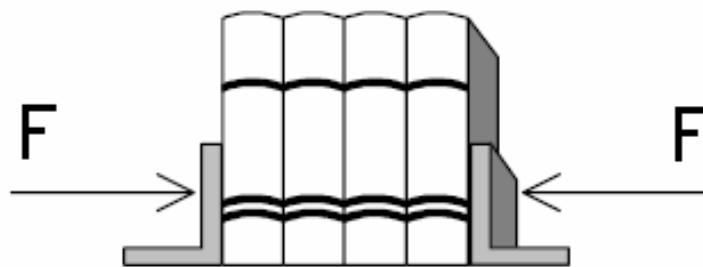


FIGURA 2.1: PILHA DE LIVROS COM APLICAÇÃO DE UMA FORÇA F
FONTE: Concreto Protendido - Fundamentos Básicos - VERÍSSIMO e KLÉOS, 1998

O outro exemplo, o da roda de carroça (FIGURA 2.2), na realidade é uma composição de peças independentes de madeira, somente encaixadas, e revestidas por uma tira de aço aquecido que como consequência, por dilatação, aumenta o seu diâmetro original e que quando resfriado retorna ao diâmetro original.

É dessa maneira que se aplica tensão sobre a roda, efetuando uma protensão sobre a mesma, solidarizando o conjunto.

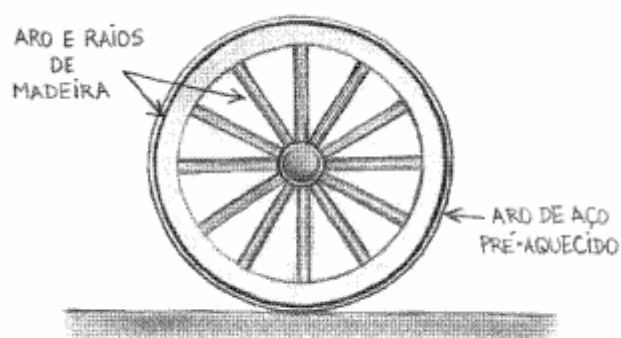


FIGURA 2.2: RODA DE CARROÇA
FONTE: Fundamentos do Concreto Protendido - HANAI J., 2005

Com os exemplos acima fica evidenciado que a protensão também pode ser utilizada para solidarizar partes de uma estrutura em concreto pré-moldado, FOTO 2.1.



FOTO 2.1: ADUELAS PRÉ-MOLDADAS DO TABULEIRO DE UMA PONTE NA ÁSIA
FONTE: VSL International, 2006

Ainda, segundo PFEIL (1984), protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar a sua resistência ou o seu comportamento, sob diversas condições de carga.

2.1.2 CONCRETO PROTENDIDO NO MUNDO E NO BRASIL

Para relatar historicamente o concreto protendido, tem-se que remontar à descoberta do cimento em 1824 (na Ilha de Portland, Inglaterra), quando então franceses e alemães iniciaram inúmeras pesquisas com intuito de melhorar a capacidade mecânica do concreto.

Denomina-se concreto, uma mistura homogênea e devidamente proporcionada, dos seguintes componentes:

- Água
- Cimento
- Agregado graúdo
- Agregado miúdo
- Aditivos

Em 1855, Lambot patenteou um processo de fabricação de embarcações feitas em concreto armado.

Outro francês, Monier, em 1867 já fabricava vasos, tubos e outros elementos em concreto armado.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos nessa mesma época, porém todos fadados ao insucesso devido principalmente aos problemas oriundos da falta de conhecimento da aderência entre armadura e concreto, o que ocasionava perdas ao longo do tempo.

Até o ano de 1877 não se conhecia exatamente o desempenho estrutural do aço no concreto, e foi quando Hyatt através de inúmeros ensaios definiu os efeitos da aderência do aço ao concreto, passando desde então a fazer-se uso de uma armadura apenas na face tracionada do elemento estrutural.

O concreto, conhecidamente, possui uma elevada resistência à compressão e uma baixa resistência à tração, o que propicia o surgimento de fissuras em elementos estruturais sujeitos a ação de cargas, e em geral nem se tem o conhecimento do valor da resistência à tração para suportar cargas, (LEONHARDT, 1983) (FIGURA 2.3).

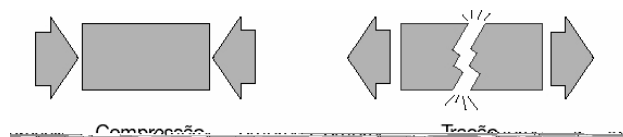


FIGURA 2.3: VIGA DE CONCRETO SUJEITA A UMA CARGA DISTRIBUÍDA, COM SURGIMENTO DE FISSURAS DE TRAÇÃO

FONTE: Manual para a boa execução de estruturas protendidas - CAUDURO, 1998

O concreto protendido propriamente dito teve sua primeira patente solicitada pelo engenheiro P. H. Jackson, em meados de 1872, em um sistema de união de blocos de concreto utilizando um tirante, (ALMEIDA FILHO F. M., 2002).

Nessa ocasião a protensão da armadura ativa se perdia devido a diversos fatores desconhecidos até então, tais como fluência e retração do concreto.

Somente no final da década de 20 do século passado é que o engenheiro Eugène Freyssinet, um grande pesquisador francês que contribuiu para o avanço tecnológico da protensão, desenvolveu métodos para considerar as perdas de protensão utilizando aços especiais de alta resistência.

No Brasil, a primeira utilização do concreto protendido ocorreu em 1948, na ponte do Galeão no Rio de Janeiro, com a utilização do sistema Freyssinet, (VASCONCELOS, 1985).

Nessa ocasião tanto o projeto quanto todos os materiais inerentes ao processo de protensão, assim como todos os equipamentos necessários para aplicação das forças de protensão desse sistema, foram importados da França, (VASCONCELOS, 1985).

No início da década de 50, a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira começou a produzir o aço de alta resistência para o concreto protendido (CP), dividindo inicialmente o mercado de produção de fios com a Indústria de Arames Cleide S.A., que abandonou o mercado em 1980.

No ano de 1950 foi realizada em Paris a primeira conferência sobre concreto protendido, quando surgiu a FIP (Federation Internationale de la Precontrainte).

Na década de 70, houve o desenvolvimento constante de ancoragens de maior capacidade de carga (para cabos compostos por múltiplas cordoalhas), de 200 tf a 600 tf, para a utilização em estruturas de concreto protendido.

No período acima mencionado o mercado demonstrou uma preferência acentuada pelo novo processo de ancorar individualmente as cordoalhas (nas ancoragens múltiplas) através de cunhas metálicas de formato tronco-cônico, (PFEIL, 1983).

A primeira norma sobre o concreto protendido foi publicada na Alemanha em 1953.

Em 1963 foi publicada, e passou a vigorar no Brasil, a norma de Cálculo e Execução de Obras de Concreto Protendido, com o título de “Projeto de Norma”, sob a sigla PNB-116, (VASCONCELOS, 2002).

Somente em 1978 o CEB/FIP (Comité Euro-Internacional du Béton) publicou o Código Modelo para Estruturas de Concreto Armado e Concreto Protendido.

Atualmente a NBR 6118, publicada em 2003, dá as diretrizes para o dimensionamento de estruturas de concreto (concreto armado ou concreto protendido).

Devido ao fato de uma construção em concreto protendido ser considerada como um avanço tecnológico, pode-se incorrer em um erro afirmar que o concreto protendido será sempre uma opção melhor do que a de se construir em concreto armado.

É, portanto conveniente considerar alguns aspectos:

- a tecnologia (conhecimentos, recursos humanos e materiais) para se projetar e construir obras em concreto protendido nem sempre está disponibilizada;

- não são em todas as situações em que a utilização da protensão é mais favorável, como por exemplo, fundações e pilares sujeitos a compressão com pequena excentricidade.

2.2 SISTEMAS DE CONCRETO PROTENDIDO

Antes de se descrever os sistemas existentes, é conveniente definir alguns conceitos básicos com terminologia técnica própria e sob a ótica da Norma Brasileira NBR 6118/2003:

- **Item 3.1.4 - Elementos de concreto protendido:** aqueles nos quais, parte da armadura é previamente alongada por meio de equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU).
- **Item 3.1.5 - Armadura passiva:** qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada.
- **Item 3.1.6 - Armadura ativa (de protensão):** constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial.
- **Item 3.1.7 - Concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial):** concreto protendido em que o pré-

alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto; a ancoragem no concreto realiza-se só por aderência.

- **Item 3.1.8 - Concreto com armadura ativa pós-tracionada (protensão com aderência posterior):** concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizados, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, criando posteriormente aderência com o concreto de modo permanente, através da injeção das bainhas.
- **Item 3.1.9 - Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência (protensão sem aderência):** concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizados, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, mas não sendo criada aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados.

Com as definições acima, a classificação dos sistemas de protensão se diferencia por haver aderência ou não da armadura ativa ao concreto e, em havendo, em que momento esta aderência ocorre.

É oportuno deixar claro uma diferença conceitual entre *sistema de protensão* e *tipo de protensão*.

VERISSIMO G. S e KLEOS M. LENS C. JR (1998), salientam que os *sistemas de protensão* basicamente se reduzem a dois:

- protensão com aderência inicial, e
- protensão com aderência posterior.

O elemento que distingue os *sistemas* é o momento em que se processa a aderência da armadura ativa com o elemento estrutural, em relação à cura do concreto.

Já a designação *sistema* também pode ser uma referência a um processo específico, como por exemplo: sistema Freyssinet, sistema Tensacciai, sistema Diwidag ou sistema VSL, entre tantos outros.

Na FIGURA 2.4 pode-se observar que com relação ao efeito final da protensão sobre o elemento estrutural, e sob a ótica das tensões atuantes, os *tipos, graus ou níveis de protensão* podem ser:

- protensão completa;
- protensão limitada;
- protensão parcial.

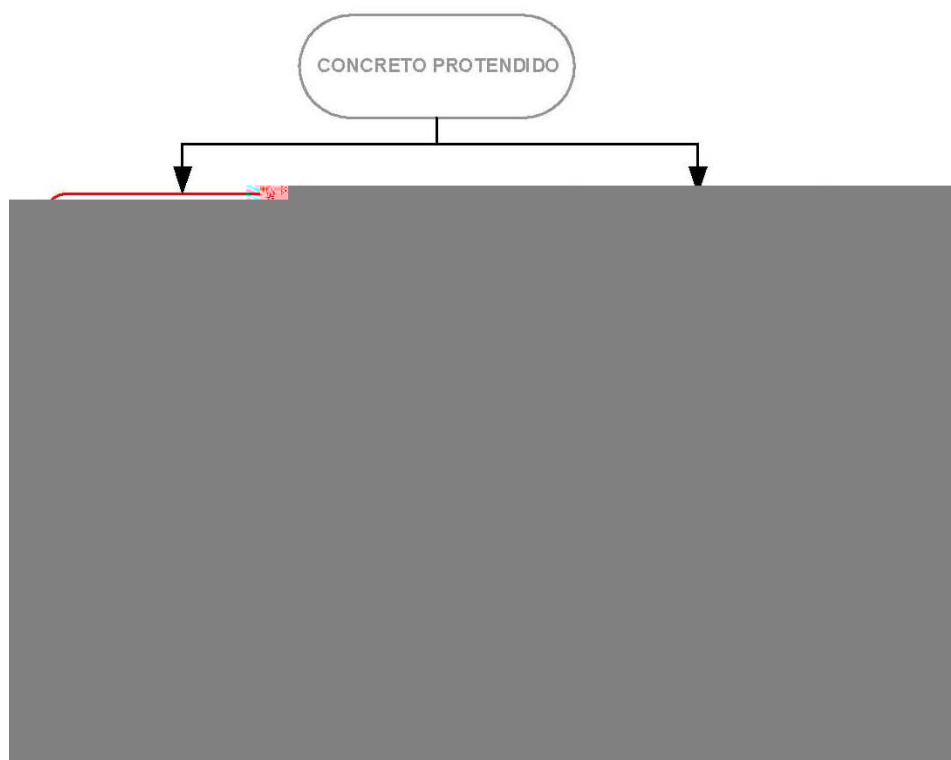


FIGURA 2.4: TIPOS OU NÍVEIS DE PROTENSÃO

A definição dos níveis de protensão preconizados pela NBR 6118, que estão relacionados à classe da agressividade ambiental assumida para a estrutura, às exigências relativas à fissuração e também às combinações de ações de serviço, é:

- Protensão completa (CP nível 3) - nesse caso duas condições devem ser atendidas:
 - a) para as *combinações frequentes* de ações, previstas em projeto, é respeitado o *estado limite de descompressão* (ELS-D) - “estado no qual em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção”.
A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo *estado limite de descompressão parcial* ELS-DP - “estado no qual se garante a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas, devendo esta região se estender a uma distância maior que a_p da face mais próxima da cordoalha ou da bainha de protensão” com $a_p=25$ mm;
 - b) para as *combinações raras* de ações, previstas no projeto, é respeitado o *estado limite de formação de fissuras* (ELS-F) - “estado em que se inicia a formação de fissuras, admitindo-se que esse estado limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a $f_{ct,f}$ ”.
- Protensão limitada (CP nível 2) - nesse caso duas condições devem ser atendidas:
 - a) para as *combinações quase permanentes* de ações, previstas no projeto, é respeitado o *estado limite de descompressão* (ELS-D). A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo *estado limite de descompressão parcial* ELS-DP com $a_p=25$ mm;
 - b) para as *combinações frequentes* de ações, previstas no projeto, é

respeitado o estado *limite de formação de fissuras* (ELS-F).

- Protensão parcial (CP nível 1) - nesse caso somente uma condição é imposta:
 - a) para as *combinações freqüentes* de ações, previstas no projeto, é respeitado o *estado limite de abertura das fissuras* (ELS-W) - “estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados na seção 13 da NBR 6118”, com $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$.

O nível de protensão (força aplicada à peça) deve ser determinado levando-se em conta quais os efeitos devem ser introduzidos no elemento estrutural para o que o mesmo atenda aos requisitos estabelecidos para o seu uso.

As exigências de durabilidade relacionada à fissuração e à proteção da armadura ativa devem ter uma atenção especial.

As TABELAS 2.1 e 2.2, abaixo, mostram respectivamente a classe de agressividade ambiental e as exigências quanto limite de fissuração relacionando-os aos níveis de protensão.

TABELA 2.1: CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

FONTE: ABNT NBR 6118, 2003. Tabela 6.1

TABELA 2.2: EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação freqüente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2	Pré-tração com CAA II ou	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação freqüente

FONTE: ABNT NBR 6118, 2003. Tabela 13.3

2.2.1 PROTENSÃO COM ADERÊNCIA INICIAL

A protensão com aderência inicial é largamente utilizada na fabricação de elementos estruturais pré-fabricados, principalmente executados em pistas de produção em série.

Esse sistema consiste basicamente em se aplicar previamente uma força de protensão (pré-alongamento) ao aço de alta resistência, podendo o aço estar arranjado na forma de fios ou cordoalhas, através de macacos hidráulicos apoiados diretamente em contrafortes ou cabeceiras de protensão (FIGURA 2.5).

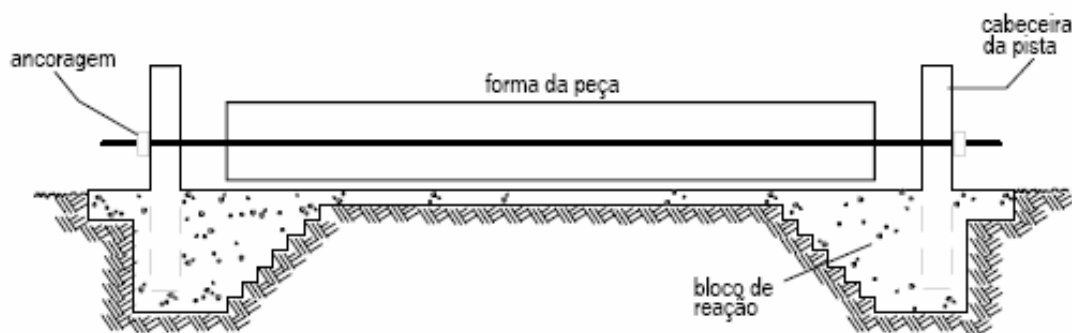


FIGURA 2.5: MODELO ESQUEMÁTICO DE UMA PISTA DE PROTENSÃO
 FONTE: Concreto Protendido - Fundamentos Básicos - VERÍSSIMO e KLÉOS, 1998

Os fios ou cordoalhas permanecem ancorados nas extremidades da pista até que se processe o posterior lançamento do concreto dentro das formas do elemento estrutural, concreto esse que envolve o aço previamente alongado ou tracionado.

Somente após a resistência a compressão do concreto, prevista em projeto, comprovadamente ter sido atingida (através de ensaios laboratoriais), é que se procede ao alívio ou liberação das cargas nos fios ou cordoalhas, quando então as forças de protensão são transferidas ao concreto por aderência da armadura ativa.

O sistema de protensão com aderência inicial teve seu primeiro uso no Brasil no início da década de 50, aproximadamente cinco anos após a primeira utilização do sistema de concreto com armadura ativa pós-tracionada.

Atualmente esse processo é largamente difundido no Brasil por várias empresas especializadas na execução de estruturas pré-fabricadas de concreto, e em sua grande maioria utilizam cordoalhas constituídas por sete fios, de diferentes diâmetros, em pistas de protensão.

Os diversos tipos de elementos estruturais com características lineares, em que uma das dimensões é predominante sobre a outra, além de uma seção transversal pouco variável, permite com que sejam produzidos em pistas de protensão (FIGURA 2.6).

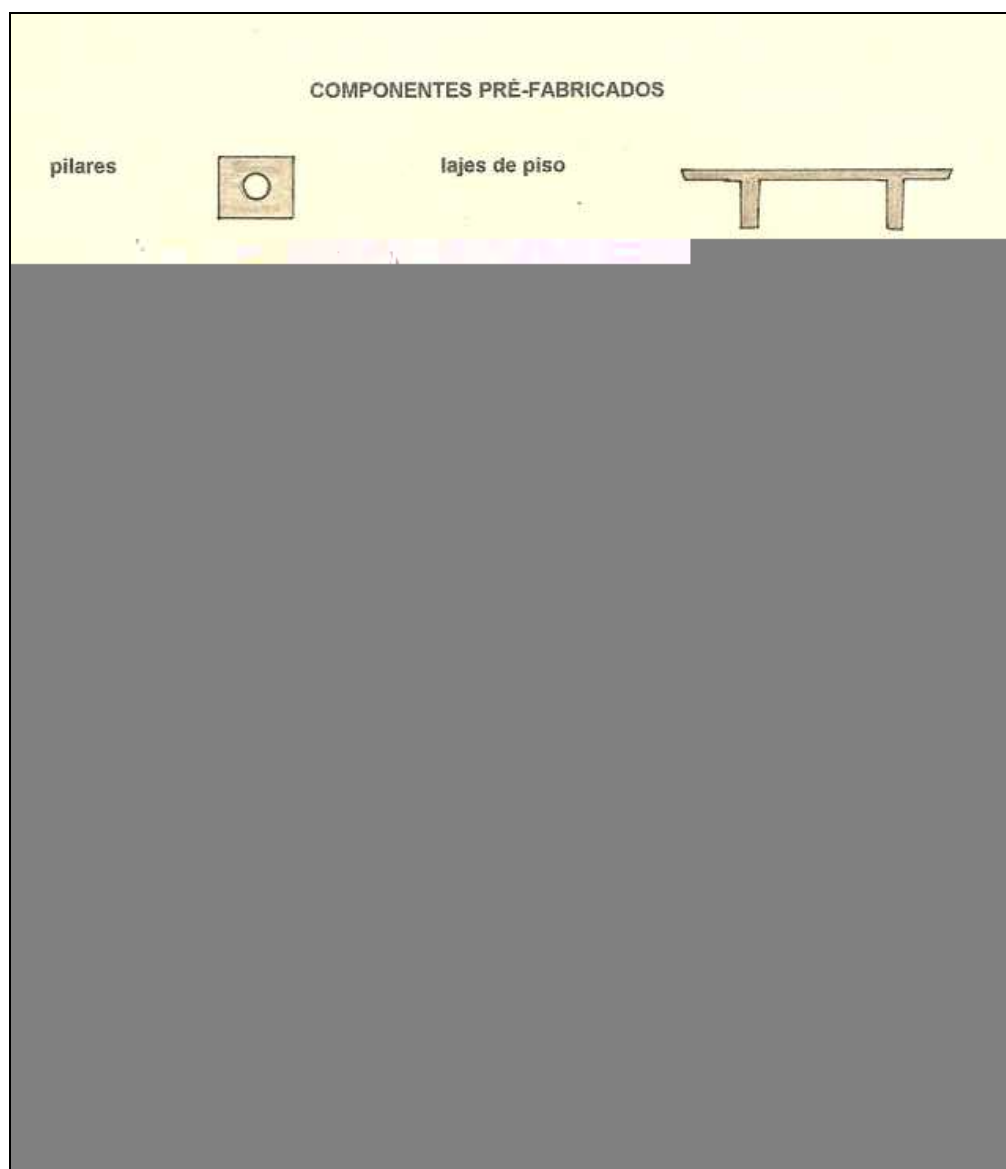


FIGURA 2.6: SEÇÕES TÍPICAS DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Manual Técnico de Pré Fabricados de Concreto - ABCI, 1987

A variação do comprimento das pistas (FOTO 2.2), que pode variar de 60 m a 180 m é função de algumas variáveis, tais como: a capacidade de produção da empresa, dimensões do terreno e tipologia das peças a serem produzidas.



FOTO 2.2: PISTA DE VIGAS TIPO “I” DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADO
FONTE: Weiler C. Holzberger Industrial Ltda, 2006

Alguns exemplos de aplicação de estruturas executadas com peças pré-moldadas pré-tracionadas (FOTOS 2.3, 2.4 e 2.5 e FIGURAS 2.7 e 2.8).



FOTO 2.3: ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Consid, 1994



FOTO 2.4: ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Consid, 1994



FOTO 2.5: ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Consid, 1994

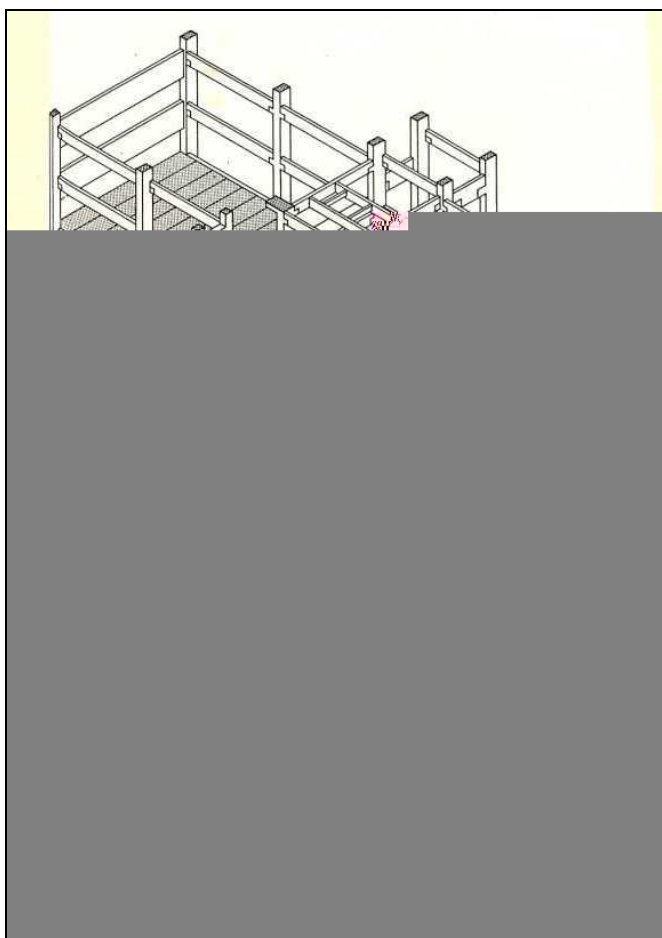


FIGURA 2.7: ESQUEMA DE UMA EDIFICAÇÃO VERTICAL COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Associação Brasileira de Construção Industrializada, 1997

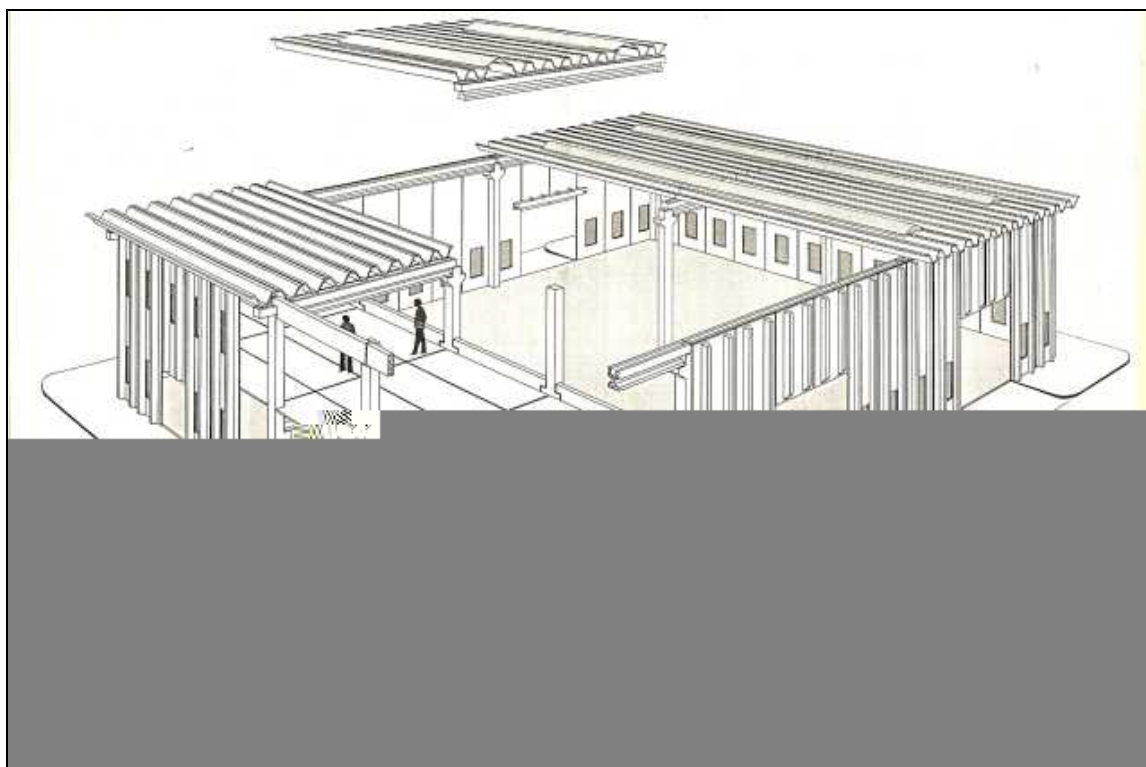


FIGURA 2.8: BARRACÃO INDUSTRIAL COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS
FONTE: Associação Brasileira de Construção Industrializada, 1997

2.2.2 PROTENSÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR

Esse sistema consiste basicamente em primeiro se lançar o concreto nas formas dos elementos estruturais, aguardando a adequada cura do concreto para o ganho de resistência mecânica.

Uma vez devidamente comprovada a compatibilidade da resistência mecânica do concreto, através de ensaios laboratoriais, com aquelas especificadas em projeto, se procede a aplicação das forças de protensão.

Esse sistema é utilizado basicamente em todos os segmentos da construção civil, destacando-se as pontes, barragens, viadutos, grandes reservatórios de água, silos

de armazenamento diverso, contenção de taludes e coberturas de grandes vãos, entre outras.

As forças de protensão são aplicadas diretamente em ancoragens ativas que se apóiam sobre o concreto.

Essas ancoragens são compostas por placa distribuidora de tensão, blocos de ancoragem e cunhas metálicas de formato tronco cônico, e normalmente são dispostas nas extremidades dos elementos estruturais a serem protendidos (FIGURA 2.9).



FIGURA 2.9: VIGA DE CONCRETO SUJEITA A UMA CARGA DISTRIBUÍDA SOB O EFEITO DA PROTENSÃO

FONTE: Manual para a boa execução de estruturas protendidas - CAUDURO, 1998

A tecnologia do sistema de protensão com armadura ativa pós-tracionada aderente pressupõe a utilização de bainhas metálicas, que permitem o deslizamento das cordoalhas em seu interior, ao longo de seu eixo longitudinal e no sentido de seu alongamento, durante o processo de aplicação das forças de protensão (tensionamento do aço) através das ancoragens ativas.

As tensões de tração do aço aplicadas nas ancoragens se transmitem através das placas repartidoras (de apoio) diretamente ao concreto, produzindo as pressões desejadas no elemento estrutural, (LEONHARDT, 1967).

O princípio desse sistema de protensão, devido à recomposição da seção útil

da peça, após a injeção de calda de cimento com equipamentos especiais, supõe que haja uma distribuição das forças de protensão aplicadas inicialmente nas ancoragens ativas, ao longo de toda a extensão do cabo.

As bainhas, normalmente fabricadas com lâminas de aço de pequena espessura, são os dutos pelos quais se introduzem as cordoalhas que formam os cabos, isolando a armadura ativa do contato com o concreto; portanto devem possuir estanqueidade garantida para evitar obstruções indesejadas, decorrentes da penetração de nata do próprio concreto, o que prejudicaria a aplicação das forças de protensão ao elemento estrutural.

O espaço vazio existente entre as bainhas metálicas e as cordoalhas envolvidas pelas mesmas, ao ser preenchido com a injeção de uma calda de cimento, sob pressão, torna as diversas partes em um único corpo, reconstituindo assim a seção original do elemento estrutural: o conjunto de cordoalhas, a bainha e a seção de concreto adjacente.

A aderência mecânica entre os diversos componentes: cordoalha, bainha e seu entorno, recompõe a seção transversal útil da peça, (KUPERMAN, 1986).

No caso de protensão com armadura ativa pós-tracionada e aderência posterior, em lajes de edificações verticais de múltiplo uso (residencial, comercial, shopping center, hospital, garagens, e outros) e/ou em pisos industriais, são utilizados cabos constituídos por um conjunto composto por uma, duas, três ou até quatro cordoalhas envolvidas em uma mesma bainha.

No caso de lajes de edificações verticais e/ou pisos industriais a seção dessas bainhas são normalmente circulares ou oblongas, com dimensões que podem variar de acordo com a capacidade do cabo disposto no elemento estrutural.

Algumas seções das bainhas utilizadas em lajes e/ou pisos às vezes são oblongas devido à altura útil desses elementos estruturais ser bastante reduzida, na ordem de 20 cm e com dimensão mínima especificada pela NBR 6118, por exemplo, em 16 cm para lajes (TABELA 2.3).

TABELA 2.3: DIMENSÕES DE BAINHAS UTILIZADAS EM LAJES E/OU PISOS

Ancoragem	Cordoalha	Dimensões das ancoragens (mm)	Seção das bainhas (mm)
1 Ø	Ø 12,7 mm	100 x 100	Ø 32
	Ø 15,2 mm	115 x 115	Ø 32
2 Ø	Ø 12,7 mm	100 x 130	19 x 36
	Ø 15,2 mm	115 x 160	22 x 32
3 Ø	Ø 12,7 mm	110 x 185	19 x 48
	Ø 15,2 mm	125 x 205	22 x 55
4 Ø	Ø 12,7 mm	110 x 230	19 x 62
	Ø 15,2 mm	125 x 250	22 x 73

FONTE: Manual Técnico da PROTENDE, 2005

As armaduras ativas, além de introduzir os esforços oriundos da aplicação das forças de protensão ao elemento estrutural, podem funcionar como armadura passiva devido à aderência entre essa e o concreto, melhorando muito o comportamento da peça à fissuração.

Esse sistema apresenta algumas vantagens que devem ser aqui destacadas:

- aumento da capacidade das seções do elemento estrutural no estado limite último (ELU);
- melhoria do comportamento do elemento estrutural entre os estágios de fissuração e de ruptura;
- a eventual falha de um cabo tem conseqüências restritas (em caso de incêndio, explosão ou terremoto, por exemplo).

Experimentalmente foi constatado que o comportamento dos cabos aderentes e não aderentes são semelhantes, nos primeiros estágios de carregamento de uma viga protendida, quando a seção do elemento estrutural ainda trabalha totalmente comprimida.

À medida que o carregamento transversal aumenta, o surgimento de fissuras nesse sistema provoca grandes deformações localizadas nas regiões das fissuras aumentando consideravelmente as tensões no aço nesses pontos, comportamento característico das armaduras passivas no concreto armado.

As fissuras surgem em grande quantidade e em pequenas dimensões, limitadas pela armadura ativa (FIGURA 2.10).

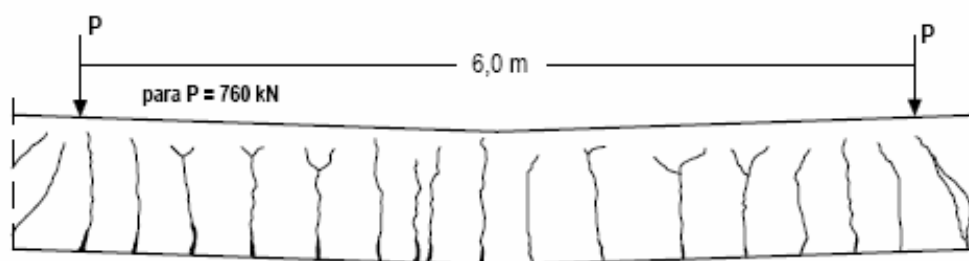


FIGURA 2.10: VIGA DE CONCRETO COM PROTENSÃO ADERENTE, SUJEITA A UM CARREGAMENTO

FONTE: Hormigón Pretensado - LEONHARDT F., 1967

Fissuras com menor abertura tendem a proteger melhor a armadura e melhoram o aspecto estético do elemento estrutural.

Se aumentarmos o carregamento transversal da peça até seu colapso, a armadura ativa contribuirá na eficiência do momento resistente devido aos alongamentos ocorridos nas seções abertas pelas fissuras.

2.2.3 PROTENSÃO SEM ADERÊNCIA POSTERIOR

No sistema de protensão com armadura ativa pós-tracionada não aderente, as forças de protensão são aplicadas nas ancoragens ativas, diretamente apoiadas sobre o concreto.

