



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

OSVALDO SOUSA BORGES NETO

**CÁLCULO AUTOMATIZADO DAS PERDAS DE PROTENSÃO  
UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO EM AUTOLISP**

Tucuruí - PA  
2010

OSVALDO SOUSA BORGES NETO

**CÁLCULO AUTOMATIZADO DAS PERDAS DE PROTENSÃO UTILIZANDO A  
PROGRAMAÇÃO EM AUTOLISP**

Trabalho de Conclusão de Curso como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Ronaldson José de França Mendes Carneiro.

Tucuruí - PA  
2010

OSVALDO SOUSA BORGES NETO

**CÁLCULO AUTOMATIZADO DAS PERDAS DE PROTENSÃO UTILIZANDO A  
PROGRAMAÇÃO EM AUTOLISP**

Trabalho de Conclusão de Curso como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Ronaldson José de França Mendes Carneiro.

Tucuruí, 27 de novembro de 2010.

Aprovado por:

---

Prof<sup>o</sup>. Ronaldson José de França Mendes Carneiro, DSc. (UFPA)  
(Orientador)

---

Prof<sup>o</sup>. Antônio Malaquias Pereira, MSc. (UFPA)  
(Examinador Interno)

---

Prof<sup>a</sup>. Carolina Coelho da Rosa, MSc. (UFPA)  
(Examinadora Interna)

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu Deus criador do céu e da terra em quem confio.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Ronaldson Carneiro pela paciência, confiança e conhecimentos compartilhados. Ao meu pai Weliton e minha mãe Emília pelo incentivo e força que me fizeram chegar aqui. Aos meus irmãos Willian e Weliton que sempre estiveram comigo quando necessitei. E aos meus amigos que me acompanharam nessa fase até o fim.

## RESUMO

As estruturas de concreto protendido estão ganhando espaço na construção civil graças a suas vantagens técnicas e econômicas. Em seu processo de cálculo se faz necessário a verificação das perdas de protensão, que são inerentes a essa tecnologia, buscando o melhor aproveitamento dos materiais e economia na estrutura. Para tanto, é indispensável o uso de ferramentas computacionais a fim de otimizar as etapas de cálculo. A programação em AutoLISP, uma linguagem reconhecida pelo AutoCAD, e muito empregada pelos projetistas, permite a programação das equações das perdas de protensão preconizadas na NBR 6118 e desenha o elemento protendido com os gráficos das perdas de protensão. São apresentados dois exemplos para validar os resultados do programa. Os resultados obtidos pelo programa são comparados aos valores obtidos manualmente. Os resultados mostram que o programa é eficiente no cálculo das perdas de protensão, tanto para o caso ancoragens ativa-ativa quanto no caso de ancoragens ativa-passiva, bem como na visualização dos gráficos das perdas imediatas e progressivas. Outro ponto positivo do uso do programa é a utilização da formulação mais elaborada para cálculo das perdas progressivas, prevista na NBR 6118, que resultam em valores mais precisos.

Palavras-chave: concreto protendido, perdas de protensão, *AutoLISP*.

## **ABSTRACT**

Prestressed concrete structures are gaining importance in the construction industry through its technical and economic advantages. In its calculation process, it is necessary to verify the prestressing losses, which are inherent to this technology, looking for the best use of materials and economic structures. Therefore, it is necessary to use computational tools to optimize the calculation steps. The AutoLISP programming, a language recognized by AutoCAD, and very employed by designers, allows programming of the equations provided by NBR 6118 for prestressing losses calculation and draws the structural element and the prestressing losses graphics. Two examples are shown to validate the results of the program. The results obtained by the program are compared to the values obtained manually. The results show that the program is effective in the calculation of prestressing losses, for active-active and active-passive anchorages, as well as the graphs for immediate progressive losses. Another positive aspect of using the program is the use of more elaborate formulation for progressive losses calculation provided by NBR 6118, resulting in more precise values.

Keywords: prestressed concrete, prestressing losses, AutoLISP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de viga protendida. Fonte: Carneiro (2007).	3
Figura 2 - Tensões na seção A A' da viga. Fonte: Carneiro (2007).	4
Figura 3 - Primeira ponte em concreto protendido. Fonte: sites.google.com /site /cissaat /história.	5
Figura 4 - Esquema de fabricação de elementos pré-moldados em concreto protendido com aderência inicial. Fonte: Hanai (2005).	7
Figura 5 - Posicionamento das bainhas metálicas na viga. Fonte: Carneiro (2007).	8
Figura 6 - Aplicação da protensão com macaco hidráulico. Fonte: Carneiro (2007).	8
Figura 7 - Cabos e ancoragens. Fonte: Carneiro (2007).	8
Figura 8 - Injeção da nata de cimento. Fonte: Carneiro (2007).	8
Figura 9 - Elementos de ancoragem da cordoalha engraxada. Fonte: Carneiro (2007).	9
Figura 10 - Ilustração de cordoalhas engraxadas. Fonte: Carneiro (2007).	9
Figura 11 - Macaco de protensão de mono cordoalha. Fonte: Carneiro (2007).	9
Figura 12 - Disposição das cordoalhas engraxadas em laje. Fonte: Carneiro (2007).	9
Figura 13 - Diagrama tensão x deformação do concreto na compressão. Fonte: Hognestad (apud PARK e PAULAY, 1975).	10
Figura 14 - Diagrama tensão x deformação do concreto idealizado. Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).	11
Figura 15 - Rolo de fios para protensão. Fonte: Belgo.	13
Figura 16 - Fio liso para protensão. Fonte: Trecem.	13
Figura 17 - Cordoalha de 3 e 7 fios. Fonte: Revista Concreto.	13

Figura 18 - Seção de cordoalha de 7 fios. Fonte: <a href="http://www.cesec.ufpr.br/metallica">www.cesec.ufpr.br/metallica</a> .....	13
Figura 19 - Rolo de cordoalhas. Fonte: Belgo.....	13
Figura 20 - Diagrama tensão x deformação do aço de protensão. Fonte: Carneiro (2007).....	14
Figura 21 - Diagrama tensão deformação para aços de armaduras ativas. Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).....	14
Figura 22 - Perdas por atrito em cabo parabólico. Fonte: Carneiro (2007).....	17
Figura 23 - Acomodação do cabo de protensão no sistema de ancoragem. Fonte: Carneiro (2007). .....	19
Figura 24 - Sequência de protensão de dois cabos. Fonte: Carneiro (2009). .....	20
Figura 25 - Pontos cartesianos do gráfico das perdas por atrito.....	27
Figura 26 - Variação da força no cabo devido à acomodação.....	28
Figura 27 - Exemplo da função <i>while</i> .....	29
Figura 28 - Pontos considerados para o cálculo da Área $E_p \times A_p \times d$ . .....	30
Figura 29 - Valor da força $\Delta P_p$ nas perdas por encurtamento imediato do concreto. ....	31
Figura 30 - Pontos cartesianos do gráfico das perdas por atrito.....	34
Figura 31 - Pontos da Área $E_p \times A_p \times d$ (ancoragens ativa-passiva). .....	35
Figura 32 - Fluxograma do programa de perdas de protensão em <i>AutoLISP</i> .....	36
Figura 33 - Variáveis do programa de perdas de protensão em <i>AutoLisp</i> para duas ancoragens ativas.....	37
Figura 34 - Características geométricas da seção da viga. ....	38
Figura 35 - Carregando a programação em <i>AutoLISP</i> no <i>AutoCAD</i> . .....	38
Figura 36 - Resultado das perdas por atrito do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).....	39

Figura 37 - Resultado das perdas por acomodação do exemplo (para ancoragens ativa-ativa). .....	40
Figura 38 - Resultado das perdas por encurtamento imediato do exemplo (para ancoragens ativa-ativa). .....	41
Figura 39 - Resultado das perdas progressivas do exemplo (para ancoragens ativa-ativa). ....	42
Figura 40 - Resultado da memória de cálculo do exemplo (para ancoragens ativa-ativa). .....	43
Figura 41 - Resultado final das perdas de protensão obtidas manualmente. Fonte: Carneiro (2007). .....	43
Figura 42 - Variáveis do programa de perdas de protensão em <i>AutoLisp</i> (ancoragens ativa- passiva). .....	44
Figura 43 - Esquema do piso com lajes nervuradas de concreto armado e vigas-faixa protendidas. ....	45
Figura 44 - Detalhe da nervura. ....	45
Figura 45 - Resultado das perdas por atrito do exemplo (ancoragens ativa-passiva). .....	46
Figura 46 - Resultado das perdas por acomodação do exemplo (ancoragens ativa-passiva). ..	47
Figura 47 - Resultado das perdas por encurtamento imediato do exemplo (ancoragens ativa- passiva). .....	48
Figura 48 - Resultado das perdas progressivas e memória de cálculo do exemplo (ancoragens ativa-passiva). .....	49
Figura 49 - Resultado final das perdas de protensão obtidas manualmente. Fonte: Rossi (2009). .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cordoalhas de 3 e 7 fios estabilizados (RB).....	15
Tabela 2 - Valores de acomodação no sistema Freyssinet .....	19
Tabela 3 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\varphi(t_{\infty}, t_0)$ .....	21
Tabela 4 - Valores de $\psi_{1000}$ , em porcentagem .....	23
Tabela 5 - Valores interpolados de $\varphi(t_{\infty}, t_0)$ e de $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ .....	32
Tabela 6 - Valores interpolados de $\psi_{1000}$ em porcentagem.....	33

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	APRESENTAÇÃO .....	1
1.2	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
<b>2</b>	<b>CONCEITOS RELACIONADOS AO CONCRETO PROTENDIDO .....</b>	<b>3</b>
2.1	DEFINIÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO .....	3
2.2	EVOLUÇÃO DO CONCRETO PROTENDIDO.....	4
2.3	DIFERENÇAS ENTRE CONCRETO ARMADO E CONCRETO PROTENDIDO ..	6
2.4	SISTEMAS DE PROTENSÃO .....	7
2.4.1	Concreto protendido com aderência inicial (armadura pré-tracionada).....	7
2.4.2	Concreto protendido com aderência posterior (armadura pós-tracionada) .....	8
2.4.3	Concreto protendido sem aderência (armadura pós-tracionada).....	8
<b>3</b>	<b>MATERIAIS EMPREGADOS NO CONCRETO PROTENDIDO .....</b>	<b>10</b>
3.1	CONCRETO .....	10
3.2	AÇOS PARA ARMADURAS ATIVAS .....	12
3.2.1	Tipos de aço de protensão .....	12
3.2.2	Propriedades mecânicas mais importantes .....	14
3.2.3	Designação do aço de protensão .....	15
<b>4</b>	<b>PERDAS DE PROTENSÃO .....</b>	<b>16</b>
4.1	PERDAS IMEDIATAS .....	16
4.1.1	Perdas por atrito.....	16
4.1.2	Perdas por deslizamento da armadura e acomodação das ancoragens.....	18
4.1.3	Perdas por encurtamento imediato do concreto .....	19
4.2	PERDAS PROGRESSIVAS.....	21
4.2.1	Retração e fluência .....	21
4.2.2	Relaxação do aço.....	22
4.3	PROGRESSIVAS FINAIS .....	23
4.3.1	Processo simplificado para o caso de fases únicas de operação.....	23
4.3.2	Processo aproximado.....	25

<b>5</b>	<b>ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO .....</b>	<b>26</b>
5.1	PROGRAMAÇÃO PARA CABO PARABÓLICO-RETILÍNEO COM DUAS ANCORAGENS ATIVAS .....	26
5.1.1	Programação das perdas por atrito .....	26
5.1.2	Programação das perdas por acomodação das ancoragens .....	27
5.1.3	Programação das perdas por encurtamento imediato do concreto .....	31
5.1.4	Programação das perdas progressivas .....	32
5.2	PROGRAMAÇÃO PARA CABO PARABÓLICO COM ANCORAGENS ATIVA-PASSIVA .....	33
5.2.1	Programação das perdas por atrito .....	33
5.2.2	Programação das perdas por acomodação das ancoragens .....	34
5.2.3	Programação das perdas por encurtamento imediato do concreto .....	35
5.2.4	Programação das perdas progressivas .....	36
5.3	FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO.....	36
<b>6</b>	<b>APLICAÇÃO DO PROGRAMA.....</b>	<b>37</b>
6.1	CABO PARABÓLICO COM DUAS ANCORAGENS ATIVAS.....	37
6.2	CABO PARABÓLICO COM ANCORAGENS ATIVA-PASSIVA.....	44
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>51</b>
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52
	<b>APÊNDICE A - RESUMO DAS VARIÁVEIS PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA - ANCORAGENS ATIVA-ATIVA.....</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE B - RESUMO DAS VARIÁVEIS PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA - ANCORAGENS ATIVA-PASSIVA.....</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE C - CÓDIGO-FONTE DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO EM AUTOLISP - ANCORAGENS ATIVA-ATIVA.....</b>	<b>58</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

A utilização do concreto protendido tem larga aceitação no mundo todo, e vem se difundindo cada vez mais. Este fato pode ser comprovado através do grande número de obras civis realizadas, desde silos e tanques, passando por pontes e viadutos, até estádios e edifícios de todos os tipos, incluindo obras com mais de 40 anos.

Isto está relacionado com o fato de que a protensão nas estruturas de concreto ter se mostrado muito eficiente no atendimento dos estados limites de serviço, principalmente flecha e fissuração, exigidos pelas normas de estruturas de concreto. E nos últimos anos, observou-se que a protensão sem aderência vem se firmando como uma solução vantajosa, técnica e econômica, em edificações de maneira geral, em razão, principalmente, da simplicidade do manuseio das cordoalhas engraxadas, bem como da redução dos custos em decorrência da eliminação das bainhas metálicas e da operação de injeção.

No processo de cálculo de estruturas de concreto protendido está compreendido o cálculo das perdas de protensão, que num primeiro momento são estimadas e depois são conferidas com os resultados das perdas imediatas e das perdas progressivas.

Este processo confere economia no dimensionamento de estruturas protendidas, visto que, se a análise da estimativa de perdas com o resultado obtido for satisfatória, o calculista poderá manter o número de cordoalhas. Mas, se as perdas estimadas estiverem divergentes das obtidas, o calculista deverá modificar o número de cordoalhas ou a resistência do concreto e realimentar o processo de cálculo. Dessa forma, há o aproveitamento máximo dos materiais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DO TRABALHO

Por ser um processo moroso e necessitar de dados gráficos para o acompanhamento, no cálculo das perdas de protensão se faz necessário a utilização de uma ferramenta que facilite e agilize este procedimento. Por isso, neste trabalho propõe-se criar uma ferramenta de auxílio ao cálculo das perdas de protensão, que seja de manuseio simples e eficiente, obtendo

os gráficos de perdas e tabelas de memória de cálculo no mesmo ambiente em que os projetos são apresentados: no *AutoCAD*.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além do presente capítulo introdutório, o trabalho está organizado conforme os capítulos descritos a seguir.

O capítulo 2 refere-se aos principais conceitos, definições e o histórico sobre o concreto protendido, onde são destacadas as diferenças entre o concreto armado e o concreto protendido, e os tipos de sistemas de protensão.

No capítulo 3 são descritos os materiais empregados no concreto protendido, suas características e relações tensão x deformação.

No capítulo 4 são apresentadas as perdas de protensão, com suas respectivas formulações preconizadas pela NBR 6118.

No capítulo 5 é descrito como o programa de perdas foi elaborado através da linguagem *AutoLISP* para o caso de cabo com duas ancoragens ativas e o para o caso de cabo com ancoragens ativa-passiva.

No capítulo 6 é mostrado um exemplo de como utilizar o programa de perdas de protensão em *AutoLISP* para os dois casos considerados.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CONCEITOS RELACIONADOS AO CONCRETO PROTENDIDO

### 2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), os elementos de concreto protendido são aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por 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).

Dessa forma, a protensão é um artifício de se introduzir forças especiais permanentes na estrutura (forças de protensão) para melhorar o seu comportamento quando sujeito aos carregamentos externos, como a eliminação das tensões de tração, que acarretam fissuras devido à baixa resistência do concreto à tração, mantendo a inércia da peça.

A protensão pode ser ilustrada pelo esquema mostrado na Figura 1, na qual uma barra, com rosca laminada, colocada em um duto posicionado na região inferior da viga, recebe placas de aço e porcas na extremidade (sistema de ancoragem). O aperto das porcas, realizado após o endurecimento do concreto, cria tensões de tração no aço que comprimem o concreto.

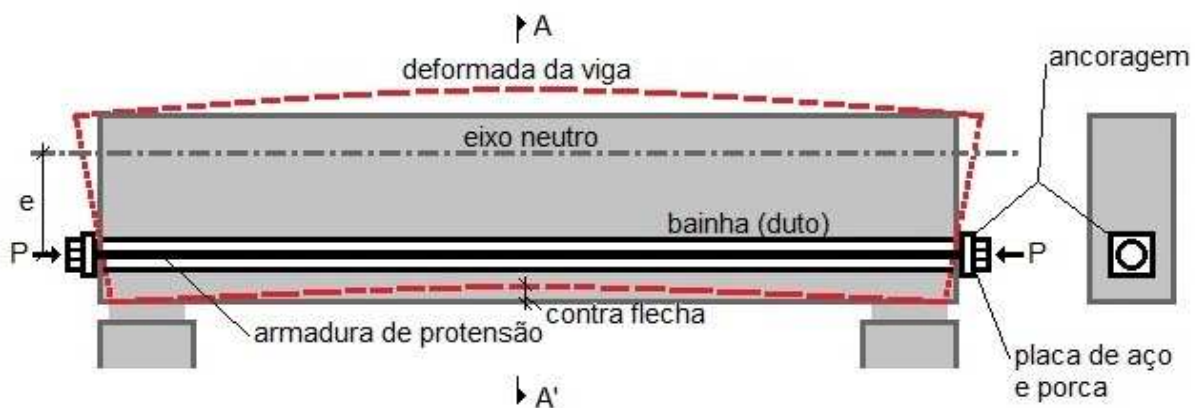


Figura 1 - Esquema de viga protendida. Fonte: Carneiro (2007).

Utilizando o princípio da superposição dos efeitos, tem-se a seguinte disposição das tensões na seção AA':

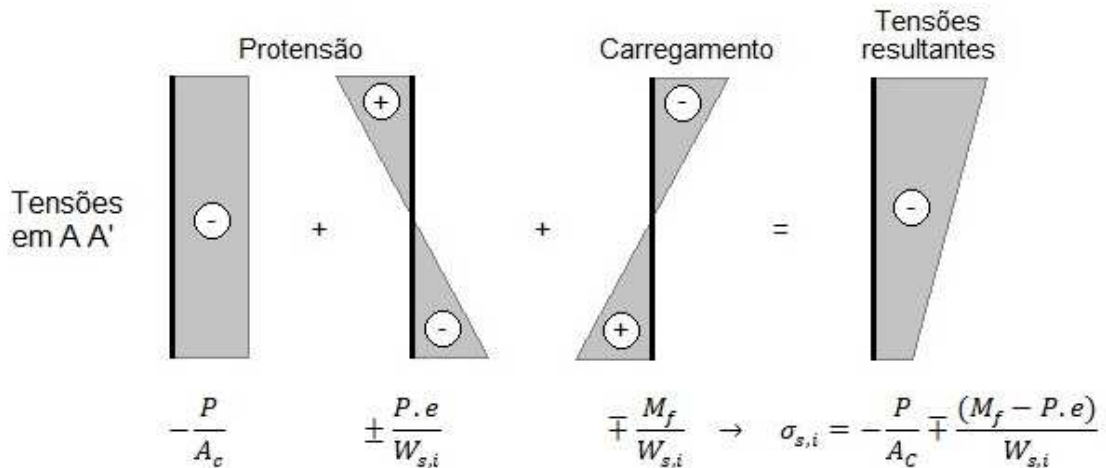


Figura 2 - Tensões na seção A A' da viga. Fonte: Carneiro (2007).

Outro benefício gerado pela redução ou eliminação da fissuração da peça, é a diminuição das flechas, pois não há uma redução da inércia da seção e também observa-se a formação de uma contra-flecha gerada pela protensão. Dessa forma, o concreto protendido torna-se uma ferramenta essencial para atender situações em que há problemas relacionados às flechas e/ou fissuras.

## 2.2 EVOLUÇÃO DO CONCRETO PROTENDIDO

O princípio da protensão, apesar de ser bastante antigo, foi aplicado no concreto no fim dos anos 1800's. A primeira idéia de se pré-tensionar o concreto foi aplicada em 1886 por um norte americano, P. H. Jackson, que obteve patentes para protender pedras artificiais e arcos de concreto.

Em 1888, o alemão Doehring conseguiu patente para fabricar elementos de pisos com argamassa e arame estirado, tendo utilizado tal material para a construção de lajes de piso. Foi a primeira proposta para a execução de peças pré-moldadas protendidas.

No ano de 1907, o alemão M. Koenen tenta utilizar a protensão no concreto com interesse em eliminar a fissuração visando aplicação em obras ferroviárias. As experiências

realizadas, no entanto, não atingiram o objetivo pretendido porque a tensão de protensão foi muito pequena para compensar as deformações de encurtamento produzidas pela retração e fluência do concreto, de tal modo que a armadura, previamente tracionada, afrouxou, anulando as tensões de compressão no concreto. Os fenômenos da retração e, principalmente, fluência do concreto eram pouco conhecidos na época, por isso não se encontrou uma conveniente e correta explicação para o fracasso da experiência.

Foi Eugène Freyssinet que, em 1928, diagnosticou a necessidade de utilização de materiais de alta resistência. Neste mesmo ano, registra a primeira patente de protensão do mundo, introduzindo o termo técnico "*precontrainte*" para designar o tracionamento prévio de fios de alta resistência (cabos soltos no concreto munidos de ancoragens em suas extremidades).

Em 1940, Freyssinet inventa os dispositivos de ancoragem e os equipamentos de protensão que têm o seu nome e ainda hoje são largamente utilizados no mundo inteiro. Ainda neste ano, surge outra patente de protensão, análoga ao sistema FREYSSINET, criada pelo engenheiro belga Magnel.

O ano de 1941 foi marcado pela aplicação do concreto protendido em estruturas de grandes vãos. Freyssinet projeta a ponte sobre o rio Marne (na França) com 55 metros de vão e altura de 1,27 metros, ou seja, um 1/43 do vão.