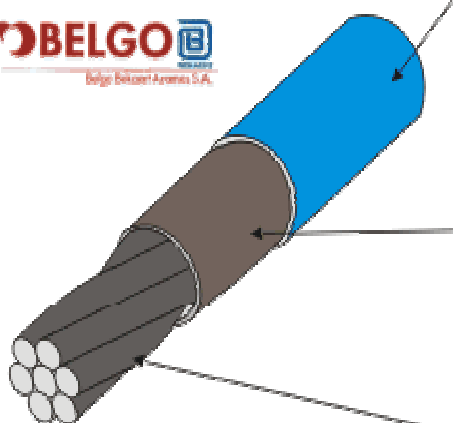
Essas forças não são transferidas ao longo do cabo, uma vez que o espaço existente entre a cordoalha e a capa de polietileno de alta densidade é preenchido com uma graxa mineral, o que não permite que exista aderência entre a armadura ativa e o concreto.

O sistema de protensão com armadura ativa pós-tracionada não aderente teve suas primeiras aplicações nos Estados Unidos no final da década de 50, (ALMEIDA FILHO F. M., 2002).

A fina camada de graxa mineral existente entre a armadura ativa e a capa de polietileno de alta densidade permite que ocorra o deslizamento do aço CP no sentido paralelo ao de seu eixo longitudinal, durante o processo de aplicação das forças de protensão (pré-alongamento ou tensionamento do aço).

Essa camada de graxa mineral aplicada na cordoalha, em seu processo de industrialização, possui dupla finalidade: a de proteção contra corrosão e também de impedir a aderência da armadura ativa ao concreto (FIGURA 2.11).

DADOS TÉCNICOS DAS CORDOALHAS



Capa plástica de Polietileno de alta densidade

- Resistência suficiente para suportar os danos que podem ser provocados durante a fabricação, transporte, instalação, concretagem e protensão.
- Estabilidade química, sem fragilizar-se durante a exposição das diferentes temperaturas e durante a vida útil da estrutura.
- O aço e a graxa que recobre a cordoalha não reage com o concreto.
- Cumpre as recomendações da FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) e a PTI (Post-Tensioning Institute).

Graxa

- Garante proteção contra corrosão do aço.
- Garante lubrificação entre cordoalha e a capa.
- Garante uma película protetora para exposição à baixas temperaturas.
- É quimicamente estável e não reage com o aço do cordão, a capa ou o concreto.
- Cumpre as recomendações da FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) e a PTI (Post-Tensioning Institute).

Cordoalha de Aço

- Cordoalha de 7 fios, fabricado segundo norma NBR 7483/91, ASTM A416.

FIGURA 2.11: CORDOALHA ENGRAXADA

FONTE: Impacto Protensão, 2005

Esse sistema somente foi implementado no mercado nacional a partir de fevereiro de 1997; quando teve início a fabricação do aço com a característica especialmente desenvolvida para este sistema (protegido por uma camada de graxa mineral e uma capa de polietileno de alta densidade), pela Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, (CAUDURO, 1997).

Por se tratar de cordoalhas individualizadas, somente podem se utilizadas como cabos de protensão do tipo monocordoalha ancoradas individualmente.

Uma das atuais utilizações desse sistema é a aplicação de cabos externos para recuperação ou reforço de estruturas, facilitando sobremaneira a manutenção dessas obras uma vez que os cabos não ficam imersos no concreto da estrutura.

Segundo dados fornecidos pela Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, no Brasil há um consumo médio mensal de aproximadamente 3.100 toneladas de aço CP para uso em lajes e/ou pisos desde 1987.

Esses consumos, entretanto, incluem indistintamente aços especiais para os diferentes sistemas de protensão, com e sem aderência posterior, e cordoalhas com diâmetros de 12,7 mm e 15,2 mm do aço tipo CP 190 RB.

No período de 1987 a 2004, observa-se um crescimento quase contínuo, acentuando-se a partir do ano de 1999 (GRÁFICO 2.1), incrementado pelo uso do novo sistema de protensão de armadura ativa pós-tracionada e não aderente (sem aderência posterior), largamente difundido no Brasil nos dias de hoje.

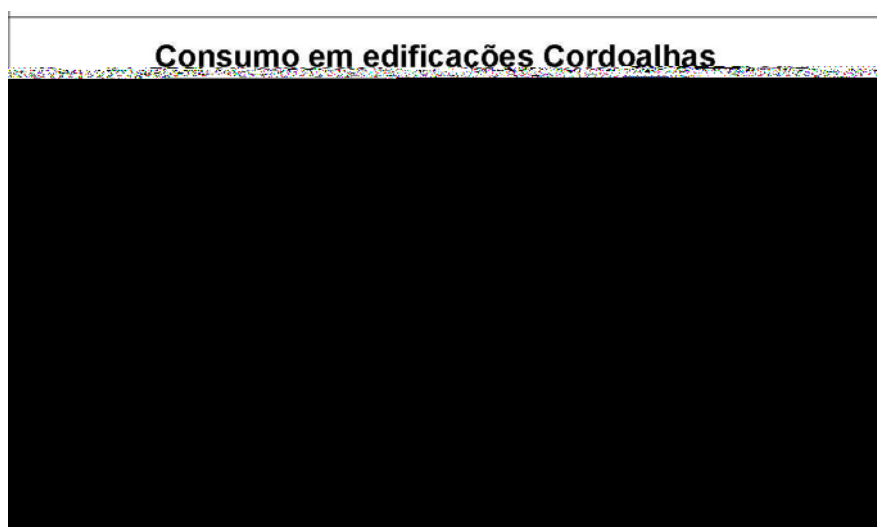


GRÁFICO 2.1: CONSUMO DE CORDOALHAS EM EDIFICAÇÕES
FONTE: Acelor Brasil - Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, 2005

Ainda segundo a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, existe um crescimento acentuado na utilização desse sistema de protensão com cordoalhas engraxadas, que representa a utilização do aço especial para armadura ativa pós-tracionada sem aderência posterior, conforme o GRÁFICO 2.2 abaixo:



GRÁFICO 2.2: CONSUMO DE CORDOALHAS PARA PÓS-TRAÇÃO COM E SEM ADERÊNCIA POSTERIOR

FONTE: Acelor Brasil - Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, 2005

Os cabos não aderentes desempenham suas funções apenas como elementos para aplicação das forças de protensão e por não haver aderência entre o cabo e o concreto, sua contribuição para a ruptura do elemento estrutural é muito limitada.

Com o aumento gradativo do carregamento surgem pequenos números de fissuras com grandes aberturas.

Essas fissuras tendem a distribuir as tensões em um comprimento longo da armadura ativa, o que produz um alongamento unitário pequeno com conseqüente pequeno acréscimo de tensão na armadura ativa (FIGURA 2.12).

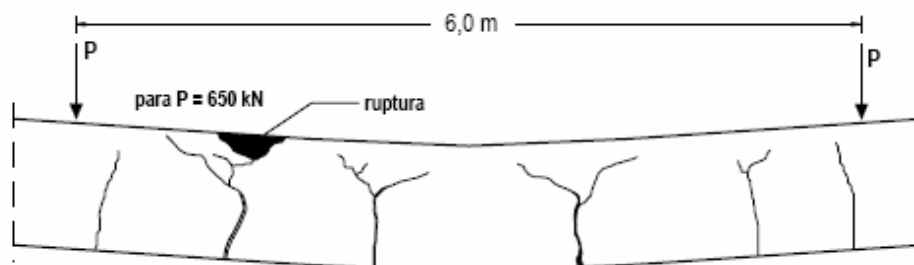


FIGURA 2.12: VIGA DE CONCRETO COM PROTENSÃO NÃO ADERENTE, SUJEITA A UM CARREGAMENTO

FONTE: Hormigón Pretensado - LEONHARDT F., 1967

O pequeno acréscimo de tensão é relativamente moderado, e a contribuição para o momento resistente da seção do elemento estrutural é menos eficiente.

Esse sistema apresenta algumas vantagens que devem ser aqui destacadas:

- maior excentricidade no posicionamento dos cabos;
- o aço recebe proteção contra corrosão no processo de fabricação;
- os cabos são distribuídos na laje de forma mais rápida;
- as perdas por atrito são muito baixas devido à existência da graxa; e
- não existe a operação de injeção de calda de cimento.

2.2.4 FORÇAS DE PROTENSÃO

As forças de protensão a serem consideradas devem seguir os preceitos da NBR 6118, a saber:

- força na armadura P_i : é a força máxima aplicada na armadura ativa através do equipamento de protensão, e as tensões correspondentes devem estar limitadas aos parâmetros estabelecidos no item 9.6.1.2.1 da NBR 6118:
 - a) para os casos de armaduras pré-tracionadas: por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura ativa, quando retirado o equipamento de protensão deve ser:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 f_{ptk} \\ 0,90 f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{para aços categoria RN})$$

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,77 f_{ptk} \\ 0,85 f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{para aços categoria RB})$$

b) para os casos de armaduras pós-tracionadas: por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura ativa, quando retirado o equipamento de protensão deve ser:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 f_{ptk} \\ 0,87 f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{para aços categoria RN})$$

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74 f_{ptk} \\ 0,82 f_{pyk} \end{cases} \quad (\text{para aços categoria RB})$$

- força na armadura P_a : é a força na armadura ativa no instante imediatamente anterior a liberação das cabeceiras, na seção de abscissa $x = 0$.

Esse valor somente se refere ao sistema de pré-tração e é conhecido como força ancorada, porque corresponde ao momento imediatamente anterior à transferência das forças aplicadas ao elemento estrutural.

- força na armadura ou no concreto $P(x)$

- força na armadura ou no concreto $P_t(x)$: é a força que ocorre no tempo t e na seção de abscissa x .

Essa força é obtida deduzindo as perdas progressivas ao longo do tempo, retração e fluência do concreto e relaxação do aço. É uma força variável e tende ao valor final $P_\infty(x)$ que equivale ao valor final após ocorrerem todas as perdas.

$$P_t(x) = P_0(x) - \Delta P_t(x) = P_t - \Delta P_0(x) - \Delta P_t(x) \quad (2.2.4.1)$$

2.3 MATERIAIS COMPONENTES

Os principais materiais que são considerados nos diversos sistemas são evidentemente o concreto e os aços de alta resistência, não deixando de ser analisada a calda de cimento para injeção, fundamental no sistema de protensão com aderência posterior, no qual é utilizada.

2.3.1 CONCRETO

Uma estrutura de concreto protendido prevê um controle mais rigoroso na qualidade do concreto a ser utilizado e para isso faz-se necessário um controle de qualidade mais eficiente, com a realização de ensaios preliminares dos elementos a serem utilizados na elaboração do concreto.

Os concretos empregados em elementos estruturais com armaduras ativas possuem normalmente uma resistência mecânica superior às dos concretos utilizados em elementos estruturais somente com armaduras passivas.

Pode-se dizer que as faixas de resistência à compressão do concreto de estruturas protendidas situa-se entre 30 *MPa* e 40 *MPa*, enquanto em estruturas de concreto armado essa resistência varia de 20 *MPa* a 30 *MPa*.

São vários os fatores que justificam a elevada resistência dos concretos, entre eles estão:

- concretos de alta resistência permitem a redução de seção das peças, com conseqüente diminuição do peso próprio, o que beneficia a utilização de peças pré-moldadas.
- concretos de alta resistência em função do maior módulo de deformação, possuem menores deformações imediatas e também as que ocorrem ao longo do tempo, como retração e fluência, o que minimiza os efeitos de perdas de protensão.
- a introdução de forças de protensão pode causar solicitações prévias muito elevadas, frequentemente mais elevadas que as que ocorrem em uma situação de serviço.

Além de um bom controle tecnológico, deve-se atentar para que o concreto tenha uma boa compacidade e baixa permeabilidade a fim de se garantir uma eficiente proteção contra a corrosão intercrystalina sob tensão (stress corrosion) das armaduras ativas.

Para que se garantam boas características tanto quanto as propriedades mecânicas quanto de durabilidade das construções, devem ser tomadas as precauções necessárias quanto ao tipo de cimento a ser utilizado e a seleção dos agregados (miúdos e graúdos) e aditivos.

Os cimentos a serem utilizados podem ser do tipo Portland, ARI, AF ou Pozolânico.

Os agregados, graúdos e miúdos, devem ser selecionados tanto quanto à origem mineralógica como quanto à granulometria.

Os aditivos a serem utilizados não devem conter cloretos ou outros componentes químicos que sejam prejudiciais à integridade das armaduras.

Com relação à durabilidade de um concreto, a NBR 6118, em seu item 7.4.1, ressalta que é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do recobrimento da armadura, TABELA 2.4.

TABELA 2.4: CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		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 (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NOTAS					
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com 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.					

FONTE: ABNT NBR 6118, 2003. Tabela 7.1

A cura do concreto independe do elemento estrutural ser de concreto protendido ou de concreto armado, entretanto deve ser criteriosa e cuidadosa para possibilitar que o concreto atinja as qualidades previstas.

Em algumas indústrias de concreto pré-fabricado utiliza-se a cura térmica para acelerar o processo de reações químicas e permitir uma maior produtividade de utilização de formas e outros equipamentos, em ciclos de 24 horas.

Esse tipo de cura, associada ao uso do cimento ARI, possibilita que o concreto atinja, no intervalo de 12 a 18 horas, aproximadamente 70% da resistência correspondente aos 28 dias.

O processo desse tipo de cura é essencialmente executado em três etapas:

- aquecimento gradual;
- manutenção da temperatura de cura (próximo aos 75°C);
- desaquecimento gradativo.

As características das fases dependem do tipo de cimento, dosagem do concreto, resistência especificada, dimensões geométricas da peça, entre outras.

HANAI J. B. (2005), relaciona uma coletânea de alguns dados que sempre são de particular interesse em um projeto de concreto protendido:

- f_{ckj} e f_{ctkj} : resistência característica à compressão e à tração direta na data de aplicação da protensão.
- f_{ck28} e f_{ctk28} : resistência característica à compressão e à tração direta aos 28 dias.
- $E_{ci(t_0)}$: módulo de elasticidade do concreto na idade t_0 , em que se aplique uma ação permanente, como é o caso da protensão.
- $E_{ci(28)}$: módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.
- relação água/cimento, em massa, empregada na dosagem do concreto.

A resistência característica à compressão, f_{ck} , é um dos principais parâmetros de caracterização do concreto.

Esse valor é obtido através do rompimento de corpos de prova moldados em formas cilíndricas com diâmetro nominal de 15 cm e altura de 30 cm, aos 28 dias. A moldagem desses corpos de prova está estabelecida na NBR 5738 e o procedimento para rompimento dos mesmos está descrito na NBR 5739.

O f_{ck} é definido como a resistência para a qual existe uma probabilidade de 5% de ocorrerem valores menores (TABELA 2.5).

TABELA 2.5: RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA IDADE, EM CONDIÇÕES NORMAIS DE CURA

cimento	idade do concreto em dias				
	3	7	28	90	360
CP I	0,60	0,78	1,00	1,12	1,20
ARI	0,66	0,82	1,00	1,09	1,16

FONTE: Concreto Protendido - Fundamentos Básicos - VERÍSSIMO e KLÉOS, 1998

NOTA: alterado pelo autor, devido fórmulas e coeficientes da ABNT.NBR 6118, 2003. Item 12.3.3b

2.3.2 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

Os aços utilizados para as armaduras ativas se caracterizam por serem aços de alta resistência e ausência de patamar de escoamento. A resistência desses aços é aproximadamente três vezes maior que as do aço utilizado no concreto armado.

No mercado brasileiro eles podem ser encontrados da seguinte maneira:

- fios trefilados de aço carbono, diâmetro de 3 a 8 mm, fornecidos em rolos ou em bobinas;
- cordoalhas, que são constituídas por fios enrolados em forma de hélice com 2, 3 ou 7 fios;
- barras de aço-liga de alta resistência, laminadas a quente, com diâmetros superiores a 12 mm e com comprimento limitado.

Em função do tratamento no processo de industrialização, podem ser:

- aços aliviados ou de relaxação normal (RN), que são aços retificados por tratamento térmico que alivia as tensões internas de trefilação;
- aços estabilizados ou de relaxação baixa (RB), são aços trefilados que

recebem tratamento termo-mecânico (submetidos a uma temperatura de 400° C na fase final de seu processo de fabricação), o qual melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação do aço, também chamado de aço estabilizado.

Genericamente se designa um aço utilizado para armadura ativa, da seguinte maneira: **CP-190 RB**, onde o **CP** significa Concreto Protendido e **190** equivale à resistência mínima à ruptura por tração $f_{ptk} = 190 \text{ kgf/mm}^2$ (aproximadamente 1.900 *MPa*), resistência que se diz efetiva no caso de fios e convencional no caso de cordoalhas, e **RB** que significa de relaxação baixa.

É necessário esclarecer que o fato da resistência ser convencional, no caso das cordoalhas, deve-se a que as tensões não se distribuem de maneira uniforme em todos os fios que são enrolados em um formato helicoidal.

No Brasil, o aço para armadura ativa começou a ser fabricado em 1952, com diâmetro nominal de 5 mm, pela Companhia Brasileira Belgo Mineira.

Na década de 60 apareceram as cordoalhas de dois, três e sete fios que desde então vêm substituindo a utilização dos fios por serem mais econômicas; em poucas empresas produtoras de elementos pré-fabricados ainda se utilizam fios no sistema de armadura ativa pré-tracionada com aderência inicial.

No sistema de armadura ativa pós-tracionada a preferência tem sido pela utilização de cordoalhas de sete fios, tanto com diâmetro nominal de 12,7 mm como de 15,2 mm.

A composição básica desse tipo de cordoalha consiste em seis fios periféricos que formam uma hélice, com passo de aproximadamente 200 mm, em torno do fio central que é reto e que possui um diâmetro nominal pouco superior ao diâmetro dos outros seis fios helicoidais.

Essa disposição geométrica do tipo hélice permite que haja uma maior superfície de aderência mecânica, devido ao efeito saca-rolha, entre a cordoalha e o

concreto e/ou a calda de cimento, dependendo de sua utilização ser no processo de pré-tração ou pós-tração com aderência, (LEONHARDT, 1983), (FIGURA 2.13).

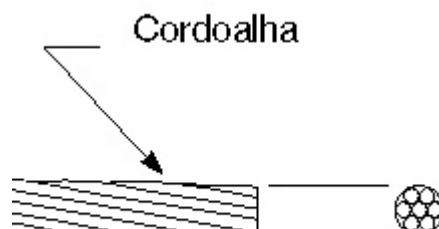


FIGURA 2.13: CORDOALHA DE 7 FIOS TIPO CP 190 RB Ø 1/2"

FONTE: Manual para a boa execução de estruturas protendidas - CAUDURO, 1998

Somente em 1974 a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira passou a fabricar os aços estabilizados, aços esses que possibilitam uma redução superior a 15% nas perdas de protensão ao longo do tempo.

Os parâmetros de qualidade e as características físicas e mecânicas dos fios e cordoalhas de aço para o concreto protendido estão definidos em especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nas normas brasileiras:

- NBR-7482 - Fios de aço para concreto protendido;
- NBR-7483 - Cordoalhas de aço para concreto protendido - Requisitos;
- NBR-7484 - Fios, Barras e Cordoalhas de aço, destinados a armaduras de protensão - Ensaios de relaxação isotérmica.

As principais propriedades mecânicas do aço são:

- f_{ptk} : resistência característica à ruptura por tração do aço;
- f_{pyk} : limite de escoamento convencional, correspondente à deformação residual (após descarga) de 0,2%;
- E_p : módulo de elasticidade do aço.

Os valores médios dos módulos de elasticidade do aço CP são:

- $E_p = 205.000 \text{ MPa}$ para fios
- $E_p = 195.000 \text{ MPa}$ para cordoalhas

Os módulos de elasticidade devem ser fornecidos pelo fabricante ou obtidos através de ensaios específicos preconizados pela ABNT; na falta de dados mais precisos, a NBR 6118 em seu item 8.4.4, permite a adoção de um valor médio (para fios e cordoalhas) de $E_p = 200 \text{ GPa}$.

Por se tratar de um módulo de deformação aparente, englobando a acomodação dos fios enrolados, a cordoalha apresenta um valor menor que os fios.

Fios e cordoalhas possuem um limite de escoamento convencional, aproximadamente igual à tensão correspondente à deformação de 1%.

Existem também as cordoalhas engraxadas, conforme citado no item 2.2.3, que são fornecidas em diâmetros nominais de 12,7 mm e 15,2 mm, em rolos de aproximadamente 3.000 kg.

Um fator de grande relevância das cordoalhas engraxadas é a proteção contra corrosão da armadura ativa, pois o aço quando sujeito a elevadas tensões, fica mais susceptível aos efeitos da corrosão.

A TABELA 2.6 mostra alguns dados técnicos das cordoalhas de 3 e de 7 fios mais comercializadas no Brasil, que normalmente são fornecidas em bobinas com aproximadamente 2.500,00 kg, com diâmetro interno de 76,2 cm, diâmetro externo de 139 cm e altura de 76,2 cm, FOTO 2.6.



FOTO 2.6: BOBINAS DE CORDOALHAS DE SETE FIOS
 FONTE: PROTENDE, 2006

TABELA 2.6: DADOS TÉCNICOS DE CORDOALHAS DE TRÊS E SETE FIOS

Especificações dos Produtos									
Produtos	Diâmetro Nominal (mm)	Área Aprox. (mm²)	Área Mínima (mm²)	Massa Aprox. (kg/km)	Carga Mínima de Ruptura		Carga Mínima a 1% de Alongamento		Along. Sob Carga (em 610 mm)
					(kN)	(kgf)	(kN)	(kgf)	
Cord. CP 190 RB 3x3,0	6,5	21,8	21,5	171	40,8	4.080	36,7	3.670	3,5
Cord. CP 190 RB 3x3,5	7,6	30,3	30,0	238	57,0	5.700	51,3	5.130	3,5
Cord. CP 190 RB 3x4,0	8,8	38,3	37,6	304	71,4	7.144	64,3	6.430	3,5
Cord. CP 190 RB 3x4,5	9,6	46,5	46,2	366	87,7	8.770	78,9	7.890	3,5
Cord. CP 190 RB 3x5,0	11,1	66,5	65,7	520	124,8	12.480	112,3	11.230	3,5
Cord. CP 190 RB 9,5	9,5	55,5	54,8	441	104,3	10.430	93,9	9.390	3,5
Cord. CP 190 RB 12,5	12,7	101,4	98,7	792	187,3	18.730	168,6	16.860	3,5
Cord. CP 190 RB 15,2	15,2	143,5	140,0	1.126	265,8	26.580	239,2	23.920	3,5

FONTE: Acelor Brasil - Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, 2005

O GRÁFICO 2.3 mostra a relação tensão x deformação e a determinação do módulo de elasticidade, ou módulo de Young, que deve ser fornecido pelo fabricante ou emitido por laboratório idôneo.



GRÁFICO 2.3: RELAÇÃO TENSÃO x DEFORMAÇÃO AÇO CP
FONTE: Acelor Brasil - Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, 2005

2.3.3 CALDA DE CIMENTO

As principais finalidades da calda de cimento, injetada no espaço existente entre a bainha e a armadura ativa, são a proteção da armadura ativa contra a corrosão e a ligação mecânica da mesma ao concreto.

Denomina-se calda ou nata de cimento, uma mistura os seguintes componentes:

- água de amassamento;
- cimento; e
- aditivos.

A água de amassamento deve ser potável, com teor de porcentagem de cloro inferior a 500 mg/l e isenta de detergentes, como preconiza a NBR 7681.

Os cimentos são normalmente utilizados em sacos de 50 kg, e podem ser do tipo:

- CP I - 25, 32 ou 40 (cimento portland comum) fabricado sob encomenda, e de difícil programação;
- CP II F - 25, 32 ou 40 (cimento portland composto de filer = carbonáticos, próprio calcário da jazida) encontrado com razoável facilidade no mercado; ou
- CP II E - 25, 32 ou 40 (cimento portland composto de escória de alto forno) encontrado com grande facilidade no mercado.

Esses cimentos deverão conter:

- teor de compostos ≤ 10 %;
- teor de enxofre e sulfatos $< 0,20$ %; e
- cloro de cloretos $\leq 0,10$ %

Muitos são os parâmetros que influenciam a qualidade de uma calda de cimento, dentre eles pode-se citar:

- natureza, idade e temperatura do cimento;
- condições e tempo de mistura;
- temperatura da água, do ambiente e no interior da bainha.

Os aditivos utilizados podem ter características plastificantes, de expansão ou de retardamento de início de pega, e devem ser ensaiados previamente para comprovar a compatibilidade com o cimento.

A escolha do tipo de aditivo também é função do tipo de cabo a ser injetado.

A mistura desses componentes deve ser executada em um misturador de alta rotação, por um tempo mínimo de quatro minutos antes de sua utilização, (LEONHARDT, 1983).

Ao se aumentar a carga aparece uma primeira fissura no local de tração máxima (tanto para caso de protensão aderente como não aderente) e isto produz um aumento brusco de tensão no aço. Um aumento de tensão em um grande comprimento origina um aumento de alongamento, e conseqüentemente a fissura se abre mais rapidamente, (LEONHARDT, 1967).

Os parâmetros de qualidade e as características físicas e mecânicas da calda de cimento estão definidos em especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nas seguintes normas brasileiras:

- NBR-7682 - Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez;
- NBR-7683 - Calda de cimento para injeção - Determinação dos índices de exsudação e expansão;
- NBR-7684 - Calda de cimento para injeção - Determinação da resistência à compressão;

- NBR-7685 - Calda de cimento para injeção - Determinação da vida útil.

Alguns dos parâmetros estabelecidos nas normas brasileiras acima citadas e de controle em tempo muito reduzido são:

- *fluidez*: o índice de fluidez corresponde ao tempo necessário para o preenchimento de uma proveta de 1000 ml através do cone de Marsh. Esse tempo deve estar compreendido entre 9 seg e 15 seg.
- *exsudação*: valor que deve ser medido em proveta de 1000 ml, e cuja valor de porcentagem de água exsudada deve ser inferior a 2%.
- *expansão*: medida efetuada na mesma proveta em que se mede a exsudação e cujo valor aconselhado deve estar situado entre 3% e 4%, no máximo.

A proporção correta de seus componentes é determinada através de ensaios prévios de laboratório e as propriedades da calda obtida devem ser controladas na obra, durante a execução dos serviços.

A calda de cimento, além de restituir a seção útil do elemento estrutural, preenchendo todos os vazios existentes entre as cordoalhas e bainhas, garantindo a aderência posterior (no processo de pós-tração com aderência posterior), também tem como finalidade fundamental proteger o aço tracionado contra o processo de corrosão, que por estar sob tensão tem seu processo acelerado, (LACROIX e FUENTÉS, 1978).

O hidróxido de cálcio produzido pela hidratação dos silicatos cálcicos do cimento, mantém o meio fortemente alcalino (pH=12), propiciando um ambiente de proteção contra a oxidação das cordoalhas, (PFEIL, 1983 e LEONHARDT, 1967).

Ainda segundo X. DÉROBERT, C. AUBAGNAC e O. ABRAHAM (2002), a corrosão do aço sob tensão é acelerada se a injeção de calda de cimento não atender as especificações técnicas de procedimentos e a qualidade de seus componentes.

Avaliando alguns problemas de corrosão ocorridos em aço para concreto protendido, constatou-se que a própria calda de cimento pode colaborar de maneira negativa, se a mesma possuir componentes com características agressivas ao meio, (SCHEEL e HILLEMEIER, 1997).

Problemas com recobrimento de armaduras em meios agressivos são fatores que colaboram para acentuar a corrosão de armaduras, (COSTA e APPLETON, 2002).

Segundo LEONHARDT (1983) os principais agentes causadores da corrosão são:

- nitratos: favorecem a corrosão sob tensão.
- sulfetos: favorecem a fragilidade por hidrogenação.
- cloretos: conduzem a uma corrosão localizada, podendo produzir o efeito de moessa e conseqüente fragilidade por hidrogenação.

Cuidados especiais devem ser tomados, uma vez que as maiores causas de patologias apresentadas em estruturas de concreto protendido, no processo de pós-tração com aderência posterior, estão relacionadas a problemas decorrentes da má qualidade da injeção de calda de cimento, (X. DÉROBERT, C. AUBAGNAC e O. ABRAHAM, 2002).

Ademais de todos esses cuidados, inerentes ao processo de injeção e os componentes da nata de cimento, tem-se que verificar a agressividade do meio onde a obra esta sendo executada.

2.4 ACESSÓRIOS E EQUIPAMENTOS

2.4.1 ACESSÓRIOS

A maioria das empresas de elementos estruturais pré-fabricados e nos mais diversos sistemas de concreto protendido que utilizam fios e cordoalhas, os acessórios básicos são constituídos por: bainha, ancoragem e cunhas.

➤ BAINHA:

Bainha é um dispositivo que separa fisicamente o contato da armadura ativa com a massa do concreto que a envolve.

São utilizadas somente em estruturas pós-tracionadas, podendo ser fabricadas em chapas metálicas de aço laminado a frio com espessuras que variam de 0,2 mm a 0,35 mm, em forma de hélice, o que possibilita o uso de luvas de emendas rosqueáveis fabricadas pelo mesmo processo e sendo na realidade um pedaço de uma bainha com um diâmetro imediatamente superior, FOTO 2.7.

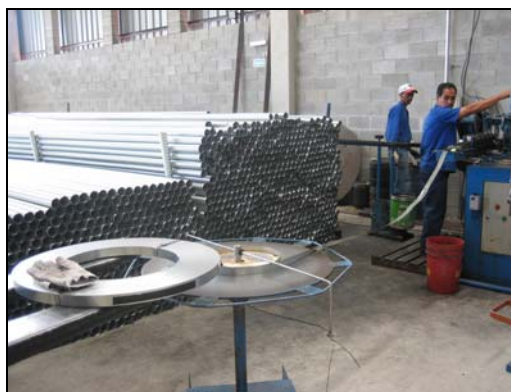


FOTO 2.7: FABRICAÇÃO DE BAINHAS
FONTE: Fábrica da PROTENDE, 2006

Devem ser projetadas com um diâmetro que permita a movimentação dos cabos em seu interior e capazes de resistir, sem deformação apreciável, à pressão do concreto lançado e aos esforços oriundos de sua montagem.

Os diâmetros variam de 25 mm a 110 mm e dependem do número de cordoalhas que serão alojadas em seu interior e também do processo de enfição das cordoalhas já cortadas, que pode ser antes ou após a concretagem do elemento estrutural, em casos de vigas.

Em obras do tipo UHE (Usinas Hidroelétricas), normalmente se utilizam bainhas fabricadas em tubos rígidos de aço para os cabos dos pilares e das vigas de munhão, em função da magnitude da massa de concreto, que exerce grande pressão sobre as mesmas.

As ondulações transversais além de dar maior rigidez contra o amassamento, melhora a aderência ao concreto e à nata de injeção.

Por ter a forma de hélice, também possibilita que longos cabos, pré-cortados e embainhados, sejam transportados em forma de rolos com raios de curvatura relativamente pequenos, principalmente no caso de lajes com bainhas oblongas, (LEONHARDT,1983), FOTO 2.8.



FOTO 2.8: CABOS ENROLADOS PARA UTILIZAÇÃO EM LAJE
FONTE: Obra do HSBC Palácio Avenida, 1988

As bainhas metálicas somente são utilizadas no sistema de pós-tração com

➤ ANCORAGEM:

As ancoragens são dispositivos mecânicos (metálicos), que podem ser do tipo: ativa, passiva ou de emenda.

Devido a grande variedade de tipos de ancoragens para cada processo de protensão, serão definidas apenas quanto ao conceito de aplicação de forças.

- ancoragens ativas: são aquelas nas quais se aplicam diretamente as forças de protensão através de equipamentos especiais, denominados macacos hidráulicos e que são acionados por bombas hidráulicas de alta pressão. São constituídas por placas repartidoras de tensão, blocos de ancoragem e trombetas para abertura do leque das cordoalhas, FIGURA 2.14.

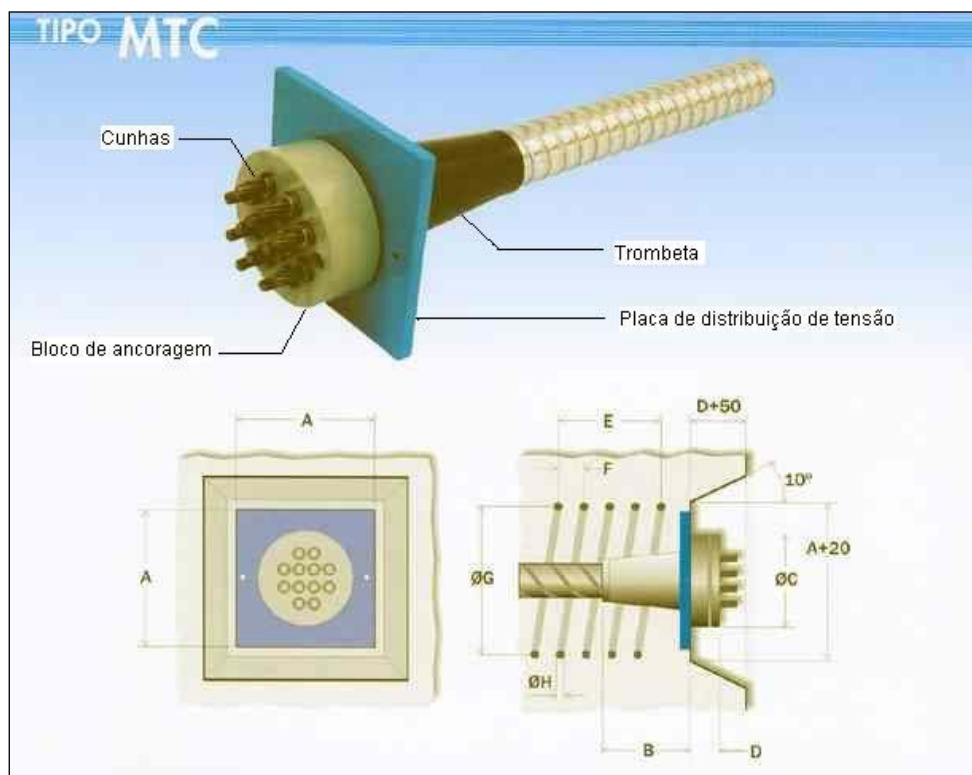


FIGURA 2.14: ANCORAGEM ATIVA
 FONTE: Catálogo Técnico da PROTENDE, 2005

- ancoragens passivas: são aquelas onde não se aplicam diretamente as forças de protensão, podendo estar imersa na massa do concreto do elemento estrutural.

Esse tipo de ancoragem pode ser executado de diversas maneiras:

- por simples atrito e aderência do fio em contato direto ao concreto;
- utilização de ancoragens do tipo ativa com cunhas pré-cravadas;
- por dispositivos mecânicos especiais; ou
- por meio de laços colocados no interior do concreto, FIGURA 2.15.



FIGURA 2.15: ANCORAGEM PASSIVA
FONTE: Catálogo Técnico da PROTENDE, 2005

Na execução de aplicação de forças de protensão no sistema de pós-tração com ou sem aderência posterior dos cabos, para o caso de lajes de edificações verticais de múltiplo uso e/ou pisos industriais, as ancoragens ativas estarão sempre incorporadas ao elemento estrutural e ficam fixadas à extremidade dos cabos de protensão (FOTOS 2.11 e 2.12).



FOTO 2.11: ANCORAGEM MONO-CORDOALHA UTILIZADA NO SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO SEM ADERÊNCIA POSTERIOR
FONTE: PROTENDE, 2006

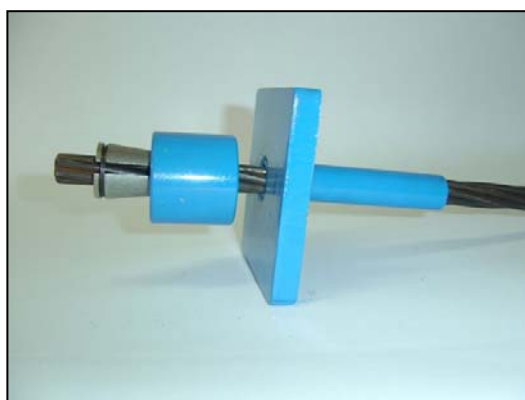


FOTO 2.12: ANCORAGEM MONO-CORDOALHA UTILIZADA NO SISTEMA DE PÓS-TRAÇÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR
FONTE: PROTENDE, 2006

➤ CUNHAS:

São elementos metálicos, que recebem um tratamento especial tipo têmpera, de resistência mecânica superior às cordoalhas, possuem um formato tronco-cônico e podem ser bipartidas ou tripartidas, dependendo do processo tecnológico utilizado, FOTO 2.13.

As cunhas são providas de ranhuras nas faces internas, devidamente dimensionadas quanto à profundidade e ângulo das reentrâncias.

Esses dispositivos envolvem os fios ou cordoalhas individualmente e ficam alojados nas cavidades cônicas dos blocos da ancoragem ativa.

Em função da penetração das cunhas nas cavidades, ocorre um aumento da pressão lateral, o que impede o deslizamento da armadura ativa, auxiliada pela existência das ranhuras internas que asseguram a fixação do aço após o tracionamento do mesmo através de macacos hidráulicos acionados por bombas elétricas de alta pressão.

FOTO 2.13: CUNHAS UTILIZADAS NOS SISTEMAS DE PÓS-TRAÇÃO COM E SEM ADERÊNCIA POSTERIOR

2.4.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos básicos dos processos de protensão são:

- *Máquina de cortar cordoalha, lixadeira manual ou policorte:* utilizada para o corte a frio das cordoalhas, de acordo com as medidas especificadas em projeto, FOTO 2.14.
- *Máquina de dobrar cordoalha:* utilizada para executar as dobras, no caso de ancoragens passivas tipo laço, FOTO 2.15.



FOTO 2.14: LIXADEIRA MANUAL
FONTE: PROTENDE, 2006

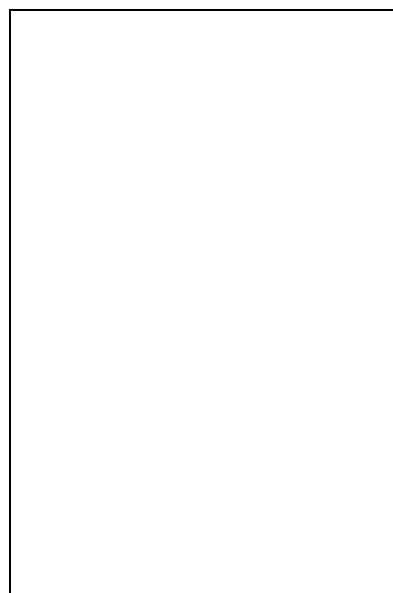


FOTO 2.15: MÁQUINA DE DOBRAR CORDOALHA
FONTE: RUDLOFF, 2006

- *Macaco hidráulico mono ou múltipla tensão:* equipamento utilizado para aplicação das forças de protensão, geralmente de embolo vazado, FIGURA 2.16 e FOTOS 2.16 e 2.17.

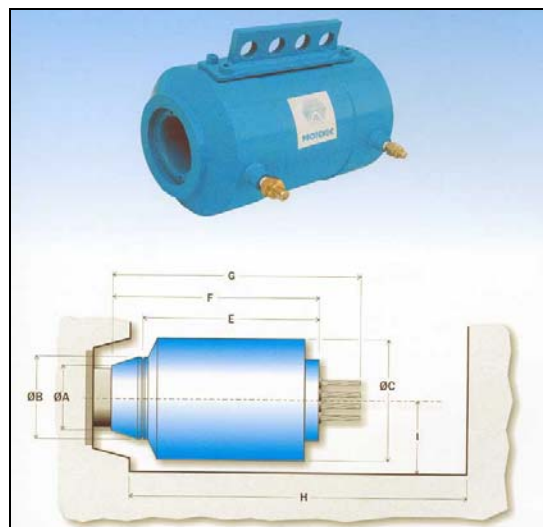


FOTO 2.16: MACACO MONOCORDOALHA FOTO 2.17: MACACO MULTI TENSÃO

FONTE: Catálogo Técnico da PROTENDE, 2005

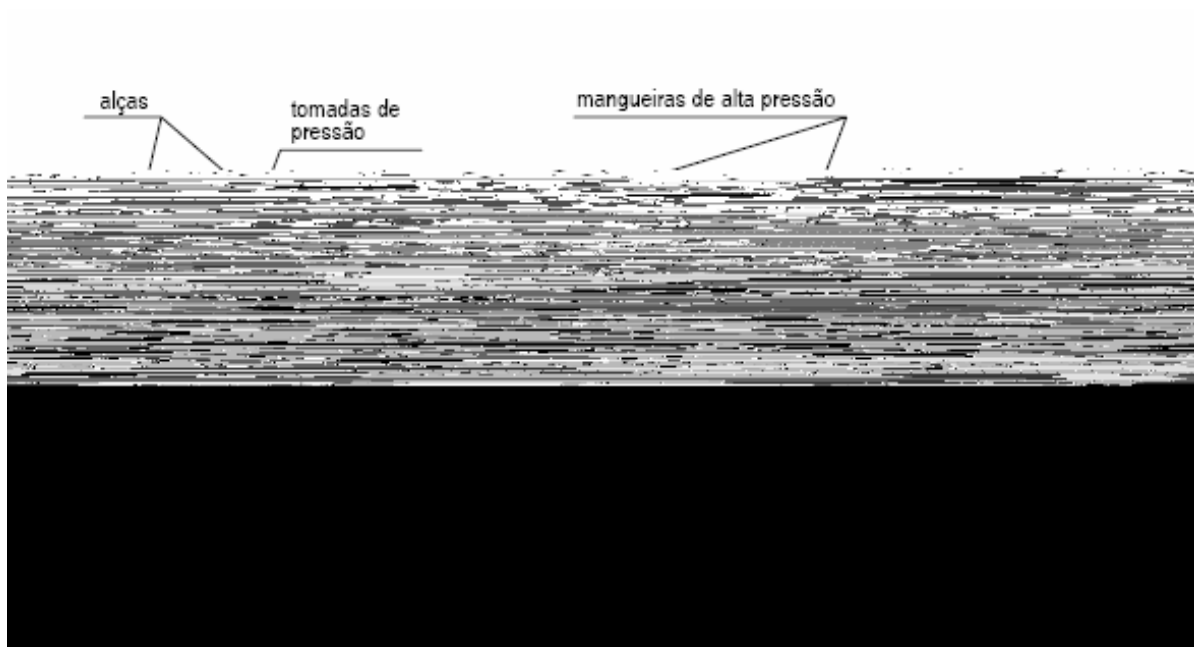


FIGURA 2.16: ESQUEMA GENÉRICO DO MACACO HIDRÁULICO
 FONTE: Concreto Protendido - Fundamentos Básicos - VERÍSSIMO e KLÉOS, 1998

- *Bomba de alta pressão*: equipamento que aciona os macacos hidráulicos e que controlam a aplicação das forças de protensão através de manômetros com graduação de 10 kgf/cm², FOTO 2.18.

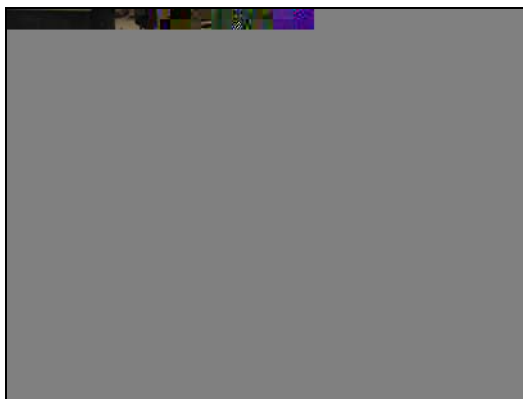


FOTO 2.18: BOMBA DE ALTA PRESSÃO
FONTE: PROTENDE, 2006

- *Misturador de calda de cimento*: equipamento utilizado para misturar a calda de cimento cujo traço normalmente misturado é feito com dois sacos de cimento, com volume aproximado de 75 litros, FOTO 2.19.



FOTO 2.19: MISTURADOR DE CALDA DE CIMENTO
FONTE: PROTENDE, 2006

- *Agitador*: equipamento que tem a finalidade específica de manter a calda de cimento já misturada em agitação constante até sua utilização, a fim de manter as características da mesma, FOTO 2.20.



FOTO 2.20: AGITADOR DE CALDA DE CIMENTO
FONTE: PROTENDE, 2006

- *Bomba Injetora*: equipamento que efetivamente injeta a calda de cimento nas condições pré-estabelecidas em ensaios e que pode manter uma sobre pressão de 5 kgf/cm^2 para garantir o total preenchimento dos vazios existentes entre as cordoalhas e a bainha, FOTO 2.21.



FOTO 2.21: BOMBA INJETORA DE CALDA DE CIMENTO
FONTE: PROTENDE, 2006

2.5 PERDAS DE PROTENSÃO

Diz-se que um elemento estrutural é de concreto protendido quando o mesmo está submetido a forças especiais e permanentemente aplicadas, que são as chamadas forças de protensão.

Essas forças, apesar de possuírem o caráter de serem permanentes, estão sujeitas a variação de suas intensidades, para valores que podem oscilar para mais ou para menos.

De uma maneira genérica, é designada perda de protensão à ocorrência da diminuição da intensidade da força aplicada.

Segundo PFEIL (1983), em todos os processos de protensão existem perdas de tensão dos cabos ou cordoalhas.

As perdas não só se constituem em um inconveniente pelo menor rendimento do aço de protensão, como também provocam um aumento no estado de solitação do concreto. Assim, é essencial para o engenheiro estrutural ter conhecimento das perdas com a maior precisão possível, (LACROIX, 1978).

Ainda segundo LACROIX (1978) essas perdas podem ser consideradas como imediatas ou lentas, a saber:

- *perdas imediatas por atrito*: no sistema de protensão com aderência posterior, ocorre atrito entre a armadura ativa e a bainha.

Essas perdas são decorrentes de causas mecânicas, tais como resistência de atrito ao longo do cabo durante seu alongamento dentro das bainhas, sendo tanto maior quanto mais sinuoso for o cabo, devido às altas pressões de contato que surgem na alteração das trajetórias dos cabos. Item 9.6.3.3.2.2 da NBR 6118.

Na prática esses desvios angulares podem ser decorrentes das curvaturas do traçado teórico (deflexões previstas em planta e

elevação) do cabo ou por desvios acidentais no seu posicionamento nas formas (desvios parasitas).

$$\Delta P_{(x)} = P_i \times [1 - e^{-(\mu \Sigma \alpha + kx)}] \quad (2.5.1)$$

onde:

P_i = força máxima aplicada à armadura ativa pelo equipamento de tração;

x = abscissa do ponto onde se calcula ΔP , medida a partir da ancoragem, em metros;

e = base de logaritmos Neperianos;

μ = coeficiente de atrito aparente entre cordoalhas e bainha, expressos em 1/radianos. Na falta de dados experimentais pode ser adotado um dos valores da TABELA 2.7, abaixo:

TABELA 2.7: COEFICIENTES DE μ

μ	Situação
0,50	entre cabo e concreto (sem bainha)
0,30	entre barras ou fios com mossas e bainha metálica
0,20	entre fios ou cordoalhas lisas e bainha metálica
0,10	entre fios ou cordoalhas lisas e bainha metálica lubrificada
0,05	entre cordoalha e bainha de polietileno lubrificada

FONTE: ABNT NBR 6118, 2003. Item 9.6.3.3.2.2

$\Sigma \alpha$ = somatório dos ângulos de deflexão ao longo do cabo (em elevação e em planta), expresso em radianos;

k = coeficiente que fornece uma simulação dos desvios parasitários ao longo do cabo, expresso em rad/m, em caso de falta de dados experimentais pode ser adotado o valor de $0,01\mu$ (1/m).

- *perdas imediatas por retrocesso de ancoragem*: essa perda está associada ao sistema de protensão e sua ocorrência é relativa ao encunhamento na ancoragem quando se transfere o esforço de protensão do equipamento utilizado para a ancoragem, provocando um ajuste da cunha no corpo da ancoragem ativa (penetração da cunha no bloco de ancoragem durante o processo de alívio de carga no macaco).

A magnitude dessa perda é função do sistema utilizado e é equivalente ao recuo ou penetração da cunha na ancoragem, podendo essa acomodação ser prevista durante o processo de aplicação das forças de protensão, compensando a mesma com uma majoração equivalente na força a ser aplicada.

Essas perdas na ancoragem, para o processo de protensão em cordoalhas, variam de 4 mm a 6 mm, (PFEIL, 1983).

- *perdas imediatas do concreto*

Em um elemento estrutural com “n” cabos distribuídos em uma determinada posição da seção transversal, para uma protensão sucessiva, o primeiro cabo sofrerá uma perda de tensão decorrente da aplicação de força nos (n-1) cabos restantes, sendo nula a perda no último cabo.

O item 9.6.3.3.2.1 da NBR 6118 especifica que a perda média de protensão por encurtamento elástico pode ser calculada pela fórmula:

$$\Delta\sigma_p = \frac{\alpha_p \times (\sigma_{cp} \times \sigma_{cg}) \times (n-1)}{2n} \quad (2.5.2)$$

sendo simplificada para o caso de um grande número de cabos, para:

$$\Delta\sigma_p = \frac{\alpha_p \times \sigma_{cp}}{2} \quad (2.5.3)$$

- *perdas lentas por retração e fluência do concreto*: o concreto, devido a sua própria reologia, está sujeito a algumas deformações intrínsecas (GRÁFICO 2.4).

Em função de um equilíbrio higrotérmico do concreto com o meio ambiente, durante o período de cura (secagem do concreto), o mesmo sofre encurtamentos ao longo do tempo, fenômeno que é chamado retração.

Outro fenômeno que se manifesta ao longo do tempo é a fluência, que ocorre quando o concreto está submetido a ações de longa duração e produz deformações plásticas e elásticas progressivas das fibras nas regiões solicitadas.

Assim, como a protensão introduz esforços de compressão prévia e de longa duração aos elementos de concreto, a mesma acaba por

sofrer essas perdas devido ao encurtamento da região protendida. Em teoria essa perda progressiva ocorre até que haja uma estabilização no tempo infinito, mas na prática essas perdas ocorrem em um intervalo que varia de 2 a 3 anos, (HANAI, 2005).

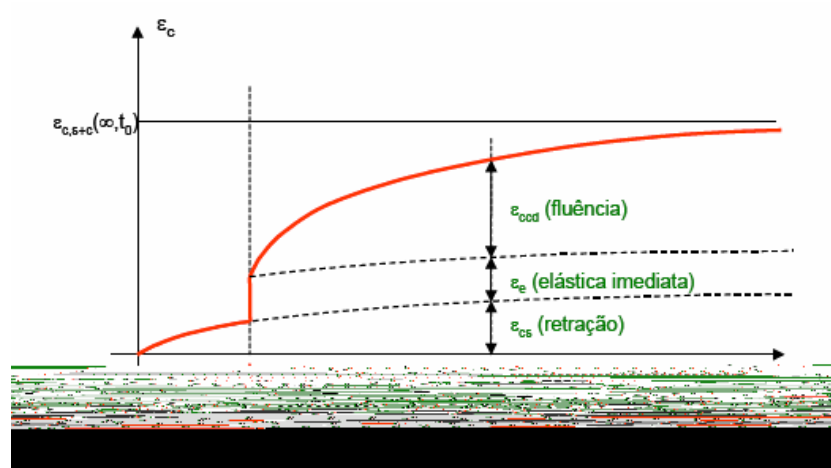


GRÁFICO 2.4: DEFORMAÇÕES POR RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO CONCRETO

FONTE: Fundamentos do Concreto Protendido - HANAI J., 2005

- *perdas lentas por relaxação e fluência do aço*: são fenômenos que geram também perdas progressivas, FIGURA 2.17.

Quando há uma diminuição da tensão no aço, mantendo o comprimento da armadura constante após ter sido deformada por uma solicitação inicial, existe um fenômeno chamado relaxação (devido à existência de aços tipo RB, esse efeito é minimizado).

Ocorre, portanto, um alívio de tensão mantendo o comprimento ou deformação constante.

Ao se aumentar a deformação do aço ao longo do tempo, mantendo a tensão constante, ocorre o fenômeno designado fluência (do aço).

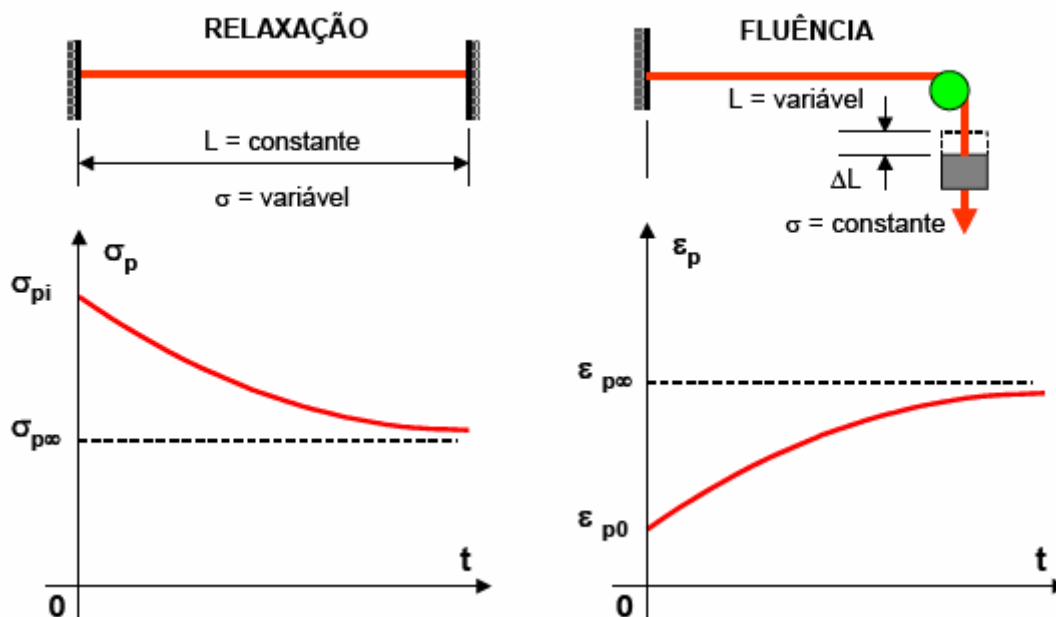


FIGURA 2.17: DEFORMAÇÕES POR RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO AÇO
 FONTE: Fundamentos do Concreto Protendido - HANAI J., 2005

2.6 REUTILIZAÇÃO DE ANCORAGENS ATIVAS

Baseado no princípio da protensão pelo processo de *pré-tração* em peças estruturais, onde se utilizam ancoragens apoiadas em contra-fortes ou cabeceiras de pistas de protensão (não havendo, portanto, ancoragens incorporadas à massa do concreto), e levando-se em consideração os efeitos de todas as perdas anteriormente descritas, é de se supor que existe a possibilidade de se executar a aplicação das forças de protensão pelo processo de *pós-tração* com aderência posterior, reutilizando as ancoragens ativas, desde que não haja substancial perda das forças aplicadas nas ancoragens.

As tecnologias dos processos vigentes poderão gerar um novo procedimento, visando o desenvolvimento do conhecimento científico existente e já largamente estudado tanto na *pré-tração* quanto na *pós-tração*.

Os diversos tipos de perdas de protensão que ocorrem em elementos estruturais protendidos pelos processos atualmente disponibilizados já foram profundamente estudados (PFEIL, 1983).

Com a utilização da protensão em lajes de edificações verticais e/ou em pisos industriais, e devido à multiplicidade de seus usos (residencial, hoteleiro, comercial, hospitalar, estacionamentos, etc...), torna-se conveniente um estudo mais profundo para definir um coeficiente que compense uma eventual perda de tensão com a retirada da ancoragem ativa no sistema de protensão com aderência posterior.

Para que haja a possibilidade de se reutilizar ancoragens ativas, faz-se necessário uma avaliação criteriosa da eventual ocorrência de perdas com a retirada dessas ancoragens, através de ensaios em laboratório.

Uma possível implicação da retirada da ancoragem seria a necessidade de compensar essa eventual perda de protensão com uma quantidade adicional de armadura frouxa, também designada armadura doce ou armadura passiva (constituída por aço CA), o que acarretaria um aumento da chamada taxa de armadura passiva.

Taxa de armadura é o quociente da quantidade de aço utilizado por unidade cúbica de concreto aplicado (kg/m^3) e em casos de obras protendidas têm-se dois tipos de taxas de armadura:

- taxa de aço duro (armadura ativa): é uma taxa relativa ao consumo de aço CP (concreto protendido) em relação ao volume de concreto do elemento estrutural protendido, e
- taxa de aço doce (armadura passiva): é uma taxa relativa ao consumo de aço CA (concreto armado) em relação ao volume de concreto do elemento estrutural.

O sistema de protensão com aderência posterior possibilita que um determinado espaço físico de uma laje e/ou piso tenha sua utilização alterada (exemplo: uma abertura na laje para colocação de uma escada rolante) sem o

comprometimento da estrutura, observanda sempre a necessidade de uma consulta com aprovação prévia ao engenheiro responsável pelo cálculo estrutural.

Fica evidente que a alteração de servicibilidade de uma laje e/ou piso estrutural, que requeira um recorte como o acima citado, é inviável com o sistema de pós-tensão sem aderência, devido a perda total da força de protensão aplicada aos cabos que constituem a armadura ativa da região do corte, perda essa que é inerente ao sistema de protensão adotado.

No sistema de pré-tensão a ancoragem tipo monocordoalha utilizada possui basicamente os mesmos componentes do sistema de pós-tensão, com exceção da placa repartidora de tensão, pois existe um contraforte ou cabeceira que desempenha essa função.

Os blocos de ancoragens e as cunhas de longa vida são fabricados para obterem múltiplo uso, na ordem se 500 a 800 reutilizações, conforme informações obtidas junto a fornecedores e usuários: Weiller, Paul, Prepron, Protende, Rudloff (como fornecedores) e Cassol, DM, Cinasa, Consid, e outros (como usuários).

Uma avaliação comparativa do custo de uma ancoragem completa (trombeta + placa repartidora + bloco de ancoragem + cunha metálica) de uso único incorporado ao elemento estrutural, com uma ancoragem para uso múltiplo (bloco de ancoragem + cunha metálica), será um dos objetivos desta pesquisa quanto ao seu aspecto econômico.

Nessa análise deve-se considerar além do número de reutilizações, a incidência do custo da ancoragem no produto final.

No processo comparativo de custo, deve-se atentar para o fato de que os equipamentos utilizados nos sistemas atuais de protensão poderão ser os mesmos, não sendo necessário desenvolver novos equipamentos.

Deve-se, entretanto acrescentar o custo de dispositivos, como selas e calços, necessários para absorver provisoriamente as forças de protensão até que a calda de cimento, injetada sob pressão e com as características de projeto, atinja a resistência

mecânica à compressão necessária, permitindo que seja possível aliviar as forças de protensão com a consequente retirada das ancoragens ativas.

3 EXPERIMENTO

3.1 GENERALIDADES

Os experimentos foram realizados nas dependências do Laboratório de Materiais e Estruturas - LAME, nas instalações do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná - UFPR.

O LAME é conveniado à Universidade Federal do Paraná, e é credenciado pelo INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, e integra a Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios - RBLE; possuindo a certificação de conformidade com NBR ISO 9002, tendo sido credenciado pela empresa DET NORSKE VERITAS.

Os ensaios foram desenvolvidos com foco principal na obtenção de dados relativos à eventual perda de força de protensão (aplicada nas armaduras ativas de lajes protótipos, dimensionadas para essa finalidade) com a retirada das ancoragens ativas.

A utilização de extensômetros elétricos foi uma decisão tomada em função da disseminação de seu uso corrente em ensaios laboratoriais e da maior precisão nos dados obtidos e armazenados eletronicamente.

Esses dispositivos elétricos foram conectados a um Data Logger modelo Kyowa interligado a um micro computador portátil de uso pessoal.

O uso desses extensômetros, uma vez instalados, mostrou-se relativamente barato em face ao elevado número de leituras que podem ser efetuadas nas diversas fases do experimento.

Outros dispositivos utilizados nos ensaios, tais como: sela de protensão (para a aplicação direta das forças), mesa desativadora (para alívio das forças aplicadas e possibilitar a retirada dos blocos das ancoragens ativas), bem como calços e medidores

rotativos para uma leitura convencional, foram especificamente desenvolvidos para possibilitar o experimento.

Os projetos desses equipamentos ou dispositivos foram desenvolvidos em Curitiba e fabricados em São Paulo, na unidade industrial da PROTENDE, FIGURA 3.1.

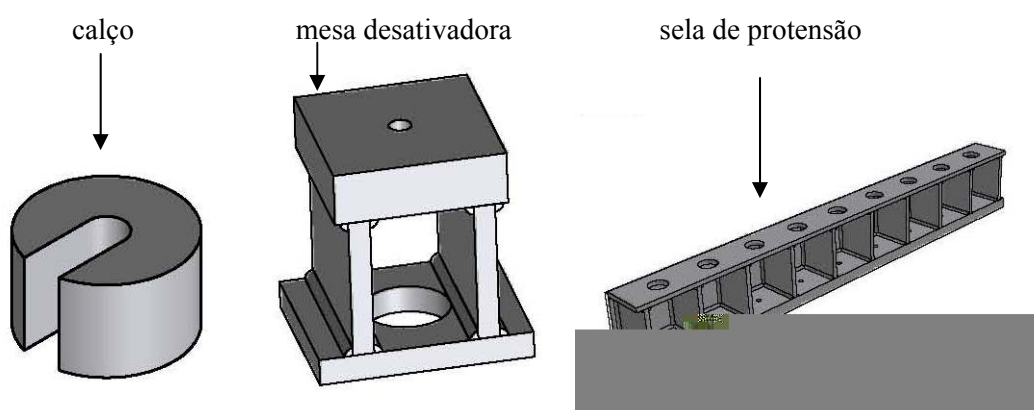


FIGURA 3.1: DESENHOS DOS DISPOSITIVOS AUXILIARES

As premissas básicas do experimento foram rigorosamente seguidas nas lajes ensaiadas.

As etapas a seguir descritas definem o programa experimental estabelecido para os referidos ensaios:

- Dimensionamento da laje a ser ensaiada, em concordância com a norma técnica NBR 6118, vigente no país.
- Seleção da empresa fornecedora do concreto usinado (pré-misturado), fornecido no mercado da RMC.

- Detalhamento das formas das lajes, a serem executadas.
- Aquisição dos materiais necessários: madeira serrada, compensados, pregos, desmoldante, aço para armadura passiva, aço para armadura ativa, etc...
- Dosagem de um traço experimental para atender a resistência mecânica da calda de cimento a ser utilizada na injeção das bainhas, após a aplicação das forças de protensão.
- Busca de empresas parceiras para minimização dos investimentos necessários à execução dos ensaios.

3.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Por se tratar de um experimento que envolve materiais com características muito variáveis, são muitos os fatores que podem influenciar os resultados desses ensaios.

A fim de direcionar e manter o foco desta pesquisa, e observar os resultados inerentes às hipóteses inicialmente formuladas, foram estabelecidas algumas variáveis independentes (aquelas cujos fatores podem ser controlados), tais como:

- características específicas do aço de protensão.
- a força de protensão a ser aplicada ao aço de protensão.
- a resistência mecânica à compressão do concreto.
- a resistência mecânica à compressão da calda de cimento para a injeção.
- a resistência mecânica do concreto (mínima) para que se possa aplicar as forças de protensão, f_{ckj} com $j \geq 7$ dias.
- a resistência mecânica da calda de cimento (mínima) para que se possa efetuar o alívio das forças de protensão, f_{ckj} com $j \geq 7$ dias.

Com o intuito de se obter um universo maior de observações e se efetuar uma análise estatística mais consistente dos resultados, confeccionaram-se 03 (três) lajes protótipos, com dimensões de 19 cm x 140 cm x 760 cm, conforme TABELA 3.1 e FIGURA 3.2.

Não se ensaiaram as lajes de forma simultânea, de tal maneira que eventuais erros observados durante o processo de execução na primeira laje, pudessem ser corrigidos nos protótipos subseqüentes.

O dimensionamento das lajes foi efetuado pelo eng^o Jorge Luiz Silka Pereira, do escritório de cálculo PROCALC Estruturas Ltda tendo como base os critérios da NBR 6118, conforme ANEXO 3.7.

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS LAJES

3.3.1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento e detalhamento da laje protótipo considerou uma protensão com cabos retilíneos, já que o objetivo principal é analisar o comportamento das ancoragens sob o efeito das forças de protensão.

Portanto, inicialmente, a laje foi submetida a forças de protensão, totalmente apoiada sobre a sua face inferior, para análise do comportamento das ancoragens.

As verificações se baseiam na Norma Brasileira ABNT NBR 6118 (2003) - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento.

A variação na disposição geométricas dos nichos de monitoramento é função de estudo de comprimentos de ancoragem, caso haja perda da força de protensão aplicada em cordoalhas, o que permite avaliar comprimentos diferentes entre os nichos e a borda da laje.

3.3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

A laje protótipo a ser ensaiada possui as seguintes características:

- espessura: $h = 19\text{cm}$
- largura: $b_w = 140\text{cm}$
- comprimento: $\ell = 760\text{cm}$

3.3.3 MATERIAIS E CRITÉRIOS UTILIZADOS

- Classe de agressividade ambiental II: agressividade moderada, ambiente urbano (laboratório), risco de deterioração da estrutura pequeno.
- Concreto classe C30 ($f_{ck} \geq 30\text{MPa}$).
- Armadura ativa: monocordoalha aderente de aço tipo CP 190 RB com diâmetro nominal de 12,7 mm em bainha metálica galvanizada.

$$A_s = 0,99\text{cm}^2 / \text{cordoalha}$$

$$f_{ptk} = 1.900\text{MPa} = 190\text{kN} / \text{cm}^2 \text{ (valor característico da resistência à tração do aço de protensão)}$$

$$E_p = 200\text{GPa} = 200.000\text{MPa} = 20.000\text{kN} / \text{cm}^2$$

- Armadura passiva: aços CA-60 e CA-50.

3.3.4 FORÇA DE PROTENSÃO

Para as dimensões adotadas da laje, foram distribuídas 9 cordoalhas em sua altura média, ancoradas em suas extremidades de acordo com o detalhe proposto por este trabalho.

A força de protensão na cordoalha na ocasião da protensão, considerando 80% da tensão máxima no aço de protensão, é de:

$$P_0 = 0,80 \times f_{ptk} \times A_s \quad (3.3.4.1)$$

$$P_0 = 0,80 \times 190 \times 0,99 = 150,48 \text{ kN} \approx 150 \text{ kN} / \text{cordoalha}$$

A força total de protensão na laje, para 9 cordoalhas, é de:

$$P_0 = 9 \times 150 = 1.350 \text{ kN} = 135 \text{ tf} = 135.000 \text{ kgf}$$

3.3.5 VERIFICAÇÃO DO E.L.U. NO ATO DA PROTENSÃO

De acordo com o item 17.2.4.3 da Norma Brasileira ABNT NBR 6118 (2003), admite-se que a segurança em relação ao estado limite último no ato da protensão seja verificada no estágio I (concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais) desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- a) a tensão máxima de compressão na seção de concreto, obtida através das solicitações ponderadas de $\gamma_p = 1$ e $\gamma_f = 1,0$ não deve ultrapassar 70% da resistência característica $f_{ck,j}$ prevista para a idade de aplicação da protensão;
- b) a tensão máxima de tração do concreto não deve ultrapassar 1,2 vezes a resistência à tração $f_{ct,m}$ correspondente ao valor $f_{ck,j}$ especificado;
- c) quando nas seções transversais existirem tensões de tração, deve haver armadura de tração calculada no estágio II. Para efeitos de cálculo, nessa fase da construção, a força nessa armadura pode ser considerada igual à resultante das tensões de tração no concreto no estágio I. Essa força não deve provocar, na armadura correspondente, acréscimo de tensão superiores a 150 MPa no caso de fios ou barras lisas e a 250 MPa em barras nervuradas.

Considerando $f_{ck,j}$ com $j = 28$ dias, isto é, $f_{ck,j} = f_{ck} = 30$ MPa, tem-se então as seguintes tensões limites:

Tensão máxima de compressão:

$$\sigma_{c,máx} = 0,7 f_{ckj} = 0,7 \times 30 = 21 \text{ MPa} \quad (3.3.5.1)$$

Tensão máxima de tração:

$$\sigma_{t,máx} = 1,2 f_{ct,m} \quad (3.3.5.2)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,3 \times 30^{2/3} = 2,90 \text{ MPa} \quad (3.3.5.3)$$

$$\sigma_{t,máx} = 1,2 \times 2,90 = 3,48 \text{ MPa}$$

As tensões atuantes são calculadas pela equação geral das tensões (estádio I):

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (3.3.5.4)$$

No ato da protensão, não existirão momentos fletores, pois há uma protensão retilínea e a laje totalmente apoiada. Portanto apenas as forças de protensão, produzirão tensões de compressão:

$$P = \gamma_p \times N_{ao} = 1,1 \times 1.350 = 1.485 \text{ kN} = 148,50 \text{ tf} = 148.500 \text{ kgf} \quad (3.3.5.5)$$

$$A = b_w \times h = 140 \times 19 = 2.660 \text{ cm}^2 \quad (3.3.5.6)$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{1.485}{2.660} = 0,558 \text{ kN} / \text{cm}^2 = 5,58 \text{ MPa} < \sigma_{c,máx}$$

Portanto atende ao E.L.U. no ato da protensão, segundo o critério simplificado da Norma Brasileira ABNT NBR 6118 (2003).