**Figura 3 - Primeira ponte em concreto protendido. Fonte: [sites.google.com/site/cissaat/história](https://sites.google.com/site/cissaat/história).**

Entre 1948 e 1949 foram patenteados novos sistemas de protensão: MORANDI na Itália, VSL e BBRV na Suíça, LEOBA e DYWIDAG na Alemanha. Em 1950, é executada a primeira ponte ferroviária em Concreto Protendido, projeto de Leonhardt, com o sistema Leoba.

Em 1952, Finsterwalder, com o emprego do sistema DYWIDAG, projeta a primeira ponte em balanços sucessivos de Concreto Protendido.

No ano de 1959, foi construída no Brasil a primeira ponte em balanço sucessivo com rótula central, sobre o Rio Tocantins, vencendo um vão de 140 metros, o que constituiu na época recorde mundial no gênero.

Inúmeras outras grandes obras foram e vêm sendo construídas, no Brasil e no mundo, com o uso do Concreto Protendido marcando a sua importância no desenvolvimento das estruturas de concreto.

### 2.3 DIFERENÇAS ENTRE CONCRETO ARMADO E CONCRETO PROTENDIDO

Em estruturas de concreto armado a armadura é designada de passiva ou frouxa, pois trabalha somente quando recebe o carregamento não absorvido pelo concreto. A tração gerada pelo carregamento é combatida exclusivamente pelo aço face à fissuração do concreto, assim o aço fica responsável em resistir a tração e o concreto em resistir a compressão.

Já nas estruturas de concreto protendido, a armadura de protensão é chamada de ativa pois trabalha antes do carregamento atuar. Ela é colocada na peça não para receber os esforços, como no concreto armado, mas sim para gerar forças especiais (forças de protensão) com o objetivo de produzir contra-flechas e gerar tensões de compressão necessárias para que o concreto possa absorver a tração oriunda do carregamento. Logo, este se torna responsável tanto pela tração quanto pela compressão. Diz-se que o concreto protendido é um material naturalmente resistente à compressão e artificialmente à tração, possível, pois, com o artifício da protensão. (CARNEIRO, 2007)

A diferença entre concreto armado e protendido está unicamente na existência ou não de forças de protensão. A existência de armadura ativa acarreta procedimentos especiais em

relação ao concreto armado tradicional, tanto no projeto como na execução. No projeto de peças de concreto protendido é necessário calcular com mais rigor os efeitos da retração e da fluência do concreto, bem como da relaxação do aço de protensão; as perdas por atrito, acomodação e deformação imediata do concreto; as outras variações da força de protensão. É necessária também uma verificação mais pormenorizada de todas as etapas de carregamento da peça, visto que a protensão introduz, desde a fase de execução, esforços importantes nos elementos estruturais. Na execução, são utilizados sistemas especiais de protensão, sendo necessários mais parâmetros de controle dos materiais e dos componentes executados. Enfim, requer-se uma maior disponibilidade tecnológica, o que inclui pessoal especializado e equipamentos, em geral, de custo mais elevado. Portanto, pode-se afirmar que as diferenças são essencialmente tecnológicas, isto é, que exigem ou não conhecimentos adicionais de projeto e execução uma vez que os materiais são na sua essência os mesmos. (HANAI, 2005)

## 2.4 SISTEMAS DE PROTENSÃO

### 2.4.1 Concreto protendido com aderência inicial (armadura pré-tracionada)

É aquele em que o estiramento da armadura é realizado antes do lançamento do concreto. A armadura tensionada é ancorada provisoriamente em apoios independentes. Após a concretagem da peça e endurecimento do concreto, a ligação da armadura com os referidos apoios é desfeita e a força de protensão é transferida à peça apenas pela aderência com o concreto. A Figura 4 mostra, esquematicamente, o uso dessa modalidade de concreto protendido na produção de elementos pré-fabricados.

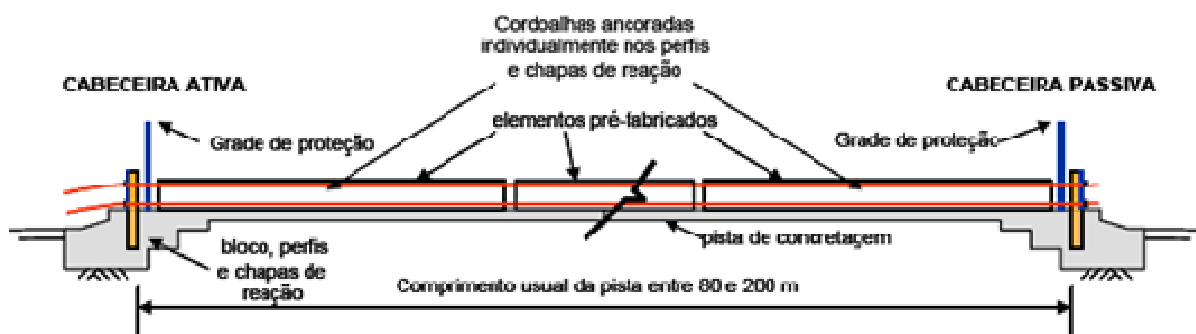


Figura 4 - Esquema de fabricação de elementos pré-moldados em concreto protendido com aderência inicial. Fonte: Hanai (2005).

#### 2.4.2 Concreto protendido com aderência posterior (armadura pós-tracionada)

É aquele no qual a armadura de protensão é colocada em bainhas e tensionada após o lançamento e endurecimento do concreto. A aderência da armadura com o elemento estrutural é adquirida por meio da injeção de nata ou argamassa de cimento nas bainhas. É o sistema normalmente empregado em pontes, reservatórios, barragens, etc. A Figura 5 à Figura 8 ilustram o concreto protendido com aderência posterior.



**Figura 5 - Posicionamento das bainhas metálicas na viga. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 7 - Cabos e ancoragens. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 6 - Aplicação da protensão com macaco hidráulico. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 8 - Injeção da nata de cimento. Fonte: Carneiro (2007).**

#### 2.4.3 Concreto protendido sem aderência (armadura pós-tracionada)

É aquele em que a armadura, dentro de bainhas, é tracionada após o endurecimento do concreto, ficando ligada ao elemento estrutural apenas nas ancoragens. Tem-se empregado a armadura na forma de cordoalhas revestidas com uma camada de graxa e uma capa plástica (PEAD - polietileno de alta densidade) extrudada diretamente sobre a cordoalha já engraxada.

Tem sido utilizada em elementos estruturais de pequeno porte que não necessitam de um grau de protensão elevado, como em lajes e vigas de prédios residenciais e comerciais. A Figura 9 à Figura 12 mostram alguns elementos da protensão não aderente com cordoalhas engraxadas.



**Figura 9 - Elementos de ancoragem da cordoalha engraxada. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 11 - Macaco de protensão de mono cordoalha. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 10 - Ilustração de cordoalhas engraxadas. Fonte: Carneiro (2007).**



**Figura 12 - Disposição das cordoalhas engraxadas em laje. Fonte: Carneiro (2007).**

### 3 MATERIAIS EMPREGADOS NO CONCRETO PROTENDIDO

#### 3.1 CONCRETO

Como o emprego da protensão requer, em geral, a utilização de técnicas mais elaboradas do que no caso de concreto armado, o controle de qualidade global deve ser mais eficiente, sendo necessário o uso de concretos de melhor qualidade.

Dessa forma, a resistência característica à compressão simples dos concretos empregados em concreto protendido situa-se freqüentemente na faixa entre 25 e 50 MPa, enquanto no concreto armado a resistência é fixada entre 20 e 50 MPa.

Resistências elevadas dos concretos são desejáveis por diversos aspectos, entre estes, suportar a introdução da força de protensão que pode causar solicitações prévias muito elevadas, freqüentemente mais altas que as correspondentes a uma situação de serviço. Ademais, a protensão é normalmente aplicada poucos dias após a concretagem do elemento.

Além disso, o emprego de concreto e aços de alta resistência permite a redução em geral das dimensões das peças, diminuindo assim seu peso próprio, o que é primordial, sobretudo no caso de elementos pré-moldados. E concretos de resistência mais alta em geral também têm módulo de deformação mais elevado, o que diminui tanto as deformações imediatas como as que ocorrem ao longo do tempo, provocadas pela fluência do concreto. O diagrama tensão x deformação típico do concreto é mostrado na Figura 13.

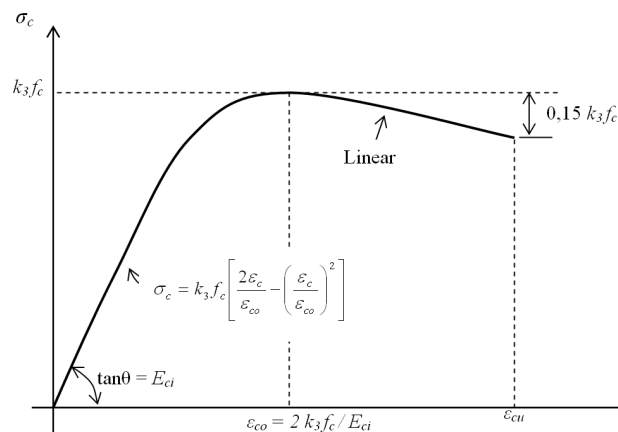


Figura 13 - Diagrama tensão x deformação do concreto na compressão. Fonte: Hognestad (apud PARK e PAULAY, 1975).

Onde:

$\sigma_c$ : a tensão no concreto;

$\varepsilon_c$ : a deformação do concreto;

$k_3$ : a relação entre a resistência máxima do concreto na região comprimida e o valor da resistência obtido no ensaio de corpos de prova cilíndricos;

$f_c$ : a resistência do concreto obtida do ensaio dos corpos de prova cilíndricos;

$\varepsilon_{co}$ : a deformação do concreto correspondente à tensão máxima;

$\varepsilon_{cu}$ : a deformação última do concreto.

Para análise no cálculo em estado limite último, a NBR 6118 permite que seja empregado o diagrama tensão-deformação idealizado mostrado na Figura 14. A distribuição de tensões no concreto se faz de acordo com o diagrama parábola-retângulo, com tensão de pico igual a  $0,85 f_{cd}$ , o qual pode ser substituído pelo retângulo de altura  $0,8 x$ , sendo  $x$  a profundidade da linha neutra com a mesma tensão no caso de seções retangulares.

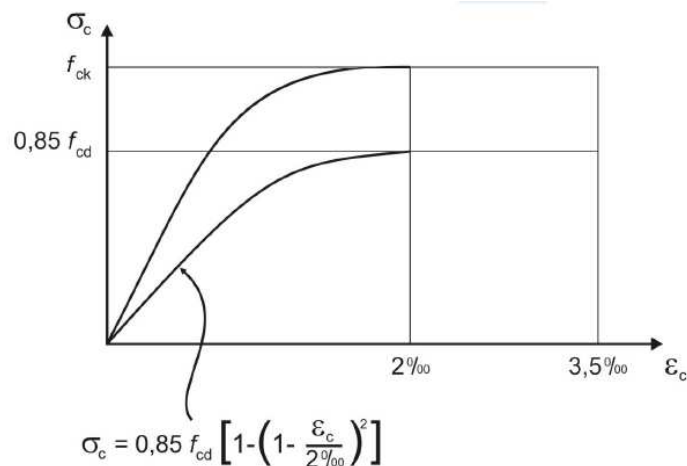


Figura 14 - Diagrama tensão x deformação do concreto idealizado. Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).

Sendo  $f_{ck}$  a resistência característica à compressão e  $f_{cd}$  sua resistência de cálculo obtida por:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Sendo  $\gamma_c$  o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

### 3.2 AÇOS PARA ARMADURAS ATIVAS

O aço empregado no concreto protendido deve apresentar elevada resistência à tração, alto limite elástico e baixa perda de tensão por relaxação. A resistência elevada é garantida com o aumento do teor de carbono e pelo processo de trefilação. Quanto ao tratamento, há dois tipos de aço: aço aliviado de tensões ou de Relaxação Normal (RN) e o aço estabilizado ou de Baixa Relaxação (RB).

O aço aliviado de tensões ou de Relaxação Normal (RN) é aquele em que aço trefilado recebe tratamento térmico que alivia tensões internas de trefilação, através do qual os fios são passados em chumbo derretido entre 250 e 500°C, o que resulta na melhora da linearidade do diagrama tensão x deformação. Contudo, o fio de aço esticado tende a ceder com o tempo e conseqüentemente perder parte da tensão introduzida com a protensão, perda de tensão denominada de relaxação do aço.

O aço estabilizado ou de Baixa Relaxação (RB) é aquele em que aço trefilado recebe tratamento termomecânico, onde parte desta relaxação é provocada propositalmente durante o alívio das tensões, elevando-se a temperatura entre 350 e 400°C e provocando um alongamento no fio de, aproximadamente, 1%. Esta etapa é conhecida como estabilização e este procedimento melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação do aço.

#### 3.2.1 Tipos de aço de protensão

O aço de protensão pode ser fabricado em dois tipos: os fios e as cordoalhas.

Os fios trefilados de aço carbono possuem diâmetro de 4 a 9 mm, fornecidos em rolos, do aço RN ou RB. A trefilação produz encruamento do aço, aumentando sua resistência.

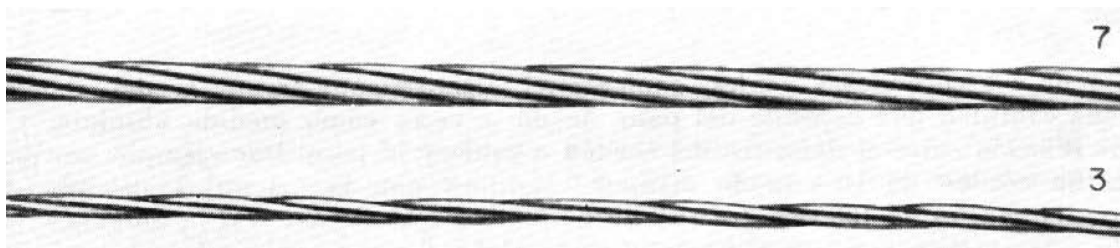


**Figura 15 - Rolo de fios para protensão. Fonte: Belgo.**



**Figura 16 - Fio liso para protensão. Fonte: Trecem.**

As cordoalhas são formadas por fios enrolados em forma de hélice, como uma corda. São constituídas por 3 ou 7 fios, apenas no aço RB. A cordoalha de 3 fios é constituída de fios de mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, numa forma helicoidal com passo uniforme. A cordoalha de 7 fios é constituída de seis fios de mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, em torno de um fio central reto de maior diâmetro (no mínimo 2% maior). São fornecidos em rolos com comprimentos superiores a 600 metros.



**Figura 17 - Cordoalha de 3 e 7 fios. Fonte: Revista Concreto.**



**Figura 18 - Seção de cordoalha de 7 fios. Fonte: [www.cesec.ufpr.br/metallica](http://www.cesec.ufpr.br/metallica)**



**Figura 19 - Rolo de cordoalhas. Fonte: Belgo.**

### 3.2.2 Propriedades mecânicas mais importantes

O comportamento típico do aço de protensão é mostrado no diagrama tensão x deformação, ilustrado na Figura 20.

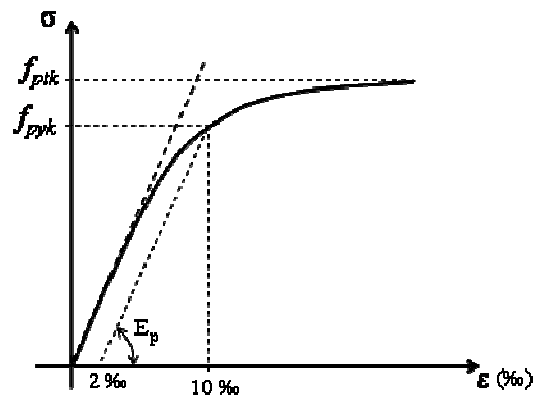


Figura 20 - Diagrama tensão x deformação do aço de protensão. Fonte: Carneiro (2007).

As principais propriedades mecânicas do diagrama são:

$f_{ptk}$  : resistência característica à tração (define a categoria do aço de protensão);

$f_{pyk}$  : resistência característica ao escoamento convencional (tensão correspondente à deformação de 10 ‰ ou à deformação residual de 2 ‰);

$E_p$  : módulo de elasticidade em torno de 200 GPa.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), para cálculo nos estados limites de serviço e último, pode-se utilizar o diagrama simplificado mostrado na Figura 21, sendo  $\epsilon_{uk}$  a deformação de alongamento correspondente a ruptura das cordoalhas.

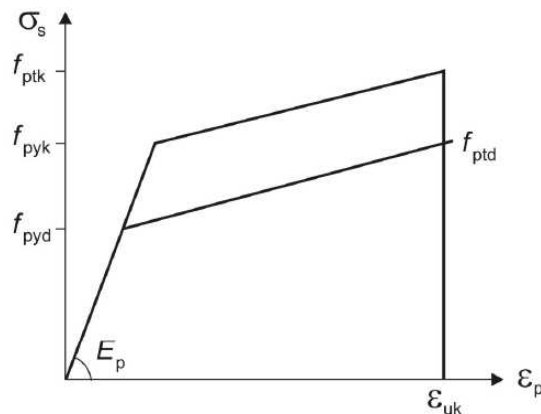


Figura 21 - Diagrama tensão deformação para aços de armaduras ativas. Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).

### 3.2.3 Designação do aço de protensão

A armadura de protensão é designada pelas letras “CP”, para indicar que é um aço de protensão, seguida da categoria do aço, no caso, o valor da resistência característica à tração  $f_{ptk}$ , em  $kN/cm^2$ , das letras RN ou RB, as quais indicam o tratamento do fio, barra ou cordoalha. Para os fios há ainda a indicação da conformação superficial, L (liso) ou E (entalhado). Dessa forma, a designação da armadura de protensão é realizada como segue.

Fios:

CP	$f_{ptk}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	RB ou RN	$\Phi$ (mm)	L ou E
	145 / 150 / 170 / 175		4,0 / 5,0 / 6,0 / 7,0 / 8,0 / 9,0	

Cordoalhas:

CP	$f_{ptk}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	RB	$\Phi$ (mm)
	190		3 x (3,0 a 5,0) / 9,5 / 12,7 / 15,2

Cabe destacar que nas estruturas protendidas com pós-tensão, aderente ou não aderente, trabalha-se somente com as cordoalhas de 7 fios do aço RB de diâmetro 12,7 mm ou 15,2 mm, apenas na categoria 190. As informações técnicas das cordoalhas para protensão estão resumidas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Cordoalhas de 3 e 7 fios estabilizados (RB).**

Produto	Diâmetro Nominal (mm)	Área Aprox. (mm <sup>2</sup> )	Área Mínima (mm <sup>2</sup> )	Massa Aprox. (kg/km)	Carga Mínima de Ruptura (kN)	Carga Mín. a 1% de deformação (kN)	Along. Sob Carga (em 610 mm)
CP 190 RB 3x3,0	6,5	21,8	21,5	171	40,8	36,7	3,5
CP 190 RB 3x3,5	7,6	30,3	30,0	238	57,0	51,3	3,5
CP 190 RB 3x4,0	8,8	38,3	37,6	304	71,4	64,3	3,5
CP 190 RB 3x4,5	9,6	46,5	46,2	366	87,7	78,9	3,5
CP 190 RB 3x5,0	11,1	66,5	65,7	520	124,8	112,3	3,5
CP 190 RB 9,5	9,5	55,5	54,8	441	104,3	93,9	3,5
CP 190 RB 12,7	12,7	101,4	98,7	792	187,3	168,6	3,5
CP 190 RB 15,2	15,2	143,5	140,0	1126	265,8	239,2	3,5

Fonte: Belgo.

## 4 PERDAS DE PROTENSÃO

Segundo Hanai (2005): "embora as forças de protensão sejam de caráter permanente, elas estão sujeitas a variações de intensidade, para maiores ou menores valores". A diminuição da força de protensão é chamada de perda de protensão, e são inerentes aos processos de transferência de tensões para o concreto. Elas são divididas em perda imediatas e perdas progressivas.

### 4.1 PERDAS IMEDIATAS

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003), nos sistemas usuais de protensão as perdas imediatas são aquelas devidas ao atrito entre as armaduras e as bainhas ou concreto, a acomodação e o deslizamento da armadura junto à ancoragem e ao encurtamento imediato do concreto. Isto é, são as perdas que ocorrem no início até o fim do ato da protensão.

#### 4.1.1 Perdas por atrito

As perdas por atrito ocorrem principalmente em razão do contato armadura/bainha ao longo do cabo. Há, também, perdas em decorrência do atrito no contato da armadura com o macaco de protensão e com as ancoragens, as quais são compensadas por um incremento na pressão manométrica aplicada no equipamento. Nos sistemas pré-tracionados (concreto protendido com aderência inicial), não ocorrem perdas por atrito, exceto aquelas nas ancoragens e equipamentos de protensão.

Teoricamente, os cabos retos não têm perdas por atrito. Durante a protensão nos cabos curvos ou poligonais, surgem forças de atrito contrárias ao alongamento da armadura, reduzindo, portanto, a força efetiva de protensão, como ilustrado na Figura 22. As perdas por atrito ao longo do cabo estão diretamente relacionadas à curvatura do cabo, da qual resulta a pressão da armadura contra a bainha, e ao coeficiente de atrito entre as superfícies de contato.

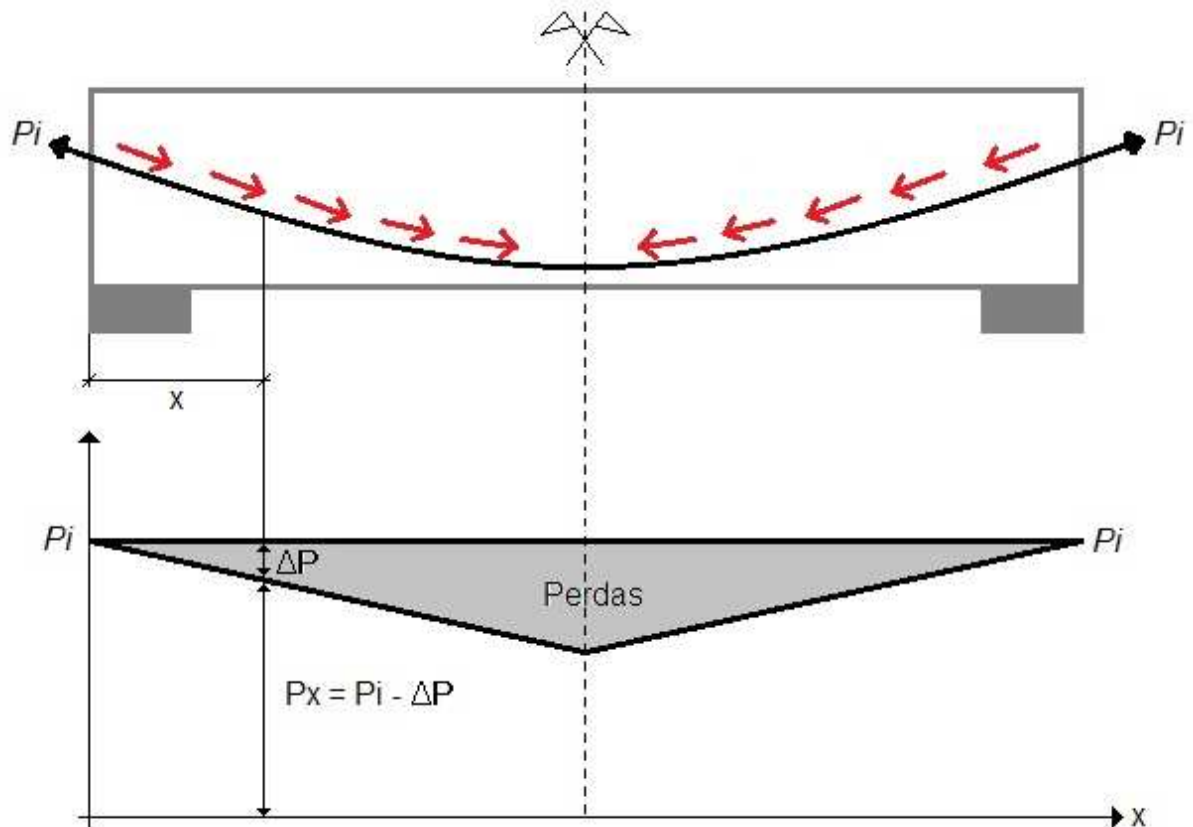


Figura 22 - Perdas por atrito em cabo parabólico. Fonte: Carneiro (2007).

Dessa forma, a força no cabo em uma seção distante  $x$  da ancoragem, considerando as perdas por atrito, pode ser determinada pela Equação (2).

$$P_x = P_i e^{-\mu \Sigma \alpha} \quad (2)$$

Sendo:

$\Sigma \alpha$ : a soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa  $x$ , ou seja, é variação angular da tangente ao cabo até a seção de abscissa  $x$ , em radianos;

$\mu$ : coeficiente de atrito aparente entre a armadura e bainha. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 37), na falta de dados experimentais,  $\mu$  pode ser estimado como se segue (em 1/radianos):

$\mu = 0,50$  entre cabo e concreto (sem bainha);

$\mu = 0,30$  entre barras ou fios com mossas ou saliências e bainha metálica;

$\mu = 0,20$  entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica;

$\mu = 0,10$  entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica lubrificada;

$\mu = 0,05$  entre cordoalha e bainha de polipropileno lubrificada.

Para a cordoalha engraxada, a fabricante Belgo estabelece um coeficiente de atrito entre 0,06 e 0,07.

Além do atrito decorrente da curvatura do cabo, há aquele produzido por desvios não intencionais da bainha em relação a sua posição teórica. Esses desvios parasitários são construtivos e se manifestam tanto nos trechos retos como nos curvos.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003), a consideração do atrito em razão dos desvios não intencionais pode ser assimilada a uma variação angular fictícia, resultando a Equação (3).

$$P_x = P_i e^{-(\mu \Sigma \alpha + k x)} \quad (3)$$

Onde  $k$  é o coeficiente de perda provocada por curvaturas não intencionais por metro linear de cabo. Na falta de dados experimentais pode ser adotado o valor  $0,01\mu$  (1/m).

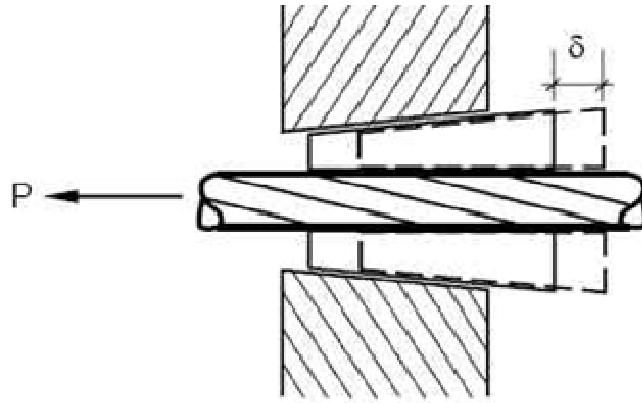
#### 4.1.2 Perdas por deslizamento da armadura e acomodação das ancoragens

A acomodação e deslizamento corresponde ao retorno da armadura devido à transferência do esforço de protensão do equipamento (macaco de protensão) para a ancoragem, ocasionando no encurtamento da armadura e, conseqüentemente, perda de protensão. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), os valores da acomodação devem ser determinados experimentalmente ou adotados os valores indicados pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragem.

Nos sistemas de protensão com pré-tração (CP com aderência inicial), a perda é desprezível, visto que a força na armadura é absorvida pelo concreto por aderência e atrito. Já no sistema com pós-tração, o esforço de protensão é transferido dos equipamentos de protensão para as ancoragens mecânicas, acarretando em perdas.

Neste tipo de sistema, a armadura é tracionada até atingir o alongamento e força de protensão desejados, então, libera-se a armadura, ocasionando a transferência da força de protensão para a ancoragem. Ao receber este esforço, a cunha tende a penetrar na ancoragem,

de modo a prender definitivamente a armadura, acarretando no retorno da armadura e, por conseguinte, uma redução do alongamento no mesmo em razão da acomodação do sistema de ancoragem.



**Figura 23 - Acomodação do cabo de protensão no sistema de ancoragem. Fonte: Carneiro (2007).**

A acomodação depende de cada sistema, sendo fornecida pelo fabricante. Para o sistema FREYSSINET o valor da acomodação está indicado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Valores de acomodação no sistema Freyssinet**

Tipo de Ancoragem	$\delta$ (acomodação)
Série L (1, 2 e 4 $\Phi$ 1/2")	3 mm
Série V (4, 6, 7 e 12 $\Phi$ 1/2")	6 a 8 mm
Série K (19, 27 e 37 $\Phi$ 1/2")	6 a 8 mm

Fonte: Carneiro (2009).

Nas ancoragens mortas ou passivas não são admitidas perdas de protensão a não ser que haja falhas na execução.

#### 4.1.3 Perdas por encurtamento imediato do concreto

A protensão sucessiva de cada um dos “n” cabos da peça protendida no sistema pós-protensão, provoca uma deformação imediata do concreto e, conseqüentemente, o encurtamento e perda nos cabos anteriormente protendidos.

A perda de protensão por deformação imediata do concreto é ilustrada na Figura 24. Seja o elemento protendido por dois cabos:

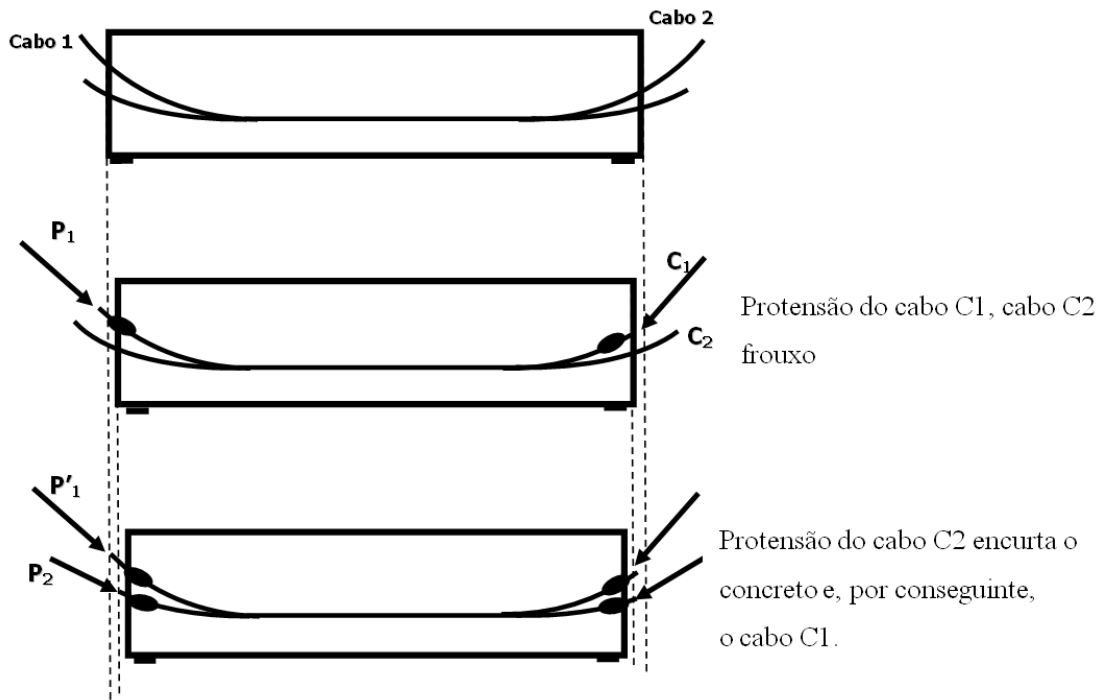


Figura 24 - Sequência de protensão de dois cabos. Fonte: Carneiro (2009).

A protensão do cabo 2 causa uma perda de protensão do cabo 1 por deformação imediata do concreto, ou seja,  $P'_1 < P_1$ . A perda é função do encurtamento do concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, o qual pode ser determinado com base na tensão do concreto devida à protensão e à carga permanente.

A perda média de tensão pode ser obtida pela Equação (4).

$$\Delta\sigma_p = \frac{\alpha_p (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) (n-1)}{2n} \quad (4)$$

Onde:

$n$ : o número de cabos;

$\sigma_{cp}$ : a tensão inicial do concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão devido à protensão simultânea dos  $n$  cabos;

$\sigma_{cg}$ : a tensão no mesmo ponto anterior devido à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão;

$\alpha_p$ : a relação entre  $E_p$  e  $E_{ci}$  (na data da protensão).

Embora a perda seja diferente nos cabos, a consideração da perda média visa a ação conjunta destes no elemento protendido, equivalendo a soma das perdas diferenciadas dos cabos.

## 4.2 PERDAS PROGRESSIVAS

Ocorrem após o ato da protensão, com o passar do tempo. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), estas são decorrentes da retração e da fluência do concreto e da relaxação do aço de protensão.

### 4.2.1 Retração e fluência

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2003), em casos onde não é necessária grande precisão, os valores finais do coeficiente de fluência  $\varphi(t_{\infty}, t_0)$  e da deformação específica de retração  $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$  do concreto, submetido a tensões menores que  $0,5 f_{ck}$  quando do primeiro carregamento, podem ser obtidos, por interpolação linear, a partir da Tabela 3.

**Tabela 3 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração  $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$  e do coeficiente de fluência  $\varphi(t_{\infty}, t_0)$ .**

Umidade ambiente %	40		55		75		90		
	20	60	20	60	20	60	20	60	
<b>Espessura fictícia <math>2Ac/u</math> cm</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	
$\varphi(t_{\infty}, t_0)$	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
	30	3,0	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
	60	3,0	2,6	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4
$\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$	<b>t<sub>0</sub> dias</b>								
	5	-0,44	-0,39	-0,37	-0,33	-0,23	-0,21	-0,10	-0,09
	30	-0,37	-0,38	-0,31	-0,31	-0,20	-0,20	-0,09	-0,09
	60	-0,32	-0,36	-0,27	-0,30	-0,17	-0,19	-0,08	-0,09

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).

Os valores do coeficiente de fluência  $\varphi(t_{\infty}, t_0)$  e da deformação específica de retração  $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$  são obtidos em função da umidade ambiente  $U$  e da espessura equivalente  $2Ac/u$ , onde  $Ac$  é a área da seção transversal e  $u$  é o perímetro da seção em contato com a atmosfera. Os valores dessa tabela são relativos a temperaturas do concreto entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$ , podendo-se, entretanto, admitir temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ . Esses valores são válidos para concretos plásticos e de cimento Portland comum.

Valores mais precisos das deformações específicas devidas à fluência e à retração podem ser calculados segundo o anexo A da NBR 6118 (ABNT, 2003).

#### 4.2.2 Relaxação do aço

A intensidade da relaxação do aço deve ser determinada pelo coeficiente  $\psi(t, t_0)$ , obtido pela Equação (5):

$$\psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}} \quad (5)$$

Sendo  $\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$  a perda de tensão por relaxação pura desde o instante  $t_0$  do estiramento da armadura até o instante  $t$  considerado; e  $\sigma_{pi}$  a tensão inicial na armadura de protensão.

Os valores médios da relaxação, medidos após 1000 h à temperatura constante de 20°C, para as perdas de tensão referidas a valores básicos da tensão inicial de 50% a 80% da resistência característica  $f_{ptk}$  ( $\psi_{1000}$ ), são reproduzidos na Tabela 4.

Os valores correspondentes a tempos diferentes de 1000 h, sempre a 20°C, podem ser determinados a partir da Equação (6), onde o tempo deve ser expresso em dias.

$$\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \left( \frac{t - t_0}{41,67} \right)^{0,15} \quad (6)$$

Para tensões inferiores a  $0,5 f_{ptk}$ , admite-se que não haja perda de tensão por relaxação. Para tensões intermediárias entre os valores fixados na Tabela 4, pode ser feita interpolação linear.

Pode-se considerar que para o tempo infinito o valor de  $\psi(\infty, t_0)$  é dado por  $\psi(\infty, t_0) \cong 2,5 \cdot \psi_{1000}$ .

**Tabela 4 - Valores de  $\psi_{1000}$ , em porcentagem**

$\sigma_{p0}$	Cordoalhas		Fios		Barras
	RN	RB	RB	RB	
<b>0,5 <math>f_{ptk}</math></b>	0	0	0	0	0
<b>0,6 <math>f_{ptk}</math></b>	3,5	1,3	2,5	1,0	1,5
<b>0,7 <math>f_{ptk}</math></b>	7,0	2,5	5,0	2,0	4,0
<b>0,8 <math>f_{ptk}</math></b>	12,0	3,5	8,5	3,0	7,0

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003).

### 4.3 PROGRESSIVAS FINAIS

Em razão da interação entre os fenômenos de retração e fluência do concreto, e relaxação do aço, as perdas progressivas devem ser calculadas considerando-se a interação citada.

#### 4.3.1 Processo simplificado para o caso de fases únicas de operação

Esse caso é aplicável quando são satisfeitas as condições seguintes: (a) a concretagem do elemento estrutural, bem como a protensão, são executadas, cada uma delas, em fases suficientemente próximas para que se desprezem os efeitos recíprocos de uma fase sobre a outra; (b) os cabos possuem entre si afastamentos suficientemente pequenos em relação à altura da seção do elemento estrutural, de modo que seus efeitos possam ser supostos equivalentes ao de um único cabo, com seção transversal de área igual à soma das áreas das seções dos cabos componentes, situado na posição da resultante dos esforços neles atuantes (cabo resultante).

Nesse caso, admite-se que no tempo  $t$  as perdas e deformações progressivas do concreto e do aço de protensão, na posição do cabo resultante, com as tensões no concreto  $\sigma_{c,p0g}$  positivas para compressão e as tensões no aço  $\sigma_{p0}$  positivas para tração, sejam dadas por:

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0)E_p - \alpha_p \sigma_{c,p0g} \varphi(t, t_0) - \sigma_{p0} \chi(t, t_0)}{\chi_p + \chi_c \alpha_p \eta \rho_p} \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\sigma_{p0}}{E_p} \chi(t, t_0) + \frac{\Delta \sigma_p(t, t_0)}{E_p} \chi_p \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon_{ct} = \frac{\sigma_{c,p0g}}{E_{ci28}} \varphi(t, t_0) + \chi_c \frac{\Delta \sigma_c(t, t_0)}{E_{ci28}} + \varepsilon_{cs}(t, t_0) \quad (9)$$

Sendo:

$$\chi(t, t_0) = -\ln[1 - \psi(t, t_0)] \quad (10)$$

$$\chi_c = 1 + 0,5\varphi(t, t_0) \quad (11)$$

$$\chi_p = 1 + \chi(t, t_0) \quad (12)$$

$$\eta = 1 + e_p^2 \frac{A_c}{I_c} \quad (13)$$

$$\rho_p = A_p / A_c \quad (14)$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{ci28}} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_{c,p0g}$  é a tensão no concreto adjacente ao cabo resultante, provocada pela protensão e pela carga permanente mobilizada no instante  $t_0$ , sendo positiva se de compressão;

$\varphi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência do concreto no instante  $t$  para protensão e carga permanente, aplicadas no instante  $t_0$ ;

$\Delta \sigma_{p0}$  é a tensão na armadura ativa devida à protensão e à carga permanente mobilizada no instante  $t_0$ , positiva se de tração;

$\chi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência do aço;

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  é a retração no instante  $t$ , descontada a retração ocorrida até o instante  $t_0$ ;

$\psi(t, t_0)$  é o coeficiente de relaxação do aço no instante  $t$  para protensão e carga permanente mobilizada no instante  $t_0$ ;

$\Delta\sigma_c(t, t_0)$  é a variação da tensão do concreto adjacente ao cabo resultante entre  $t_0$  e  $t$ ;

$\Delta\sigma_p(t, t_0)$  é a variação da tensão no aço de protensão entre  $t_0$  e  $t$ ;

$\rho_p$  é a taxa geométrica da armadura de protensão;

$e_p$  é a excentricidade do cabo resultante em relação ao baricentro da seção do concreto;

$A_p$  é a área da seção transversal do cabo resultante;

$A_c$  é a área da seção transversal do concreto;

$I_c$  é o momento central de inércia na seção do concreto.

#### 4.3.2 Processo aproximado

Esse processo pode substituir o estabelecido em 4.3.1, desde que satisfeitas as mesmas condições de aplicação e que a retração não difira em mais de 25% do valor  $[-8 \times 10^{-5} \varphi(\infty, t_0)]$ .

O valor absoluto da perda de tensão devida a fluência, retração e relaxação, com  $\sigma_{c,p0g}$  em megapascal e considerado positivo se de compressão, é dado por:

Para aços de relaxação normal (RN) (valor em porcentagem):

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 18,1 + \frac{\alpha_p}{47} [\varphi(t_\infty, t_0)]^{1,57} (3 + \sigma_{c,p0g}) \quad (16)$$

Para aços de relaxação baixa (RB) (valor em porcentagem):

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 7,4 + \frac{\alpha_p}{18,7} [\varphi(t_\infty, t_0)]^{1,07} (3 + \sigma_{c,p0g}) \quad (17)$$

Onde  $\sigma_{p0}$  é a tensão na armadura de protensão devida exclusivamente à força de protensão, no instante  $t_0$ .

## 5 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO

Para a elaboração do programa de perdas foi utilizada a linguagem *AutoLISP*, que é baseada na linguagem *LISP (List Processing)*. A sua escolha foi devido ao *AutoCAD*, pois contém um interpretador de *LISP* embutido, permitindo a digitação de expressões/funções *AutoLISP* na linha de comando e sua interpretação automática. Outro motivo é a praticidade de se programar utilizando apenas o Bloco de Notas do Windows.

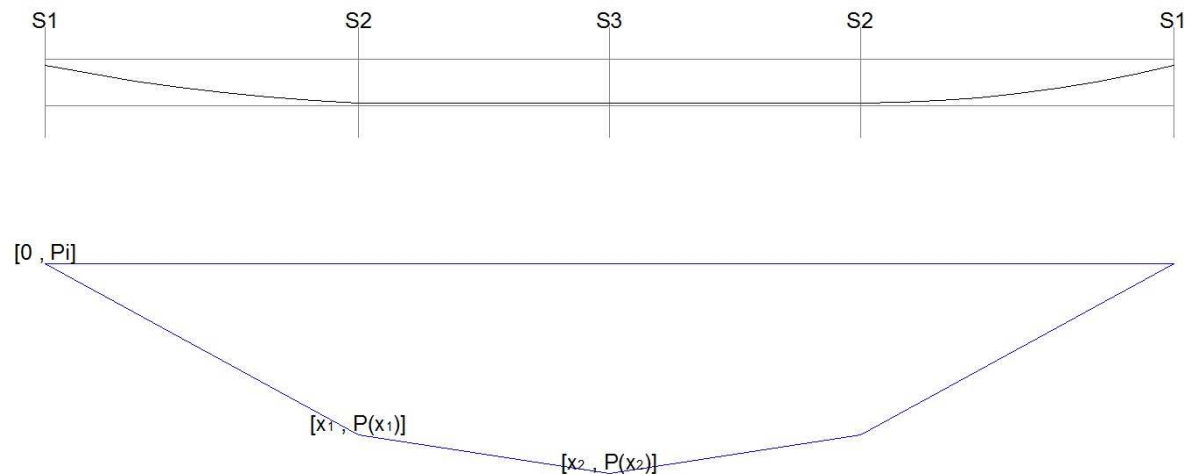
### 5.1 PROGRAMAÇÃO PARA CABO PARABÓLICO-RETILÍNEO COM DUAS ANCORAGENS ATIVAS

No caso da viga protendida com duas ancoragens ativas a programação inicia-se com o nome do comando a ser reconhecido pelo *AutoCAD*: "perdasaa". Após, programa-se as variáveis de acordo com as fórmulas descritas a seguir.

#### 5.1.1 Programação das perdas por atrito

As perdas por atrito são calculadas de acordo com a Equação (3) que equivale a equação da NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 37) para as perdas por atrito. Esta equação calcula a força no cabo em função da distância  $x$ , sendo que o programa calcula a força em dois pontos: o primeiro ponto ( $x_1$ ) corresponde à distância percorrida na viga do início do cabo até o final de sua curvatura; e o segundo ponto ( $x_2$ ) corresponde a metade da distância do vão da viga (ponto de simetria da viga).