3.3.6 CÁLCULO DAS PERDAS

- Perdas imediatas por atrito:

$$P_{(x)} = P_0 \times e^{-(\mu\alpha+kx)} \quad (3.3.6.1)$$

onde:

$P_{(x)}$: força atuante no cabo a uma distância x

P_0 : força inicial aplicada na extremidade do cabo

α : somatório dos ângulos de inflexão do cabo, não considerada a inclinação inicial α_0

μ : coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha

k : coeficiente de perdas por metro provocadas por curvas não intencionais do cabo

sendo:

$$P_0 = 150,48 \text{ kN}$$

$$\alpha = 0 \text{ (cabo retilíneo)}$$

$$\mu = 0,20 \text{ (para fios lisos paralelos ou trançados e bainha metálica)}$$

$$k = 0,001 \text{ (adotado)}$$

$$P_{(x)} = 150,48 \times e^{-(0,20 \times 0,00 + 0,001x)} = 150,48 \times e^{-0,001x}$$

Para:

$$x = 0 \quad P_{(x=0)} = 150,48 \text{ kN}$$

$$x = \ell/2 = 3,80 \text{ m} \quad P_{(x=3,80)} = 149,91 \text{ kN}$$

$$x = \ell = 7,60 \text{ m} \quad P_{(x=7,60)} = 149,34 \text{ kN}$$

3.3.7 CÁLCULO DO ALONGAMENTO (de ancoragem a ancoragem)

Força média de protensão:

$$P_{med} = \frac{P_{(x=0)} + P_{(x=\ell)}}{2} = \frac{150,48 + 149,34}{2} = 149,91 \text{ kN} \quad (3.3.7.1)$$

Alongamento teórico:

$$\Delta \ell = \frac{P_{med} \times \ell}{E_p \times A_s} = \frac{149,91 \times 760}{20.000 \times 0,99} = 5,75 \text{ cm} \quad (3.3.7.2)$$

ou seja, uma deformação $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{57,5}{7,60} = 7,57 \text{ mm} / \text{m}$ (3.3.7.3)

3.3.8 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PASSIVAS

A taxa de armadura mínima é de:

$$\rho_{min} = 0,15\% \times \rho_p \approx 0 \quad (3.3.8.1)$$

Adotado $\rho = 0,05\% A_c$

$$A_{s,min} = 0,0005 \times 19 \times 100 = 0,95 \text{ cm}^2 / \text{m por face} \quad (3.3.8.2)$$

Armadura adotada: 1 ϕ 5,0 c/20 cm

3.4 CRONOGRAMA DOS ENSAIOS

Foi elaborado um fluxograma de atividades básicas a serem desenvolvidas durante o experimento, para possibilitar uma macro visão dos caminhos a serem percorridos em cada fase dos ensaios, FIGURA 3.2.

Esse fluxograma serviu como ferramenta de apoio para a definição de um cronograma, mesmo sem um detalhamento minucioso, no qual se estabeleceram algumas datas importantes a fim de cumprir o prazo para a defesa desta pesquisa.

Essa ferramenta também serviu de base para que se fizesse uma previsão de um tempo de utilização das dependências cedidas pelo LAME, FIGURA 3.3.

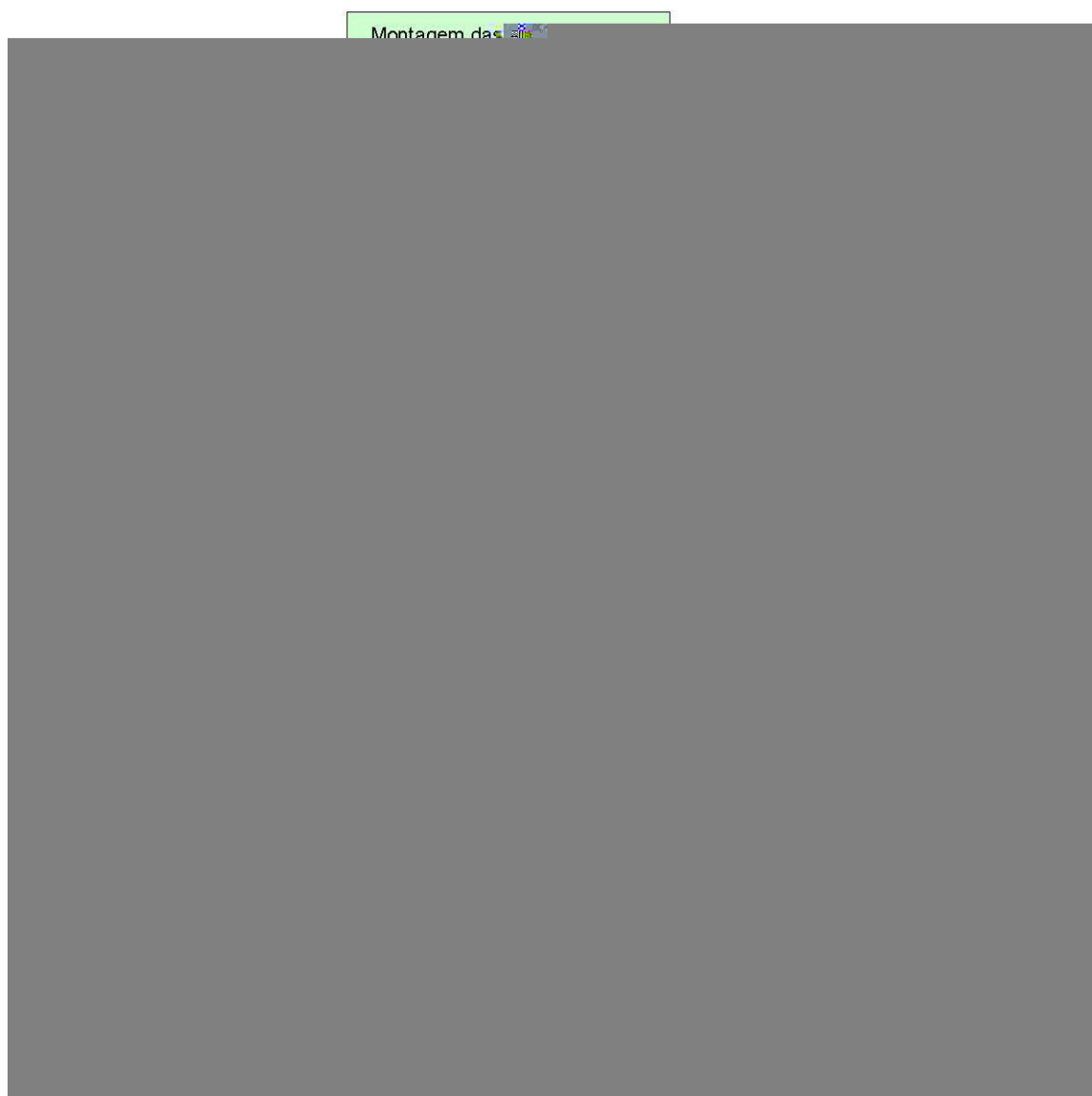


FIGURA 3.2: FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES



FIGURA 3.3: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.5.1 CONCRETO

O concreto utilizado foi do tipo pré-misturado, fornecido a título de parceria, pela empresa Concrebrás S.A., do grupo Itambé S.A.

A seqüência da mistura adotada pela empresa, e que gerou o traço de concreto aprovado e utilizado nas lajes ensaiadas, foi a seguinte:

- água (60%)
- aditivo
- agregado graúdo
- agregado miúdo
- cimento
- água (40% no local de aplicação do concreto)

A pré-mistura dos componentes foi executada em uma CDC - Central Dosadora de Concreto, que é a responsável pela dosagem dos materiais componentes do concreto - MCC, com posterior transferência para o caminhão betoneira com capacidade de até 8 m³.

Nesse tipo de central, a mistura e a homogeneização do concreto são efetuadas no próprio caminhão betoneira, antes de seguir para o destino final de aplicação, FOTOS 3.1 e 3.2.



FOTO 3.1: CENTRAL DOSADORA

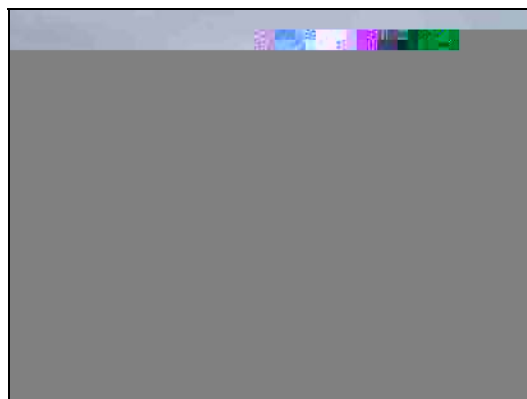


FOTO 3.2: CAMINHÃO BETONEIRA

Essas centrais são compostas basicamente por silos de cimento, reservatórios para água e aditivos, balança de cimento e agregados, hidrômetros, compressores e transportadores de correia ou abastecimento para pesagem na balança diretamente com pá carregadeira (tipo Tow Go).

A central dosadora com capacidade produtiva de aproximadamente 60 m³/h, utilizada pela Concrebrás, é totalmente automatizada e o controle do traço e respectivos volumes são feitos através de digitação dos dados em um micro computador, FOTO 3.3.



FOTO 3.3: CONTROLE AUTOMATIZADO

A TABELA 3.1 mostra alguns dados relativos ao concreto utilizado nas lajes do experimento.

TABELA 3.1: DADOS DA MISTURA E DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

	L1, L2 e L3
Temperatura (°C)	26°C
Slump (cm)	80 ± 10
f_{ck}	30 MPa
Cimento CP II - Z - 32	327 kg/m ³
Água	178 l/m ³
Brita 1 - Itambé	975 kg/m ³
Brita 2 - Novabrita	177 kg/m ³
Areia fina - Bassani	296 kg/m ³
Areia industrial - Itambé	461 kg/m ³
Aditivo Mira RT - 86	1,96 l/m ³

- CIMENTO

O cimento utilizado foi o tipo Portland CP II - Z - 32, fornecido a granel pela Cia Itambé, proveniente de uma mesma partida de fabricação.

Os ensaios de caracterização física, química e mecânica do cimento são realizados constantemente pelo laboratório da própria indústria e um dos modelos adotados consta no ANEXO 3.1.

- AGREGADO MIÚDO

Como agregados miúdos foram utilizadas areias naturais e areias industriais provenientes da Região Metropolitana de Curitiba, cuja caracterização e curva granulométrica são constantemente avaliadas pelo laboratório da própria empresa fornecedora do concreto. Um dos modelos dessas análises encontra-se na tabela do ANEXO 3.2.

- AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado foi o disponibilizado pelas mineradoras da Região Metropolitana de Curitiba, cuja caracterização e curva granulométrica são constantemente avaliadas pelo laboratório da própria empresa fornecedora do concreto e um dos modelos dessas análises encontra-se na tabela do ANEXO 3.3.

- ADITIVOS

O aditivo utilizado foi o Mira RT - 86, industrializado pela GRACE Construction Products, cuja ficha com as características específicas de uso encontra-se no ANEXO 3.4.

- ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água de amassamento utilizada na dosagem foi a água potável fornecida diretamente pela rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR.

3.5.2 AÇOS

Foram utilizados aços para armadura passiva e ativa, do tipo CA (concreto armado) para armadura passiva e CP (concreto protendido) para armadura ativa, em consonância ao estabelecido no projeto estrutural.

- AÇO CA-50 e CA-60

São aços utilizados como armadura passiva, com resistências características à tração equivalentes a 5.000 kgf/cm² e 6.000 kgf/cm² respectivamente.

Neste experimento as lajes foram projetadas com a utilização de aços com bitolas de 5, 10 e 12,5 mm de diâmetros nominais.

O ANEXO 3.8 mostra os resultados dos aços CA que foram ensaiados no laboratório do LAME/LACTEC.

Esses aços foram adquiridos cortados e dobrados de acordo com a especificação do projeto estrutural.

- AÇO CP 190 RB

Aço utilizado como armadura ativa, com resistência característica a tração

A dosagem ideal foi obtida através de ensaios realizados no laboratório do LAME/LACTEC, obedecendo aos parâmetros pré-estabelecidos no projeto estrutural.

A seqüência da mistura do traço ensaiado foi a seguinte:

- água
- aditivo
- cimento

Os materiais foram misturados em um misturador de eixo vertical do tipo Skymesen, modelo LAR-08, com capacidade de 8 litros e uma potência de 0,6 CV.

Foram utilizados os seguintes componentes:

- cimento: CP II - F - 32
- aditivo: flowcable, da BASF
- aditivo: adiment premium, da Otto Baumgart
- água: a fornecida diretamente pela SANEPAR

As FOTOS 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 ilustram os ensaios de mistura, fluidez, expansão, exsudação, moldagem e rompimento dos corpos de prova e os ANEXOS 3.5 e 3.6 mostram as fichas técnicas correspondentes aos aditivos utilizados.



FOTO 3.4: ENSAIO DE CALDA



FOTO 3.5: ENSAIO DE CALDA



FOTO 3.6: ENSAIO DE CALDA



FOTO 3.7: ENSAIO DE CALDA FOTO 3.8: ENSAIO DE CALDA FOTO 3.9: ENSAIO DE CALDA

A TABELA 3.3 mostra os resultados das dosagens das caldas (01 e 02) de cimento para injeção, elaboradas com o aditivo flowcable, nas dependências do LAME/LACTEC.

TABELA 3.3: RESULTADOS DAS CALDAS ENSAIADAS

	Calda 01	Calda 02
Temperatura ambiente	23 °C	21 °C
Temperatura da mistura	23,5 °C	21,7 °C
Cone de Marsh (fluidez)	10,33 seg	8,81 seg
Exsudação	0,00 %	0,00 %
Expansão	0,62 %	0,87 %
f_{cj} com j = 3 dias	39,43 MPa	30,73 MPa
f_{cj} com j = 7 dias	40,13 MPa	34,58 MPa
f_{cj} com j = 28 dias	43,43 MPa	39,43 MPa

O traço da calda utilizada com o aditivo Adiment Premium foi desenvolvido através de anos de experiência de campo da PROTENDE, e repetido para este experimento com as mesmas características dos utilizados em obras de concreto protendido, acompanhadas por laboratórios como os de Furnas, CESP, entre outros.

3.6 EXECUÇÃO DAS LAJES PARA ENSAIO

A logística de utilização do espaço das instalações do laboratório do LAME fez parte desta pesquisa, uma vez que foram necessários pouco mais de 50 m² do espaço disponível, além de possibilitar o acesso de um caminhão betoneira, próximo ao local disponibilizado, o qual ficaria com uso restrito deste experimento por um prazo de aproximadamente 150 dias.

As lajes protótipos foram executadas de acordo com os dados geométricos constantes no projeto estrutural elaborado pela Procalc.

Uma vez definido o local e o espaço para a execução das lajes, procedeu-se a aquisição de materiais para a execução das formas das mesmas.

Foi executado um barroteamento sobre o piso existente, com caibros de pinus com 2" x 4" x 250 cm, com espaçamento de 35 cm, sobre os quais foram dispostas as folhas de compensado resinado fenólico com cola branca e com espessura de 10 mm, medindo 110 x 220 cm, formando a base geral abrangendo as três lajes.

As formas laterais e frontais foram executadas com o mesmo tipo de compensado, utilizando-se sarrafos de pinus de 1" x 2" com inclinação de 45°, para os travamentos e enrijecimentos frontais.

Caibros de pinus de 2" x 4" foram utilizados para a separação longitudinal das lajes L1, L2 e L3, como ilustram as FOTOS 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13.



FOTO 3.10: EXECUÇÃO DAS FORMAS



FOTO 3.11: EXECUÇÃO DAS FORMAS



FOTO 3.12: EXECUÇÃO DAS FORMAS

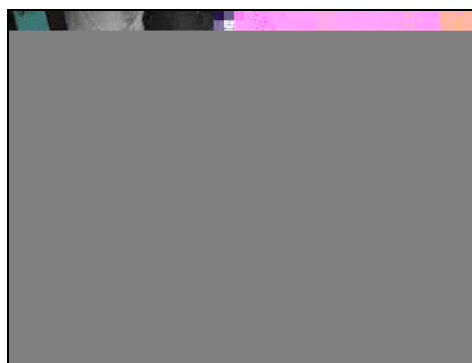


FOTO 3.13: EXECUÇÃO DAS FORMAS

Todas as superfícies de contato com o concreto receberam a aplicação de uma camada de cera líquida para formas de concreto (desmoldante) da marca Desmol C, fabricado pela Vedacit, com o intuito de facilitar os trabalhos posteriores de desforma das lajes, FOTOS 3.14 e 3.15.

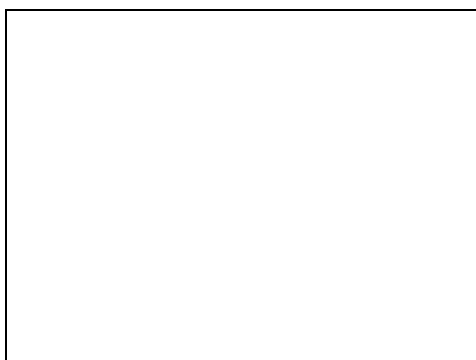


FOTO 3.14: DESMOLDANTE



FOTO 3.15: DESMOLDANTE

Após a montagem e conferência dimensional das formas, distribuiu-se a primeira malha da armadura passiva (camada inferior), constituída por barras de aço CA-50 e CA-60.

O aço da armadura passiva foi adquirido cortado e dobrado em conformidade com o projeto estrutural, sendo necessária apenas sua montagem; o que foi feito utilizando-se arame recozido nº 18 para o correto posicionamento das barras de aço.

As furações necessárias à passagem das bainhas metálicas (FOTOS 3.16 e 3.17) foram executadas preliminarmente nas formas frontais das lajes, com uma serra copo com diâmetro nominal de 32 mm, fixada na extremidade de uma furadeira manual tipo Bosh, com o eixo coincidente exatamente com as posições previstas para a disposição das cordoalhas.



FOTO 3.16: EXTREMIDADE FORMAS



FOTO 3.17: EXTREMIDADE FORMAS

As bainhas metálicas foram posicionadas vazias sobre a camada inferior da armadura passiva, devidamente fixadas na altura da linha neutra da laje, com o intuito de se evitar a introdução de esforços indesejados de flexão durante o processo de aplicação das forças de protensão.

Posteriormente a esse posicionamento procedeu-se a montagem da segunda malha da armadura passiva, constituída por aço CA-50 e CA-60, a ser colocada na camada superior da laje, FOTOS 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21.

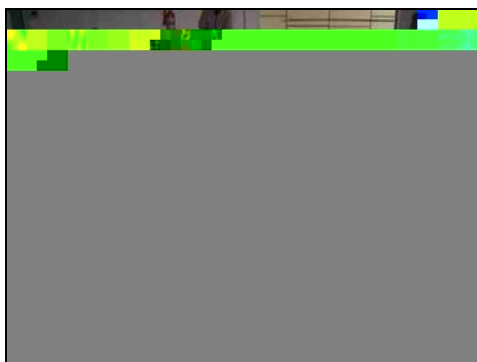


FOTO 3.18: ARMAÇÃO DAS LAJES



FOTO 3.19: ARMAÇÃO DAS LAJES



FOTO 3.20: ARMAÇÃO DAS LAJES



FOTO 3.21: ARMAÇÃO DAS LAJES

Para garantir os recobrimentos preconizados pela NBR 6118 (2003), item 7.4.7.6, vide TABELA 3.4 abaixo, foram utilizados dois tipos de espaçadores.

TABELA 3.4: CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E COBRIMENTO NOMINAL PARA $\Delta c = 10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

FONTE: ABNT NBR 6118, 2003. Item 7.4.7.6. Tabela 7.2

Para os cobrimentos previstos com dimensão de 25 mm, foram utilizadas pastilhas em contato com as formas laterais e de fundo; os espaçadores de formato triangular, com 70 mm de altura, sobre os quais se colocou uma barra de aço com diâmetro de 10 mm, serviram de apoio das bainhas, para manter o eixo das mesmas coincidentes com a linha neutra da laje, FOTOS 3.22 e 3.23 e desenho esquemático da FIGURA 3.4.



FOTO 3.22: ESPAÇADORES



FOTO 3.23: ESPAÇADORES

FIGURA 3.4: DESENHO ESQUEMÁTICO DO RECOBRIMENTO

Essas pastilhas ou espaçadores de argamassa foram fornecidos a título de parceria pela empresa JACP - Produtos Industrializados.

Nos pontos previamente estabelecidos para se efetuarem as medições e monitoramento das deformações das cordoalhas durante o processo de aplicação das forças de protensão e/ou alívio dessas forças, foram executadas pequenas formas de madeira, com intuito de formar nichos vazados de 75 x 150 mm, seguindo aproximadamente as coordenadas do projeto estrutural, FOTOS 3.24 e 3.25.



FOTO 3.24: FORMA DOS NICHOS



FOTO 3.25: FORMA DOS NICHOS

Posteriormente a concretagem das lajes as posições dos nichos foram devidamente catalogadas em relação ao eixo “X” das mesmas, conforme demonstrado na TABELA 3.5 e FIGURA 3.5.

TABELA 3.5: POSICIONAMENTO DOS NICHOS EM RELAÇÃO AO EIXO “X”

Cordoalhas	medida "X" (mm)		
	Laje 01	Laje 02	Laje 03
C1	1663	1790	1703
C2	902	911	924
C3	1150	1144	1140
C4	1407	1466	1419
C5	922	930	906
C6	1410	1458	1428
C7	930	1171	1116
C8	1143	925	892
C9	1685	1758	1723



FIGURA 3.5: ESQUEMA DO POSICIONAMENTO DOS NICHOS EM RELAÇÃO AO EIXO “X”

Para evitar qualquer tipo de problema durante o processo de concretagem das lajes, como por exemplo, um eventual entupimento das bainhas com nata de cimento oriunda do próprio concreto, o que poderia comprometer os ensaios, as armaduras ativas (aço CP) foram introduzidas posteriormente à concretagem, momentos antes de serem aplicadas as forças de protensão.

Os purgadores, constituídos por uma mangueira tipo cristal com diâmetro nominal de 12,7 mm e com parede de espessura igual a 2 mm, foram posicionados nas extremidades de cada bainha e mantidos em posição vertical para que não sofressem danos durante o lançamento do concreto, o que causaria problemas quando fossem utilizados, FOTOS 3.26 e 3.27.



FOTO 3.26: COLOCAÇÃO DE PURGADORES

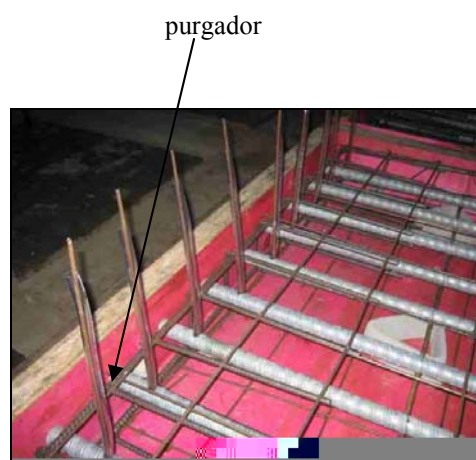


FOTO 3.27: COLOCAÇÃO DE PURGADORES

Purgador é a denominação dos tubos por onde se efetuam as operações de injeção da calda de cimento nas bainhas.

São sempre dispostos nas extremidades dos cabos e em pontos intermediários, no caso de cabos longos, FIGURA 3.6.

Somente após uma verificação minuciosa e conferência de todas as etapas anteriormente descritas procedeu-se a programação com a empresa fornecedora do concreto, para acertar os detalhes da entrega, confirmando todas as características do concreto a ser aplicado.

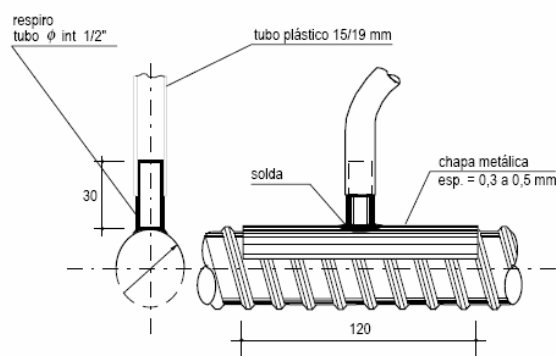


FIGURA 3.6: DESENHO ESQUEMÁTICO DO PURGADOR

FONTE: Concreto Protendido - Fundamentos Básicos - VERÍSSIMO e KLÉOS, 1998

Com a chegada do caminhão betoneira, o procedimento adotado “antes” do descarregamento do concreto foi o de conferir os dados constantes da nota fiscal e executar o ensaio expedito do slump test e posterior moldagem de corpos de prova, para caracterização das resistências mecânicas nas idades estabelecidas, FOTO 3.28.

O descarregamento, depois de autorizado, foi executado através de carrinhos de mão colocados sob a bica do caminhão betoneira e levados diretamente ao local de aplicação do concreto.



FOTO 3.28: SLUMP TEST

A concretagem ocorreu de maneira criteriosa, lançando o concreto diretamente nas formas das lajes e tomando o cuidado para evitar danos quanto ao posicionamento das bainhas, FOTOS 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34.

O concreto foi vibrado mecanicamente através do uso de vibrador de imersão elétrico, com mangote ou agulha de diâmetro nominal de 32 mm.

Durante o processo de vibração foi tomado cuidado especial para evitar o contato do mangote com as bainhas, o que exerceria pressão sobre as mesmas podendo ocasionar deslocamentos indesejados ou danos à sua integridade, possibilitando eventual infiltração de nata de cimento do próprio concreto, prejudicando os resultados dos ensaios.

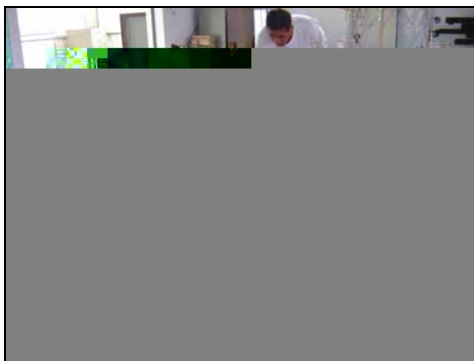
As superfícies das lajes foram simplesmente desempenadas e receberam água durante o processo de cura, caracterizando uma cura úmida do concreto.



FOTOS 3.29: CONCRETAGEM DAS LAJES



FOTO 3.30: CONCRETAGEM DAS LAJES



FOTOS 3.31: CONCRETAGEM DAS LAJES



FOTO 3.32: CONCRETAGEM DAS LAJES



FOTO 3.33: CONCRETAGEM DAS LAJES



FOTO 3.34: CONCRETAGEM DAS LAJES

A desforma ocorreu normalmente, após um período de cura de uma semana e as superfícies do concreto foram analisadas visualmente para verificar eventuais falhas de concretagem ou vibração insuficiente (bicheiras), o que não ocorreu.

Os nichos previstos para leituras também foram desformados e limpos para possibilitar o acesso aos mesmos, FOTO 3.35.

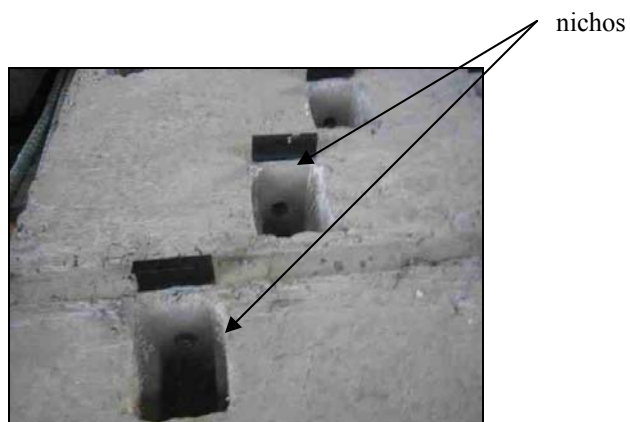


FOTO 3.35: NICHOS DESFORMADOS

3.7 EXTENSÔMETROS

Os extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões de um material em variações equivalentes em sua resistência elétrica.

Algumas das principais características dos extensômetros são:

- alta precisão de medição;
- pequeno tamanho e baixo peso;
- excelente resposta a fenômenos dinâmicos;
- excelente linearidade;
- fácil de se utilizar desde que conhecida a boa técnica;
- possibilita a medida em locais remotos.

O princípio de funcionamento de um extensômetro está baseado em que se que dado material é tracionado, a força aplicada ao material é proporcional à deformação na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a deformação.

O extensômetro está baseado no fato que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem deformações.

A força gerada internamente no material, para contrabalançar a ação externa, possui uma magnitude que por unidade de área é chamada de tensão.

A tensão, portanto é um tensor com magnitude, direção e face de aplicação, expresso em kgf/cm^2 , ou qualquer outra relação de força por unidade de área.

Normalmente os materiais possuem a propriedade de se alongarem quando tracionados e de encolherem quando comprimidos.

Supondo um material tracionado com uma quantidade de alongamento Δl e com um comprimento original de l , a relação $\Delta l/l$ é designada de deformação e é adimensional.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.7.1)$$

Se tomarmos como exemplo uma amostra de aço doce submetido a um ensaio de tração, vê-se que a tensão é proporcional à deformação entre a origem e o ponto “a”, onde se obtém uma inclinação praticamente linear.

Essa é a chamada região elástica onde se aplicam os princípios da lei de Hooke, GRÁFICO 3.1.

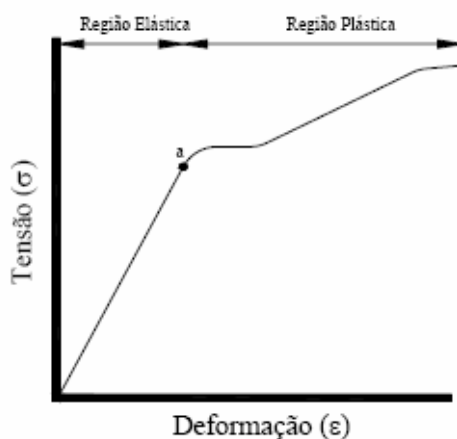


GRÁFICO 3.1: GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO AÇO CA

FONTE: Extensometria Básica - ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004

No gráfico acima a relação tensão x deformação na região elástica é dada pela seguinte equação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad \text{onde:} \quad (3.7.2)$$

σ é a tensão;

ε é a deformação; e

E é uma constante de proporcionalidade que é chamada de módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.

Os extensômetros elétricos utilizados neste experimento foram os do tipo PA-06-125BA-120LEN, conforme FIGURA 3.7 e FOTOS 3.36 e 3.37.

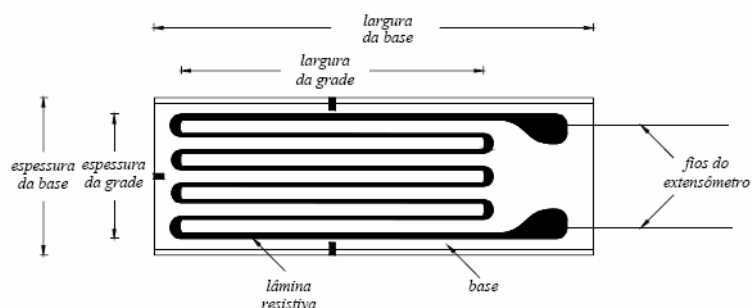


FIGURA 3.7: MODELO GENÉRICO DE UM EXTENSÔMETRO
 FONTE: Extensometria Básica - ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004



FOTO 3.36: EXTENSÔMETROS



FOTO 3.37: EXTENSÔMETROS

Os extensômetros foram adquiridos da empresa Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda, e sua nomenclatura tem o significado da FIGURA 3.8.

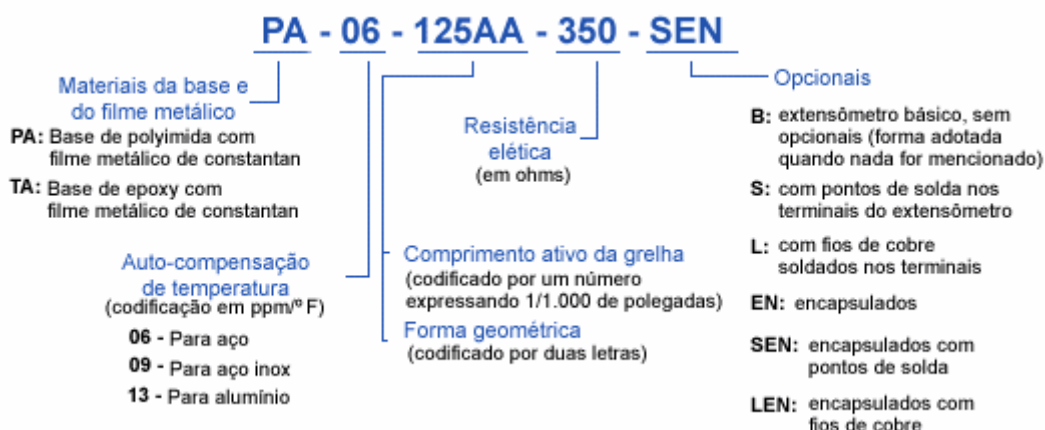


FIGURA 3.8: NOMENCLATURA DE UM EXTENSÔMETRO EXCEL SENSOR
 FONTE: Excel Sensores Ind. Com. e Exp. Ltda, 2006

Os extensômetros foram colados em um dos fios helicoidais da cordoalha, com adesivo superbond, e suas superfícies foram protegidas com uma camada de silicone transparente.

A posição de colagem foi definida em função da distância do nicho à face da laje, uma vez que sua fixação ocorreu antes da enfição das cordoalhas nas bainhas, FOTO 3.38; também foi considerado um deslocamento da ordem de 60 mm que ocorreria com a aplicação das forças de protensão.

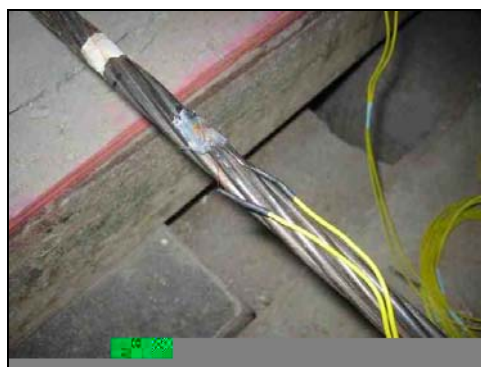


FOTO 3.38: COLAGEM DE EXTENSÔMETROS

Os cabos ligados aos extensômetros foram conectados a um Data Logger, modelo Kyowa, de onde foram obtidas leituras iniciais de referência de cada extensômetro, FOTOS 3.39 e 3.40.