Com o valor de  $P_i$  informado pelo usuário, juntamente com os valores de  $P(x_1)$  e  $P(x_2)$  calculados pelo programa através da Equação (3), e armazenados na memória do *AutoCAD*, programa-se o comando *line* (linha) para desenhar nos seguintes pontos cartesianos formando o gráfico de perdas por atrito:  $[0, P_i]$ ;  $[x_1, P(x_1)]$ ;  $[x_2, P(x_2)]$ .



**Figura 25 - Pontos cartesianos do gráfico das perdas por atrito.**

Para complementar o gráfico, programa-se o comando *text* (texto) para escrever o valor da força no cabo calculado nos referidos pontos. O comando *text* também é utilizado para gerar as tabelas com a memória de cálculo ao lado do gráfico.

Na Figura 25, como a viga, o cabo e, conseqüentemente, o gráfico de perdas são simétricos verticalmente em  $x_2$ , pode-se espelhar o gráfico neste ponto programando o comando *mirror* (espelhar), assim tem-se gerado o gráfico de perdas por atrito em toda a viga.

A aproximação da Equação (3), uma equação exponencial, por um gráfico com retas, gera uma diferença desprezível na perda por atrito nas outras seções.

### 5.1.2 Programação das perdas por acomodação das ancoragens

No cálculo das perdas por acomodação das ancoragens, sabe-se que a acomodação ( $\delta$ ) faz com que o movimento da cordoalha dentro da bainha seja inverso ao movimento de tração, portanto gera-se atrito no sentido inverso. Logo, o gráfico das perdas por acomodação é simétrico horizontalmente ao gráfico das perdas por atrito.

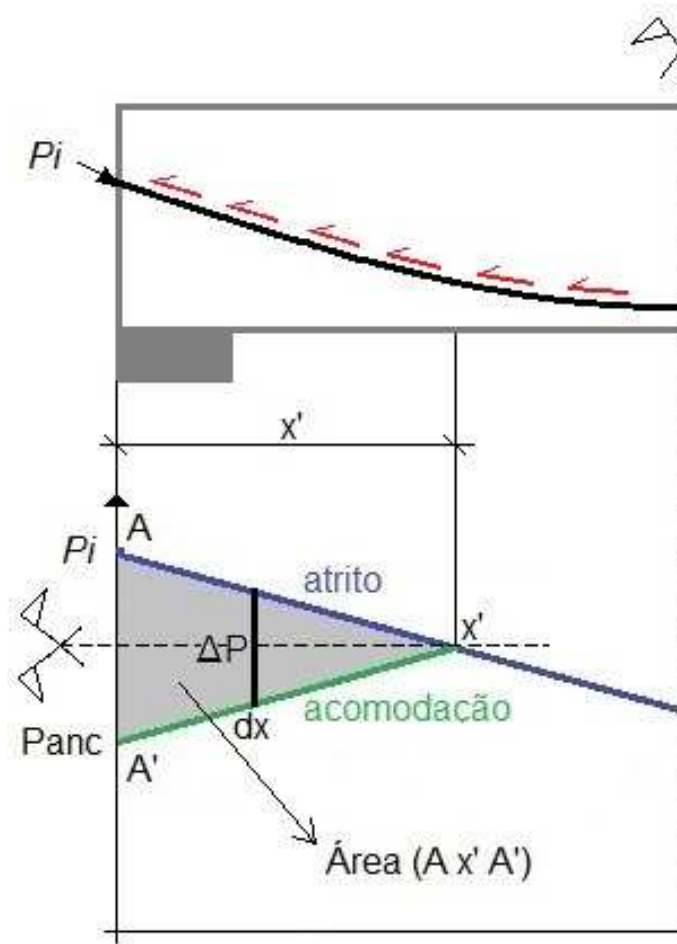


Figura 26 - Variação da força no cabo devido à acomodação.

Fazendo a condição de compatibilidade geométrica de que a acomodação ocorrida deve ser igual ao encurtamento do cabo provocado pela variação da força de protensão, tem-se o encurtamento total ocorrido o trecho  $x'$ :

$$\sum \Delta L dx = \frac{\sum \Delta P \times dx}{E_p \times A_p} = \delta \quad (18)$$

E, sabendo-se que a área  $A x' A'$  é:

$$\text{Área}(A x' A') = \sum \Delta P \times dx \quad (19)$$

Substituindo-se (18) em (19), e rearranjando, tem-se:

$$\text{Área}(A x' A') = E_p \times A_p \times \delta \quad (20)$$

Logo, o ponto  $A'$  ( $Panc$ ) e o comprimento afetado  $x'$  devem ser determinados por tentativa. Varia-se o ponto  $x'$  até que a  $\text{Área}(Ax'A')$  seja igual ao valor  $Ep \times Ap \times \delta$ .

Na programação, o método das tentativas se faz através da função *while* (enquanto). Atribui-se o valor de uma variável igual a “n” (não), então, enquanto a variável for igual a “n” o programa continua a executar a rotina, caso contrário, quando a variável for diferente de “n”, no caso igual a s (sim), a condição é desfeita e o programa encerra esta rotina.

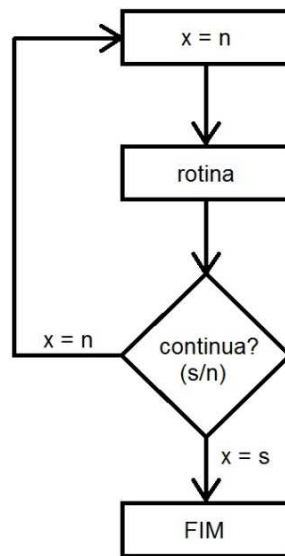


Figura 27 - Exemplo da função *while*.

Definido isto, o usuário poderá fazer inúmeras tentativas para o valor de  $x'$ . Quando testa-se um valor para  $x'$  o programa irá calcular o valor de  $P(x')$  na reta entre os pontos  $[0, P_i]$  e  $[x_1, P(x_1)]$  se  $x' \leq x_1$ , ou será calculado o valor de  $P(x')$  na reta entre os pontos  $[x_1, P(x_1)]$  e  $[x_2, P(x_2)]$  se  $x' > x_1$ . Para tal, fez-se o uso da função *if* (se) para obedecer estas condições.

De posse do ponto  $[x', P(x')]$ , programa-se o comando *area* (área) para calcular a área formada no gráfico nos pontos de acordo com a Figura 28:

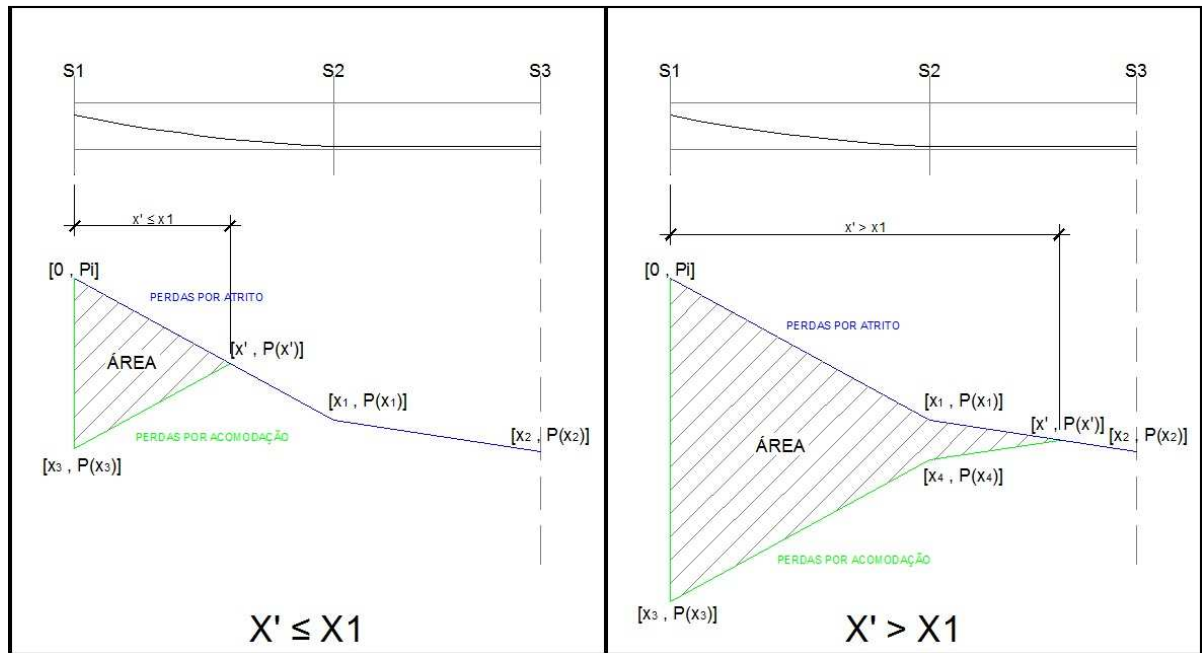


Figura 28 - Pontos considerados para o cálculo da Área  $Ep \times Ap \times d$ .

Se  $x' \leq x_1$ , calcula-se a área formada pelos pontos  $[0, P_i]$ ,  $[x', P(x')]$  e  $[x_3, P(x_3)]$ .

Se  $x' > x_1$ , calcula-se a área formada pelos pontos  $[0, P_i]$ ,  $[x_1, P(x_1)]$ ,  $[x', P(x')]$ ,  $[x_4, P(x_4)]$  e  $[x_3, P(x_3)]$ .

Sendo que, pela condição de simetria, os pontos  $[x_3, P(x_3)]$  e  $[x_4, P(x_4)]$  são iguais a:

$$x_3 = 0 \quad (21)$$

$$P(x_3) = P(x') - [P_i - P(x')] \quad (22)$$

$$x_4 = x_1 \quad (23)$$

$$P(x_4) = P(x') - [P(x_1) - P(x')] \quad (24)$$

Assim, quando o usuário entrar com um valor para  $x'$  será mostrado na linha de comando a área formada por este ponto e a área  $Ep \times Ap \times \delta$  seguido de uma pergunta: "A

área formada é igual a área  $E_p \times A_p \times \delta$  (s/n)?" . Quando o usuário responder "s" (sim) será desenhado o gráfico nos pontos  $[x_3, P(x_3)]$  e  $[x', P(x')]$ , se  $x' \leq x_1$ ; ou será desenhado o gráfico nos pontos  $[x_3, P(x_3)]$ ,  $[x_4, P(x_4)]$  e  $[x', P(x')]$ , se  $x' > x_1$ . Complementando o gráfico, programa-se o comando *text* (texto) para escrever os valores calculados nos pontos do gráfico de acomodação. Este comando também é usado para formar a tabela de memória de cálculo ao lado do gráfico.

### 5.1.3 Programação das perdas por encurtamento imediato do concreto

Para a obtenção das perdas por encurtamento imediato do concreto, programou-se a Equação (4) preconizada na NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 37). O resultado desta equação em módulo,  $|\Delta\sigma_p|$ , multiplicado pela área de aço em um cabo,  $A_p$ , será o valor da força  $\Delta P_p$  a ser subtraído de  $P(x_3)$ ,  $P(x')$ ,  $P(x_1)$  e  $P(x_2)$ , se  $x' \leq x_1$ ; ou de  $P(x_3)$ ,  $P(x_4)$ ,  $P(x')$  e  $P(x_2)$ , se  $x' > x_1$ , para formar o gráfico de perdas por encurtamento imediato conforme a Figura 29.

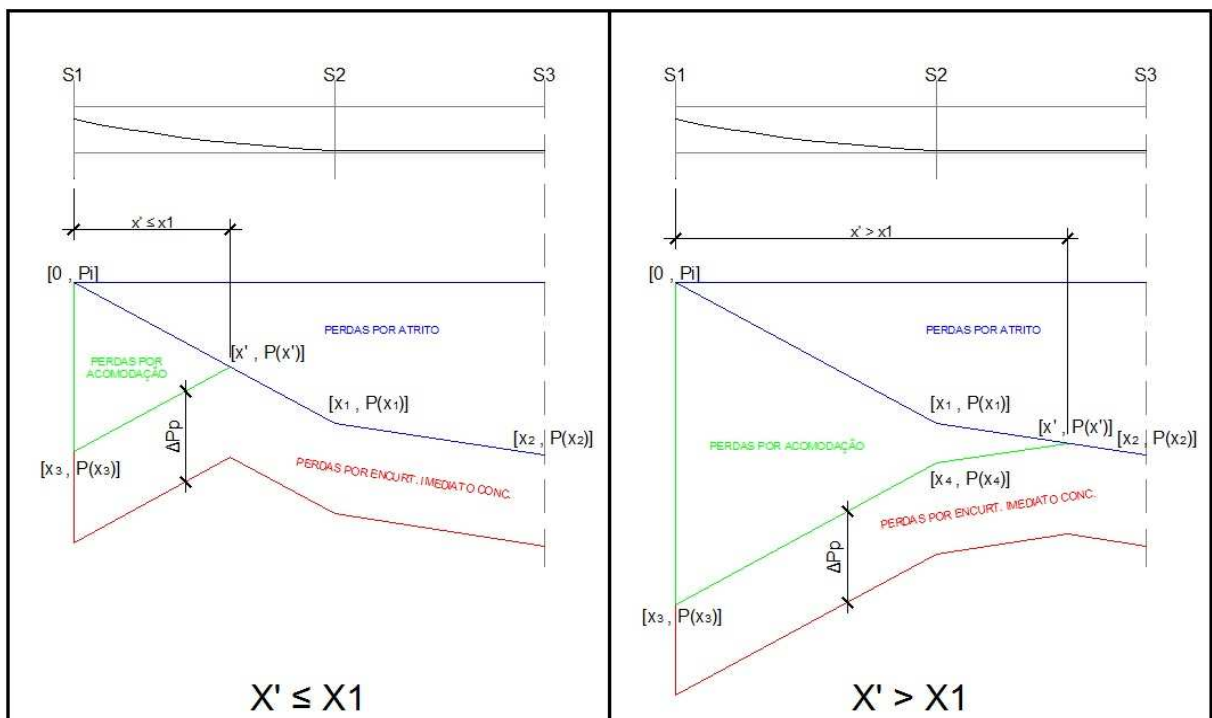


Figura 29 - Valor da força  $\Delta P_p$  nas perdas por encurtamento imediato do concreto.

Cabe destacar que, visando maior praticidade no processo de cálculo destas perdas, o programa calcula a evolução das tensões automaticamente, dispensando o usuário em encontrar os valores de  $\sigma_{cp}$  e de  $\sigma_{cg}$ .

Semelhante às outras perdas, programa-se o comando *line* (linha) e *text* (texto) para desenhar o gráfico e a memória de cálculo.

#### 5.1.4 Programação das perdas progressivas

Para a obtenção das perdas progressivas, optou-se pelo processo simplificado por ser mais abrangente, comparado ao processo aproximado. Para tanto, programou-se a Equação (7), e as Equações de (10) à (15), fornecidas na NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 38).

Vale ressaltar que o coeficiente de fluência,  $\varphi(t_\infty, t_0)$ , e o coeficiente de retração,  $\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ , estão programados com os valores interpolados, eliminando este procedimento. Eles são calculados em função da espessura fictícia e da umidade do ambiente, como mostra a Tabela 5:

**Tabela 5 - Valores interpolados de  $\varphi(t_\infty, t_0)$  e de  $\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ .**

UMIDADE (%)	40	55	75	90
$\varphi(t_\infty, t_0)$	$\frac{372 - h_{fic}}{80}$	$\frac{344 - h_{fic}}{80}$	$\frac{320 - h_{fic}}{100}$	$\frac{480 - h_{fic}}{200}$
$\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$	$\frac{h_{fic} - 372}{800}$	$\frac{h_{fic} - 390}{1000}$	$\frac{h_{fic} - 480}{2000}$	$\frac{h_{fic} - 3660}{4000}$

Utilizando a função *if* (se), programa-se os coeficientes de fluência e retração de acordo com a umidade adotada.

Outra variável que também não necessita da interpolação é a relaxação de cordoalhas após 1000 h a 20°C,  $\psi_{1000}$ . Calcula-se esta variável a partir da relação entre  $f_{ptk}$  e  $\sigma_{p0}$ , e este valor é avaliado pelo programa como mostra a Tabela 6:

Tabela 6 - Valores interpolados de  $\psi_{1000}$  em porcentagem.

$\frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}}$	$0 \leq \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}} \leq 0,5$	$0,5 < \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}} \leq 0,6$	$0,6 < \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}} \leq 0,7$	$0,7 < \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}} \leq 0,8$
$\Psi_{1000}$ (RB)	0	$\left(13 \times \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}}\right) - 6,5$	$\left(12 \times \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}}\right) - 5,9$	$\left(10 \times \frac{f_{ptk}}{\sigma_{p0}}\right) - 4,5$

Como resultado das perdas progressivas é adotado o valor de  $\Delta\sigma_p(t, t_0)$ , encontrado através da Equação (7), multiplicado pela área de aço em um cabo,  $A_p$ . Este valor será subtraído das perdas por encurtamento imediato do concreto, formando o gráfico das perdas progressivas.

## 5.2 PROGRAMAÇÃO PARA CABO PARABÓLICO COM ANCORAGENS ATIVA-PASSIVA

Da mesma forma, para vigas protendidas com ancoragens ativa-passiva, a programação inicia-se com o nome do comando a ser reconhecido pelo *AutoCAD*: "perdasap". Em seguida, programa-se as variáveis de acordo com as fórmulas descritas a seguir.

### 5.2.1 Programação das perdas por atrito

As perdas por atrito são calculadas de acordo com a Equação (3) que equivale à equação da NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 37) para as perdas por atrito. Esta equação calcula a força no cabo em função da distância  $x$ , sendo que o programa calcula a força em quatro pontos: o primeiro ponto ( $x_1$ ) corresponde à distância percorrida na viga do início do cabo até o final de sua curvatura; o segundo ponto ( $x_2$ ) corresponde a um ponto de trecho reto do cabo; o ponto ( $x_3$ ) corresponde ao ponto final de trecho reto do cabo para iniciar a próxima curvatura; e o ponto ( $x_4$ ) corresponde ao final da curvatura do cabo.

Com o valor de  $P_i$  informado pelo usuário, juntamente com os valores de  $P(x_1)$ ,  $P(x_2)$ ,  $P(x_3)$ , e  $P(x_4)$  calculados pelo programa através da Equação (3), e armazenados na memória do *AutoCAD*, programa-se o comando *line* (linha) para desenhar nos seguintes

pontos cartesianos formando o gráfico de perdas por atrito:  $[0, P_i]$ ;  $[x_1, P(x_1)]$ ;  $[x_2, P(x_2)]$ ;  $[x_3, P(x_3)]$ ;  $[x_4, P(x_4)]$ .



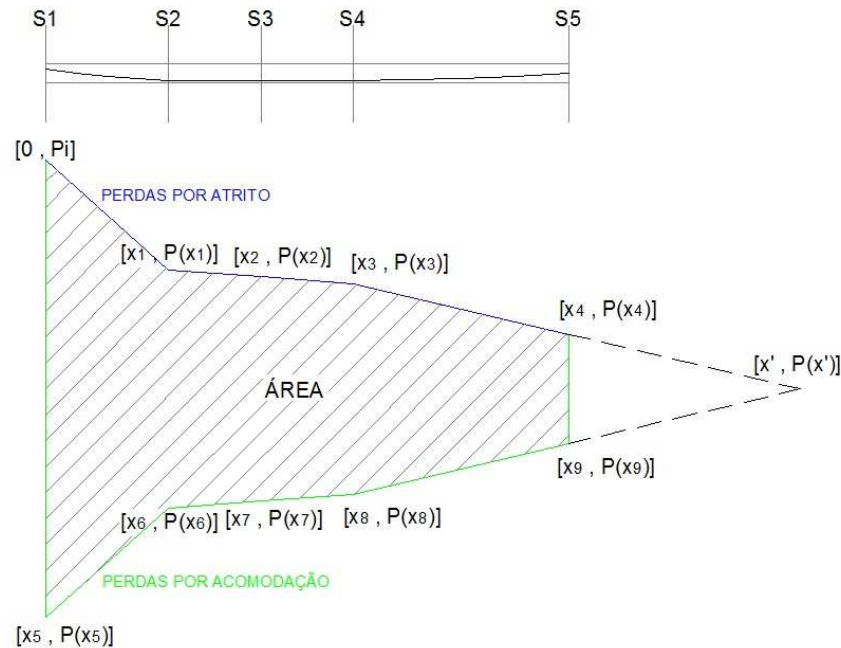
**Figura 30 - Pontos cartesianos do gráfico das perdas por atrito.**

Para complementar o gráfico, programa-se o comando *text* (texto) para escrever o valor da força no cabo calculado nos referidos pontos. O comando *text* também é utilizado para gerar as tabelas com a memória de cálculo ao lado do gráfico.

Neste sistema, a aproximação da Equação (3), uma equação exponencial, por um gráfico com retas, também gera uma diferença desprezível na perda por atrito nas outras seções.

### 5.2.2 Programação das perdas por acomodação das ancoragens

O método de cálculo das perdas por acomodação das ancoragens neste sistema é igual ao descrito em 5.1.2. Logo, o usuário poderá testar inúmeros valores para  $x'$  até que a área formada seja igual a área  $E_p \times A_p \times \delta$ , como exemplifica a Figura 31:



**Figura 31 - Pontos da Área  $E_p \times A_p \times d$  (ancoragens ativa-passiva).**

Dessa forma, calcula-se a área formada pelos pontos  $[0, P_i]$ ,  $[x_1, P(x_1)]$ ,  $[x_2, P(x_2)]$ ,  $[x_3, P(x_3)]$ ,  $[x_4, P(x_4)]$ ,  $[x', P(x')]$ ,  $[x_9, P(x_9)]$ ,  $[x_8, P(x_8)]$ ,  $[x_7, P(x_7)]$ ,  $[x_6, P(x_6)]$ , e  $[x_5, P(x_5)]$ .

Sendo que os pontos das perdas por acomodação são calculados obedecendo a condição de simetria em relação aos pontos das perdas por atrito, semelhante ao exposto nas Equações (22) e (24).

Assim, quando o ponto de  $P(x')$ , que formar a área igual a  $E_p \times A_p \times \delta$ , for encontrado, será programado o comando *line* (linha) para desenhar o gráfico de perdas por acomodação nos pontos citados anteriormente. Complementando o gráfico, programa-se o comando *text* (texto) para escrever os valores calculados nos pontos do gráfico de acomodação. Este comando também é usado para formar a tabela de memória de cálculo ao lado do gráfico.

### 5.2.3 Programação das perdas por encurtamento imediato do concreto

Para a obtenção das perdas por encurtamento imediato do concreto, programou-se a Equação (4) preconizada na NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 37). O resultado desta equação,

$\Delta\sigma_p$ , multiplicado pela área de aço em um cabo,  $A_p$ , será o valor a ser subtraído de  $P(x_5)$ ,  $P(x_6)$ ,  $P(x_7)$ ,  $P(x_8)$  e  $P(x_9)$ , para formar o gráfico de perdas por encurtamento imediato.

Como no caso anterior, o programa calculará a evolução das tensões automaticamente, dispensando o usuário em encontrar os valores de  $\sigma_{cp}$  e de  $\sigma_{cg}$ .

Semelhante as outras perdas, programa-se o comando *line* (linha) e *text* (texto) para desenhar o gráfico e a memória de cálculo.

#### 5.2.4 Programação das perdas progressivas

O método de cálculo das perdas progressivas neste sistema é igual ao descrito em 5.1.4, sendo utilizado as mesmas equações e interpolações. O resultado também se faz pela multiplicação de  $\Delta\sigma_p(t, t_0)$  pela área de aço em um cabo,  $A_p$ . Este valor será subtraído das perdas por encurtamento imediato do concreto para formar o gráfico das perdas progressivas.

### 5.3 FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO

A Figura 32 mostra o fluxograma do programa de perdas em protensão, sendo iguais para os casos considerados em 5.1 e em 5.2.

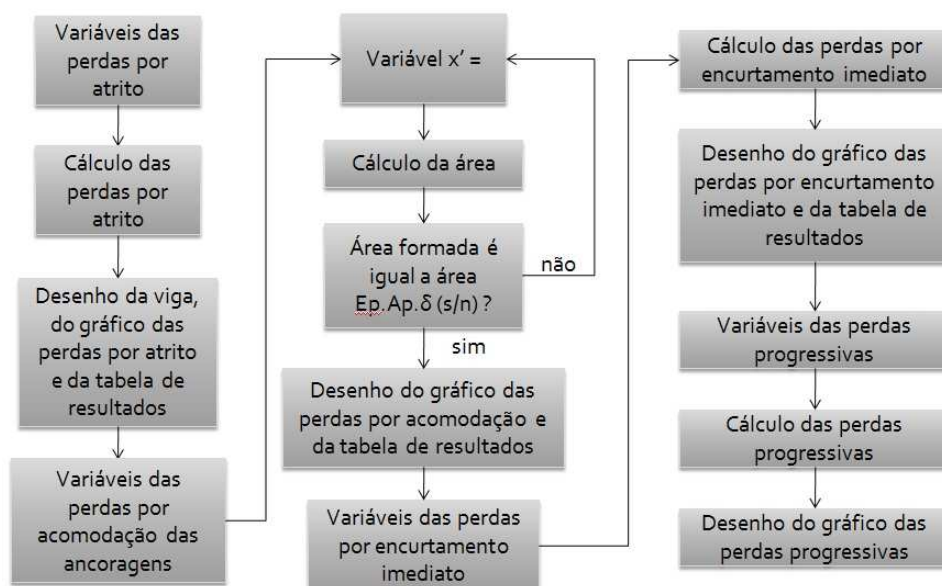


Figura 32 - Fluxograma do programa de perdas de protensão em *AutoLISP*.

## 6 APLICAÇÃO DO PROGRAMA

### 6.1 CABO PARABÓLICO COM DUAS ANCORAGENS ATIVAS

O programa de perdas de protensão em *AutoLisp* gera os gráficos das perdas de protensão para vigas bi-apoiadas com cabos parabólicos-retilíneos, armadura pós-tracionada e simétricos no meio do vão. O usuário deve fornecer os valores das variáveis, como exemplifica a Figura 33:

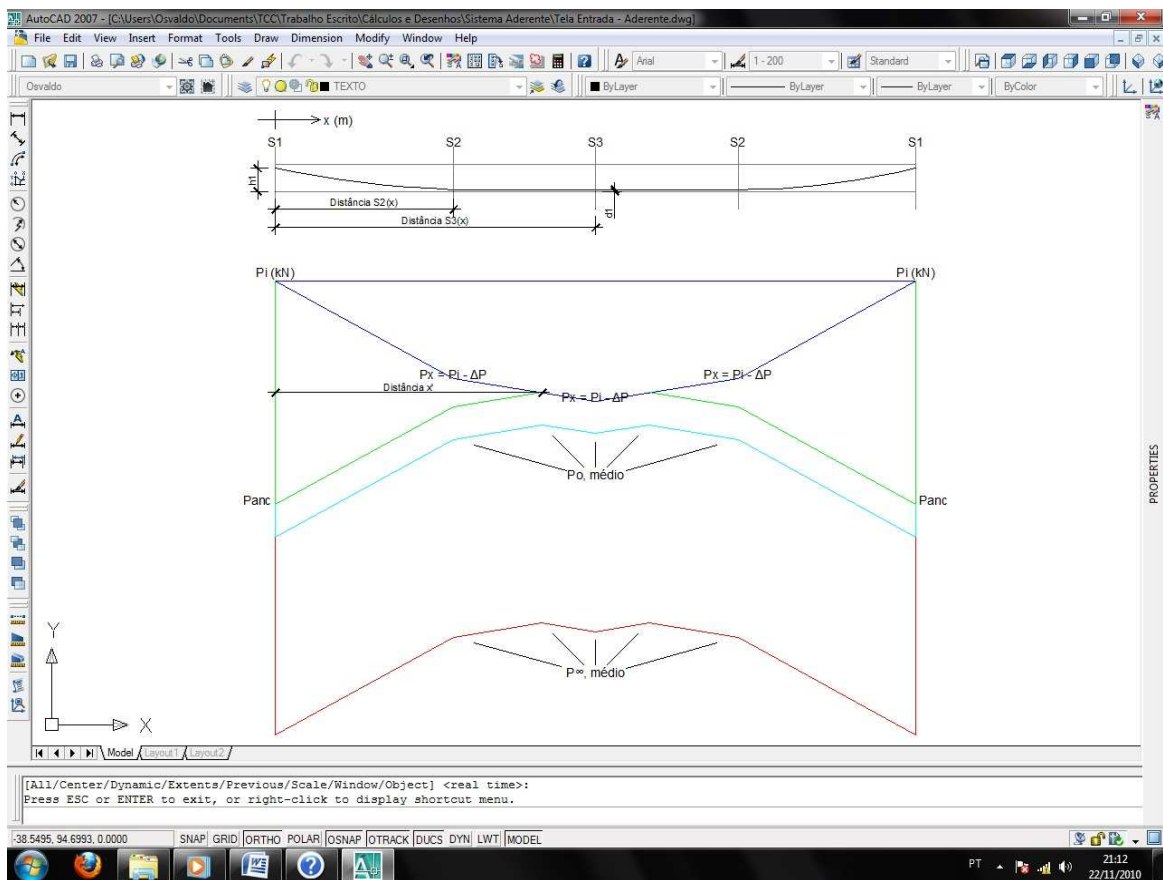


Figura 33 - Variáveis do programa de perdas de protensão em *AutoLisp* para duas ancoragens ativas.

O programa é utilizado para gerar os gráficos das perdas imediatas e progressivas de uma viga simplesmente apoiada de 36 metros de vão e seção transversal como mostra a Figura 34, protendida por 5 cabos parabólicos-retilíneos com 6 cordoalhas do aço CP 190 RB 12.7 mm por cabo. A força inicial de protensão é de 830 kN por cabo, aplicada aos 7 dias da concretagem e o  $f_{ck}$  de 30 MPa. Todas as variáveis necessárias para o cálculo estão no APÊNDICE A.

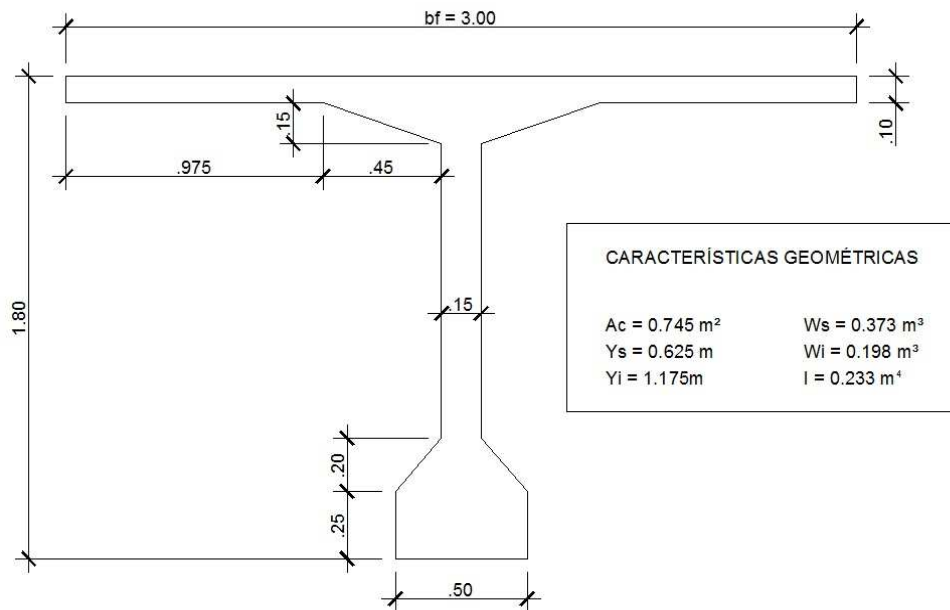


Figura 34 - Características geométricas da seção da viga.

Primeiramente, deve-se carregar o arquivo da programação em *AutoLisp* no *AutoCAD*. O arquivo em questão é um arquivo do bloco de notas que possui a extensão modificada para ".lsp", pois assim pode ser reconhecido pelo *AutoCAD* como uma programação em *AutoLisp*. Na janela do *AutoCAD*, seleciona-se o menu "*Tools*" e a opção "*Load Application...*", na nova janela aberta deve-se selecionar o arquivo do *AutoLisp* no diretório o qual ele foi salvo e clicar no botão "*Load*". Na linha de comando do *AutoCAD* será informado que o arquivo foi carregado com êxito, conforme a Figura 35. Após, clicar no botão "*Close*".

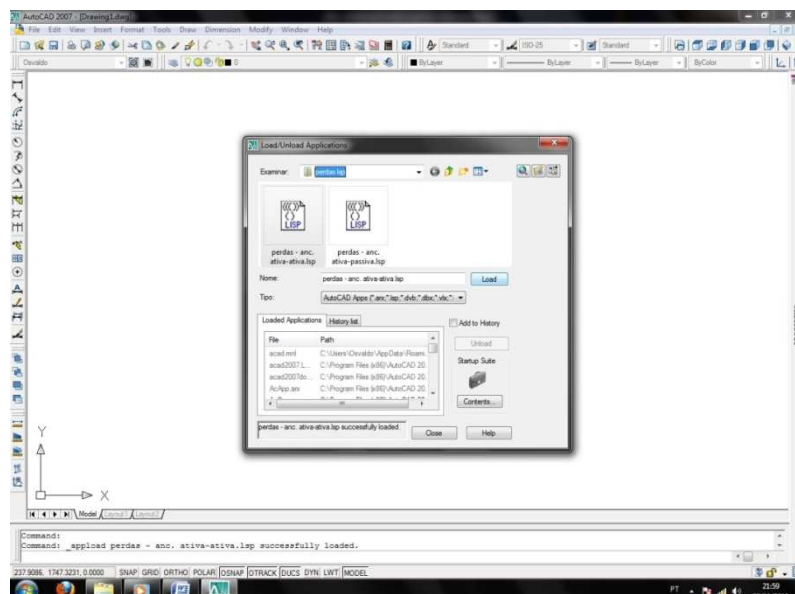
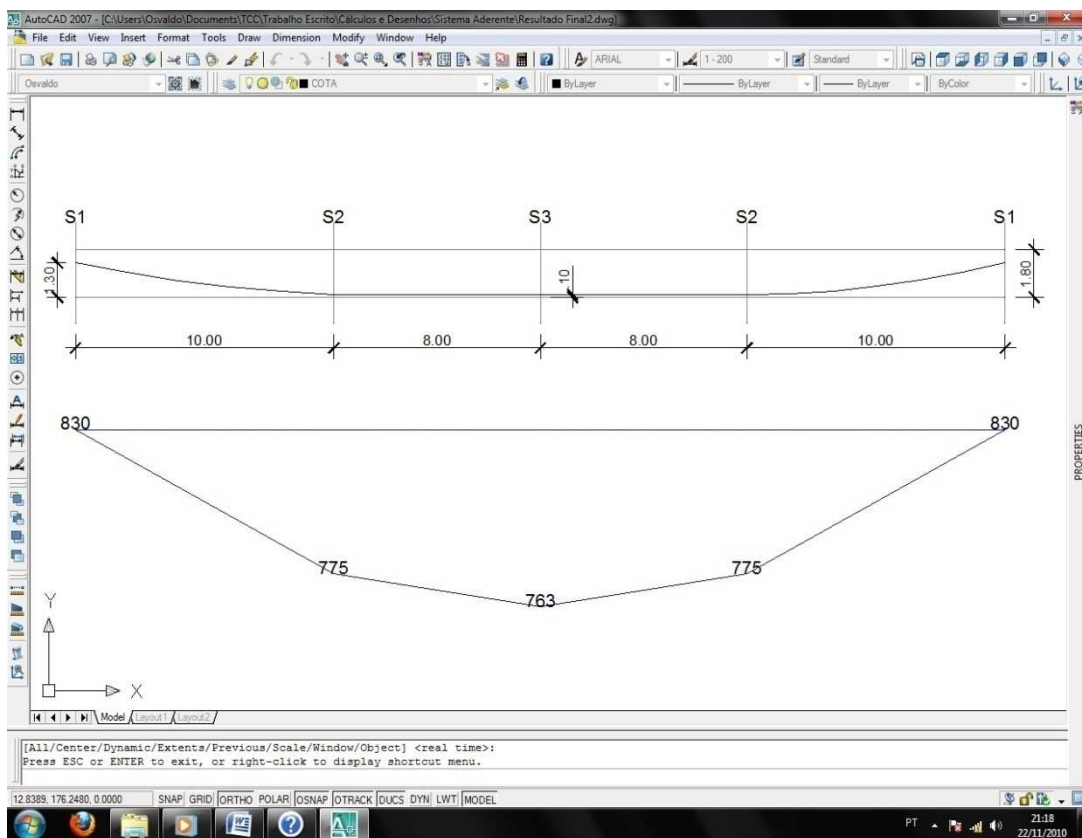


Figura 35 - Carregando a programação em *AutoLISP* no *AutoCAD*.

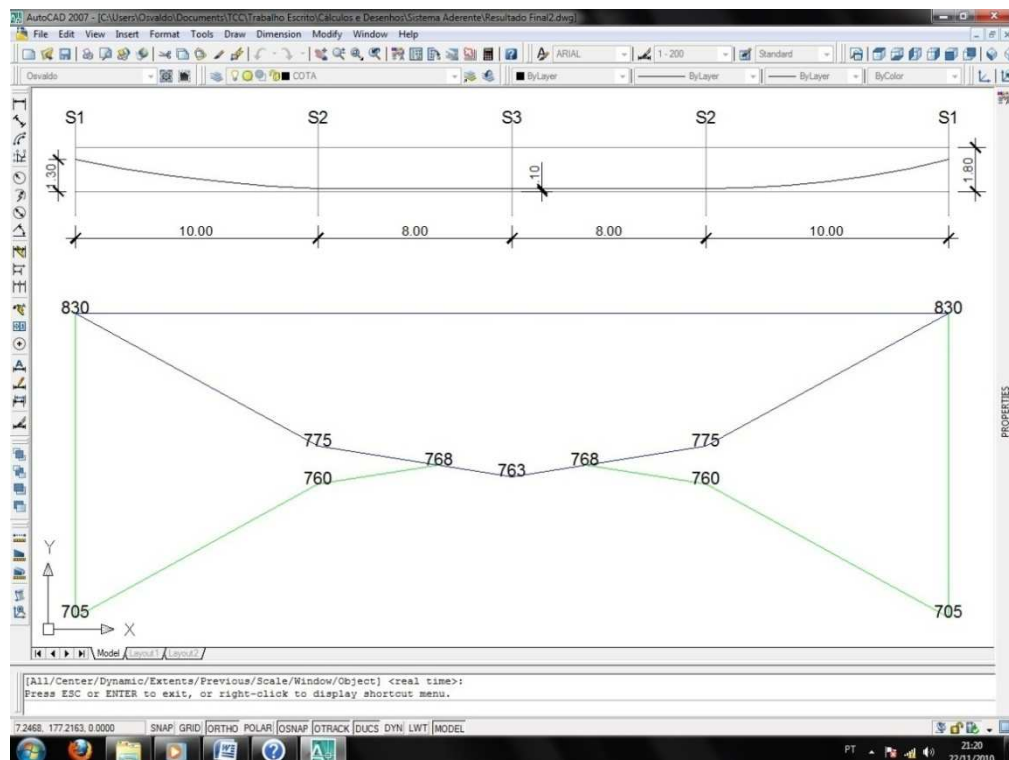
Com o arquivo carregado pode-se dar início ao programa, digitando na linha de comando "perdasaa" e pressionar "Enter". Desta forma, inicia-se a entrada dos valores no programa, sendo que o primeiro a ser informado é a altura da viga em metros, seguindo o exemplo entra-se com 1.80 e pressiona-se "Enter". Após, informa-se a distância "S2(x)" que é o comprimento percorrido na viga do início do cabo até o final de sua curvatura (ver Figura 33), no caso, é de 10 metros (a distância S1 não precisará ser fornecida, pois sempre será igual a zero). De forma análoga, informa-se a distância "S3(x)" que é o comprimento do início do cabo até o meio do vão, então entra-se com 18 metros. Em seguida, na linha de comando é pedido a "Altura h1", que segundo a Figura 33 é a altura em que o cabo sai da extremidade da viga, sendo de 1.30 metros no exemplo. Da mesma forma a "Altura d1" que é o cobrimento do cabo no meio do vão, sendo de 0.10 metros no exemplo. Deve-se informar o valor da força inicial de protensão "Pi", que é de 830 kN. Em seguida, informa-se o valor do coeficiente de atrito aparente entre a armadura e a bainha: 0.20, segundo o exemplo. Então, tem-se gerado no *AutoCAD* o gráfico das perdas por atrito, sendo a escala no eixo y 10 vezes menor.



**Figura 36 - Resultado das perdas por atrito do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).**

Seguindo para as perdas por acomodação das ancoragens, deve-se entrar com o valor do módulo de elasticidade do aço de protensão ( $E_p$ ), que é de 202 kN/mm<sup>2</sup>. Informa-se o valor

da área de aço por cabo ( $A_p$ ) de 608.40 m<sup>2</sup>, obtida pelo produto do número de cordoalhas (6 cordoalhas por cabo) pela área de uma cordoalha (101.40 mm<sup>2</sup>). E, após, o valor da acomodação da ancoragem ( $\delta$ ) em milímetros, que é de 6 mm. Então, resta saber a distância  $x'$ , que é o valor que corresponde a área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$  formado pelo gráfico simétrico horizontalmente em  $P(x')$ . Nesta parte, informa-se uma distância para testar se a área a ser formada é igual a área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$ . A área que se forma na distância informada é mostrada na linha acima da linha de comando, e na linha de comando é informado o valor da área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$  (igual a 73.7381, no exemplo) e uma pergunta "sim ou não (s/n)?", se as áreas forem iguais entra-se "s" (sim) e "Enter", se as áreas não forem iguais entra-se "n" (não) e "Enter" e a linha de comando retornará a pedir o valor da distância  $x'$ . Este procedimento poderá ser repetido até o usuário encontrar o valor mais próximo da área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$ . No exemplo, a área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$  será próxima da área formada em  $x'$  igual a 15 metros (ver Figura 33), então entra-se com 15 e "Enter", "s" e "Enter". Vale ressaltar que o produto  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$  é igual a 737.381 kN.m, mas como o programa calcula a área baseada no desenho que é numa escala 10 vezes menor, a área a ser comparada é sempre  $E_p \cdot A_p \cdot \delta / 10$ , portanto 73.7381 kN.m. Assim, junto ao gráfico das perdas por atrito foi gerado o gráfico das perdas por acomodação.