FOTO 3.39: LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

FOTO 3.40: LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

O “fator de sensibilidade” dos extensômetros é igual a 2,02 e foi fornecido pelo fabricante, FOTO 3.41.

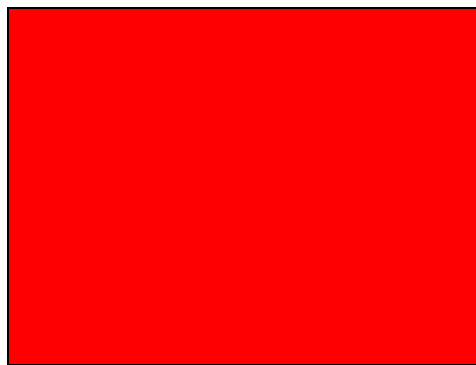


FOTO 3.41: FATOR DE SENSIBILIDADE

Os valores fornecidos pelo Data Logger referem-se a deformações, que numericamente são obtidas através da fórmula:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{10^6} \times \frac{f_{dl}}{f_s} \quad (3.7.3)$$

onde:

L_f é a leitura final do aparelho

L_i é a leitura inicial do aparelho

f_{dl} é o fator do aparelho

f_s é o fator de sensibilidade

10^6 é uma constante de deformação do aço

3.8 PROTENSÃO

Após a cura do concreto e confirmação da característica mecânica obtida através do rompimento do corpo de prova em uma prensa EMIC MAC-012, de acordo com as prescrições da NBR 5739/94, nas dependências do LAME/LACTEC, foram iniciados os preparativos para aplicação das forças de protensão previstas no projeto estrutural.

O aço utilizado como armadura ativa foi o CP 190 RB com diâmetro nominal de 12,7 mm, fabricado pela Cia Siderúrgica Belgo Mineira.

As cordoalhas foram fornecidas pela PROTENDE - Métodos e Serviços de Construção Ltda e vieram cortadas e enroladas em comprimentos de 10,00 m com o respectivo ensaio do lote, fornecido pelo fabricante, de onde foram obtidas a seção e o módulo de elasticidade reais das cordoalhas.

Os alongamentos teóricos previstos em projeto foram devidamente corrigidos, levando-se em conta a seção e o módulo de elasticidade teóricos e reais das cordoalhas (TABELA 3.2, pág 97), através do fator:

$$\frac{E_{pt} \times A_{st}}{E_{pr} \times A_{sr}} \times \Delta \ell_t = \Delta \ell_r \quad \frac{200 \times 0,99}{195 \times 100,1} \times 7,57 = 7,68 mm \quad (3.8.1)$$

Antes de se iniciar a colocação das cordoalhas no interior das bainhas, no processo escolhido de pós-enfição, foi confirmada a total desobstrução das mesmas com passagem de ar e um guia, uma vez que a obstrução poderia ter ocorrido durante o lançamento do concreto, apesar dos cuidados tomados.

O conjunto de 09 (nove) cordoalhas, após devidamente preparado, com a colagem dos extensômetros nos pontos estrategicamente definidos para acompanhar as leituras de deformações do aço, foi cuidadosamente introduzido nas bainhas para não danificar a colagem dos dispositivos instalados.

No momento em que as cordoalhas das lajes L1 e L3 chegavam às aberturas dos nichos, as mesmas recebiam o dispositivo de medição manual, desenvolvido para este experimento, FOTO 3.42.

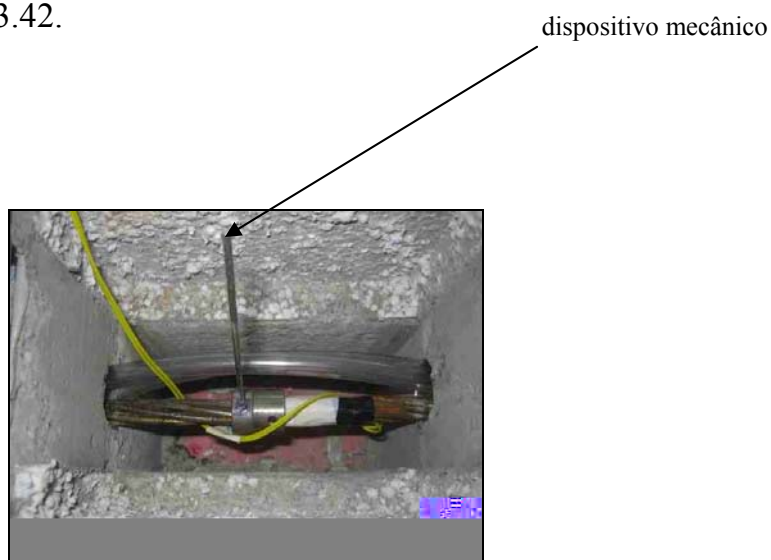


FOTO 3.42: DISPOSITIVO MECÂNICO

A força de protensão especificada em projeto foi aplicada nas cordoalhas e controlada através do acompanhamento da medida das deformações das mesmas, e também através da pressão manométrica do fluxo contínuo de óleo que circula pelo conjunto macaco x bomba.

A protensão foi efetuada prevendo-se uma distribuição simétrica dos esforços gerados pela aplicação das cargas de projeto e a apresentação dos resultados obtidos devidamente tabelados obedece a seqüência real do experimento.

A bomba utilizada para acionamento do macaco hidráulico é de alta pressão e acionada por comando elétrico.

Conhecendo-se a área do pistão do macaco hidráulico (embolo), a qual deve ser fornecida pelo fabricante do equipamento, pode-se determinar a pressão manométrica a ser aplicada, através da fórmula:

$$P_m = \frac{P_i}{A_{mac}} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (3.8.2)$$

O manômetro utilizado possui um intervalo de graduação com nível de precisão de 10 kgf/cm², o que equivale a 0,472 tf ou 3,15% da força de protensão a ser aplicada.

A agulha de leitura do manômetro está imersa em glicerina líquida para evitar que haja um deslocamento brusco da mesma, o que pode comprometer a aferição do manômetro.

A aferição do manômetro foi realizada pelo laboratório da PROTENDE, conforme FOTO 3.43.

AFERIÇÃO - DATA 05/10/2006			
BOMBA N° 76 - BOMBA N° 138729			
ÁREA DO MACACO = 200			
PREL. TEOR.	PREL. NOM.	PREL. REAL	
50	50.0	40	
100	100.0	90	
150	150.0	140	
200	200.0	180	

FOTO 3.43: AFERIÇÃO MANOMÉTRICA

Os incrementos de pressão, para leituras das deformações do aço, foram estabelecidos em intervalos de 50 kgf/cm², equivalentes a uma força de protensão de 2.360 kgf até se atingir a carga final de 15.000 kgf.

As leituras de deformações foram efetuadas para cada incremento de força aplicada, podendo ser lançadas em um gráfico de tensão x deformação, cuja característica é sua linearidade.

Esse gráfico identifica claramente eventuais anomalias de comportamento ou erros de leitura, quando essa linearidade não é verificada na plotagem dos dados.

Em função da impossibilidade de se efetuar uma leitura inicial com o macaco hidráulico devidamente posicionado e com carga nula, a correção dos deslocamentos medidos no aço de protensão entre 0 kgf/cm² e a primeira leitura com 50 kgf/cm² é realizada através de uma regressão linear simples (GRÁFICO 3.2), ou por semelhança de triângulos através do coeficiente angular:

$$\hat{y} = a + bx \quad (3.8.3)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad ; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad ; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.8.4)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \times \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.8.5)$$

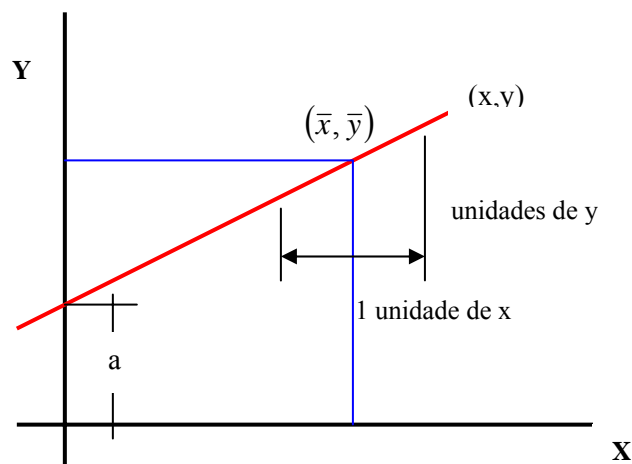


GRÁFICO 3.2: REGRESSÃO LINEAR

Quando $x = 0 \therefore y = a$, e quando $a = 0$ a reta corta a origem

Um modelo de ficha de acompanhamento de campo, utilizada em obras, consta do ANEXO 3.14.

As leituras manuais foram realizadas da maneira tradicionalmente efetuada em obras e também com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de centésimo de milímetro.

Além das leituras do tipo convencionais, normalmente efetuadas em obras, todos os extensômetros foram utilizados com leituras ininterruptas durante o processo de aplicação de cargas de protensão, medindo constantemente a deformação das cordoalhas a cada incremento de força.

Essas leituras nos trazem informações complementares e inerentes ao ensaio, tais como a influência da aplicação de carga em uma cordoalha vizinha da outra já tensionada, em uma mesma seção de laje.

Com o planejamento dos ensaios concluído e com os parâmetros de coleta de dados estabelecidos, foi possível elaborar uma matriz de controles a serem efetuados nas observações das deformações tanto do concreto quanto do aço de protensão.

Na matriz desenvolvida é possível visualizar as informações que se pretende obter desta pesquisa.

As leituras correspondentes aos alongamentos das cordoalhas de 01 à 09 das lajes L1, L2 e L3 foram efetuados como demonstrado na TABELA 3.6, na qual estão resumidas apenas as leituras referentes aos intervalos especificados de aplicação da força de protensão.

TABELA 3.6: CONTROLE DE DEFORMAÇÕES DO AÇO

Pressão	CORDOALHA "XX" - LAJE "00"							
	Macaco		Sela		Nicho		Extensômetro	
0	X	X	X	X	X	X	X	X
50		X		X		X		
100								
150								
200								
250								
250		X		X		X		
300								
318								
alívio								
passiva								
alongamento								
fator correção								
efetivo								

A TABELA 3.7 mostra o modelo adotado para anotar as medidas das lajes,

concreto, características mecânicas da armadura passiva, entre outros e constam dos anexos.

Esses dados não fazem parte da análise dos resultados e conclusões desta pesquisa específica quanto à hipótese a ser confirmada, porém corroboram a eficiência do experimento devido aos parâmetros pré-estabelecidos.

3.9 INJEÇÃO DA CALDA DE CIMENTO

Uma vez concluída a etapa de aplicação das forças de protensão na totalidade das cordoalhas de cada laje do experimento, o procedimento seguinte é a vedação dos espaços vazios existentes entre as cordoalhas e as bainhas, tanto nas extremidades ativa e passiva quanto nas aberturas dos nichos de leitura e monitoramento.

Nos nichos de observação, em função da necessidade de interromper a continuidade das bainhas, foi preciso criar uma ponte de ligação de uma extremidade à outra das mesmas (FOTO 3.45), com um pedaço de mangueira cristal, para possibilitar o fluxo contínuo da calda de cimento em toda a extensão da bainha.

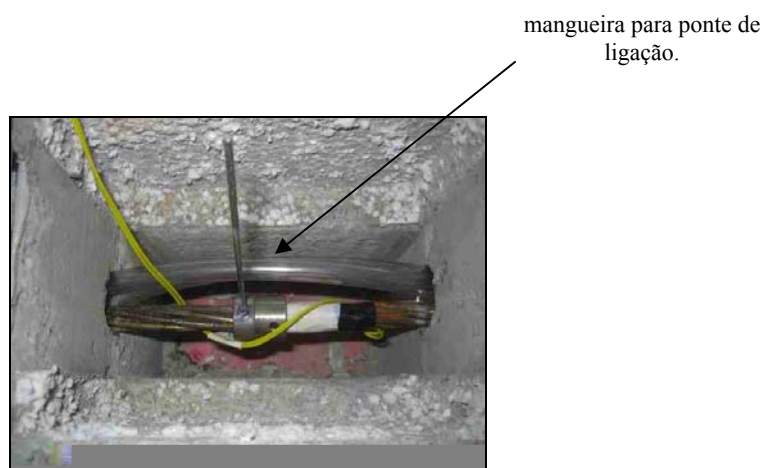


FOTO 3.45: PONTE DE LIGAÇÃO PARA INJEÇÃO

O objetivo das vedações (FOTO 3.46) é o de garantir a plena estanqueidade do conjunto bainha x cordoalha para o sucesso do total preenchimento dos vazios pela calda de cimento e conseqüente proteção do aço contra a corrosão.

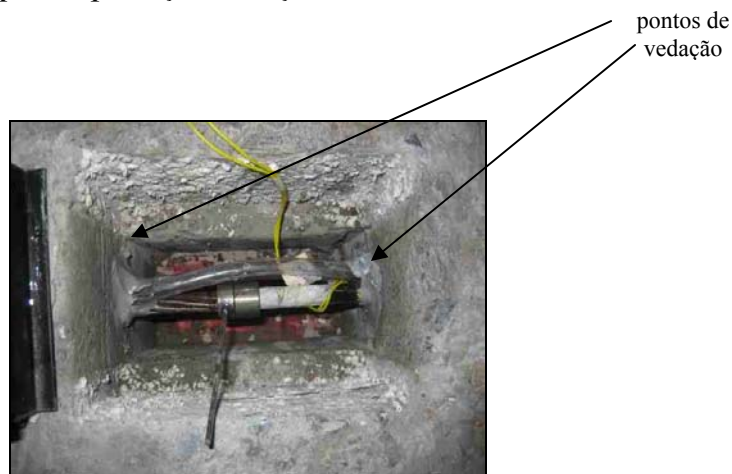


FOTO 3.46: VEDAÇÃO DOS ESPAÇOS VAZIOS COM DUREPOXI

O volume de calda de cimento necessário para o preenchimento dos vazios é fornecido pela seguinte expressão:

$$V = \frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2) \times \ell \quad (3.9.1)$$

onde:

V = volume

π = constante de valor 3,1415

D = diâmetro externo da bainha

d = diâmetro externo da cordoalha

ℓ = comprimento total da bainha

Da fórmula se obtém que cada cabo monocordoalha consumirá 5,15 ℓ de calda de cimento, ou 47 ℓ /laje ensaiada.

O procedimento adotado foi o de se iniciar a injeção através do purgador da extremidade ativa, só considerando satisfatória quando a calda de cimento no purgador oposto saia com características compatíveis com a que estava sendo injetada.

A injeção propriamente dita foi executada através de uma bomba injetora de fluxo contínuo, com a nata de cimento previamente dosada em laboratório e que teve seus parâmetros controlados durante a operação de injeção, com moldagem de corpos de prova.

Um dos controles mais fáceis de ser executado, além do tempo de mistura e dos componentes utilizados, é o tempo de fluidez que é medido no cone de Marsh.

Esse tempo, estabelecido em ensaios preliminares, deve ser mantido como característica básica de entrada e saída da calda de cimento na bacia.

Ao concluir o processo de injeção, garantindo que a qualidade da nata que sai é igual a da nata que entra, fecham-se os purgadores e aplica-se uma pressão de injeção da ordem de 5 kgf/cm², que é controlada através de um manômetro com uma graduação de intervalo de leitura de 0,5 kgf/cm².

No período de cura da calda de cimento injetada no vazão existente entre a

3.10 RETIRADA DAS ANCORAGENS ATIVAS

Após o período de sete dias (168 horas) de cura da calda de cimento, os corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 5 cm de diâmetro nominal x 10 cm de altura, foram rompidos em uma prensa EMIC MAQ-005 de acordo com a NBR 7215/96 para a comprovação de que a mesma atingiu as características mecânicas estabelecidas em projeto.

O resultado positivo permite que se efetue a aplicação de uma força de protensão equivalente a inserida inicialmente.

Por todas as perdas ocorridas durante o processo, a força atuante deverá ser um pouco menor do que a força aplicada, o que gerará uma pequena deformação na ponta da cordoalha fora da bainha.

Uma das perdas que contribui positivamente é a perda por cravação ou acomodação das cunhas (item 2.5).

A aplicação dessa força será executada sobre um dispositivo denominado mesa de desprotensão, que permite o acesso ao calço, para sua retirada.

A pequena deformação da cordoalha, na ordem de milímetro, será suficiente para que se proceda a retirada do calço previamente colocado entre o bloco de ancoragem e a sela, eliminando totalmente a tensão existente naquele pequeno trecho de aproximadamente 280 mm.

Essa deformação da ordem de 2 mm, suficiente para retirada do calço, é obtida com a aplicação de uma força equivalente 15.000 kgf.

Uma vez não havendo mais tensão nesta região, torna-se fácil a retirada do bloco de ancoragem ativa, FOTO 3.47.

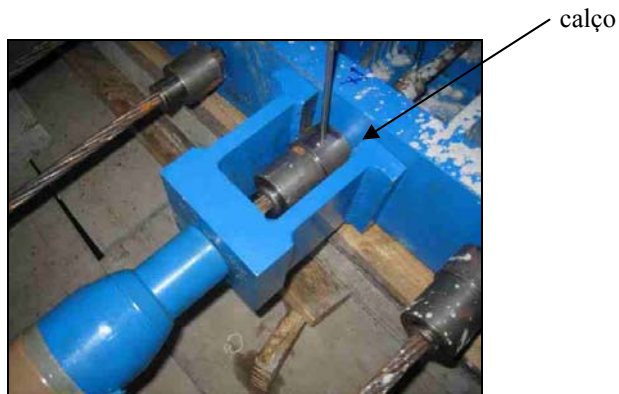


FOTO 3.47: PROCESSO DE DESATIVAÇÃO

Durante o processo de alívio das forças de protensão, imediatamente antes e após, assim como decorridos 14 dias da retirada dos calços, foram efetuadas novas medidas nos pontos de monitoramento.

Foram feitas marcas em todas as pontas das nove cordoalhas de cada laje, com uma distancia fixada em 594 mm para a laje L1 e 1.000 mm para as lajes L2 e L3, contados a partir da face do concreto da laje, antes de se proceder ao alívio das forças de protensão, FOTO 3.48.

Estas marcas serviram de referência para verificação de eventual escorregamento da cordoalha, o que significaria perda na força de protensão aplicada na armadura ativa, após a desprotensão.

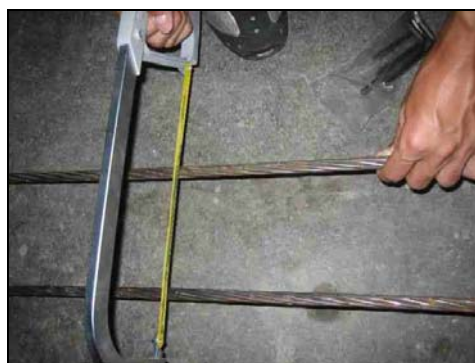


FOTO 3.48: MARCAÇÃO DAS CORDOALHAS

3.11 GERAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados gerados através de todas as observações efetuadas, tanto em leituras manuais como em leituras informatizadas foram devidamente alocados em planilhas que facilitaram a extração de gráficos e análise estatística; a FIGURA 3.10 ilustra os pontos de medições e a seqüência da aplicação das forças de protensão.

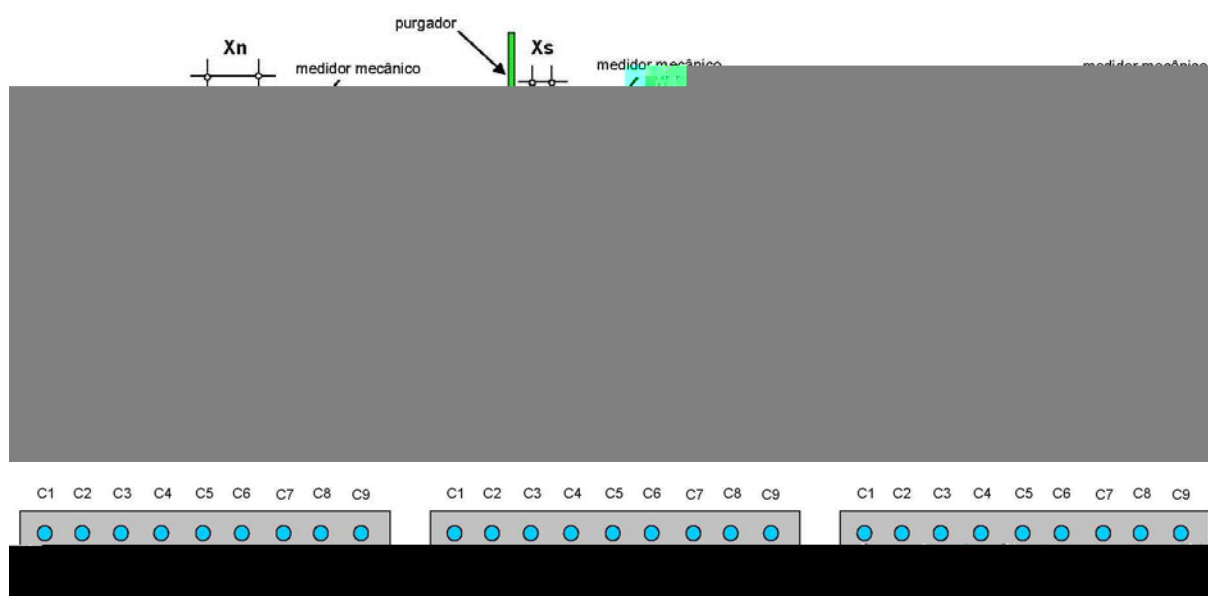


FIGURA 3.10: PONTOS DE MEDIÇÕES FÍSICAS

Da TABELA 3.9 à TABELA 3.35, nas próximas páginas, todas as medidas constantes nas colunas “macaco”, “nicho” ou “sela”, são expressas em milímetros. As colunas referentes ao “extensômetro” possuem leituras cujos números devem ser multiplicados pelo fator de correção, conforme descrito na fórmula 3.7.3, extensometria.

As pressões manométricas foram obtidas pela fórmula 3.8.2, resultando uma pressão máxima de 318 kgf/cm^2 .

LAJE L1

TABELA 3.9: CORDOALHA C5 L1

Pressão	CORDOALHA 5 - LAJE 01						
	macaco		sela		nicho		extens.
0	X	X	X	X	X	X	15,022
50	36	X	31	X	42	X	16,073
100	48	12	41	10	52	10	17,149
150	59	11	52	11	61	9	18,103
200	70	11	63	11	72	11	19,051
250	84	14	75	12	82	10	20,033
250	84	X	75	X	82	X	20,033
300	97	13	90	15	93	11	20,432
318	102	5	95	5	98	5	20,922
passiva	110		106				
teórico	61,0		59,0		52,0		
alongamento	62,0		60,0		52,0		
fator correção	73,6		71,2		61,7		
efetivo	63,6		61,2		51,7		

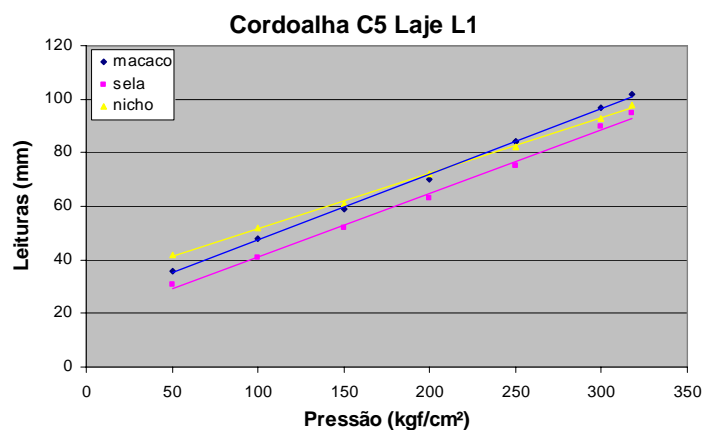


GRÁFICO 3.3: CORDOALHA C5 L1

TABELA 3.10: CORDOALHA C9 L1

Pressão	CORDOALHA 9 - LAJE 01						
	macaco		sela		nicho		extens.
0	X	X	X	X	X	X	6,526
50	37	X	40	X	33	X	8,148
100	48	11	51	11	43	10	9,217
150	61	13	63	12	52	9	9,744
200	73	12	77	14	62	10	10,697
250	85	12	89	12	72	10	11,329
250	85	X	89	X	72	X	11,329
300	96	11	99	10	82	10	11,641
318	103	7	104	5	86	4	12,258
passiva	90		85				
teórico	61,0		59,0		46,0		
alongamento	61,0		59,0		48,0		
fator correção	72,4		70,0		57,0		
efetivo	62,4		60,0		47,0		

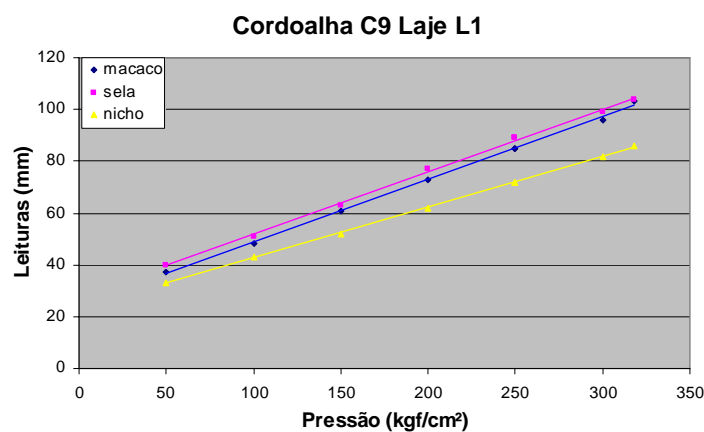


GRÁFICO 3.4: CORDOALHA C9 L1

TABELA 3.11: CORDOALHA C1 L1

Pressão	CORDOALHA 1 - LAJE 01							
	macaco	sela	nicho	extens.				
0	X	X	X	X	X	X	12,776	
50	40	X	47	X	34	X	13,896	
100	52	12	59	12	42	8	16,941	
150	64	12	70	11	53	11	*	
200	75	11	82	12	63	10	*	
250	88	13	92	10	72	9	*	
250	88	X	92	X	72	X	*	
300	99	11	103	11	81	9	*	
318	106	7	110	7	87	6	*	
							*	
passiva	80,0		75					
teórico	61,0		59,0					46,0
alongamento	61,0		58,0					48,0
fator correção	72,4		68,8					57,0
efetivo	62,4		58,8					47,0

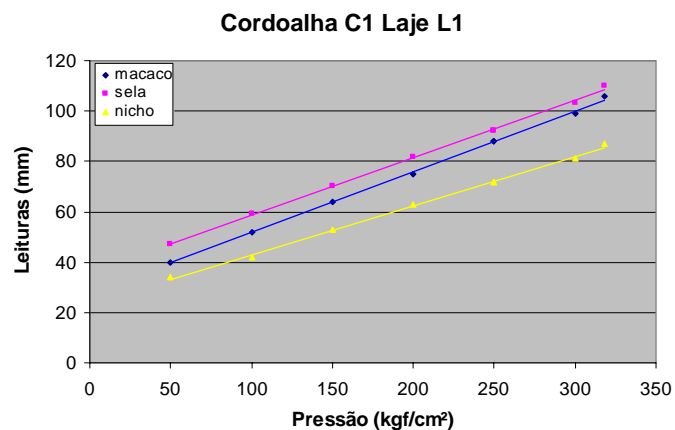


GRÁFICO 3.5: CORDOALHA C1 L1

TABELA 3.12: CORDOALHA C6 L1

Pressão	CORDOALHA 6 - LAJE 01							
	macaco	sela	nicho	extens.				
0	X	X	X	X	X	X	14,932	
50	38	X	44	X	38	X	16,586	
100	48	10	55	11	48	10	17,376	
150	61	13	67	12	58	10	18,041	
200	74	13	78	11	68	10	18,668	
250	87	13	91	13	79	11	19,433	
250	87	X	91	X	79	X	19,433	
300	99	12	102	11	87	8	20,202	
318	104	5	107	5	92	5	20,581	
passiva	81		76					
teórico	61,0		59,0					48,0
alongamento	61,0		58,0					49,0
fator correção	72,4		68,8					58,1
efetivo	62,4		58,8					48,1

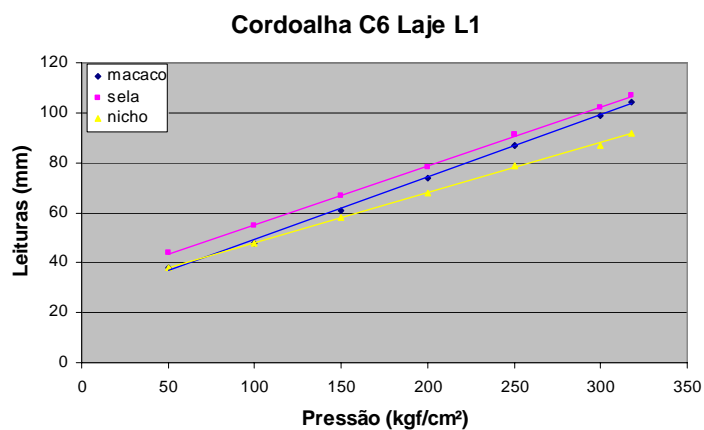


GRÁFICO 3.6: CORDOALHA C6 L1

TABELA 3.13: CORDOALHA C4 L1

Pressão	CORDOALHA 4 - LAJE 01						
	macaco	sela	nicho	extens.			
0	X	X	X	X	X	X	10,184
50	47	X	36	X	45	X	11,871
100	58	11	46	10	54	9	13,043
150	71	13	58	12	64	10	13,416
200	84	13	70	12	75	11	14,176
250	96	12	82	12	87	12	15,172
250	96	X	82	X	87	X	15,172
300	107	11	94	12	96	9	15,696
318	113	6	100	6	100	4	15,949
passiva	77		72				
teórico	61,0		59,0		48,0		
alongamento	61,0		59,0		50,0		
fator correção	72,4		70,0		59,3		
efetivo	62,4		60,0		49,3		

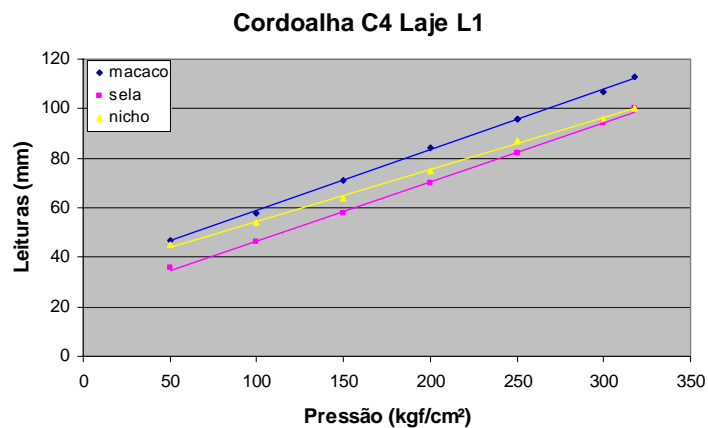


GRÁFICO 3.7: CORDOALHA C4 L1

TABELA 3.14: CORDOALHA C8 L1

Pressão	CORDOALHA 8 - LAJE 01						
	macaco	sela	nicho	extens.			
0	X	X	X	X	X	X	3,865
50	36	X	31	X	42	X	4,351
100	48	12	41	10	52	10	5,114
150	59	11	52	11	61	9	*
200	70	11	63	11	72	11	*
250	84	14	75	12	81	9	*
250	84	X	75	X	81	X	*
300	97	13	90	15	91	10	*
318	102	5	95	5	96	5	*
passiva	110		106				
teórico	61,0		59,0		50,0		
alongamento	62,0		60,0		50,0		
fator correção	73,6		71,2		59,3		
efetivo	63,6		61,2		49,3		

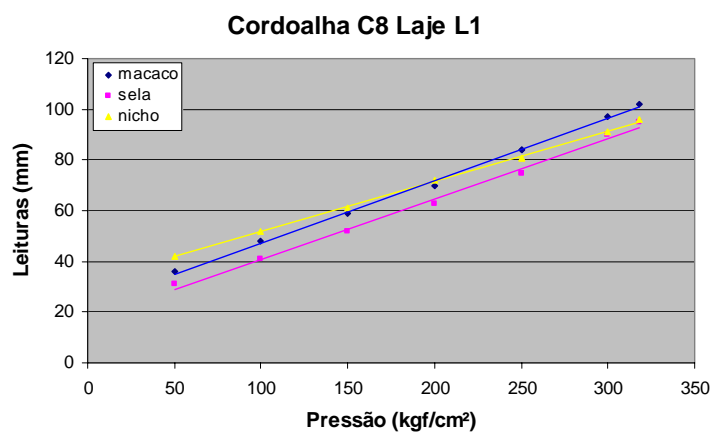


GRÁFICO 3.8: CORDOALHA C8 L1

TABELA 3.15: CORDOALHA C2 L1

Pressão	CORDOALHA 2 - LAJE 01						
	macaco	sela	nicho	extens.			
0	X	X	X	X	X	X	10,946
50	36	X	26	X	42	X	11,708
100	49	13	36	10	53	11	12,616
150	62	13	49	13	64	11	13,390
200	74	12	61	12	74	10	14,115
250	87	13	73	12	86	12	14,730
250	87	X	73	X	86	X	14,730
300	98	11	87	14	98	12	15,023
318	104	6	92	5	101	3	15,868
passiva	92		86				
teórico	61,0		59,0		52,0		
alongamento	62,0		60,0		53,0		
fator correção	73,6		71,2		62,9		
efetivo	63,6		61,2		52,9		