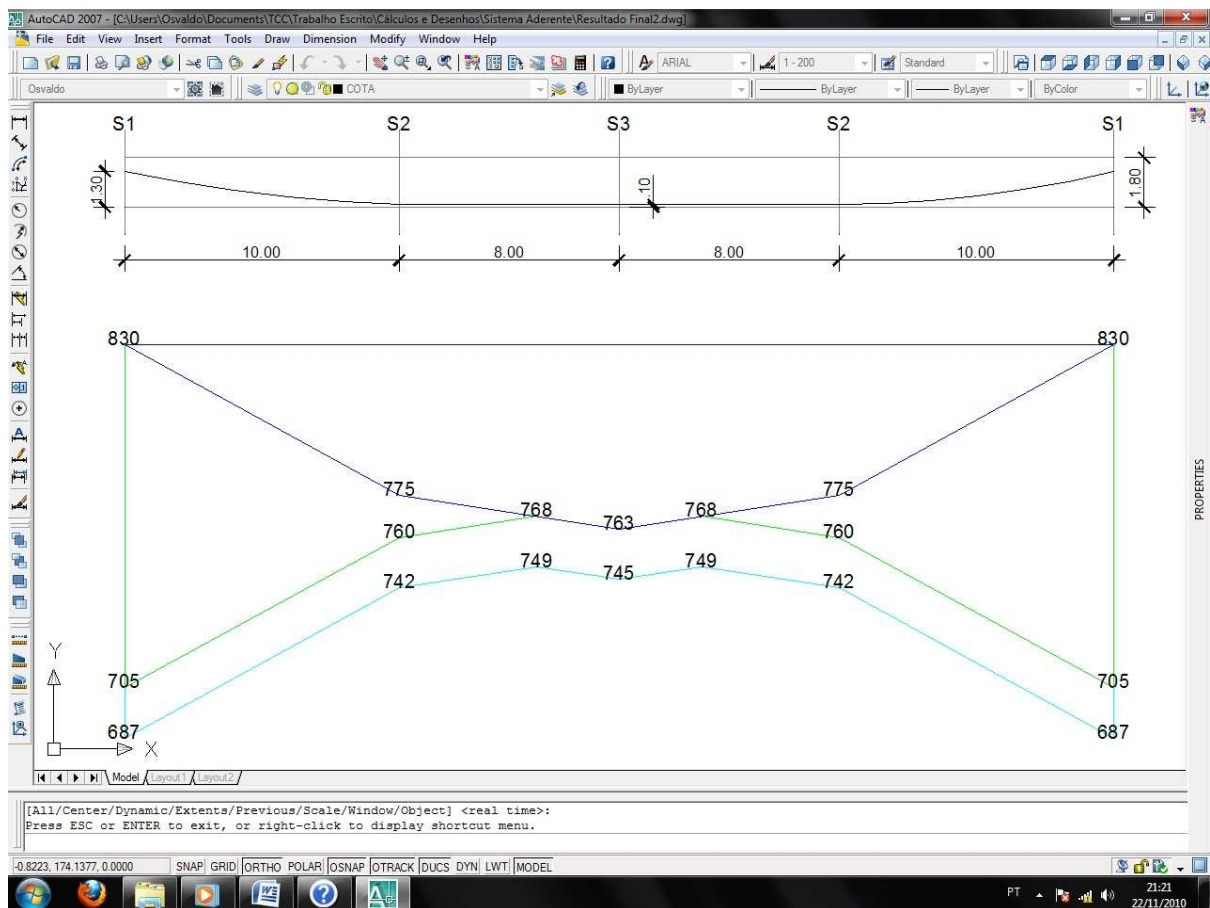


**Figura 37 - Resultado das perdas por acomodação do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).**

Segue-se, então, para as perdas por encurtamento imediato do concreto. Na linha de comando pede-se o valor de  $g_{total}$ , que é o somatório de todos os carregamentos permanentes

considerados: 21,63 kN/m. Após, informa-se o vão da viga em metros que é igual a 36m. O número de cabos: 5. Pede-se a área da seção transversal de concreto, igual a 0.745 m<sup>2</sup>. Entra-se com o valor da excentricidade do cabo em metros: 1.055m. Após, pede-se o valor do módulo de resistência superior  $W_s$  (0.373 m<sup>3</sup>) e depois o valor do módulo de resistência inferior  $W_i$  (0.198 m<sup>3</sup>). O valor de  $d'$ , que é de 0.1175 m. E, por fim, o valor de  $f_{ckj}$ , igual a 21 MPa.

Assim, tem-se gerado o gráfico das perdas por encurtamento imediato do concreto e a completando as perdas imediatas.



**Figura 38- Resultado das perdas por encurtamento imediato do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).**

Continuando o cálculo das perdas de protensão, deve-se partir para as perdas progressivas. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 38-39), pode-se realizar o cálculo pelo processo aproximado ou pelo processo simplificado, sendo que neste programa é realizado pelo processo mais geral entre os dois: o simplificado.

Portanto, prosseguindo com o programa, na linha de comando é pedido o valor do perímetro em contato com o ambiente: 6.63 m. A umidade do ambiente em porcentagem: 75%. O  $f_{ck}$  do concreto que é de 30 MPa. A carga mínima de ruptura de uma cordoalha, igual a 187.3 kN. A área de uma cordoalha: 101.40 mm<sup>2</sup>. E, por fim, o momento central de inércia da seção de 0.233 m<sup>4</sup>. Assim, tem-se gerado o gráfico das perdas progressivas, bem como a tabela com alguns dados da memória de cálculo para acompanhamento.

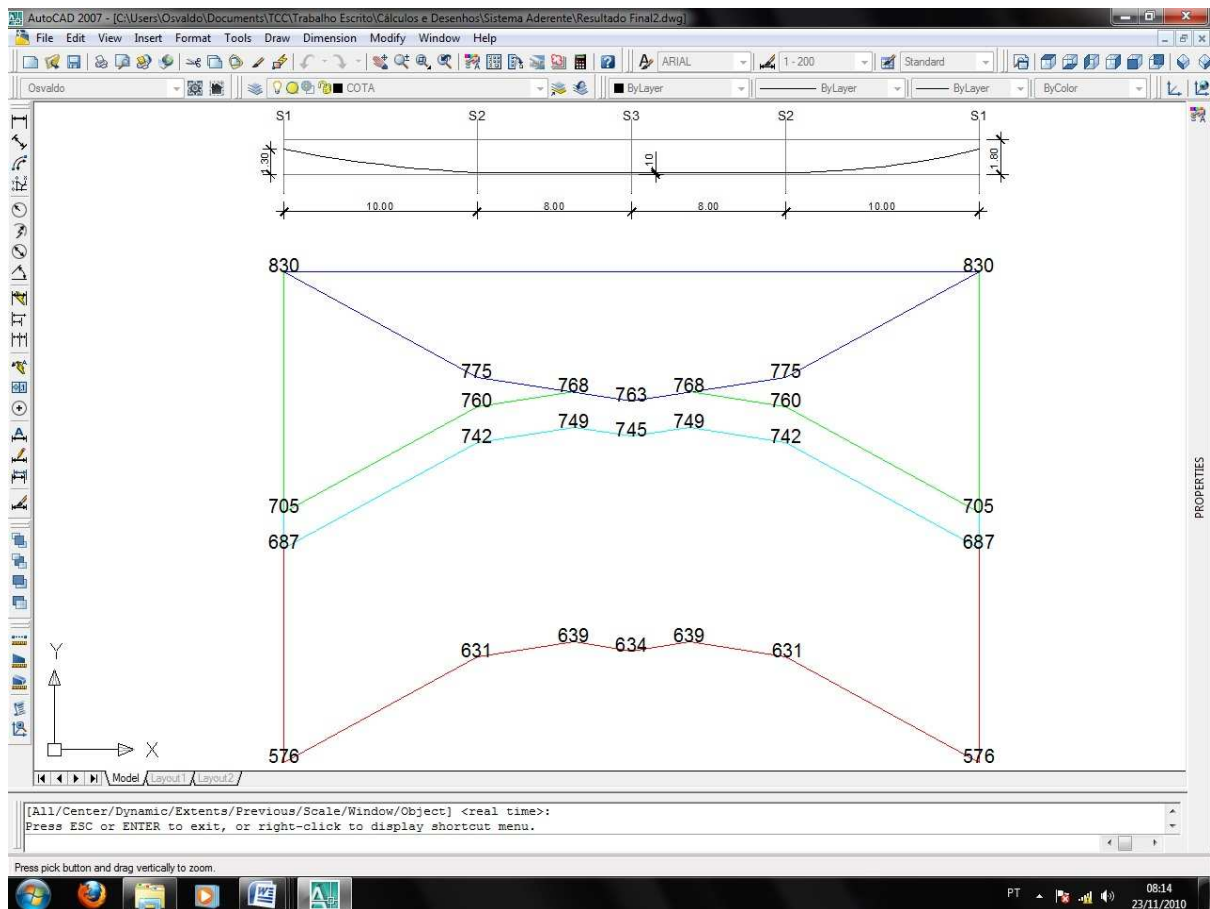


Figura 39- Resultado das perdas progressivas do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).

Perdas por atrito					
Seção	x (m)	$\Sigma\alpha$	$-(\mu\Sigma\alpha + kx)$	Px (kN)	% perdas
S1	0	0	0	830	0
S2	10	0.24	0.068	775	6.57
S3	18	0.24	0.084	763	8.06

Alongamento teórico do cabo (mm)

231

Perdas por acomodação da ancoragem					
Ep (kN/mm <sup>2</sup> )	Ap (mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	Ep.Ap. $\delta$ (kN.m)	x' (m)	Panc (kN)
202	608.4	6	737.38	15	705

Perdas por encurtamento imediato do concreto					
op	$\sigma_{cp}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{cg}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta P_p$ (kN)	Po, médio (kN)	% perda
7.87	-25473	15929	18.28	745	10.2

Perdas progressivas					
$\psi 1000$ (%)	$\phi(t^*, t)$	$\epsilon_{cs}(t^*, t)$ (‰)	$\Delta P_{s+c+r}$ (kN)	P $_{\infty}$ , médio (kN)	% perda
2.06	2.98	-0.23	111	635	23.54

[All/Center/Dynamic/Extents/Previous/Scale/Window/Object] <real time>  
Press ESC or ENTER to exit, or right-click to display shortcut menu.

75.4000 91.0803 0.0000 SNAP GRID ORTHO POLAR OSNAP OTRACK DUCS DYN LWT MODEL

Figura 40 - Resultado da memória de cálculo do exemplo (para ancoragens ativa-ativa).

Comparando-se os resultados do programa com os cálculos obtidos manualmente pode-se dizer que as perdas imediatas são praticamente iguais, sendo a força média de protensão calculada por este de 746 kN e calculada pelo programa de 745 kN. Já as perdas progressivas são diferentes, pois o programa as calcula pelo processo simplificado e o manual foi realizado pelo processo aproximado. Portanto, a força média de protensão com as perdas totais calculadas manualmente foi de 607,5 kN e as calculadas pelo programa de 635 kN. O resultado final das perdas obtidas pelo calculista pode ser visto na Figura 41.

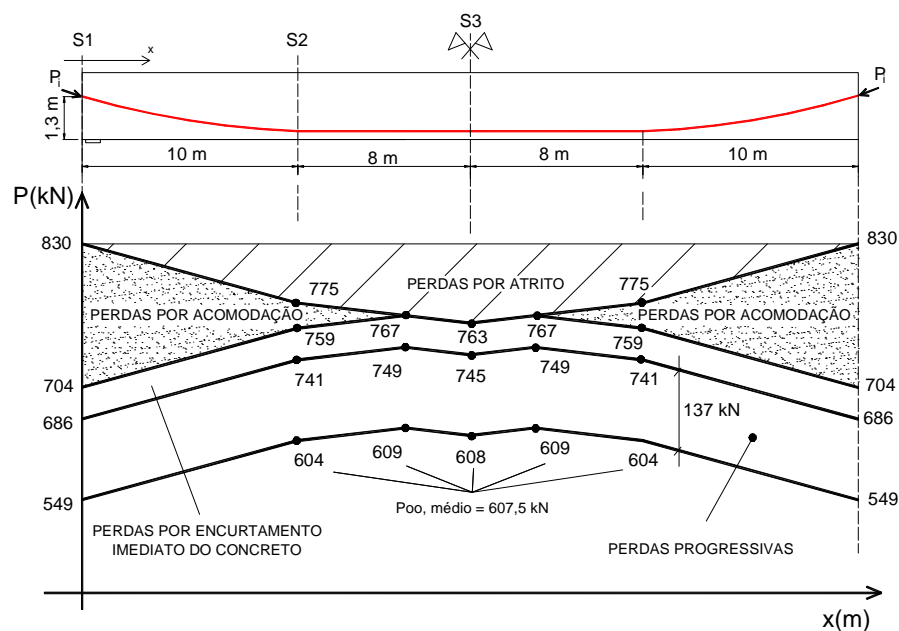


Figura 41 - Resultado final das perdas de protensão obtidas manualmente. Fonte: Carneiro (2007).

## 6.2 CABO PARABÓLICO COM ANCORAGENS ATIVA-PASSIVA

O programa de perdas de protensão em *AutoLisp* gera o gráfico das perdas imediatas e progressivas para vigas bi-apoiadas com cabo parabólico-retilíneo, sendo ancoragem ativa em S1 e ancoragem passiva (morta) em S5. As variáveis de entrada podem ser visualizadas na Figura 42:

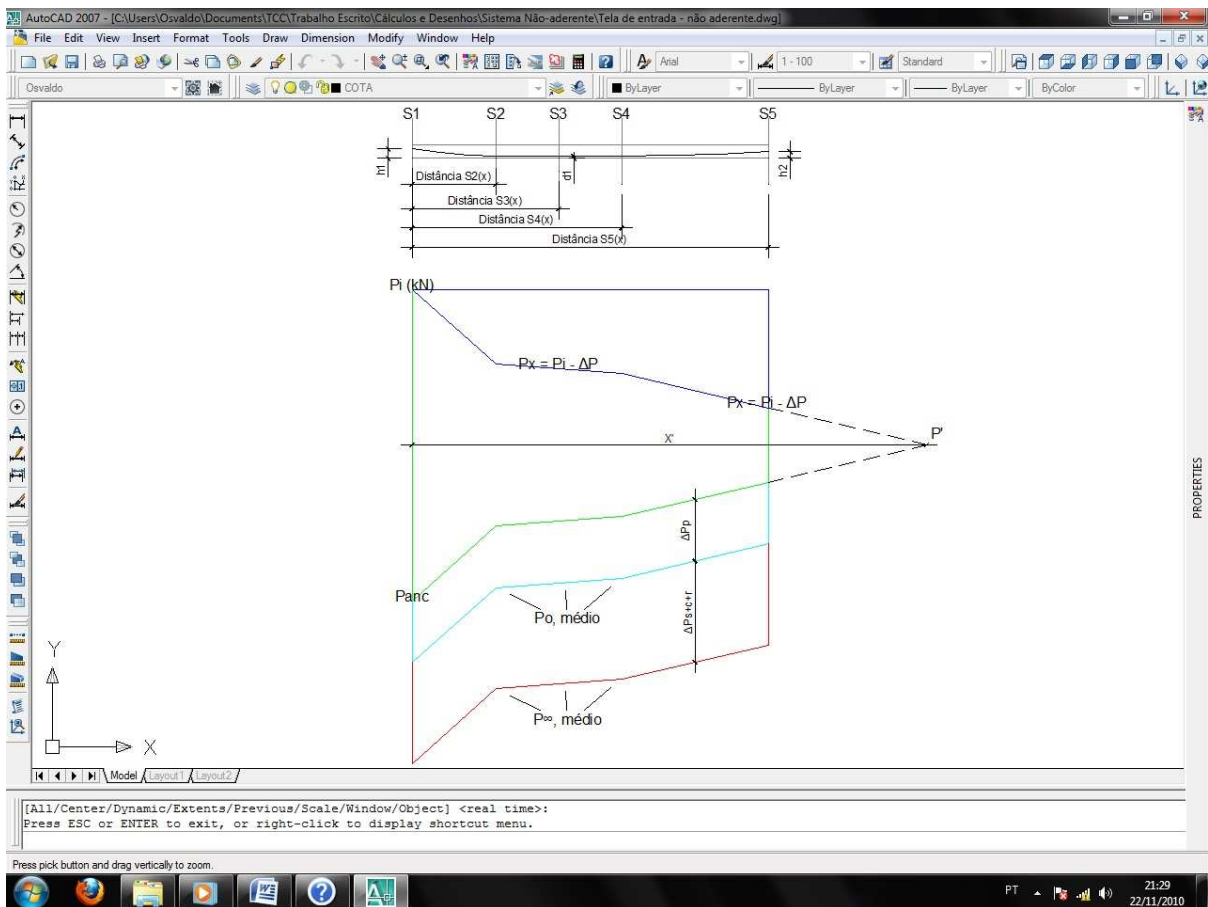
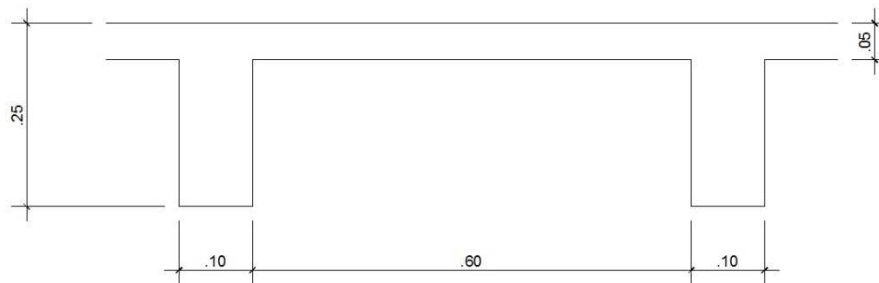


Figura 42 - Variáveis do programa de perdas de protensão em *AutoLisp* (ancoragens ativa-passiva).

O programa é utilizado para gerar os gráficos das perdas de protensão dos cabos utilizados nas vigas-faixa de base 1,25 m e altura de 0,25 m, como mostra a Figura 43. As vigas-faixa são protendidas por 14 cabos parabólicos-retilíneos monocordoalha engraxada do aço CP 190 RB 12.7 mm. A força inicial de protensão é de 150 kN por cordoalha, aplicada aos 7 dias da concretagem, e o  $f_{ck}$  de 35 MPa. O resumo dos valores utilizados neste exemplo está descrito no APÊNDICE B.



**Figura 43 - Esquema do piso com lajes nervuradas de concreto armado e vigas-faixa protendidas.**



**Figura 44 - Detalhe da nervura.**

Primeiro, deve-se carregar o arquivo de extensão ".lsp" no *AutoCAD* (ver item 6.1), digitar o comando "perdasap" e pressionar "Enter". O primeiro dado a ser fornecido é a altura da laje: 0.25 metros. Em seguida, deve-se informar as distâncias "S2, S3, S4 e S5" (ver Figura 42) que é de 1.60, 2.80, 4.00 e 6.80 metros, respectivamente, (a distância S1 não precisará ser fornecida, pois sempre será igual a zero). Após, na linha de comando é pedido a "Altura h1", que segundo a Figura 42 é a altura em que o cabo sai da extremidade da viga, sendo de 0.18 m. Da mesma forma a "Altura d1" que é o cobrimento do cabo no meio do vão, sendo de 0.04 metros no exemplo. Pede-se a "Altura h2", que segundo a Figura 42 é a altura em que o cabo sai da outra extremidade da viga, sendo de 0.125 m. Deve-se informar o valor da força inicial de protensão "Pi" em kN, que é de 150 kN. Em seguida, informa-se o valor do coeficiente de

atrito aparente entre a armadura e a bainha: 0.05. Então, tem-se gerado o gráfico das perdas por atrito.

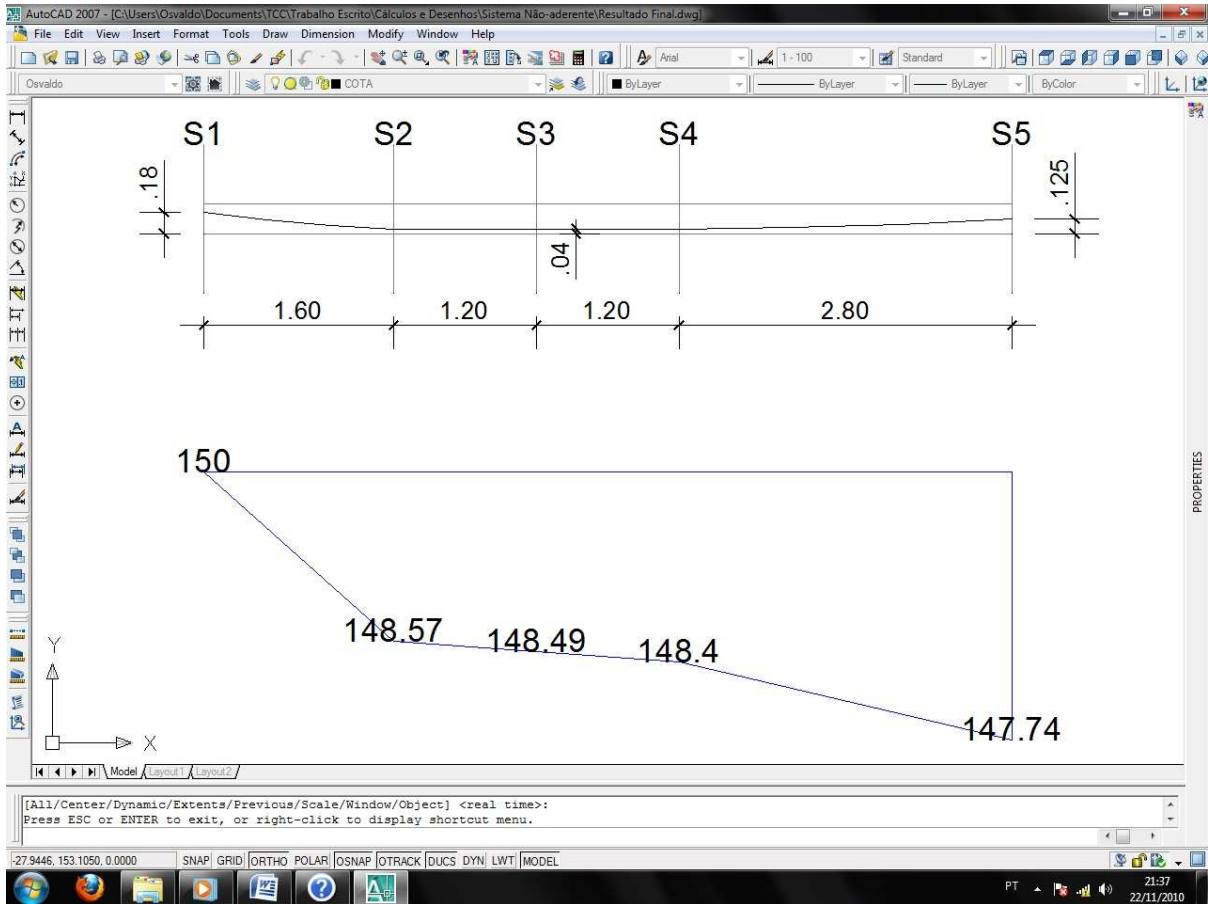
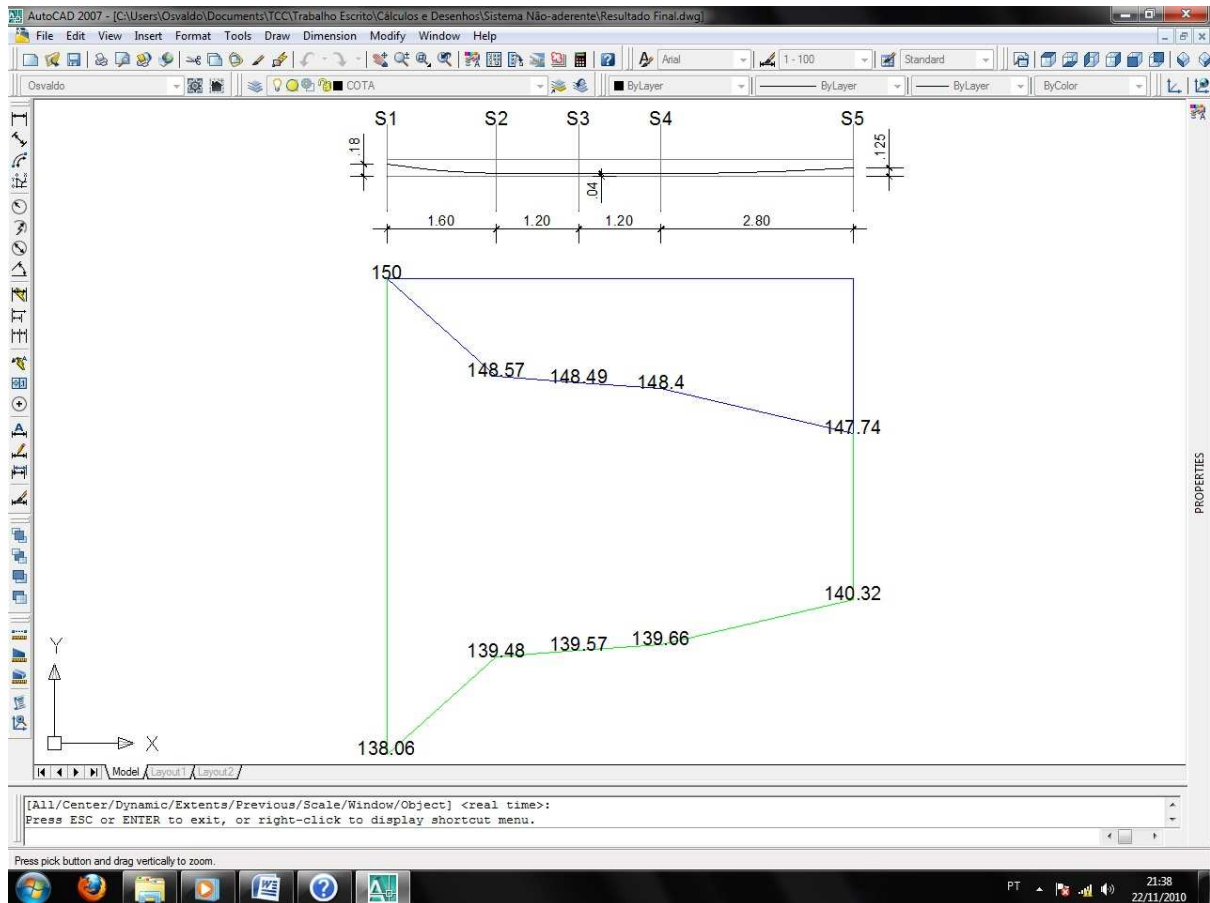


Figura 45 - Resultado das perdas por atrito do exemplo (ancoragens ativa-passiva).

Dando prosseguimento ao programa, parte-se para as perdas por acomodação das ancoragens, onde informa-se na linha de comando o valor do módulo de elasticidade do aço de protensão ( $E_p$ ), que é de 200 kN/mm<sup>2</sup>. Pede-se o valor da área de aço por cabo ( $A_p$ ) de 101.40 mm<sup>2</sup>. E, após, o valor da acomodação da ancoragem ( $\delta$ ) em milímetros, que vale 3mm. Então, na linha de comando é pedido o valor da distância  $x'$ , que segundo a Figura 42 é a distância em que há a intersecção das perdas por atrito com as perdas por acomodação que faz com que a área formada entre estes dois gráficos seja igual ao produto de  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$ . Assim, o usuário testa um valor de  $x'$  e será informado a área gerada por este valor de  $x'$  na parte de cima da linha de comando, e na linha de comando, o valor da área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta = 60.84$  seguido de uma pergunta "(s/n)?" (sim ou não), se os valores forem iguais aperta-se "s" e "Enter", se os valores forem diferentes aperta-se "n" e "Enter" e a linha de comando volta a pedir outro valor de  $x'$  até que o usuário encontre a área gerada mais próxima ou igual da área  $E_p \cdot A_p \cdot \delta$ ,

para o exemplo o valor de  $x'$  de 22.62 gerou a área de 60.83. Dessa forma, o programa gerou junto ao gráfico das perdas por atrito, o gráfico das perdas por acomodação das ancoragens.



**Figura 46 - Resultado das perdas por acomodação do exemplo (ancoragens ativa-passiva).**

Prossegue-se a entrada de valores para as perdas por encurtamento imediato do concreto. Portanto, pede-se na linha de comando o valor de  $g_{total}$ , que é o somatório de todos os carregamentos permanentes considerados: 30,63 kN/m. Em seguida, informa-se o vão da viga que é de 8 metros. Em seguida, o número de cabos: 14. A área da seção transversal de concreto, igual a 0.325 m<sup>2</sup>. A excentricidade do cabo,  $e$ : 0.085 m. Pede-se o valor do módulo de resistência superior  $W_s$  (0.0135 m<sup>3</sup>) e depois o valor do módulo de resistência inferior  $W_i$  (0.0135 m<sup>3</sup>). O valor de  $d'$ , que é de 0.04 m. E, por fim, o valor de  $f_{ckj}$ , igual a 11 MPa.

Assim, tem-se gerado o gráfico das perdas por encurtamento imediato do concreto e a parte das perdas imediatas neste sistema de protensão.

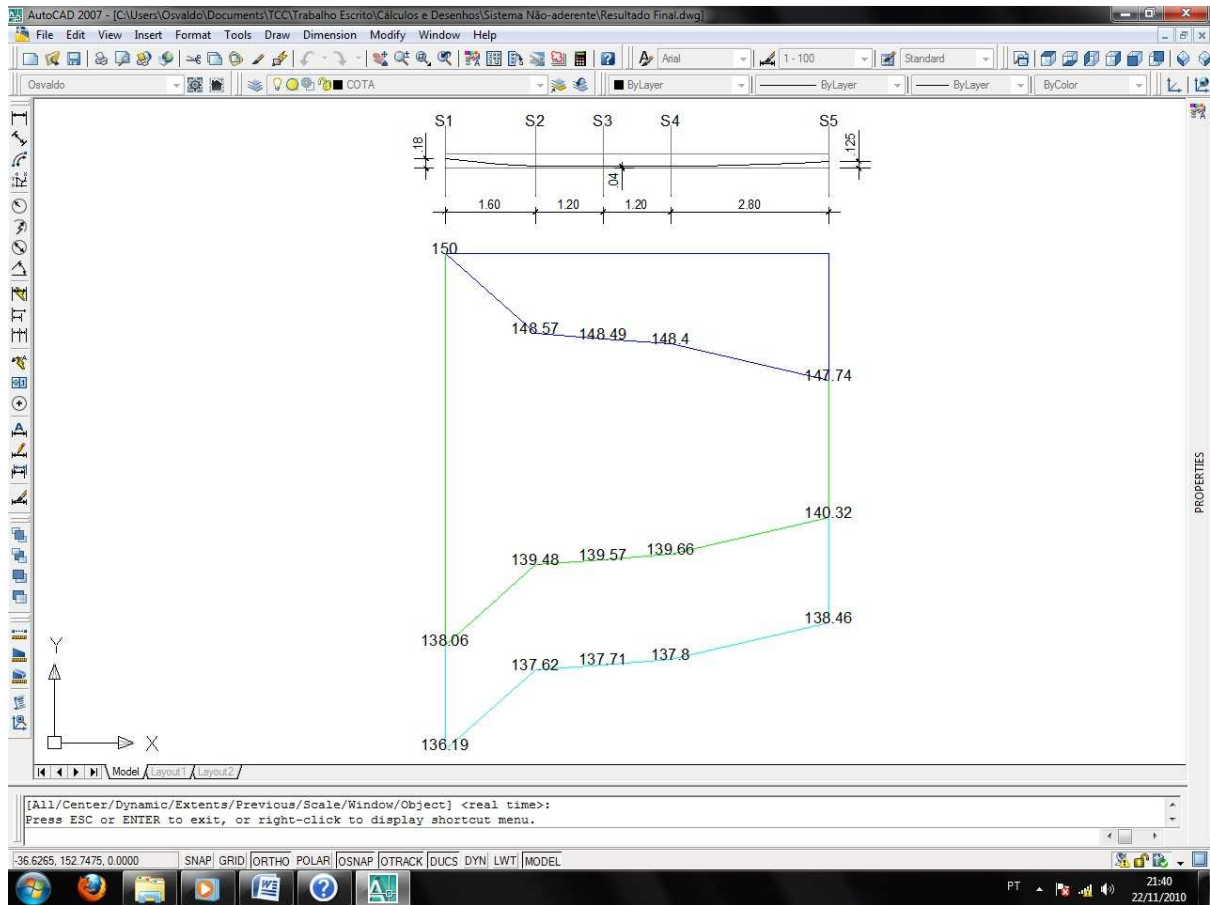
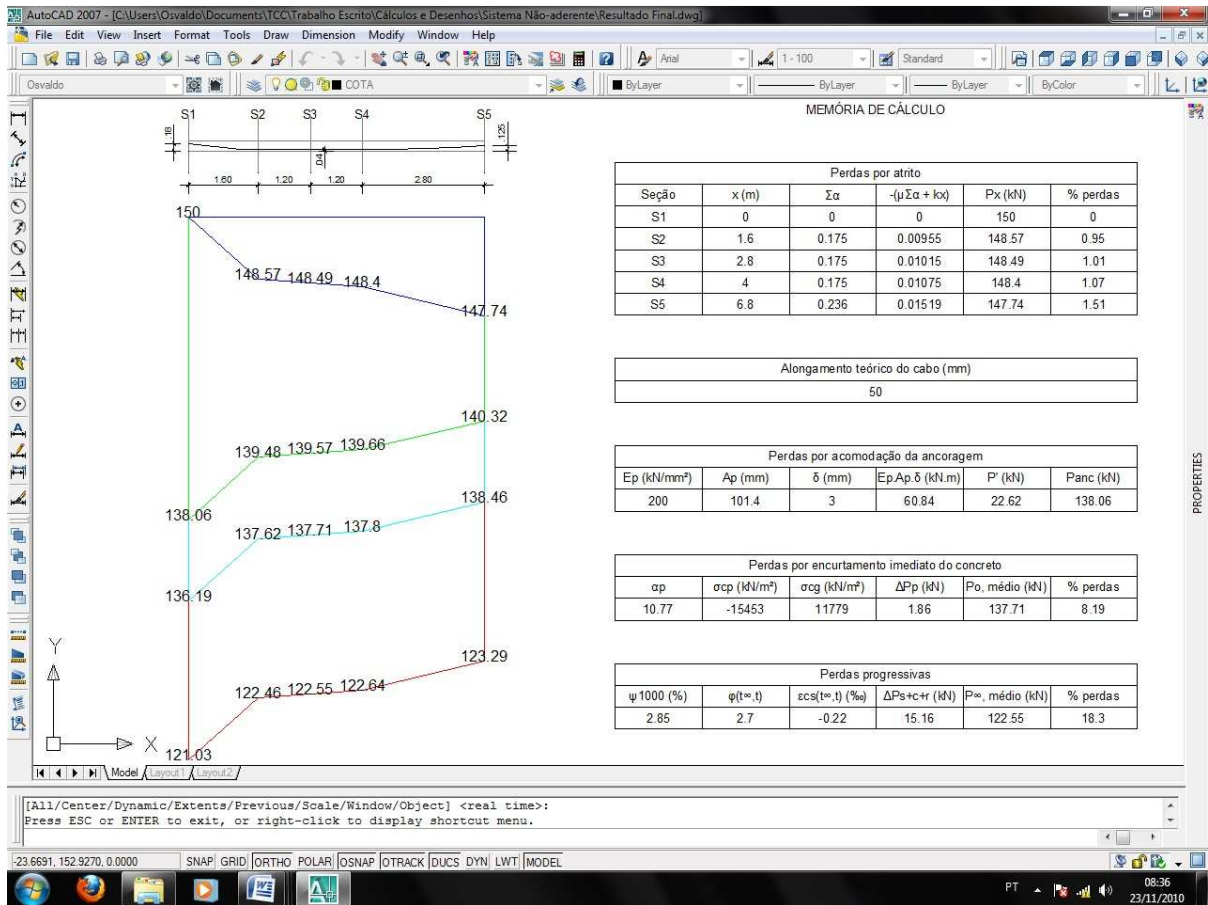


Figura 47 - Resultado das perdas por encurtamento imediato do exemplo (ancoragens ativa-passiva).

Continuando o cálculo das perdas de protensão, deve-se partir para as perdas progressivas. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 38-39) pode-se realizar o cálculo pelo processo aproximado ou pelo processo simplificado, sendo que neste programa é realizado pelo processo mais geral entre os dois: o simplificado.

Portanto, prosseguindo com o programa, na linha de comando é pedido o valor do perímetro em contato com o ambiente de  $1.30 \text{ m}^2$ . A umidade do ambiente em porcentagem,  $U$ : 75%. O  $f_{ck}$  do concreto que é de 35 MPa. O valor da carga mínima de ruptura de uma cordoalha: 187,3 kN. E, por fim, o momento central de inércia da seção de  $0,00169 \text{ m}^4$ . Logo, tem-se gerado o gráfico das perdas progressivas, bem como a tabela com alguns dados da memória de cálculo para acompanhamento.



**Figura 48 - Resultado das perdas progressivas e memória de cálculo do exemplo (ancoragens ativa-passiva).**

O resumo de valores utilizados neste exemplo está descrito no APÊNDICE B - Resumo das variáveis para utilização do programa - ancoragens ativa-passiva.

Comparando-se os resultados do programa com os cálculos obtidos manualmente, pode-se dizer que as perdas imediatas são praticamente iguais, sendo a força média de protensão calculada manualmente de 137,8 kN enquanto a obtida pelo programa é de 137,7 kN. Já as perdas progressivas são diferentes, pois o programa as calcula pelo processo simplificado e o cálculo manual foi realizado pelo processo aproximado. Portanto, a força média de protensão com as perdas totais calculadas manualmente é de 112,8 kN e as calculadas pelo programa de 122,6 kN. O resultado final das perdas obtidas pelo calculista pode ser visto na Figura 49.

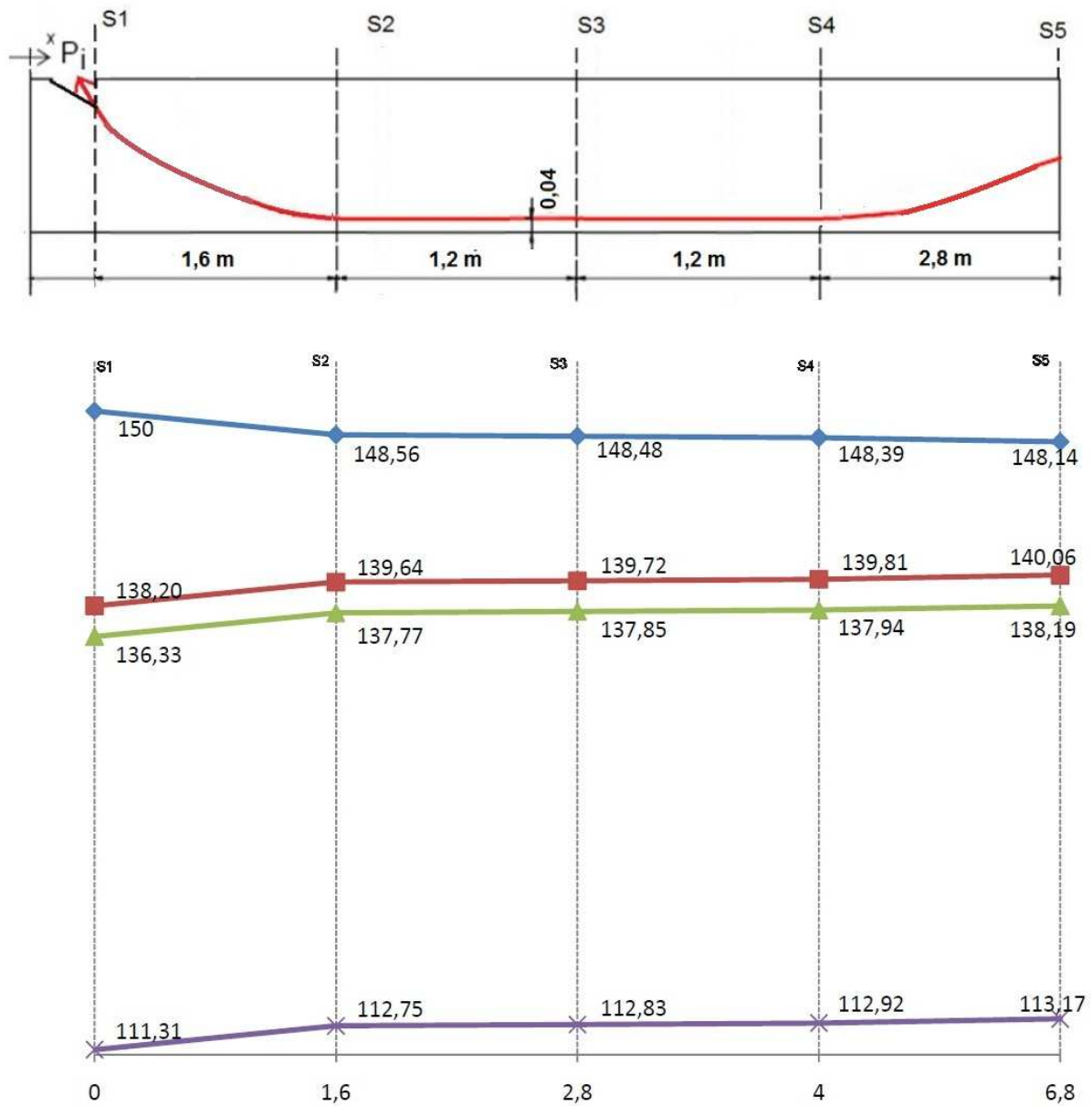


Figura 49 - Resultado final das perdas de protensão obtidas manualmente. Fonte: Rossi (2009).

## 7 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo dos resultados obtidos pelo programa e comparando-os com os resultados obtidos manualmente pode-se dizer que o programa de perdas de protensão atende os cálculos necessários para encontrar as perdas de protensão imediatas e progressivas, tanto para ancoragens ativas quanto para ancoragens ativa-passiva.

O uso do ambiente CAD também é muito válido, pois é um ambiente familiar para o projetista e confere a este uma interação entre o desenho e as verificações normativas, tornando possível salvar num mesmo arquivo os cálculos junto ao desenho.

O programa também se mostrou eficiente no acompanhamento gráfico, pois visualiza-se a força de protensão em todas as seções da viga em escala, o que deixa a desejar em outros criadores gráficos como o Excel.

O uso do programa agiliza as etapas de cálculo das perdas de protensão. Como no cálculo das perdas por acomodação, que se faz necessário o método das tentativas para encontrar o valor da área  $E_p.A_p.\delta$ . No processo de cálculo das perdas por encurtamento imediato do concreto o programa também se mostra eficiente, pois calcula a evolução das tensões no meio do vão em função do carregamento e das características geométricas das peças, dispensando o usuário de encontrar os valores de  $\sigma_{cp}$  e de  $\sigma_{cg}$ . Nas perdas progressivas é dispensável interpolar os coeficientes de retração e fluência que já estão armazenados na memória do programa em função da umidade e da espessura fictícia, bem como a relaxação de cordoalhas após 1000 h a 20°C,  $\psi_{1000}$ .

Em relação ao processo de cálculo das perdas progressivas, o simplificado é mais trabalhoso que o aproximado, fornecendo resultados mais precisos. Portanto, com base nos exemplos apresentados, o resultado da força final de protensão é maior em relação à obtida manualmente, logo seria necessário um número menor de cordoalhas para a protensão, reduzindo os custos da estrutura.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Implementar o cálculo do número de cabos e verificações das tensões no concreto, junto com o cálculo das perdas. Os resultados do cálculo das perdas podem ser utilizados para alterar os valores estimados inicialmente, promovendo a interação entre essas etapas do projeto.

Também pode-se implementar a verificação das tensões em seções intermediárias do elemento estrutural a partir dos resultados das forças de protensão obtidos com o cálculos das perdas nessas seções.

Obtenção do fuso limite com maior precisão a partir dos valores das perdas obtidas nas diversas seções. Entende-se por fuso limite a região da viga onde o projetista iria dispor a armadura ou o cabo resultante de forma a atender todas as verificações referentes às tensões limites no concreto.

Implementar o processo de cálculo das perdas para cabos de vigas contínuas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BELGO BÉKAERT ARAMES S. A. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido**, Catálogo Técnico, 2003.

CARNEIRO, R. J. F. M. **Concreto Protendido - Notas de Aula**, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**, EESC/USP - São Carlos, 2005.

SCHMID, M. R. L. Um pouco da história do uso do aço no concreto protendido no Brasil e no mundo. **Revista Concreto**, Rio de Janeiro, n. 50, 2008.

RUSCHEL, R. C. **Programando em AutoLisp - Notas de Aula**, DCC/FEC/UNICAMP - Campinas, 2000. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/%7Eregina.html>>. Acesso em: 16 ago. 2010, 14:27:00.

PARK, R.; PAULAY, T. **Reinforced Concrete Structures**, John Wiley and Sons Inc. New York, 1975.