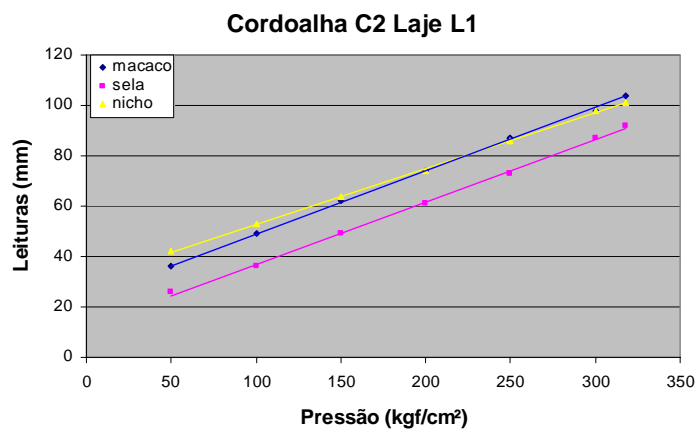


GRÁFICO 3.9: CORDOALHA C2 L1

TABELA 3.16: CORDOALHA C3 L1

Pressão	CORDOALHA 3 - LAJE 01						
	macaco	sela	nicho	extens.			
0	X	X	X	X	X	X	17,28
50	32	X	22	X	41	X	17,921
100	44	12	31	9	52	11	18,826
150	57	13	44	13	63	11	19,853
200	68	11	54	10	73	10	20,56
250	81	13	66	12	83	10	21,451
250	81	X	66	X	83	X	21,451
300	92	11	79	13	92	9	21,999
318	98	6	85	6	96	4	*
passiva	110		106				
teórico	61,0		59,0		50,0		
alongamento	62,0		59,0		51,0		
fator correção	73,6		70,0		60,5		
efetivo	63,6		60,0		50,5		

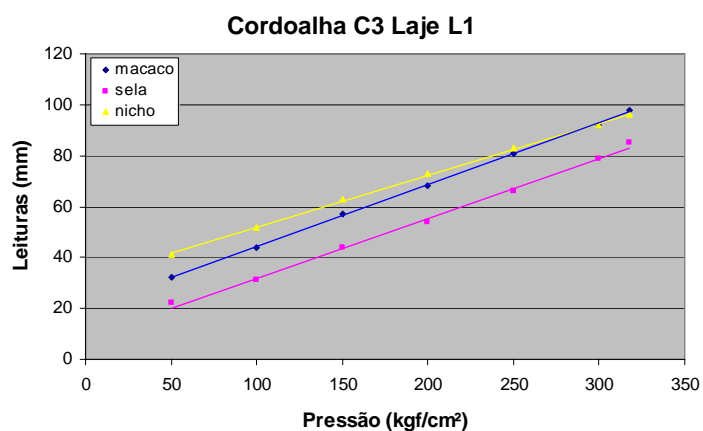


GRÁFICO 3.10: CORDOALHA C3 L1

TABELA 3.17: CORDOALHA C7 L1

Pressão	CORDOALHA 7 - LAJE 01						
	macaco	sela	nicho	extens.			
0	X	X	X	X	X	X	16,858
50	38	X	32	X	40	X	18,444
100	50	12	42	10	51	11	19,250
150	63	13	53	11	62	11	20,540
200	74	11	65	12	73	11	21,154
250	87	13	77	12	82	9	21,505
250	87	X	77	X	82	X	21,504
300	98	11	89	12	92	10	22,058
318	104	6	96	7	97	5	22,474
passiva	91		86				
teórico	61,0		59,0				52,0
alongamento	61,0		59,0				52,0
fator correção	72,4		70,0				61,7
efetivo	62,4		60,0				51,7

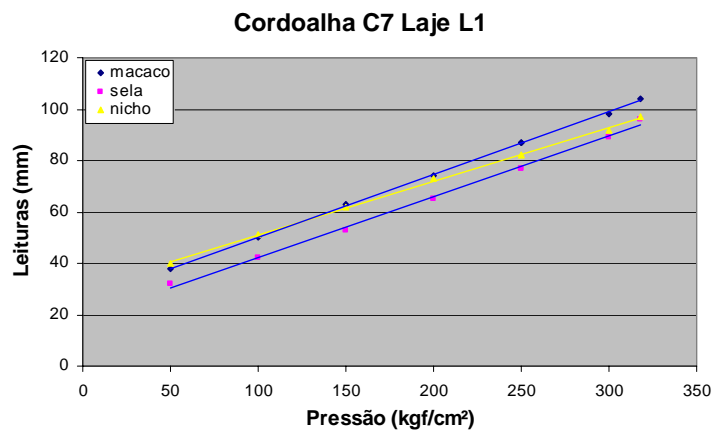


GRÁFICO 3.11: CORDOALHA C7 L1

LAJE L2

TABELA 3.18: CORDOALHA C5 L2

Pressão	CORDOALHA 5 - LAJE 02				
	macaco	sela	extens.		
0	X	X	X	X	16,280
50	24,9	X	24	X	17,250
100	37,3	12,4	34	10	18,200
150	49,2	11,9	45	11	18,910
200	60,1	10,9	56	11	19,400
250	73,2	13,1	68	12	20,290
250	73,2	X	68	X	20,290
300	84,3	11,1	79	11	21,020
318	90,1	5,8	85	6	21,450
passiva	89		86		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	62,2		58,0		
fator correção	73,8		68,8		
efetivo	63,8		58,8		

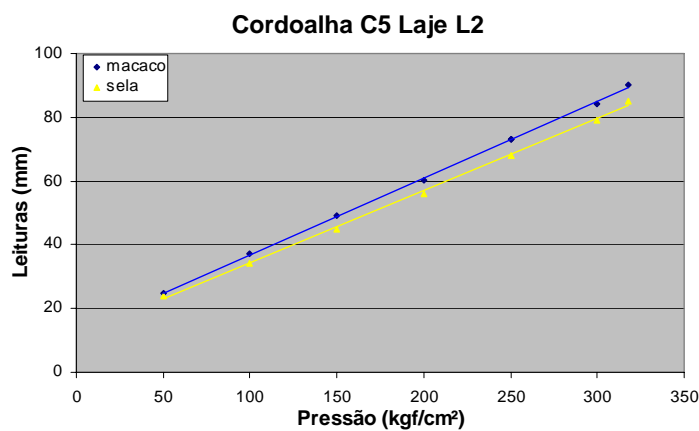


GRÁFICO 3.12: CORDOALHA C5 L2

TABELA 3.19: CORDOALHA C9 L2

Pressão	CORDOALHA 9 - LAJE 02				
	macaco	sela		extens.	
0	X	X	X	X	9,731
50	38,0	X	35	X	10,830
100	48,9	10,9	46	11	11,990
150	60,5	11,6	56	10	13,120
200	74,4	13,9	67	11	13,970
250	84,8	10,4	78	11	15,000
250	84,8	X	78	X	15,000
300	96,3	11,5	91	13	16,080
318	101,7	5,4	96	5	16,580
passiva	76		73		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	60,7		58,0		
fator correção	72,0		68,8		
efetivo	62,0		58,8		

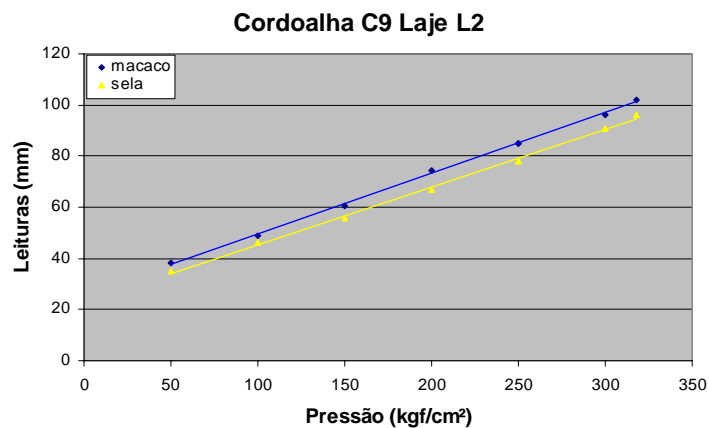


GRÁFICO 3.13: CORDOALHA C9 L2

TABELA 3.20: CORDOALHA C1 L2

Pressão	CORDOALHA 1 - LAJE 02				
	macaco	sela		extens.	
0	X	X	X	X	20.450
50	33,3	X	19	X	*
100	44,9	11,6	30	11	*
150	56,3	11,4	40	10	*
200	68,8	12,5	51	11	*
250	81,3	12,5	64	13	*
250	81,3	X	64	X	*
300	91,5	10,2	75	11	*
318	97,9	6,4	81	6	*
passiva	80		77		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	61,6		59,0		
fator correção	73,1		70,0		
efetivo	63,1		60,0		

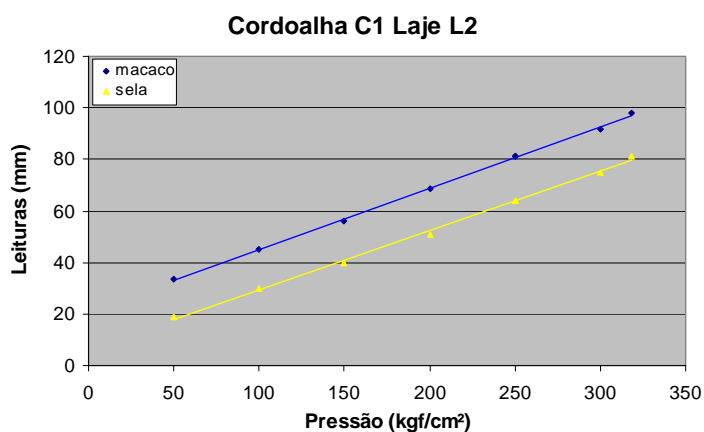


GRÁFICO 3.14: CORDOALHA C1 L2

TABELA 3.21: CORDOALHA C2 L2

Pressão	CORDOALHA 2 - LAJE 02				
	macaco	sela			extens.
0	X	X	X	X	10,046
50	26,8	X	19	X	11,220
100	37,7	10,9	29	10	12,500
150	50,5	12,8	42	13	13,250
200	62,2	11,7	54	12	14,500
250	73,7	11,5	66	12	14,900
250	73,7	X	66	X	14,900
300	85,2	11,5	77	11	15,780
318	91,4	6,2	82	5	16,370
passiva	73		70		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	61,6		60,0		
fator correção	73,1		71,2		
efetivo	63,1		61,2		

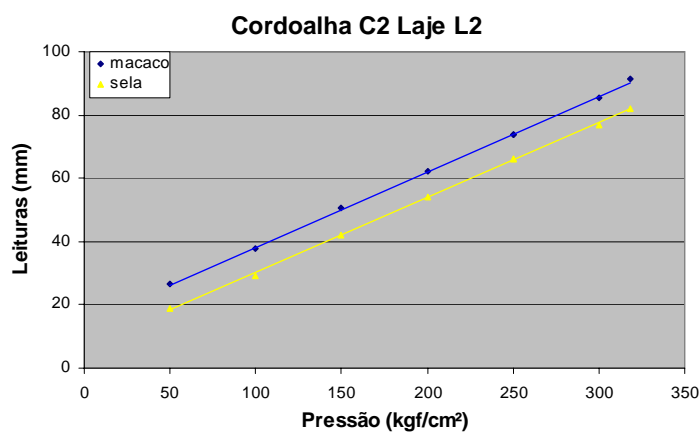


GRÁFICO 3.15: CORDOALHA C2 L2

TABELA 3.22: CORDOALHA C8 L2

Pressão	CORDOALHA 8 - LAJE 02				
	macaco	sela			extens.
0	X	X	X	X	14,425
50	25,0	X	32	X	15,550
100	36,0	11,0	44	12	16,800
150	47,8	11,8	54	10	17,300
200	59,5	11,7	65	11	18,300
250	69,5	10,0	75	10	19,350
250	69,5	X	75	X	19,350
300	82,6	13,1	87	12	20,050
318	89,4	6,8	93	6	20,600
passiva	90		87		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	61,4		58,0		
fator correção	72,9		68,8		
efetivo	62,9		58,8		

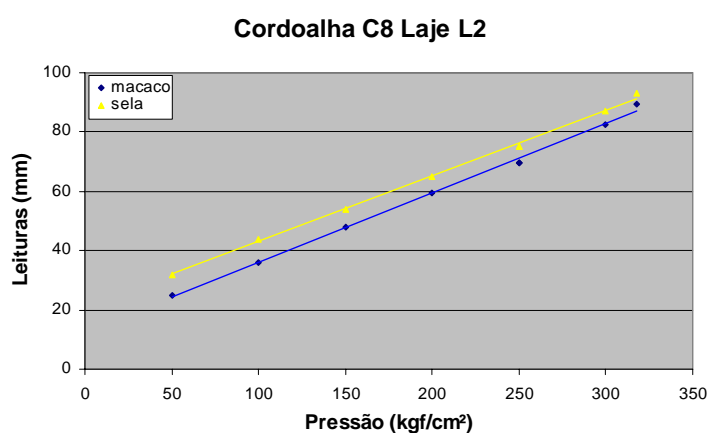


GRÁFICO 3.16: CORDOALHA C8 L2

TABELA 3.23: CORDOALHA C7 L2

Pressão	CORDOALHA 7 - LAJE 02				
	macaco	sela		extens.	
0	X	X	X	X	7,605
50	33,2	X	27	X	8,700
100	44,8	11,6	38	11	10,000
150	57,2	12,4	51	13	10,500
200	70,6	13,4	62	11	11,130
250	80,5	9,9	72	10	12,100
250	80,5	X	72	X	12,100
300	91,5	11,0	84	12	12,670
318	97,6	6,1	89	5	13,200
passiva	107		104		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	61,4		59,0		
fator correção	72,9		70,0		
efetivo	62,9		60,0		

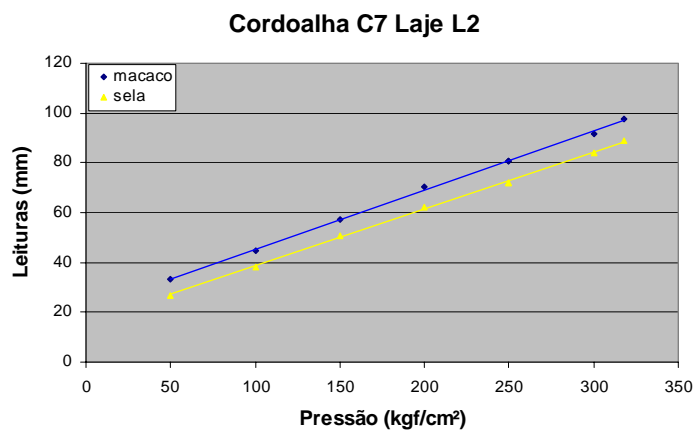


GRÁFICO 3.17: CORDOALHA C7 L2

TABELA 3.24: CORDOALHA C3 L2

Pressão	CORDOALHA 3 - LAJE 02				
	macaco	sela		extens.	
0	X	X	X	X	8,260
50	25,0	X	17	X	9,100
100	38,2	13,2	29	12	10,000
150	49,5	11,3	41	12	10,800
200	60,8	11,3	52	11	11,800
250	71,5	10,7	62	10	12,060
250	71,5	X	62	X	12,060
300	83,4	11,9	75	13	12,580
318	89,8	6,4	80	5	13,100
passiva	87		84		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	61,8		60,0		
fator correção	73,3		71,2		
efetivo	63,3		61,2		

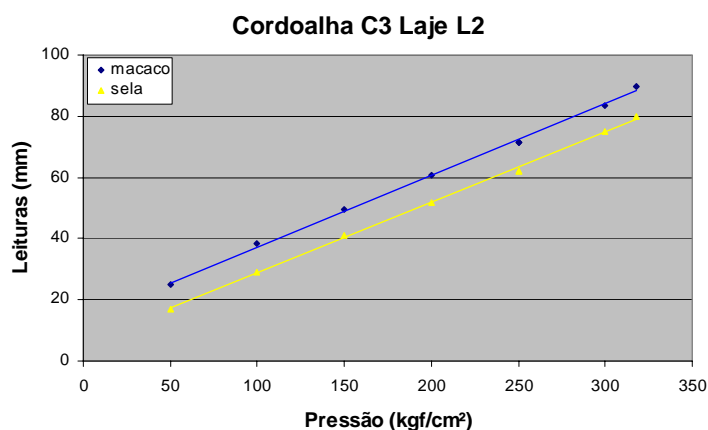


GRÁFICO 3.18: CORDOALHA C3 L2

TABELA 3.25: CORDOALHA C4 L2

Pressão	CORDOALHA 4 - LAJE 02				
	macaco	sela	extens.		
0	X	X	X	X	16,163
50	33,5	X	40	X	17,500
100	44,3	10,8	51	11	18,600
150	56,3	12,0	62	11	19,420
200	68,0	11,7	73	11	20,450
250	80,2	12,2	84	11	21,090
250	80,2	X	84	X	21,080
300	91,3	11,1	96	12	22,000
318	97,2	5,9	101	5	22,650
passiva	80		77		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	60,7		58,0		
fator correção	72,0		68,8		
efetivo	62,0		58,8		

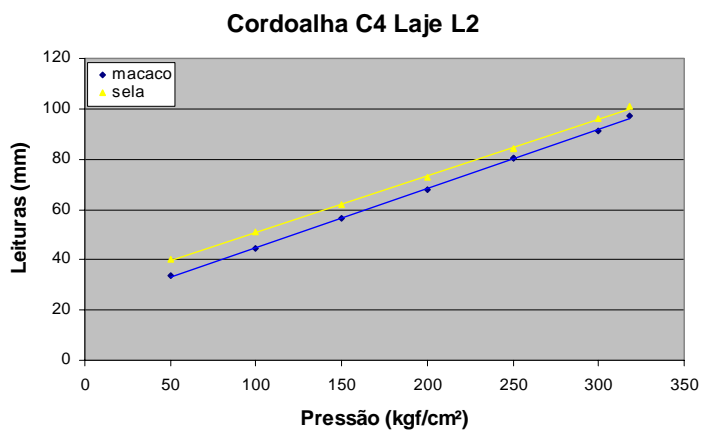


GRÁFICO 3.19: CORDOALHA C4 L2

TABELA 3.26: CORDOALHA C6 L2

Pressão	CORDOALHA 6 - LAJE 02				
	macaco	sela	extens.		
0	X	X	X	X	9,656
50	33,2	X	20	X	10,500
100	44,9	11,7	31	11	11,780
150	58,2	13,3	43	12	*
200	70,3	12,1	55	12	*
250	81,0	10,7	65	10	*
250	81,0	X	65	X	*
300	91,0	10,0	76	11	*
318	97,1	6,1	82	6	*
passiva	80		77		
teórico	61,0		59,0		
alongamento	60,9		59,0		
fator correção	72,3		70,0		
efetivo	62,3		60,0		

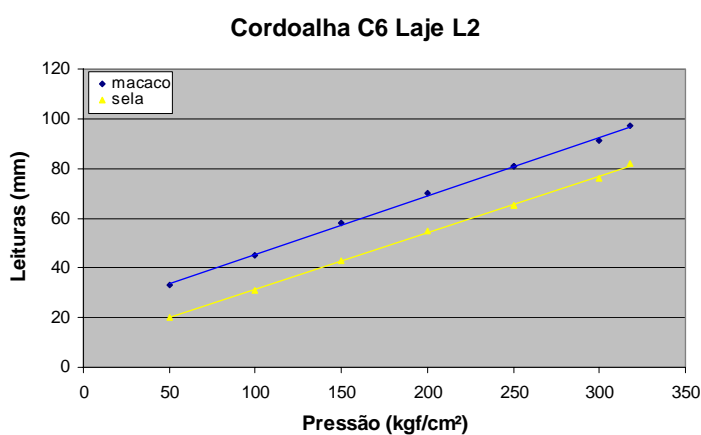


GRÁFICO 3.20: CORDOALHA C6 L2

LAJE L3

TABELA 3.27: CORDOALHA C5 L3

Pressão	CORDOALHA 5 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	2,633
50	34,0	X	44	X	3,530
100	45,3	11,3	55	11	4,630
150	58,6	13,3	66	11	5,100
200	70,8	12,2	75	9	6,200
250	83,2	12,4	85	10	6,580
250	83,2	X	85	X	6,510
300	95,3	12,1	95	10	7,690
318	99,6	4,3	100	5	8,260
passiva	85		81		
teórico	61,0		52,0		
alongamento	61,6		52,0		
fator correção	73,1		61,7		
efetivo	63,1		51,7		

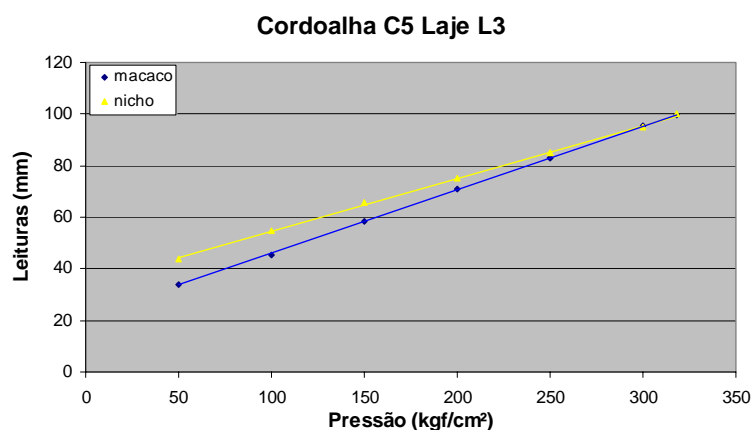


GRÁFICO 3.21: CORDOALHA C5 L3

TABELA 3.28: CORDOALHA C9 L3

Pressão	CORDOALHA 9 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	2,202
50	43,7	X	36	X	2,940
100	55,8	12,1	46	10	4,100
150	66,5	10,7	54	8	5,580
200	78,5	12,0	63	9	6,900
250	91,1	12,6	74	11	
250	91,1	X	74	X	
300	102,3	11,2	82	8	7,770
318	108,1	5,8	86	4	8,400
passiva	87		84		
teórico	61,0		46,0		
alongamento	61,4		47,0		
fator correção	72,9		55,8		
efetivo	62,9		45,8		

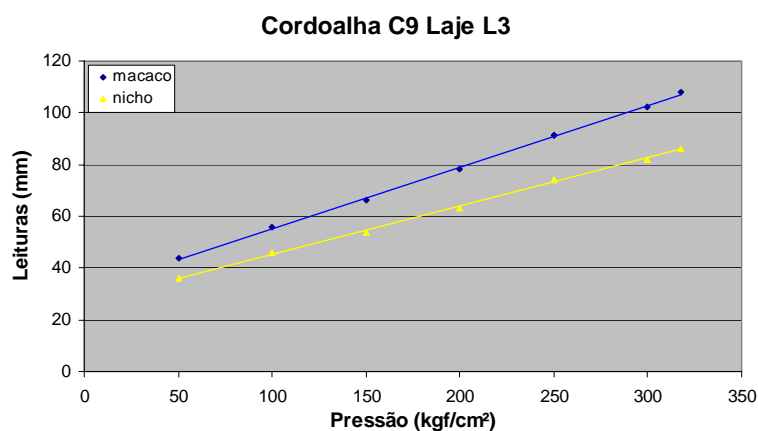


GRÁFICO 3.22: CORDOALHA C9 L3

TABELA 3.29: CORDOALHA C1 L3

Pressão	CORDOALHA 1 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	2,228
50	40,0	X	35	X	3,220
100	51,4	11,4	45	10	4,300
150	62,4	11,0	54	9	5,180
200	74,9	12,5	62	8	6,085
250	86,6	11,7	71	9	7,030
250	86,6	X	71	X	6,890
300	97,4	10,8	81	10	7,730
318	104,2	6,8	86	5	8,250
passiva	64		61		
teórico	61,0		46,0		
alongamento	61,2		48,0		
fator correção	72,6		57,0		
efetivo	62,6		47,0		

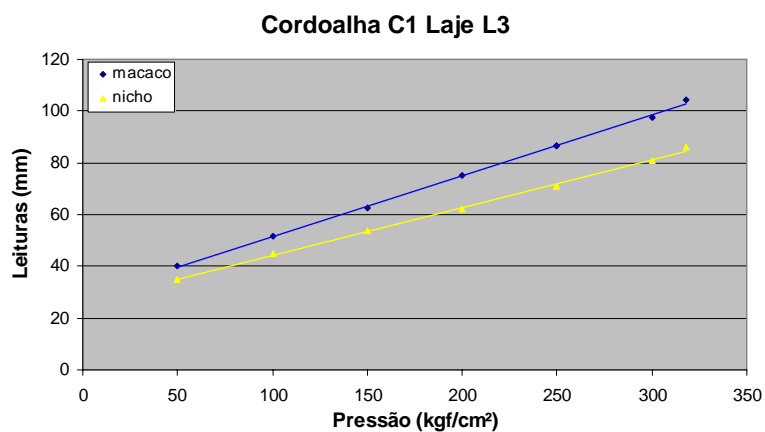


GRÁFICO 3.23: CORDOALHA C1 L3

TABELA 3.30: CORDOALHA C2 L3

Pressão	CORDOALHA 2 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	8,238
50	32,0	X	43	X	9,280
100	43,6	11,6	54	11	10,410
150	55,8	12,2	64	10	10,920
200	67,4	11,6	75	11	11,980
250	79,3	11,9	84	9	12,930
250	79,3	X	84	X	12,770
300	89,6	10,3	93	9	13,830
318	96,4	6,8	98	5	14,340
passiva	68		65		
teórico	61,0		52,0		
alongamento	61,4		52,0		
fator correção	72,9		61,7		
efetivo	62,9		51,7		

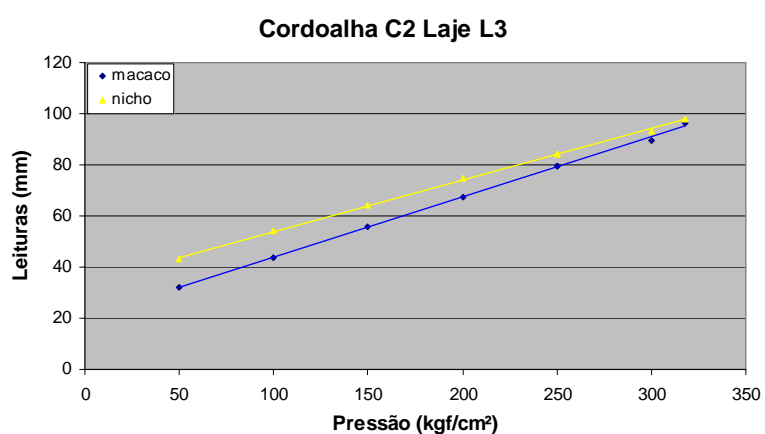


GRÁFICO 3.24: CORDOALHA C2 L3

TABELA 3.31: CORDOALHA C8 L3

Pressão	CORDOALHA 8 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	6,119
50	32,2	X	40	X	7,215
100	43,9	11,7	50	10	8,295
150	55,0	11,1	59	9	9,400
200	66,7	11,7	70	11	10,500
250	79,2	12,5	82	12	11,460
250	79,2	X	82	X	11,380
300	91,3	12,1	91	9	12,620
318	97,2	5,9	96	5	13,400
passiva	70		67		
teórico	61,0		52,0		
alongamento	62,0		53,0		
fator correção	73,6		62,9		
efetivo	63,6		52,9		

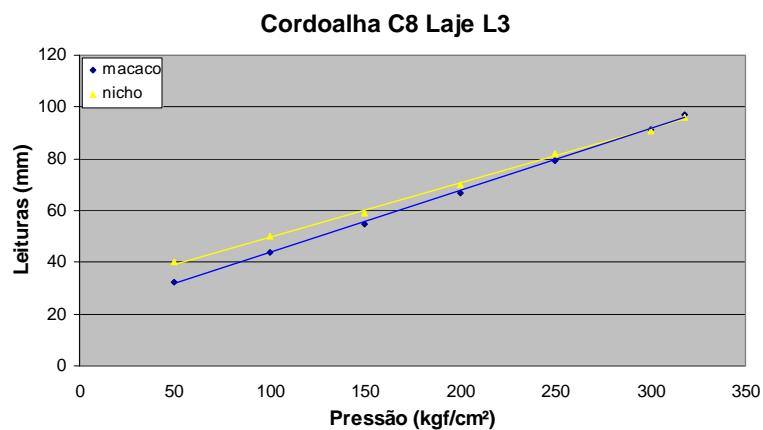


GRÁFICO 3.25: CORDOALHA C8 L3

TABELA 3.32: CORDOALHA C7 L3

Pressão	CORDOALHA 7 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	3,375
50	41,3	X	32	X	4,450
100	52,1	10,8	41	9	5,690

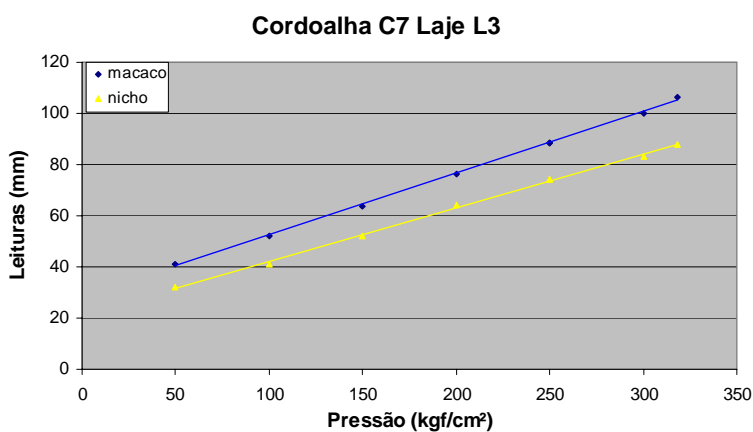


GRÁFICO 3.26: CORDOALHA C7 L3

TABELA 3.33: CORDOALHA C3 L3

Pressão	CORDOALHA 3 - LAJE 03				
	macaco	nicho	extens.		
0	X	X	X	X	4,703
50	42,0	X	36	X	5,700
100	52,8	10,8	45	9	6,840
150	64,8	12,0	56	11	7,160
200	77,4	12,6	66	10	8,140
250	89,1	11,7	77	11	9,060
250	89,1	X	77	X	8,780
300	100,3	11,2	86	9	9,330
318	106,5	6,2	91	5	9,650
passiva	69	66			
teórico	61,0	50,0			
alongamento	61,5	52,0			
fator correção	73,0	61,7			
efetivo	63,0	51,7			

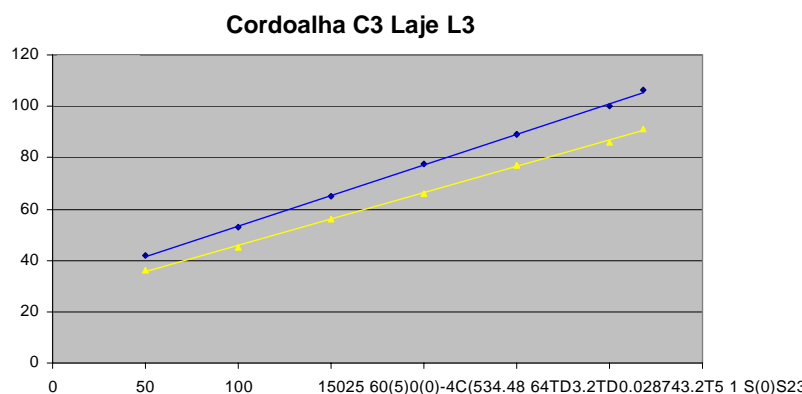


GRÁFICO 3.27: CORDOALHA C3 L3

TABELA 3.34: CORDOALHA C4 L3

GRÁFICO 3.28: CORDOALHA C4 L3

TABELA 3.35: CORDOALHA C6 L3

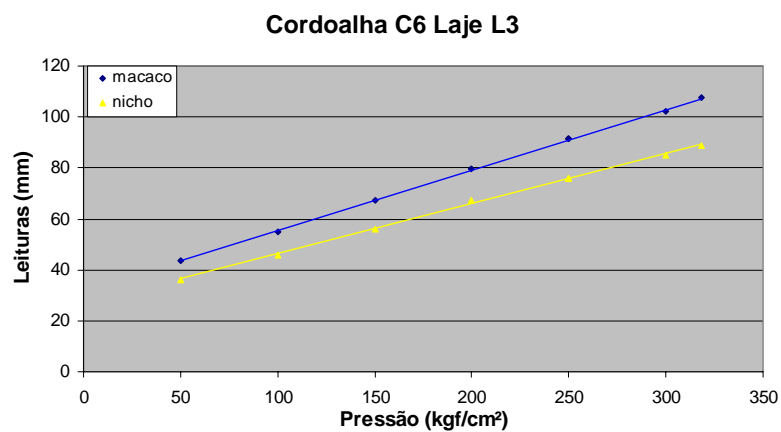


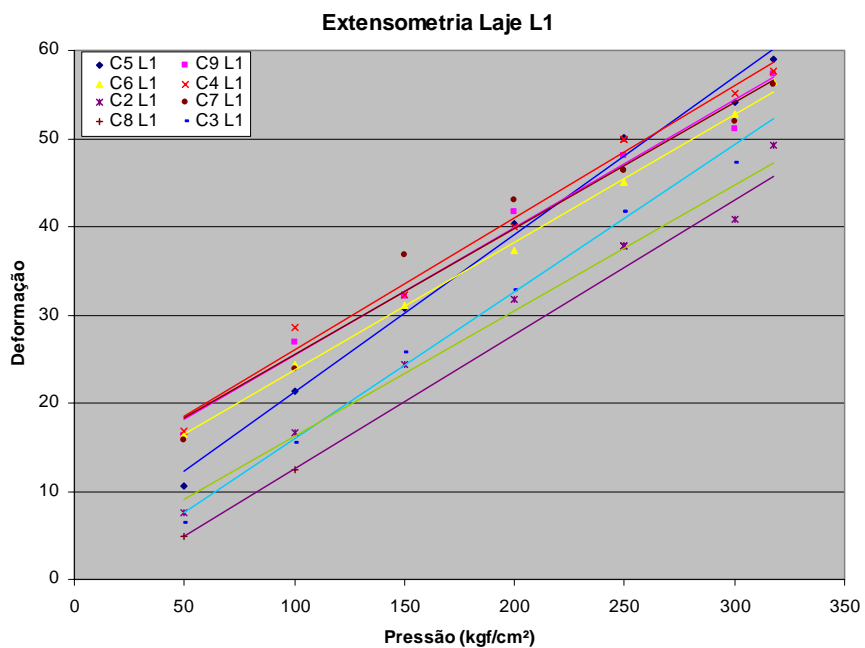
GRÁFICO 3.29: CORDOALHA C6 L3

EXTENSÔMETROS

LAJE L1

TABELA 3.36: CORDOALHAS DA L1 E GRÁFICO 3.30: CORDOALHAS DA L1

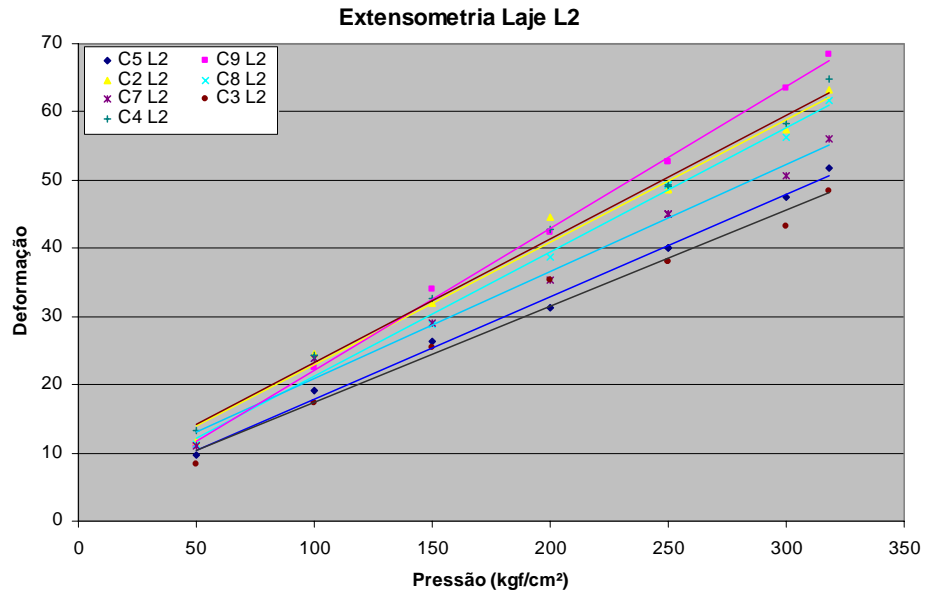
laje 01	cordoalha	referência
	C1	12.776
	C2	10.946
	C3	17.280
	C4	10.184
	C5	14.544
	C6	14.932
	C7	16.858
	C8	3.865
	C9	6.526



LAJE L2

TABELA 3.37: CORDOALHAS DA L2 E GRÁFICO 3.31: CORDOALHAS DA L2

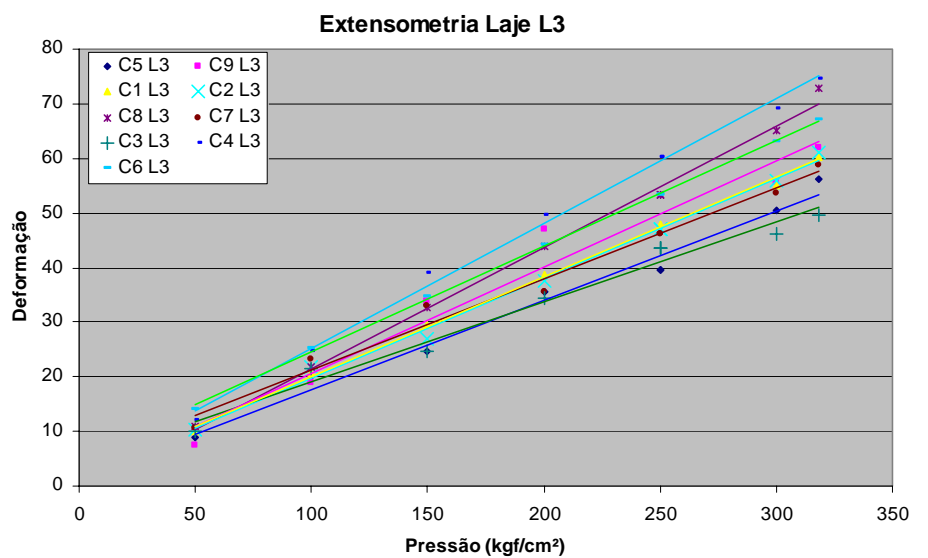
laje 02	cordoalha	referência
	C1	20.450
	C2	10.046
	C3	8.260
	C4	16.163
	C5	16.280
	C6	9.656
	C7	7.605
	C8	14.425
	C9	9.731



LAJE L3

TABELA 3.38: CORDOALHAS DA L3 E GRÁFICO 3.32: CORDOALHAS DA L3

laje 03	cordoalha	referência
	C1	2.288
	C2	8.238
	C3	4.703
	C4	2.307
	C5	2.633
	C6	7.538
	C7	3.375
	C8	6.119
	C9	2.202



Acompanhamento de leituras com extensômetros, em diferentes etapas do experimento, TABELA 3.39.

TABELA 3.39: LEITURAS COM EXTENSÔMETROS EM DIFERENTES ETAPAS

laje	cordoalha	(1) 24 h após protensão	(2) após todas desativadas	(3) 24 h após desativação	(4) leitura no dia 05/02/07	
L1	C1	16626	16805	15427	15316	com 25 dias
	C2	14949	11097	9590	8893	
	C3	19750	20250	18856	17737	
	C4	15051	14982	13723	13686	
	C5	19142	16537	14940	14465	
	C6	19831	18964	16287	15442	
	C7	21823	22298	20945	20000	
	C8	9274	9374	8073	5856	
	C9	11522	10577	8336	7342	
L2	C1	X	X	X	X	com 18 dias
	C2	14530	14824	14695	14554	
	C3	11082	11370	11096	11065	
	C4	20350	20586	20043	20140	
	C5	19520	19961	19857	19550	
	C6	X	X	X	X	
	C7	11483	11646	11332	11137	
	C8	18815	18536	18165	16936	
	C9	13930	14791	14013	15507	
L3	C1	6263	5995	6044	5890	com 18 dias
	C2	12277	?	12174	12085	
	C3	7297	7470	7284	7372	
	C4	8269	7214	7529	6822	
	C5	6816	?	6630	3731	
	C6	12908	12537	12628	12438	
	C7	7933	7766	7831	7611	
	C8	11689	10547	10558	126043	
	C9	6801	6562	6752	6588	

As medidas relativas a laje L1 foram comprometidas devido ao procedimento de injeção e os números em vermelho na tabela acima indicam os extensômetros das cordoalhas C2L1, C8L1, C5L3 e C8L3 que foram danificados durante o ensaio.

Todos os números são expressos em valores absolutos, e deve ser levado em conta o fator multiplicador de 10^6 (para aço) de acordo com a fórmula 3.7.3, constante na página 114.

Medidas físicas nos referenciais executados das cordoalhas, TABELA 3.40 e FIGURA 3.11.

TABELA 3.40: MEDIÇÕES DAS CORDOALHAS

Laje	cord.	após protensão	após 24 h	após 168 h	após desativação
L1	C 01	594	594	594	589
	C 02	594	594	594	588
	C 03	594	594	594	590
	C 04	594	594	594	591
	C 05	594	594	594	589
	C 06	594	594	594	589
	C 07	594	594	594	592
	C 08	594	594	594	587
	C 09	594	594	594	585
L2	C 01	1000	1000	1000	998
	C 02	1000	1000	1000	997
	C 03	1000	1000	1000	998
	C 04	1000	1000	1000	998
	C 05	1000	1000	1000	998
	C 06	1000	1000	1000	998
	C 07	1000	1000	1000	995
	C 08	1000	1000	1000	997
	C 09	1000	1000	1000	997
L3	C 01	1000	1000	1000	rompeu
	C 02	1000	1000	1000	999
	C 03	1000	1000	1000	998
	C 04	1000	1000	1000	1000
	C 05	1000	1000	1000	998
	C 06	1000	1000	1000	1000
	C 07	1000	1000	1000	1000
	C 08	1000	1000	1000	999
	C 09	1000	1000	1000	999

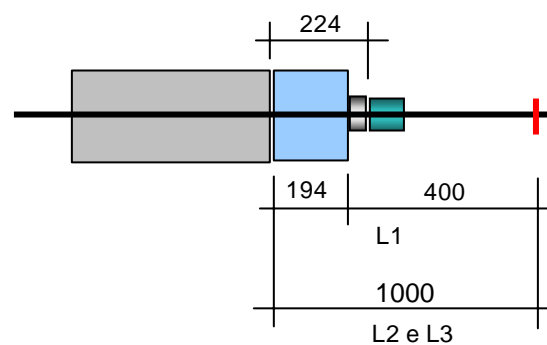


FIGURA 3.11: ESQUEMA DAS MARCAÇÕES

Controle dimensional das lajes, TABELA 3.41.

TABELA 3.41: CONTROLE DIMENSIONAL DAS LAJES L1, L2 E L3

Momento da leitura	LEITURAS DIMENSIONAIS DO CONCRETO (mm)					
	Laje 01		Laje 02		Laje 03	
	A1 - A2	B1 - B2	C1 - C2	D1 - D2	E1 - E2	F1 - F2
APÓS CONCRETAGEM	7605	7605	7613	7607	7610	7602
ANTES DE INICIAR APLICAÇÃO DAS FORÇAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS PROTENSÃO	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 24 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 48 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 72 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 96 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 120 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 144 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 168 HORAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS ALIVIO DA PROTENSÃO	7605	7605	7613	7607	7610	7602
APÓS 14 DIAS	7605	7605	7613	7607	7610	7602

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Devido a elevada quantidade de informações, foi necessário proceder a uma seleção prévia dos resultados obtidos para poder se fazer uma avaliação criteriosa mantendo o foco dos objetivos desta pesquisa.

Foi necessário um prévio ajuste no cálculo dos alongamentos (deslocamentos) teóricos para as cordoalhas, levando em consideração as diferentes posições utilizadas para realizar as medições nos locais especificados abaixo, conforme FIGURA 4.1 e TABELA 4.1.

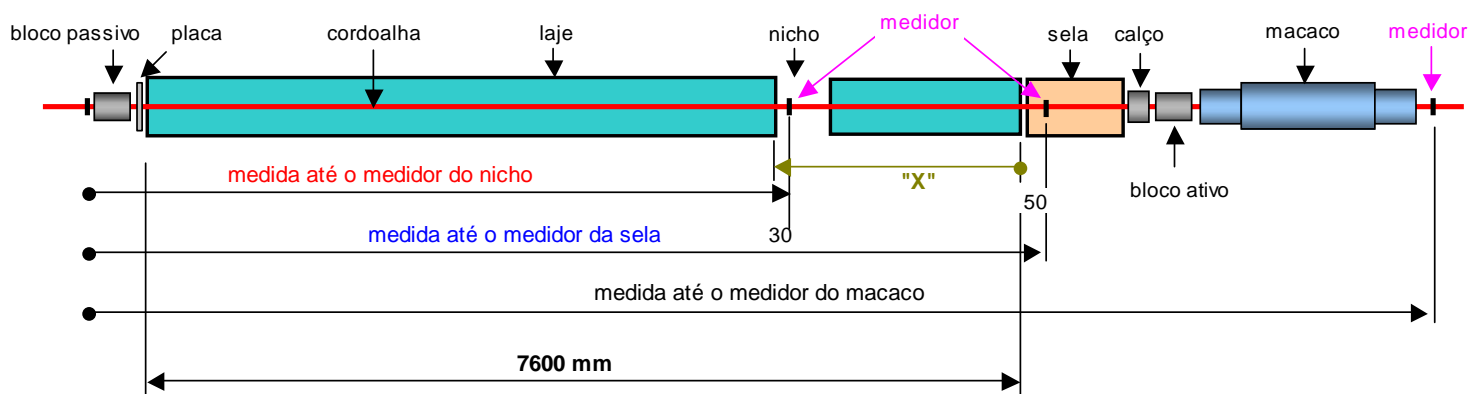


FIGURA 4.1: ESQUEMA DE MEDIDAS DAS CORDOALHAS

TABELA 4.1: COMPRIMENTO EFETIVO DAS CORDOALHAS

Cordoalhas	medida "X" (mm)			medida até o medidor do nicho comprimento cordoalha (mm)			medida até o medidor da sela comprimento cordoalha (mm)			medida até o medidor do macaco comprimento cordoalha (mm)		
	Laje 01	Laje 02	Laje 03	Laje 01	Laje 02	Laje 03	Laje 01	Laje 02	Laje 03	Laje 01	Laje 02	Laje 03
C1	1663	1790	1703	6.031	5.904	5.991	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C2	902	911	924	6.792	6.783	6.770	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C3	1150	1144	1140	6.544	6.550	6.554	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C4	1407	1466	1419	6.287	6.228	6.275	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C5	922	930	906	6.772	6.764	6.788	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C6	1410	1458	1428	6.284	6.236	6.266	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C7	930	1171	1116	6.764	6.523	6.578	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940
C8	1143	925	892	6.551	6.769	6.802	7.714	7.714	7.714	7.940	7.940	7.940

As TABELAS 3.9 a 3.35 contendo os valores das leituras efetuadas nas cordoalhas geraram os GRÁFICOS 3.3 ao 3.29, apresentados no item 3.11, os quais demonstram a linearidade entre tensão e deformação, com o devido ajuste das retas pelo método dos mínimos quadrados.

Os gráficos também mostram que os coeficientes angulares são muito próximos devido a pequena variação existente entre os deslocamentos (alongamentos) previstos para as cordoalhas.

Ressalta-se que cada cordoalha teve mais do que um método de acompanhamento de leitura dos deslocamentos, sendo eles: junto ao equipamento hidráulico de protensão (macaco), na região da sela de protensão (sela), na região do nicho (nicho) e através dos extensômetros instalados nas mesmas (extens.).

As TABELAS 3.36 a 3.38 com os respectivos GRÁFICOS 3.30 ao 3.32, também apresentadas no item 3.11, nos mostram uma pequena variação no coeficiente angular das retas originadas pelas medidas extensométricas, que tratam de “deformação específica”, portanto adimensional, e que deveriam ser paralelas, o que não ocorreu.

A discrepância entre os valores de deformações obtidas com as leituras dos extensômetros e os demais métodos nos impôs um questionamento e uma necessidade de estudar melhor esses parâmetros.

A primeira preocupação foi em se estabelecer a real diferença de comprimento entre os diferentes fios que constituem a cordoalha, que é composta por sete fios, sendo seis helicoidais em volta de um fio central reto.

Esses fios por serem helicoidais possuem um comprimento maior por unidade de metro do que o fio central.

Medidas expeditas efetuadas na cordoalha, com o auxílio de um fio de barbante (FOTO 4.1), constataram que o comprimento desses fios é da ordem de 1,5 % a 2,0 % maior do que o fio central.



FOTO 4.1: MEDIDA EXPEDITA DO FIO HELICOIDAL

Ratifica-se essa medição através do uso da fórmula que determina o comprimento de um fio helicoidal:

Seja a curva da FIGURA 4.2:

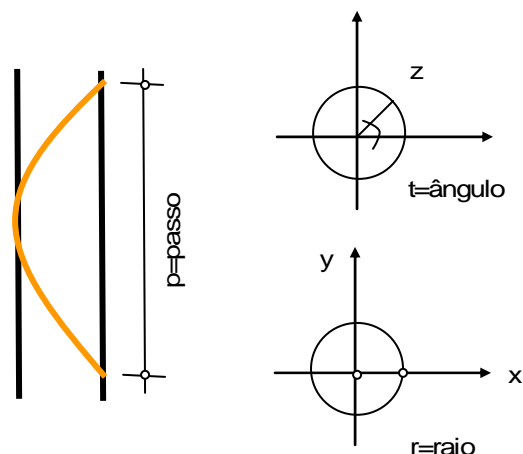


FIGURA 4.2: HELICÓIDE

em um certo instante em que o ângulo for:

$$t : 0 \leq t \leq 2\pi$$

$$x(t) = r \times \cos t$$

$$y(t) = r \times \sin t$$

$$z(t) = \frac{t \times p}{2\pi}$$

assim:	para $t = 0$	para $t = 2\pi$
	$x(0) = r$	$x(2\pi) = r$
	$y(0) = 0$	$y(2\pi) = 0$
	$z(0) = 0$	$z(2\pi) = p$

O comprimento de uma curva dada parametricamente será:

$$L(2\pi) = \int_0^{2\pi} \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2} \times dt$$

$$x' = \frac{dx}{dt} = -r \times \sin t ; \quad y' = \frac{dy}{dt} = r \times \cos t ; \quad z' = \frac{p}{2\pi}$$

$$L(2\pi) = \int_0^{2\pi} \sqrt{(-r \times \sin t)^2 + (r \times \cos t)^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \times dt$$

$$= \int_0^{2\pi} \sqrt{r^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \times dt = \sqrt{(2\pi r)^2 + (p)^2}$$

Considerando $r = 6,47mm$ e $p = 200mm$

$L(2\pi) = 204mm$; ou seja: os fios helicoidais são 2% maiores que o fio central.

Para a definição dos diâmetros efetivos dos fios que compõem a cordoalha, foram efetuadas medidas conforme TABELA 4.2 e FOTO 4.2.

TABELA 4.2: DETERMINAÇÃO DOS DIÂMETROS DOS FIOS DE UMA CORDOALHA


FIO	DISTÂNCIA ENTRE AS MEDIDAS EFETUADAS							 MÉDIA (Ø) em "mm"		
	0,10 m	0,20 m	0,40 m	0,60 m	0,80 m	1,00 m	1,20 m			
central	4,39	4,42	4,42	4,42	4,43	4,44	4,44	4,42	4,42	100%
F1	4,28	4,28	4,28	4,26	4,24	4,27	4,27	4,27	4,26	96,30%
F2	4,27	4,21	4,21	4,23	4,23	4,29	4,29	4,25		
F3	4,28	4,24	4,26	4,28	4,25	4,24	4,28	4,26		
F4	4,26	4,27	4,27	4,26	4,29	4,28	4,27	4,27		
F5	4,24	4,24	4,29	4,27	4,25	4,26	4,27	4,26		
F6	4,25	4,25	4,27	4,23	4,25	4,23	4,24	4,25		



FOTO 4.2: MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FIOS DE UMA CORDOALHA

Outro ponto investigado foi devido ao posicionamento dos extensômetros, uma vez que os mesmos foram colados sobre um dos fios helicoidais, portanto a maneira correta de avaliar o resultado da deformação registrada deve ser relacionada ao comprimento desse fio.

A deformação registrada pelos extensômetros é paralela ao eixo em que o mesmo se encontra instalado, o que coincide com o eixo do fio em que se encontra aderido, e uma vez que a força de protensão é aplicada paralela ao eixo da cordoalha (coincidente com o fio central), é necessário que se faça a decomposição dessa força.

A força efetiva no fio helicoidal é equivalente a 99,05 % da força no fio central.

Realizou-se um ensaio de tração com o fio central da cordoalha, com intuito de se conhecer o comportamento individual e tentar se fazer uma analogia. O resultado obtido encontra-se no GRÁFICO 4.1 e TABELA 4.3 abaixo.

TABELA 4.3: ENSAIO DE TRAÇÃO NO FIO CENTRAL DE UMA CORDOALHA

Comparativo da deformação do fio central da cordoalha							
pressão manômetro	pressão no fio central	força por fio	força aplicada	leitura extensômetro	leitura corrigida	medida física	medida acumulada

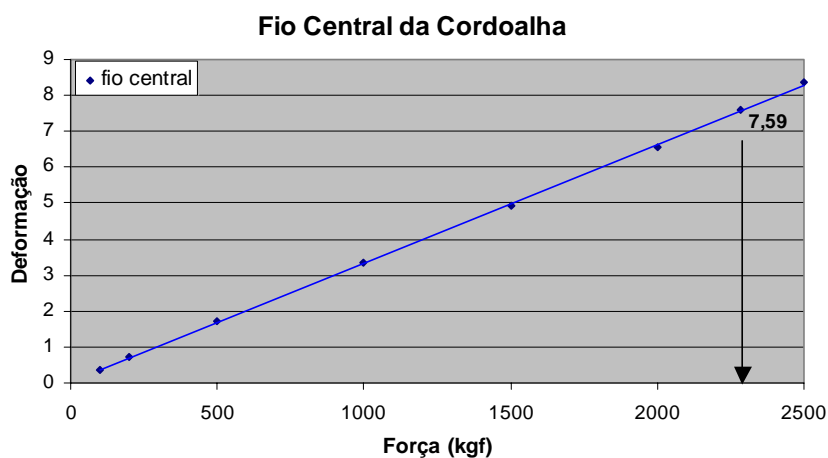


GRÁFICO 4.1: DEFORMAÇÃO (mm) DO FIO CENTRAL DE UMA CORDOALHA

A deformação obtida nesse ensaio foi de 7,59 mm/m, muito próxima da obtida para a cordoalha, que corrigida nos deu 7,68 mm/m.

Apesar desses cuidados não foi possível identificar a causa do não paralelismo dos dados obtidos com os extensômetros.

4.1.1 DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

As três lajes do experimento foram medidas em várias fases e os resultados observados constam resumidamente na TABELA 3.40, página 144.

4.1.2 DEFORMAÇÃO DO AÇO CP 190 RB

Todas as cordoalhas das três lajes do experimento foram monitoradas pelo Data Logger Kyowa em várias fases do experimento, assim como avaliadas através das marcações físicas das cordoalhas, e os resultados observados após o alívio das forças de protensão constam nas TABELAS 3.39 e 3.40 nas páginas 143 e 144 respectivamente.

Os resultados das medições físicas das cordoalhas C1 à C9 das lajes L2 e L3 apresentaram valores compatíveis com os esperados.

Para as cordoalhas da laje L2, que utilizou a sela de protensão, era previsto um deslocamento de alívio equivalente a 2,13 mm.

Para as cordoalhas da laje L3, o deslocamento previsto era menor, na ordem de 0,6 mm em virtude de não ter sido utilizada a sela de protensão nessa laje.

Esses deslocamentos somente deveriam ser observados na região externa a face do concreto, onde havia um acréscimo no comprimento da cordoalha sem injeção de calda de cimento.

A laje L1 apresentou alguns problemas pontuais de perda mais elevada, fato esse que está relacionado diretamente com o procedimento da injeção da calda de cimento; devido a imperfeições observadas em algumas vedações das extremidades ou nas pontes de ligação (efetuadas nos nichos) de algumas cordoalhas, houve vazamento

da calda durante o processo de injeção com conseqüente comprometimento da eficiência da mesma.

Os resultados obtidos através dos extensômetros e apresentados na TABELA 3.39 (página 143) nos revelam uma pequena variação de valores, porém esses valores são significativos nas cordoalhas da laje L1, a mesma que foi citada anteriormente com os problemas devidamente detectados.

4.1.3 CUSTOS DAS ANCORAGENS

Antes da comparação efetiva dos custos das ancoragens ativas é conveniente um esclarecimento das partes que compõem cada tipo de ancoragem:

- ancoragem ativa não reutilizável: são ancoragens constituídas por placa repartidora, bloco de ancoragem e cunha metálica comuns.
- ancoragem ativa reutilizável: são ancoragens constituídas por blocos de ancoragem e cunha metálica de longa vida.

No caso de lajes de edificações verticais de múltiplo uso e/ou pisos industriais protendidos, o custo relativo aos materiais complementares, tais como: bainha metálica, purgadores, cimento e aditivo para injeção, são os mesmos tanto para ancoragens comuns como para as reutilizáveis.

De acordo com consulta feita ao departamento comercial da PROTENDE e da RUDLOFF, duas das principais empresas fornecedoras desses materiais e serviços, o preço praticado (em reais) no mercado nacional de uma ancoragem reutilizável é cerca de 2,5 vezes maior do que o preço de uma ancoragem comum.

Se considerarmos apenas o fator “ancoragem”, e levando em conta que a reutilização é da ordem de 500 a 800 vezes, como citado no item 2.6 (página 77), essa proporcionalidade se inverte e passa a ser 200 a 320 vezes menor.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

A TABELA 3.41 constante na página 145 mostra que o concreto não sofreu deformação oriunda da aplicação das forças de protensão uma vez que as leituras efetuadas nas diversas fases não sofreram alterações.

Também as TABELAS 3.39 e 3.40, constantes nas páginas 143 e 144 respectivamente, permitem afirmar que as cordoalhas não apresentaram perdas além das previstas durante ou após o processo de retirada dos blocos de ancoragem ativa, uma vez que as leituras físicas efetuadas nas diversas fases do experimento não demonstraram discrepâncias, excetuando-se as justificadas por problemas oriundos do procedimento de injeção da calda de cimento.

Os dados registrados pelos extensômetros demonstram que os comprimentos de ancoragem utilizados neste experimento, variando de 877 mm a 1.775 mm já descontados os comprimentos dos nichos (vide TABELA 3.5, página 105), foram suficientes para garantir que não houvesse perda da força de protensão aplicada nas cordoalhas quando da retirada das ancoragens ativas.

Ressalta-se que no caso específico da cordoalha C1 da laje L3, durante o processo de alívio da força aplicada, foi elevada a força de protensão até o rompimento da mesma (FOTO 5.1) e não houve alteração nas leituras do extensômetro nela instalado e tampouco na referência física, o que certifica a aderência plena entre o aço e a calda de cimento.

- estudo semelhante ao realizado nesta pesquisa, porém sob a ótica da deformação do elemento estrutural sob o efeito de cargas e ELU.
- ensaios de pull out com cordoalha tensionada.

REFERÊNCIAS

A. PICARD and L. LACHANCE. **Preliminary fatigue tests on ferrocement plates.** Cement And Concrete Research, Volume 4, Issue 6, Pages 967-978, November 1974.

ADAMS, L. F. **Engineering Measurements and Instrumentation.** London, ELBS and Hodder and Stoughton, 1981.

AGOSTINI, Luís Roberto Sobreira De. **Concreto Protendido: estudo de vigas isostáticas.** São Paulo - Livraria Ciência e Tecnologia Ltda, 1983.

ALMEIDA FILHO, F. M. - **Estruturas de pisos de edifícios com a utilização de cordoalhas engraxadas** - Dissertação de mestrado São Carlos 2002.

ANAIS DA XXXII - **Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural** - Campinas, maio/2006

ANDOLFATO Rodrigo Piernas, CAMACHO Jefferson Sidney e BRITO Gilberto Antônio. **Extensometria Básica.** Ilha Solteira, 200

ANTÓNIO COSTA and JÚLIO APPLETON. **Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal.** Cement and Concrete Composites, Lisboa, Portugal, Volume 24, Issue 1, Pages 169-179, February 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6118, 2003 - **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.**

AURÉLIO BUARQUE DE HOLANDA FERREIRA, **Novo Dicionário da Língua Portuguesa,** 1975

BOENTE, A.; BRAGA, G. **Metodologia Científica Contemporânea**: Para universitários e pesquisadores. Rio de Janeiro, Brasport, 2004.

CAUDURO, Eugenio Luiz. **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas engraxadas e plastificadas**. 2ª ed. Agência Partner - São Paulo, Pancron Indústria Gráfica, 2003.

CELCIO JOSÉ ESCOBAR - **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas** - Dissertação de mestrado Curitiba 2003.

CERVO, A L. **Metodologia Científica**. 5ª ed. São Paulo, Prentice Hall, 2002.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. 4ª ed. São Paulo, Makron Books, 1996.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em Ciências Humanas e Sociais**. São Paulo, Cortez, 1991.

D. G. CAVELL and P. WALDRON. **A residual strength model for deteriorating post-tensioned concrete bridges**. Computers & Structures, Volume 79, Issue 4, Pages 361-373, February 2001.

DE LIMA, A. J. M. de. **Estudo da utilização do poliuretano expandido reciclado como adição na produção de blocos de concreto**. Curitiba, 2003. 292 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

DOMENICO BRUNO and FABRIZIO GRECO. **Delamination in composite plates: influence of shear deformability on interfacial debonding**. Cement and Concrete Composites, Volume 23, Issue 1, Pages 33-45, February 2001.

E. E. ETMAN and A. W. BEEBY. **Experimental programme and analytical study of bond stress distributions on a composite plate bonded to a reinforced concrete beam**. Cement and Concrete Composites, Volume 22, Issue 4, Pages 281-291, 2000.

E. -E. TOUMBAKARI, D. VAN GEMERT, T. P. TASSIOS and N. TENOUTASSE. **Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts**. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 6, Pages 867-872, June 1999.

FABRICIO, MARCIO M. - **Projeto simultâneo na construção de edifícios - Tese de doutorado** - São Paulo, 2002.

F. H. WITTMANN and O. W. KNAPPEA. SCHUHBAUER. **Temperature induced stresses in concrete**. Cement And Concrete Research, Volume 8, Issue 6, Pages 703-710, November 1978.

F. ROSQUOËT, A. ALEXIS, A. KHELIDJ and A. PHELIPOT. **Experimental study of cement grout: rheological behavior and sedimentation**. Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 5, Pages 713-722, May 2003.

FERRARI, A. T. **Metodologia da Pesquisa Científica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo, Atlas, 2002.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5ª ed. São Paulo, Atlas, 1999.

GOGOLA, G. W. **Concreto de Cimento Portland: influência das propriedades dos agregados no desempenho**. Curitiba, 2003. 109 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

GÜNTER HOFSTETTER and HERBERT A. MAN. **Collapse load analysis of prestressed concrete surface structures with unbonded tendons by the finite element method.** Finite Elements In Analysis And Design, Volume 5, Issue 2, Pages 141-165, July 1989.

H. SCHEEL and B. HILLEMEIER. **Capacity of the remanent magnetism method to detect fractures of steel in tendons embedded in prestressed concrete.** NDT & E International, Volume 30, Issue 4, Pages 211-216, August 1997.

HANAI, João Bento. **Fundamentos do Concreto Protendido - E-Book de apoio para o curso de engenharia civil** - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia Civil de São Carlos, 2005.

HIROSHI KATO and SHOJI ABET. **Ultrasonic evaluation of the bonding strength of dissimilar metal bonds.** NDT & E International, Volume 29, Issue 6, Pages 355-361, December 1996.

J. MARTIN, K. J. BROUGHTON, A. GIANNOPOLOUS, M. S. A. HARDY and M. C. FORDE. **Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams.** NDT & E International, Volume 34, Issue 2, Pages 107-113, March 2001.

J. Q. YE. **Interfacial shear transfer of RC beams strengthened by bonded composite plates.** Cement and Concrete Composites, Volume 23, issues 4-5, Pages 411-417 August-October 2001.

JIN QINHUA DENG MIN and HAN SUFEN. **Investigation of deteriorated concrete railway ties.** Cement and Concrete Research, Volume 26, Issue 7, Pages 999-1006, July 1996.

KENT, Preston H. **Practical Prestressed Concrete**. Mc Graw-Hill Book Company, Inc – New York, Toronto, London, 1960.

KÖECHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia Científica**. Teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 21ª ed. Petrópolis, Vozes, 1997.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Curitiba, 2002. 196 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

LACROIX, Roger; FUENTÈS, Albert. **Hormigón Pretensado: concepción, cálculo, ejecución**; traducción al español Amalio Jaime Rivas Zaragüeta. Editores Técnicos Asociados, dA, Maigón, 26 - Barcelona - España, 1978.

LEONHARDT, Fritz. **Construção de Concreto. Volume 5**. Concreto Protendido; tradução João Luis Escosteguy Merino. Rio de Janeiro - Ed. Interciência, 1983.

LEONHARDT, Fritz. **Hormigón Pretensado**; traducción de la segunda edición alemana por Alberto Corral - Artes Gráfica MAG, SL - Burgos - Madrid, 1967.

M. A. GLINICKIA. VAUTRINP. SOUKATCHOFF and J. FRANÇOIS-BRAZIER. **Plate impact testing method for GRC materials**. Cement and Concrete Composites, Volume 16, Issue 4, Pages 241-251, 1994.

MAHDI MOOSAVI AND WILLIAM F. BAWDEN. **Shear strength of portland cement grout**. Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issue 7, Pages 729-735, October 2003.

MAHDI MOOSAVI, AHMAD JAFARI AND ARASH KHOSRAVI. **Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure**. Cement And Concrete Composites, Volume 27, Issue 1, Tehran, Iran, January 2005, Pages 103-109.

MANUAL TÉCNICO DE PRÉ FABRICADOS DE CONCRETO - ABCI - 1987

MARTIN S. WILLIAMS and PETER WALDRON. **Longitudinal stress wave propagation in an unbonded prestressing tendon after release of load**. Computers & Structures, Volume 34, Issue 1, Pages 151-160, 1990.

MAYRA SOARES PEREIRA - **Modelo para análise de estruturas de pontes segmentadas de concreto com protensão externa** - Dissertação de doutorado Rio de Janeiro 2006.

MENDES, S. E. da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

MICHAELIS - **Dicionário da Língua Inglesa**.

NORMAS PARA APRESENTAÇÃO DE DOCUMENTOS CIENTÍFICOS - UFPR e Sistema de Biblioteca e Iparde, Editora da Universidade Federal do Paraná , 10 fascículos.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de Metodologia Científica**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2001.

OMAR AHMED, DIONYS VAN GEMERT and LUCIE VANDEWALLE. **Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams**. Cement and Concrete Composites, Volume 23, Issue 1, Pages 3-19, February 2001.

ORAL BÜYÜKÖZTÜRK. **Imaging of concrete structures**. NDT & E International, Volume 31, Issue 4, Pages 233-243, August 1998.

PAOLA TORNIERI - **Comportamento estrutural de pontes estaiadas: comparação de alternativas** - Dissertação de mestrado São Paulo 2002.

PFEIL, Walter. **Concreto Protendido: processos construtivos, perdas de protensão**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1983.

R. K. DHIR, J. G. L. MUNDAY and N. Y. HO. **PFA in structural precast concrete: engineering properties**. Cement and Concrete Research, Volume 18, Issue 6, Pages 852-862, November 1988.

ROBSON, C. **Real world research : a resource for social scientists and practitioner**. Oxford, Blackwell, 1993.

S. D. CRAMER, B. S. COVINO, JR., S. J. BULLARD, G. R. HOLCOMB, J. H. RUSSELL, F. J. NELSON, H. M. LAYLOR and S. M. SOLTESZ. **Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges**. Cement and Concrete Composites, Albany, USA, Volume 24, Issue 1, Pages 101-117, February 2002.

SCHENINI, Pedro Carlos, BAGNATI Antônio Marius Zuccarelli e CARDOSO André Coimbra Felix. **Gestão de Resíduos da Construção Civil** - COBRAC 2004, Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário · UFSC Florianópolis · 10 a 14 de Outubro 2004.

SCHMID, Manfred Theodor - **Perdas da força de protensão**. Rudloff VSL, São Paulo, Brasil, 1994.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 22^a ed. versão revisada e ampliada de acordo com a ABNT. São Paulo, Cortez, 2002.

SILVA, Edna Lúcia da, MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis, Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2000, 118p.

TALES SIMÕES MATTOS - **Programa para análise de superestruturas de pontes de concreto armado e protendido** - Dissertação de mestrado Rio de Janeiro 2001.

VASCONCELOS, Augusto Carlos. **O Concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações**. São Paulo, Studio Nobel, 2002. Volume III.

VASCONCELOS, Augusto Carlos. **O Concreto no Brasil: recordes, realizações, história**. São Paulo, Copiare, 1985. Volume 1.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza e KLÉOS M. LENZ César Jr. **Concreto Protendido - Fundamentos Básicos**. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, 4a edição nov/1998.

W. R. HABEL, D. HOFMANN and B. HILLEMEIER. **Deformation measurements Of mortars at early ages and of large concrete components on site by means of embedded fiber-optic microstrain sensors**. Cement and Concrete Composites, Berlin, Germany, Volume 19, Issue 1, Pages 81-102, 1997.

WERCMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Introdução ao Planejamento e Análise de Experimentos: Como identificar as principais variáveis influentes em um**

processo. Editora QSCO, 1996. Volume 8. Série PQC. Série ferramentas da Qualidade.

X. DÉROBERT, C. AUBAGNAC and O. ABRAHAM. **Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy.** NDT & E International, Volume 35, Issue 8, Pages 541-548, December 2002.

YIN, Robert K. **Case study research: design and methods.** Second edition. Applied Social Research Methods Series, Volume 5, Sage Publications, 1994.

SITES VISITADOS:

Arcelor Brasil - Cia Belgo Mineira. Disponível em www.belgomineira.com.br. Acessos em 2005 e 2006.

Comunidade da Construção. Disponível em www.comunidadeconstrucao.com.br. Acessos em 2005 e 2006.

Consulcret Consultoria e Equipamentos Ltda. Disponível em www.consulcret.com.br. Acessos em 2005 e 2006.

Excel Sensor Ind. Com. E Exportação Ltda. Disponível em www.excelsensor.com.br. Acessos em 2006.

Gerenciador de buscas na internet. Disponível em www.google.com. Acessos em 2004, 2005 e 2006.

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto. Disponível em www.ibracon.com.br. Acessos em 2005 e 2006.

Impacto Protensão. Disponível em www.impactoprotensao.com.br. Acessos em 2006.

Meio Ambiente Paraná. Disponível em www.pr.gov.br/meioambiente. Acessos em 2005.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em www.mma.gov.br/conama. Acessos em 2005.

Ministério da Educação - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Disponível em www.capes.gov.br. Acessos em 2005 e 2006.

Ministério do Trabalho e Emprego. Disponível em www.mte.gov.br. Acessos em 2005.

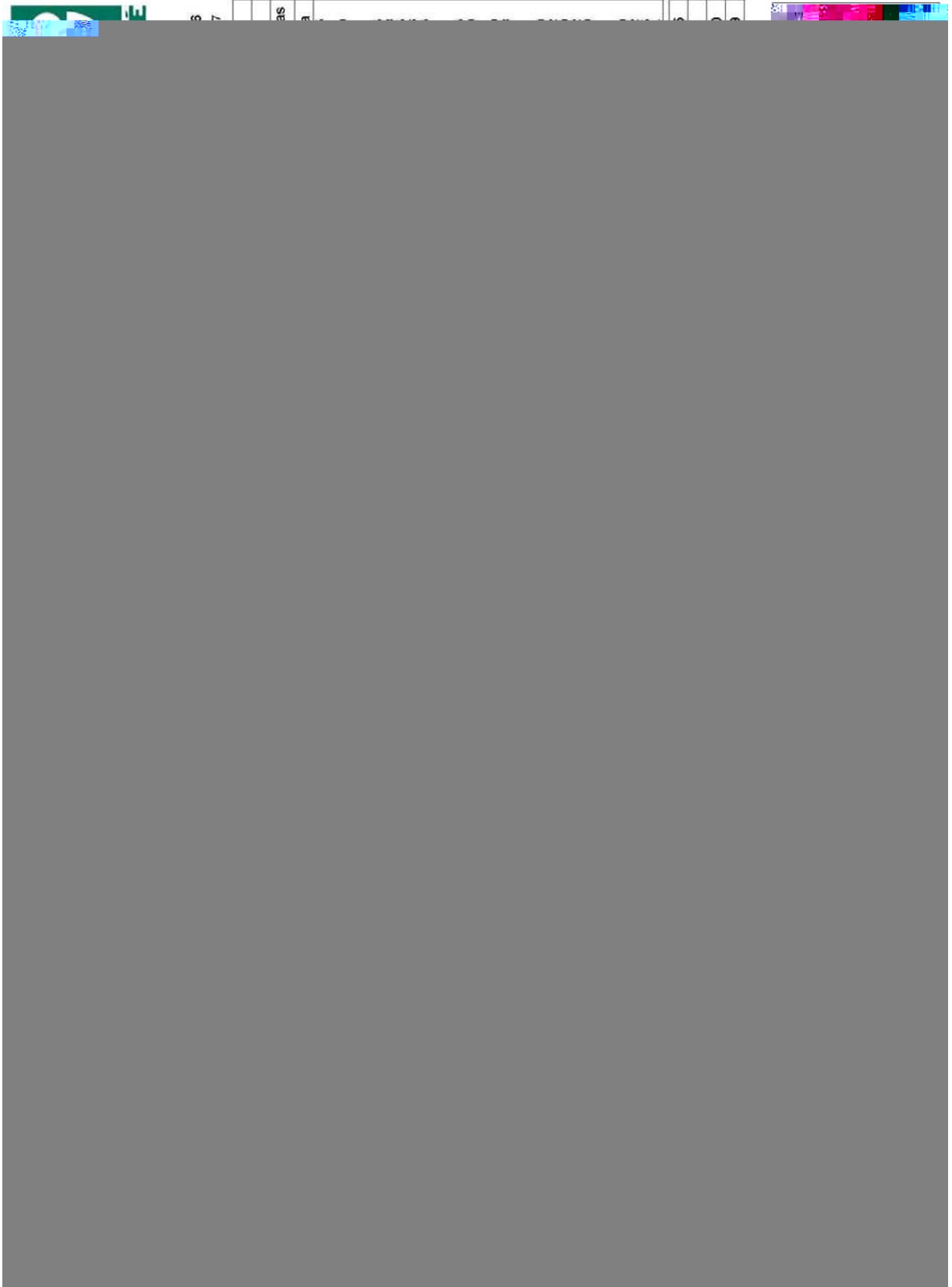
PROTENDE Sistemas e Métodos de Construções Ltda. Disponível em www.protende.com.br. Acessos em 2005, 2006 e 2007.

RUDLOFF Industrial Ltda. Disponível em www.rudloff.com.br. Acessos em 2006.

SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Paraná. Disponível em www.sinduscon-pr.com.br. Acessos em 2005.

VSL International. Disponível em www.vsl.com. Acessos em 2005 e 2006.

Weiler C. Holzberger Industrial Ltda. Disponível em www.weiler.com.br. Acessos em 2006.

ANEXOS**ANEXO 3.1: ENSAIOS DO CIMENTO**

ANEXO 3.2: ENSAIOS DOS AGREGADOS MIÚDOS



ENSAIOS FÍSICOS DE AGREGADOS

CENTRAL	Nº DO PEDIDO			DATA COLETA			DATA ENSAIO			Nº DO RELATÓRIO		
CURITIBA-CIC				14/09/2006			18/09/2006			928		
TIPO/FORNECEDOR	MASSA ESPECÍFICA (kg/m³) (NBR 776/777)			ABSORÇÃO (NBR 777/NBR 777)	MASSA UNITÁRIA (kg/m³)		MATERIAL PULVERULENTO (NBR 7219)		TORÇÕES DE ARGILA (NBR 7218)		IMPUREZA ORGÂNICA (NBR 7220)	LOS ANGELES (NBR 6645)
	SECA	0,0	3,33		NBR 7251	0,0	0,0	0,0	0,0			
1 - BRITA 1 ITAMBE	2,72	2,40 - 2,82	2,71	0,3%	1,44	1,37 - 1,52	0,7%	0,0 - 2,0				
2 - BRITA 1 VOTORANTIM CIMENTO	2,72	2,68 - 2,83	2,72	0,3%	1,42	1,38 - 1,56	1,9%	0,0 - 5,0				
3 - BRITA 0 CENTRAL	2,79	2,68 - 2,90	2,79	0,4%	1,34	1,29 - 1,46	1,6%	0,0 - 5,0				
4 - BRITA 2 PEDREIRA NOVABRIT	2,79	2,69 - 2,92	2,80	0,3%	1,45	1,38 - 1,53	0,9%	0,0 - 1,0				
LIMITE NBR 7211			TORÇÕES DE ARGILA		MATERIAL PULVERULENTO		IMPUREZA ORGÂNICA		ABRASÃO LOS ANGELES			
AGREGADO MIÚDO			≤ 3,0%		≤ 10,0% ⁽¹⁾		MAIS CLARA QUE PADRÃO		-			
AGREGADO GRAUADO			≤ 1,0% ⁽¹⁾		≤ 1,0%		-		≤ 30%			
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - NBR 7217/7211												
Fenômeno (mm)	1 - BRITA 1 ITAMBE			2 - BRITA 1 VOTORANTIM CIMENTO			3 - BRITA 0 CENTRAL			4 - BRITA 2 PEDREIRA NOVABRIT		
	M(g)	95E ₅₀	95Acum.	M(g)	95E ₅₀	95Acum.	M(g)	95E ₅₀	95Acum.	M(g)	95E ₅₀	95Acum.

ANEXO 3.3: ENSAIOS DOS AGREGADOS GRAÚDOS



ENSAIOS FÍSICOS DE AGREGADOS

CENTRAL	Nº DO PEDIDO	DATA COLETA		DATA ENSAIO	Nº DO RELATÓRIO		
CURITIBA-CIC		06/10/2006		09/10/2006	950		
TIPO/FORNECEDOR	MASSA ESPECÍFICA (kg/m³) (NBR 9726/99) (NBR 9727)	ABSORÇÃO (NBR 9727) (NBR 9727)	MASSA ÚMIDA (kg/m³)	MATERIAL PULVERULENTIA	TORÇÃO DE ARGILA	IMPUREZA ORGÂNICA (NBR 9727)	LOS ANGELES (NBR 9727)



ANEXO 3.4: FICHA TÉCNICA DO ADITIVO MIRA RT - 86



ANEXO 3.4: FICHA TÉCNICA DO ADITIVO MIRA RT - 86 (cont.)

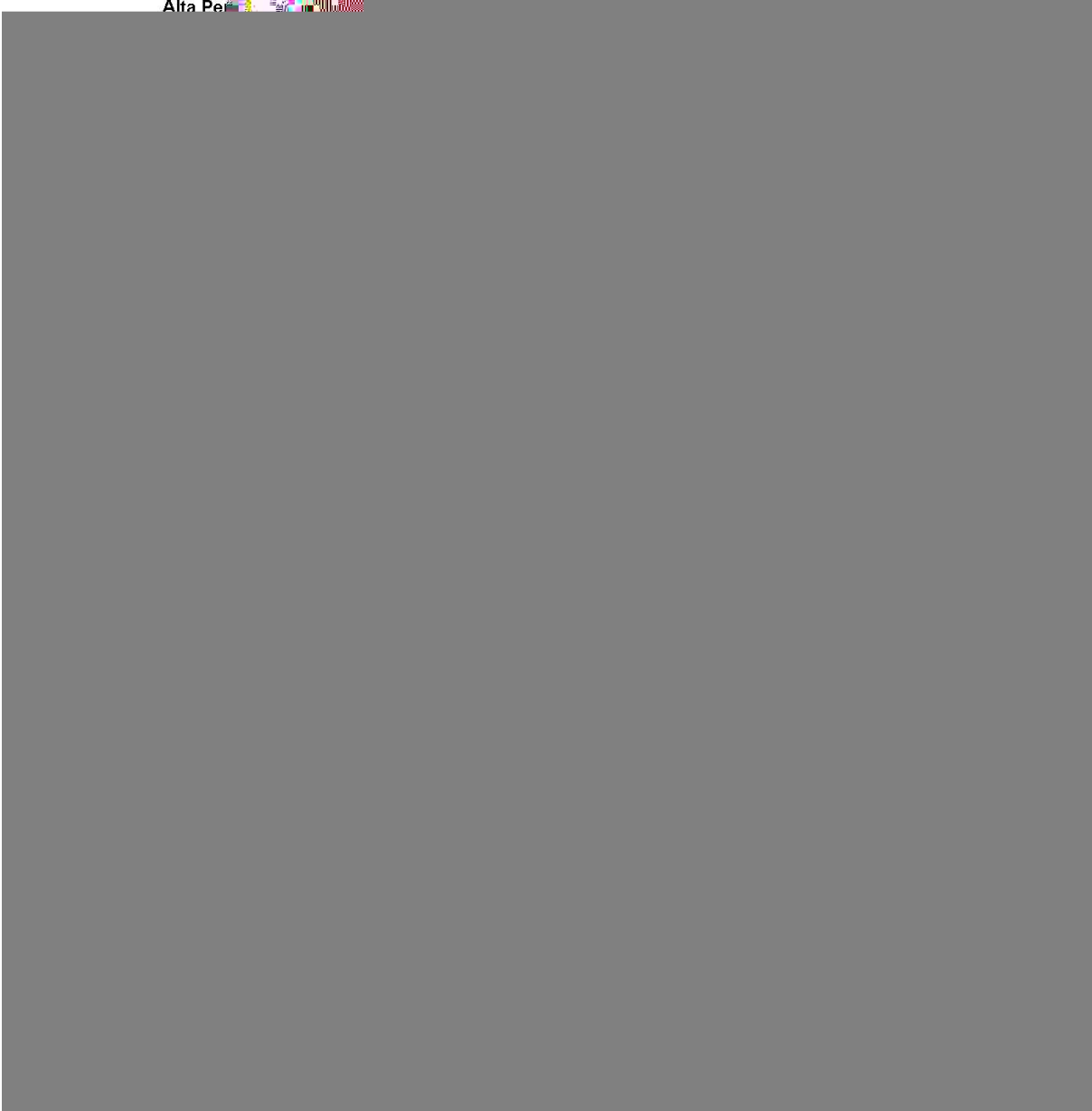
Concreto

I N F O R M A Ç Ã O D O P R O D U T O

resistência à compressão e a flexão em todas as idades.

Alta Performance

peso de cimento. Também pode-se variar as doses com os agregados e com o tipo de



ANEXO 3.5: FICHA TÉCNICA DO ADITIVO FLOWCABLE

FLOWCABLE

Aditivo para cimento, com retração compensada, para injeção em bainhas de protensão.



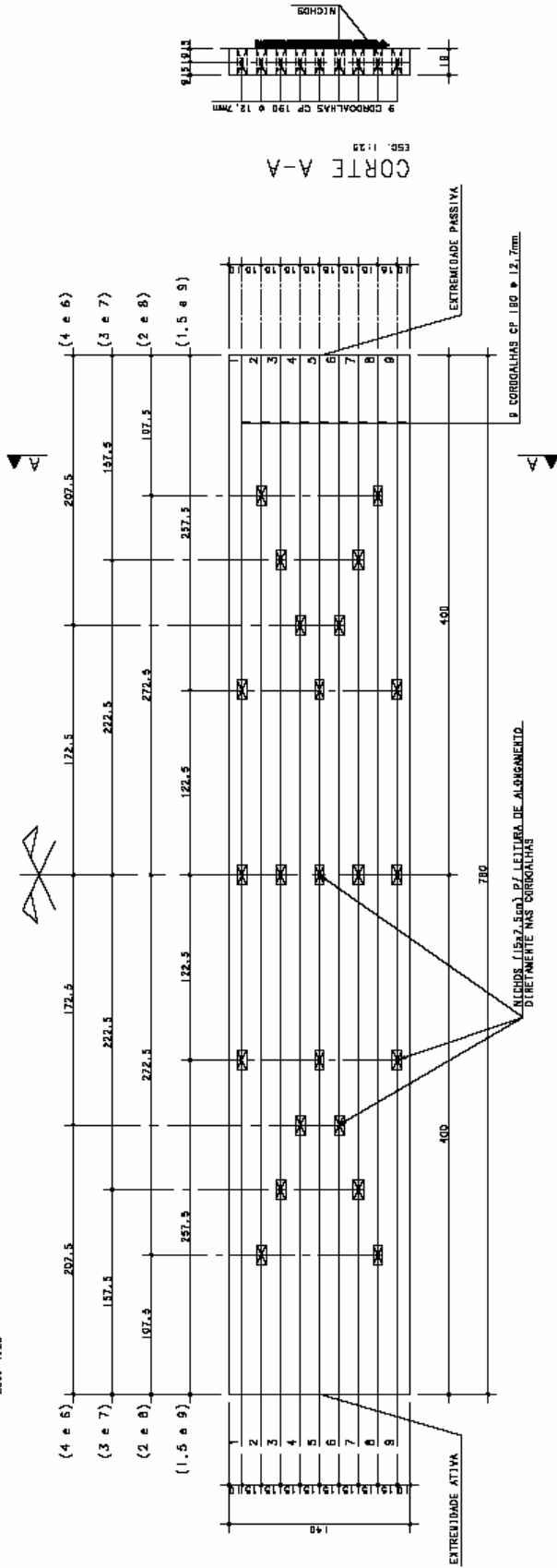
ANEXO 3.6: EXEMPLO DO ENSAIO DA CALDA DE CIMENTO

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS		DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE EXSUDAÇÃO, EXPANSÃO E FLUIDEZ NBR 7682/83 - NBR 7683/83			
Traço: 0,5		<input type="checkbox"/> Calda	<input type="checkbox"/> Argamassa	Volume (L)	
	Massa (g)	Registro	Data de início dos ensaios:		6/out
Cimento	8000		Hora de início dos ensaios:		13:40
Água	4000		Número de cp's:		
Adição	-		Idades de ruptura:		3 - 7 - 28
Adição	-		Moldagem nº:		
Aditivo	200	Flowcable - Basf			
Aditivo	-				
TEMPERATURAS			DENSIDADE		
Ambiente	21,0 °C		Peso tara (g):	DENSIDADE (kg/dm ³)	
Cimento	21,0 °C		Peso total (g):		
Água	21,5 °C		Peso líquido (g):		
Mistura	21,7 °C		Volume (ml):		
ÍNDICE DE FLUIDEZ (s)			EXSUDAÇÃO		
1ª medida:	9	média		Índice de exsudação = $\frac{\text{vol. de água}}{\text{vol. inicial}} = 0,00\%$	
2ª medida:	8,7				
3ª medida:	8,72	8,81			
1º DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO			EXPANSÃO		
Horas		Leituras (ml)		Índice de expansão = $\frac{\text{vol. total} - \text{vol. inicial}}{\text{vol. inicial}} = 0,87\%$	
		Água	Mistura		
Inicial	13:55	0	580		
1º	14:25	0	580		
2º	14:55	0	580		
3º	15:25	0	580		
4º	15:55	0	585		
5º	16:30	0	585		
6º	17:00	0	585		
2º DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO			EQUIPAMENTOS		
Horas		Leituras (ml)		Termômetro:	Calibração:
		Água	Mistura	Cronômetro:	Calibração:
Inicial	14:00	0	225	Balança:	Calibração:
1º	14:30	0	225	Recipiente:	Verificação:
2º	15:00	0	225	Misturador:	Verificação:
3º	15:30	0	227	Cone de Marsh:	Verificação:
4º	16:00	0	227	Proveta:	Calibração:
5º	16:30	0	227		
6º	17:00	0	227		
Observações:					
Técnico executor:		Técnico conferente:		Engenheiro responsável:	

ANEXO 3.7: PROJETO DA LAJE PROTÓTIPO

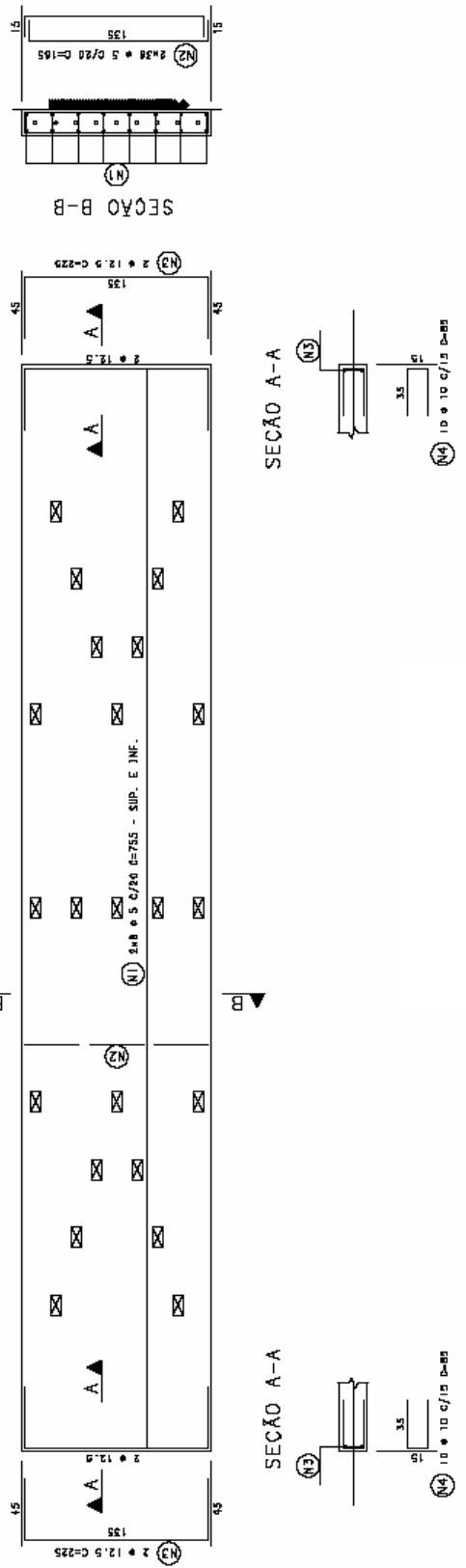
FORMA DA LAJE P/ ENSAIO DE PERDAS DE PROTENÇÃO

ESC. 1:25

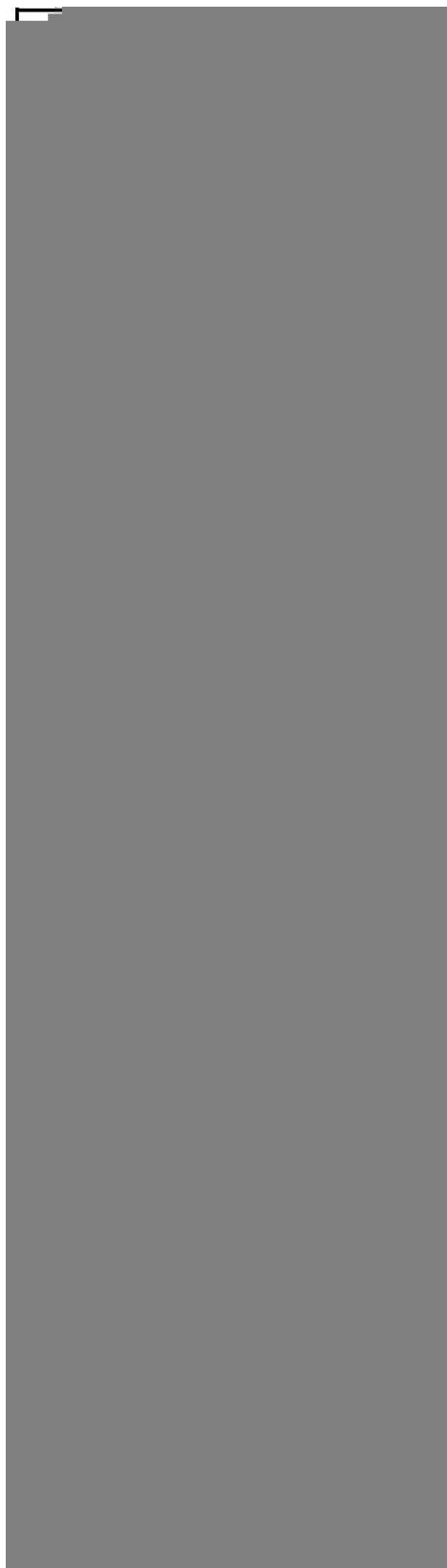


ARMADURA DA LAJE

ESC. 1:25



ANEXO 3.8: ENSAIOS DO AÇO CA 50



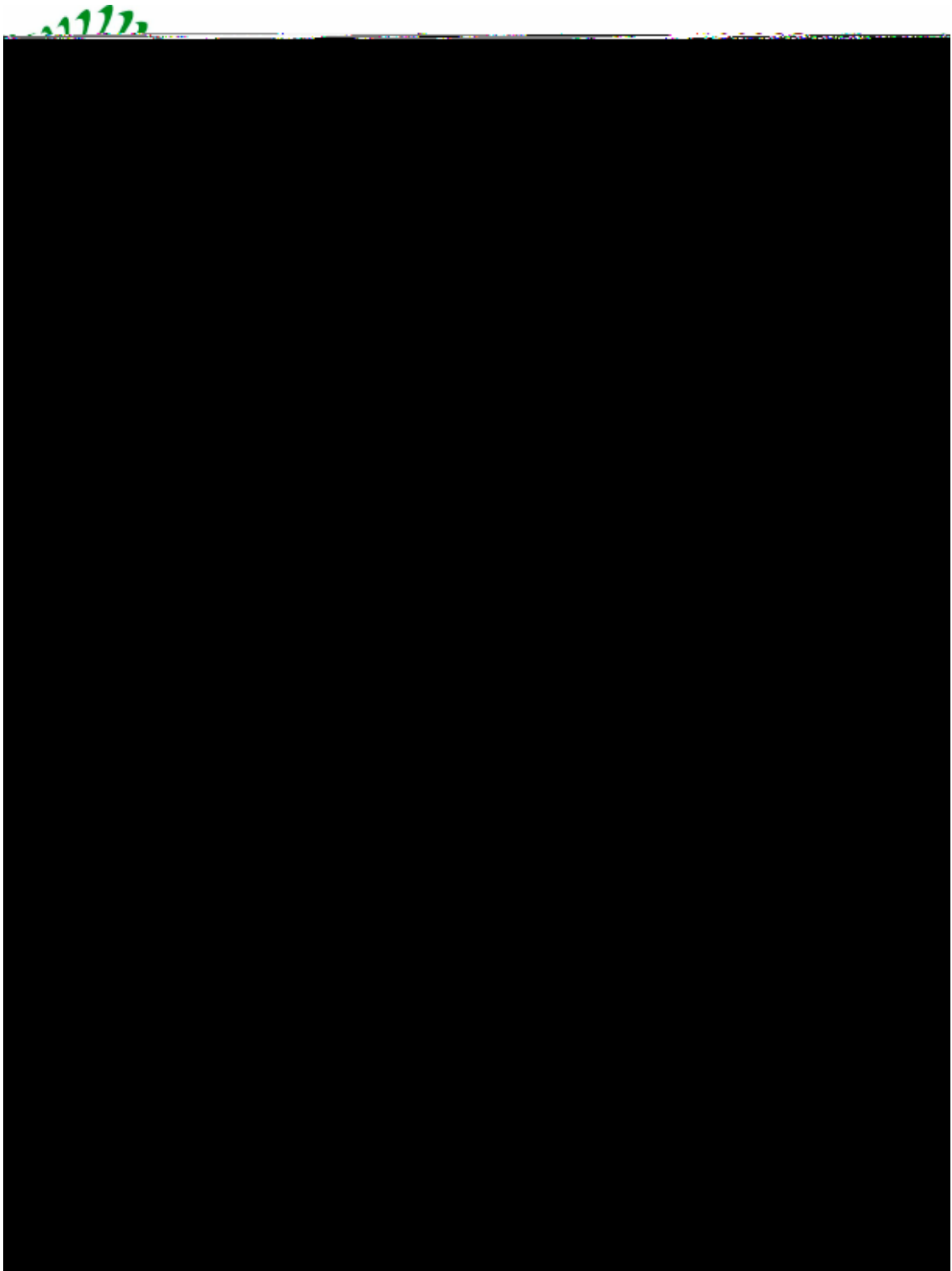
ANEXO 3.9: ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS			CONCRETO - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPO DE PROVA CILÍNDRICO NBR 5739/94										
Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Altura após capeado (mm)	Tempo de ensaio (s)	Carga Ruptura (kgf)	Tensão Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Incerteza de Medição ± (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (dias)
	1	100	200	204	40	18.239	22,8	22,6		Cisalhada	23/10	8:35	3
	2	100	200	205	39	17.938	22,4						
	3	100	200	205	41	18.959	23,7	23,1		Cisalhada	26/10	11:46	7
	4	100	200	204	40	18.072	22,6						
	5	100	200	204	51	23.038	28,8	29,2			03/11	10:50	15
	6	100	200	204	53	23.673	29,6						
	7	100	200	204	54	24.125	30,1	31,4			16/11	16:00	28
	8	100	200	204	53	26.248	32,8						
Observações:													
Executor:				Conferente:				Paquímetro: PAQ-006			Prensa: MAQ-012		
								Cronômetro: -			Escala: 200 tf		

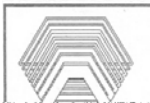
ANEXO 3.10: ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO SECANTE DO CONCRETO

LAME <small>LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</small>		CONCRETO - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICO MÓDULO SECANTE - Plano III - NBR 8522/84																							
Dados		Extensômetro Digital																							
Registro	concreto izan	Comprimento:		75,80	mm																				
Corpo de prova:	1	Número de bases de medida:		2																					
Data do ensaio:	16/11/2006	Sensibilidade do aparelho de medida: 0,0001 mm																							
Idade da amostra (dias):	28																								
Resistência à compressão prevista:		32		MPa																					
Diâmetro:	100	Carga de ruptura Obtida:		25.729	kgf																				
Altura:	200	Resistência à compressão obtida:		32,1	MPa																				
Carregamento	Força kgf	Tensão MPa	Deformação mm	Deformação Específica ($\times 10^{-6}$)	Módulo de deformação Secante																				
0,5 MPa	400	0,5	0,0000	0,0	-																				
0,1 fc	2.516	3,1	0,0053	69,9	37,2 GPa																				
0,2 fc	5.036	6,3	0,0123	162,3	35,7 GPa																				
0,3 fc	7.552	9,4	0,0201	265,2	33,6 GPa																				
0,4 fc	10.081	12,6	0,0289	381,3	31,7 GPa																				
0,5 fc	12.589	15,7	0,0489	645,1	23,6 GPa																				
0,6 fc	15.113	18,9	0,0509	671,5	27,4 GPa																				
0,7 fc	17.621	22,0	0,0671	885,2	24,3 GPa																				
0,8 fc	20.146	25,2	0,0920	1213,7	20,4 GPa																				
Observações:																									
<p style="text-align: center;">Módulo de Deformação Estática</p> <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico de Tensão vs. Deformação Específica</caption> <thead> <tr> <th>Deformação específica ($\times 10^{-6}$)</th> <th>Tensão (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td>0,5</td></tr> <tr><td>69,9</td><td>3,1</td></tr> <tr><td>162,3</td><td>6,3</td></tr> <tr><td>265,2</td><td>9,4</td></tr> <tr><td>381,3</td><td>12,6</td></tr> <tr><td>645,1</td><td>15,7</td></tr> <tr><td>671,5</td><td>18,9</td></tr> <tr><td>885,2</td><td>22,0</td></tr> <tr><td>1213,7</td><td>25,2</td></tr> </tbody> </table>						Deformação específica ($\times 10^{-6}$)	Tensão (MPa)	0,0	0,5	69,9	3,1	162,3	6,3	265,2	9,4	381,3	12,6	645,1	15,7	671,5	18,9	885,2	22,0	1213,7	25,2
Deformação específica ($\times 10^{-6}$)	Tensão (MPa)																								
0,0	0,5																								
69,9	3,1																								
162,3	6,3																								
265,2	9,4																								
381,3	12,6																								
645,1	15,7																								
671,5	18,9																								
885,2	22,0																								
1213,7	25,2																								

ANEXO 3.13: CARTA DO TRAÇO DO CONCRETO UTILIZADO NO ENSAIO



ANEXO 3.14: EXEMPLO DE CONTROLE DE CAMPO (ALONGAMENTO)

	PROTENDE Sistemas e Métodos de Construção Ltda.	FICHA DE CONTROLE DE PROTENSÃO	FOLHA Nº.:

ANEXO 3.15: CERTIFICADO DE AFERIÇÃO DA PRENSA DO LAME

Emic-Dcame

laboratório de calibração credenciado pela Cgcre/Inmetro sob o número 197



Máquinas de Ensaio

Certificado de Calibraçãonúmero: **570/05**

emissão: 05/09/05

cliente: Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento - LACTEC
BR 116, km 98, s/nº - Centro Politécnico da UFPR - Jardim das Américas
Cep: 81531-980 - Curitiba - PR

item calibrado: Máquina Universal de Ensaios
identificação: modelo DL 10000; NO: 5024; NS: 019; marca Emic; MAQ-005
escalas calibradas: 2000N; 50kN; 100kN - compressão
procedimento: PQ04 revisão 01 - procedimento baseado na norma NBR NM-ISO 7500

local da calibração: laboratório do cliente
data da calibração: 02/09/05
temperatura (°C): 19,6
ordem de serviço nº: 509/05

técnico: Joelson Albino Varela

Leonardo Borges Chieretto
Engenheiro Mecânico

Este certificado é válido exclusivamente para o equipamento calibrado nas condições desta ocasião, não sendo estendido a quaisquer outros lotes, mesmo que similares.

Este certificado só deve ser reproduzido completo. Reprodução de partes requer aprovação escrita do laboratório.

Este certificado atende aos requisitos de credenciamento pela Cgcre/Inmetro, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de m

ANEXO 3.16: CERTIFICADO DE AFERIÇÃO DA PRENSA DO LAME

Emic-Dcame

laboratório de calibração credenciado pela Cgcre/Inmetro sob o número 197

**Certificado de Calibração**número: **679/06**

emissão: 03/10/06

cliente: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC
BR 116 km 98 - Jardim das Américas - Curitiba - PR - CEP: 81531-980

item calibrado: Máquina Universal de Ensaios
identificação: modelo DL30000/PC200; NO 5889/5881; NS 021/041; Marca Emic; MAQ-012
escalas calibradas: 300kN; 2000kN - Compressão
procedimento: PQ04 revisão 01 - procedimento baseado na norma NBR NM-ISO 7500

MAQ-013

local da calibração: Instalações do cliente - Laboratório
data da calibração: 18/09/06
temperatura (°C): 21,6
ordem de serviço nº: 565/06

técnico: Joélson Albino Varela

Leonardo Borges Chiaretto
Engenheiro Mecânico

Este certificado é válido exclusivamente para o equipamento calibrado nas condições desta ocasião, não sendo estendido a quaisquer outros lotes, mesmo que similares.

Este certificado só deve ser reproduzido completo. Reprodução de partes requer aprovação escrita do laboratório.

Este certificado atende aos requisitos de credenciamento pela Cgcre/Inmetro, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com ν graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

O Inmetro é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo do ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation.
O Inmetro é signatário de acordo bilateral de reconhecimento mútuo com a EA - European Co-operation for Accreditation.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)