## **APÊNDICE A**

### **RESUMO DAS VARIÁVEIS PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA - ANCORAGENS ATIVA-ATIVA**

VARIÁVEL DO PROGRAMA	VALOR DO EXEMPLO
Altura da viga [m]	1.80
Distância S2(x) [m]	10
Distância S3(x) [m]	18
Altura h1 [m]	1.30
Altura d1 [m]	0.10
Pi [kN]	830
$\mu$ <coef de atrito>	0.20
Valor de Ep [kN/mm <sup>2</sup> ]	202
Valor de Ap [mm <sup>2</sup> ]	608.40
Valor da acomodação $\delta$ [mm]	6
Distância x' [m]	15.00
É igual a area Ep.Ap.d (s/n)?	s
gtotal <carga permanente total> [kN/m]	21.63
L <vão teórico da viga> [m]	36.00
n <número de cabos>	5
Ac <área da seção transversal> [m <sup>2</sup> ]	0.745
ep <excentricidade do cabo> [m]	1.055
Ws <módulo de resistência superior> [m <sup>3</sup> ]	0.373
Wi <módulo de resistência inferior> [m <sup>3</sup> ]	0.198
d'[m]	0.1175
fckj [MPa]	21
u <perímetro em contato com ambiente> [m]	6.63
Qual a umidade do ambiente [%] (40/55/75/90)?	75
fck [MPa]	30
Prup <carga mín de ruptura> [kN]	187.30
Área de uma cordoalha [mm <sup>2</sup> ]	101.40
Ic <momento central de inércia da seção> [m <sup>4</sup> ]	0.233

**APÊNDICE B**

RESUMO DAS VARIÁVEIS PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA - ANCORAGENS  
ATIVA-PASSIVA

VARIÁVEL DO PROGRAMA	VALOR DO EXEMPLO
Altura da viga [m]	0.25
Distância S2(x) [m]	1.60
Distância S3(x) [m]	2.80
Distância S4(x) [m]	4.00
Distância S5(x) [m]	6.80
Altura h1 [m]	0.18
Altura d1 [m]	0.04
Altura h2 [m]	0.125
Pi [kN]	150
$\mu$ <coef de atrito>	0.05
Valor de Ep [kN/mm <sup>2</sup> ]	200
Valor de Ap [mm <sup>2</sup> ]	101.40
Valor da acomodação $\delta$ [mm]	3
Distância x' [m]	22.62
É igual a area Ep.Ap.d (s/n)?	s
gtotal <carga permanente total> [kN/m]	30.63
L <vão teórico da viga> [m]	8.00
n <número de cabos>	14
Ac <área da seção transversal> [m <sup>2</sup> ]	0.325
ep <excentricidade do cabo> [m]	0.085
Ws <módulo de resistência superior> [m <sup>3</sup> ]	0.0135
Wi <módulo de resistência inferior> [m <sup>3</sup> ]	0.0135
d'[m]	0.04
fckj [MPa]	11
u <perímetro em contato com ambiente> [m]	1.30
Qual a umidade do ambiente [%] (40/55/75/90)?	75
fck [MPa]	35
Prup <carga mín de ruptura> [kN]	187.30
Ic <momento central de inércia da seção> [m <sup>4</sup> ]	0.00169

**APÊNDICE C**

**CÓDIGO-FONTE DO PROGRAMA DE PERDAS DE PROTENSÃO EM AUTOLISP -  
ANCORAGENS ATIVA-ATIVA**

```

(defun c:perdasaa ()
  (setq h0 (getreal "\nAltura da viga [m] = "))
  (setq s1 (+ 0))
  (setq s2 (getreal "\n<s1=0> Distância S2(x) [m] = "))
  (setq s3 (getreal "\nDistância S3(x) [m] = "))
  (setq h1 (getreal "\nAltura h1 [m] = "))
  (setq d1 (getreal "\nAltura d1 [m] = "))
  (setq Salfa (/ (* (- h1 d1) 2.0) s2))
  (setq Pii (getreal "\nPii [kN] = "))
  (setq mi (getreal "\n\u03BC <coef de atrito> = "))
  (setq k (* 0.01 mi))
  (setq Px1 (* Pii 1.0))
  (setq Px2 (* Pii (EXP (* (+ (* mi Salfa) (* k s2)) (- 1.0))))))
  (setq Px3 (* Pii (EXP (* (+ (* mi Salfa) (* k s3)) (- 1.0))))))
  (setq rec0 (list 0 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)))
  (setq rec1 (list (+ s3 s3) (+ (/ Px1 10.0) 5.0 h0)))
  (command "osnap" "off")
  (command "layer" "n" "VIGA" "c" "8" "VIGA" "")
  (command "clayer" "VIGA")
  (command "rectang" rec0 rec1)
  (command "line" (list s1 (+ (/ Px1 10.0) 4.0)) (list s1 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0)
h0)) "")
  (command "line" (list s2 (+ (/ Px1 10.0) 4.0)) (list s2 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0)
h0)) "")
  (command "line" (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 4.0)) (list s3 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0)
h0)) "")
  (command "line" (list (- (+ s3 s3) s2) (+ (/ Px1 10.0) 4.0)) (list (- (+ s3 s3)
s2) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0)) "")
  (command "line" (list (+ s3 s3) (+ (/ Px1 10.0) 4.0)) (list (+ s3 s3) (+ (+ (/
Px1 10.0) 6.0) h0)) "")
  (setq p1 (list s1 (/ Px1 10.0)))
  (setq p2 (list s2 (/ Px2 10.0)))
  (setq p3 (list s3 (/ Px3 10.0)))
  (setq p4 (list (- (+ s3 s3) s2) (/ Px2 10.0)))
  (setq p5 (list (+ s3 s3) (/ Px1 10.0)))
  (command "layer" "n" "ATRITO" "c" "5" "ATRITO" "")
  (command "clayer" "ATRITO")
  (command "pline" p1 p2 p3 p4 p5 p1 "")
  (setq arc1 (list s1 (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) h1)))
  (setq arc2 (list (/ s2 2.0) (+ (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) d1) (/ (- h1 d1) 3.0))))
  (setq arc3 (list s2 (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) d1)))
  (setq arc4 (list (- (+ s3 s3) s2) (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) d1)))
  (setq arc5 (list (+ (- (+ s3 s3) s2) (/ s2 2.0)) (+ (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) d1) (/ (-
h1 d1) 4.0)))
  (setq arc6 (list (+ s3 s3) (+ (+ (/ Px1 10.0) 5.0) h1)))
  (command "layer" "n" "CABO" "c" "7" "CABO" "")
  (command "clayer" "CABO")
  (if (= h1 d1) (command "line" arc1 arc6 "") (command "arc" arc1 arc2 arc3))
  (if (= h1 d1) (+ 0) (command "line" arc3 arc4 ""))
  (if (= h1 d1) (+ 0) (command "arc" arc4 arc5 arc6))
  (command "layer" "n" "TEXTO" "c" "7" "TEXTO" "")
  (command "clayer" "TEXTO")
  (command "style" "ARIAL" "arial" "" "" "" "" "")
  (command "text" "j" "c" p1 "0.5" "" (rtos Px1 2 0))
  (command "text" "j" "c" p2 "0.5" "" (rtos Px2 2 0))
  (command "text" "j" "c" p3 "0.5" "" (rtos Px3 2 0))
  (command "text" "j" "c" p4 "0.5" "" (rtos Px2 2 0))
  (command "text" "j" "c" p5 "0.5" "" (rtos Px1 2 0))
  (command "text" "j" "c" (list s1 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0)) "0.5" ""
"s1")
  (command "text" "j" "c" (list s2 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0)) "0.5" ""
"s2")
  (command "text" "j" "c" (list s3 (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0)) "0.5" ""
"s3")
  (command "text" "j" "c" (list (- (+ s3 s3) s2) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0)
h0)) "0.5" "" "s2")
  (command "text" "j" "c" (list (+ s3 s3) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0))
"0.5" "" "s1")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0)) "j"
"mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 1))) "MEMÓRIA DE CÁLCULO" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 3)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 4))) "Perdas por atrito" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 4)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "Seção" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
4))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "x (m)" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
4))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "\u03A3\u03B1\u03B1" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
4))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "-
(\u03BC\u03A3\u03A3\u03B1 + kx)" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
4))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "Px (kN)" "")
  (command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
4))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 5))) "% perdas" "")

```



```

7))) (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 8)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 7))) (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 8)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 7))) (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 8)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 7))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 8)))
(command "clayer" "ATRITO")
(command "line" (list (+ s3 s3 5.0) (/ Px1 10.0)) (list (+ s3 s3 6.5) (/ Px1 10.0)) "")
(command "clayer" "TEXT0")
(command "text" (list (+ s3 s3 7.0) (/ Px1 10.0)) "0.5" "" "PERDAS POR ATRITO")
(command "zoom" "extents")
(command "regen")
(setq Ep (getreal "\nValor de Ep [kN/mm²] = "))
(setq Ap (getreal "\nValor de Ap [mm²] = "))
(setq dd (getreal "\nValor da acomodação '\U+03B4' [mm] = "))
(setq EpApd (* (* Ep Ap) (/ dd 10000.0)))
(setq condi "n")
(while (= condi "n")
(setq ss (getreal "\nDistância x' [m] = "))
(setq Pxss1 (+ (* (/ (- Px1 Px2) s2) (- ss) Px1))
(setq p61 (list ss (/ Pxss1 10.0)))
(setq p71 (list s1 (- (/ Pxss1 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss1 10.0))))
(setq Pxss2 (if (/= s2 s3) (+ (* (/ (- Px2 Px3) (- s3 s2)) (- s2 ss) Px2) (+ 0 0)))
(setq p62 (list ss (/ Pxss2 10.0)))
(setq p72 (list s2 (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px2 10.0) (/ Pxss2 10.0))))
(setq p82 (list s1 (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss2 10.0))))
(if (<= ss s2) (command "area" p61 p71 p1 "") (command "area" p62 p72 p82 p1 p2
""))
(initget 1 "s n") (prompt "É igual a area Ep.Ap.d = ") (princ EpApd) (prompt "(s/n)?")
")
(setq condi (getkword))
(command "layer" "n" "ACOMODAÇÃO" "c" "3" "ACOMODAÇÃO" "")
(command "clayer" "ACOMODAÇÃO")
(if (<= ss s2) (command "pline" p61 p71 p1 "") (command "pline" p62 p72 p82 p1 ""))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(command "clayer" "TEXT0")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p61 "0.5" "" (rtos Pxss1 2 0))
(command "text" "j" "c" p62 "0.5" "" (rtos Pxss2 2 0))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p71 "0.5" "" (rtos (- (/ Pxss1 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss1 1.0))) 2 0)) (command "text" "j" "c" p72 "0.5" "" (rtos (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px2 1.0) (/ Pxss2 1.0))) 2 0))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "line" p1 p1 "") (command "text" "j" "c" p82 "0.5" "" (rtos (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss2 1.0))) 2 0))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(command "clayer" "ACOMODAÇÃO")
(command "line" (list (+ s3 s3 5.0) (- (/ Px1 10.0) 2.0)) (list (+ s3 s3 6.5) (- (/ Px1 10.0) 2.0)) "")
(command "clayer" "TEXT0")
(command "text" (list (+ s3 s3 7.0) (- (/ Px1 10.0) 2.0)) "0.5" "" "PERDAS POR ACOMODAÇÃO")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 10))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 11))) "Alongamento teórico do cabo (mm)" "")
(setq dl (* (+ (* (/ (+ Px1 Px2) 2) (* s2 1000)) (* (/ (+ Px2 Px3) 2) (* (- s3 s2) 1000)) (/ 2 (* Ep Ap))))
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 11))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 12))) (rtos dl 2 0) "")
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 10))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 11)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 11))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 12))))
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 14))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "Perdas por acomodação da ancoragem" ""
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16))) "Ep (kN/mm²)" ""
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16))) "Ap (mm²)" ""
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16))) "\U+03B4 (mm)" ""
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16))) "Ep.Ap.\U+03B4 (kN.m)" ""
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16))) "x' (m)" ""

```

```

"j" "mc" (list (command "mtext" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))) "Panc (kN)" "")

"mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (rtos Ep 2 0) "")
"mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (rtos Ap 2 2) "")
"j" "mc" (list (command "mtext" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (rtos dd 2 0) "")
"j" "mc" (list (command "mtext" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (rtos (* EpApd 10) 2 2)
"")

"j" "mc" (list (command "mtext" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (rtos ss 2 2) "")
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17))) (if (<= ss s2) (rtos (-
(/ Pxss1 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss1 1.0))) 2 0) (rtos (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/
Pxss2 1.0))) 2 0)) "")

(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 15)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 16)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 17)))

(command "zoom" "extents")
(command "regen")

(setq gtot (getreal "\ngtotal <carga permanente total> [kN/m] = ")
(setq vao (getreal "\nL <vão teórico da viga> [m] = ")
(setq Mfg (/ (* gtot (* vao vao)) 8))
(setq ncabos (getreal "\nn <número de cabos> = ")
(setq Ac (getreal "\nAc <área da seção transversal> [m²] = ")
(setq ecen (getreal "\nep <excentricidade do cabo> [m] = ")
(setq ws (getreal "\nws <módulo de resistência superior> [m³] = ")
(setq wi (getreal "\nwi <módulo de resistência inferior> [m³] = ")
(setq dlinha (getreal "\nd' [m] = ")
(setq Spsup (+ (/ (* (- 0 Pii) ncabos) Ac) (/ (* (* Pii ncabos) ecen) ws)))
(setq Spinf (- (/ (* (- 0 Pii) ncabos) Ac) (/ (* (* Pii ncabos) ecen) wi)))
(setq Sgsup (/ (- 0 Mfg) ws))
(setq Sginf (/ (+ 0 Mfg) wi))

(setq scp (+ (/ (* (- Spinf Spsup) (- h0 dlinha)) h0) Spsup))
(setq scg (+ (/ (* (- Sginf Sgsup) (- h0 dlinha)) h0) Sgsup))

(setq alfab (getreal "\nfckj [MPa] = ")
(setq Dsp (/ (* (+ scp scg) (* (/ Ep (/ (* 5600 (SQRT alfab)) 1000.0)) (- ncabos 1)))
(* 2 ncabos))
(setq DP (ABS (* (/ Dsp 1000000.0) Ap)))
(setq p91 (list s1 (- (- (/ Pxss1 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss1 10.0))) (/ DP
10.0))))
(setq p101 (list ss (- (/ Pxss1 10.0) (/ DP 10.0)))
(setq p111 (list s2 (- (/ Px2 10.0) (/ DP 10.0)))
(setq p12 (list s3 (- (/ Px3 10.0) (/ DP 10.0)))
(setq p92 (list s1 (- (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss2 10.0))) (/ DP
10.0)))
(setq p102 (list s2 (- (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px2 10.0) (/ Pxss2 10.0))) (/ DP
10.0)))
(setq p112 (list ss (- (/ Pxss2 10.0) (/ DP 10.0)))
(command "layer" "n" "ENCURTAMENTO" "c" "4" "ENCURTAMENTO" "")
(command "clayer" "ENCURTAMENTO")
(if (<= ss s2) (command "pline" p71 p91 p101 p111 p12 "") (command "pline" p82
p92 p102 p112 p12 ""))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0)
5.0)) "n")
(command "clayer" "TEXT0")

```

```

(- (/ Px1 1.0) (if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p91 "0.5" "" (rtos (- (- (/ Pxss1 1.0) (/ Pxss1 1.0)) (/ DP 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c" p92 "0.5" "" (rtos (- (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss2 1.0))) (/ DP 1.0)) 2 0))) (command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p101 "0.5" "" (rtos (- (/ Pxss1 1.0) (/ DP 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c" p102 "0.5" "" (rtos (- (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px2 1.0) (/ Pxss2 1.0))) (/ DP 1.0)) 2 0))) (command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p111 "0.5" "" (rtos (- (/ Px2 1.0) (/ DP 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c" p112 "0.5" "" (rtos (- (/ Pxss2 1.0) (/ DP 1.0)) 2 0))) (command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0) 5.0)) "n")
(command "text" "j" "c" p12 "0.5" "" (rtos (- (/ Px3 1.0) (/ DP 1.0)) 2 0))
(command "clayer" "ENCURTAMENTO")
(command "line" (list (+ s3 s3 5.0) (- (/ Px1 10.0) 4.0)) (list (+ s3 s3 6.5) (- (/ Px1 10.0) 4.0)) "")
(setq Pmed (if (<= ss s2) (/ (+ (- Px3 DP) (- Px2 DP) (- Pxss1 DP)) 3) (/ (+ (- Px3 DP) (- Pxss2 DP) (- (- Pxss2 (- Px2 Pxss2)) DP)) 3)))
(command "clayer" "TEXT0")
(command "text" (list (+ s3 s3 7.0) (- (/ Px1 10.0) 4.0)) "0.5" "" "PERDAS POR ENCURT. IMEDIATO CONCRETO")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 19))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "Perdas por encurtamento imediato do concreto" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "\u+03B1p" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "\u+03C3cp (kN/m\u00b2)" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "\u+03C3cg (kN/m\u00b2)" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "\u+0394pp (kN)" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "Po, m\u00e9dio (kN)" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "% perda" "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos (/ Ep (/ (* 5600 (SQRT alfap)) 1000.0)) 2 2) "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos scp 2 0) "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos scg 2 0) "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos DP 2 2) "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos Pmed 2 0) "")
(command "mtext" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) "j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22))) (rtos (* (/ (- Pii Pmed) Pii) 100) 2 2) "")
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 19))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 20))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22)))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 21))) (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 22)))
(command "zoom" "extents")
(command "regen")

```

```

(setq perim (getreal "\nu <perímetro em contato com ambiente> [m] = "))
(setq hfic (* (/ (* 2 Ac) perim) 100))
(iniaget 1 "40 55 75 90") (setq umid (getkeyword "\nQual a umidade do ambiente [%]
(40/55/75/90)? "))

(if (= umid "40") (setq coefflu (/ (- 372 hfic) 80))
    (if (= umid "55") (setq coefflu (/ (- 344 hfic) 80))
        (if (= umid "75") (setq coefflu (/ (- 320 hfic) 100)) (setq coefflu (/
(- 480 hfic) 200))))))

(if (= umid "40") (setq coefret (/ (- hfic 372) 800))
    (if (= umid "55") (setq coefret (/ (- hfic 390) 1000))
        (if (= umid "75") (setq coefret (/ (- hfic 480) 2000)) (setq coefret (/
(- hfic 3660) 4000))))))

(setq Eci28 (getreal "\nfck [MPa] = "))

(setq Spsup00 (+ (/ (* (- 0 Pmed) ncabos) Ac) (/ (* (* Pmed ncabos) ecen) ws)))
(setq Spinf00 (- (/ (* (- 0 Pmed) ncabos) Ac) (/ (* (* Pmed ncabos) ecen) wi)))
(setq scp00 (+ (/ (* (- Spinf00 Spsup00) (- h0 dlinha)) h0) Spsup00))

(setq scp0g (/ (* (+ scp00 scg) (- 0 1)) 1000))

(setq Sp0 (* (/ Pmed Ap) 1000))
(setq Prup (getreal "\nPrup <carga mín de ruptura> [kN] = "))
(setq Alc (getreal "\nÁrea de uma cordoalha [mm²] = "))
(setq valorphi (/ Sp0 (/ (* Prup 1000) Alc))

(if (<= valorphi 0.5) (setq coefrel (+ 0))
    (if (<= valorphi 0.6) (setq coefrel (- (* valorphi 13) 6.5))
        (if (<= valorphi 0.7) (setq coefrel (- (* valorphi 12) 5.9))
            (if (<= valorphi 0.8) (setq coefrel (- (* valorphi 10) 4.5))
                (princ "ERRO: \u+03c3p0 > 0.8 fptk")))))

(setq xtt0 (* (log (- 1 (* 0.025 coefrel))) (- 1)))
(setq xp (+ 1 xtt0))
(setq xc (+ 1 (* 0.5 coefflu)))
(setq rop (/ (/ (* ncabos Ap) 1000000) Ac))
(setq Ic (getreal "\nIc <momento central de inércia da seção> [m4] = "))
(setq eta (+ 1 (* (/ Ac Ic) (* ecen ecen))))
(setq DSptt0 (/ (- (- (* coefret Ep) (* (/ (* Ep 1000) (* 5600 (SQRT Eci28)))) (* scp0g
coefflu))) (* Sp0 xtt0)) (+ xp (* xc (/ (* Ep 1000) (* 5600 (SQRT Eci28)))) (* eta rop))))
(setq DPscr (ABS (/ (* DSptt0 Ap) 1000)))
(setq p131 (list s1 (- (- (- (/ Pxss1 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss1 10.0))) (/ DP
10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p141 (list ss (- (- (/ Pxss1 10.0) (/ DP 10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p151 (list s2 (- (- (/ Px2 10.0) (/ DP 10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p16 (list s3 (- (- (/ Px3 10.0) (/ DP 10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p132 (list s1 (- (- (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px1 10.0) (/ Pxss2 10.0))) (/ DP
10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p142 (list s2 (- (- (- (/ Pxss2 10.0) (- (/ Px2 10.0) (/ Pxss2 10.0))) (/ DP
10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(setq p152 (list ss (- (- (/ Pxss2 10.0) (/ DP 10.0)) (/ DPscr 10.0))))
(command "layer" "n" "PROGRESSIVAS" "c" "1" "PROGRESSIVAS" "")
(command "clayer" "PROGRESSIVAS")
(if (<= ss s2) (command "pline" p91 p131 p141 p151 p16 "") (command "pline" p92
p132 p142 p152 p16 ""))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0)
5.0)) "n")
(command "clayer" "TEXT0")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p131 "0.5" "" (rtos (- (- (- (/ Pxss1
1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss1 1.0))) (/ DP 1.0)) (/ DPscr 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c"
p132 "0.5" "" (rtos (- (- (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px1 1.0) (/ Pxss2 1.0))) (/ DP 1.0)) (/ DPscr
1.0)) 2 0)))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0)
5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p141 "0.5" "" (rtos (- (- (- (/ Pxss1 1.0)
(- (/ Px2 1.0) (/ Pxss2 1.0))) (/ DP 1.0)) (/ DPscr 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c" p142 "0.5" ""
(rtos (- (- (- (/ Pxss2 1.0) (- (/ Px2 1.0) (/ Pxss2 1.0))) (/ DP 1.0)) (/ DPscr 1.0)) 2 0)))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0)
5.0)) "n")
(if (<= ss s2) (command "text" "j" "c" p151 "0.5" "" (rtos (- (- (- (/ Px2 1.0) (/
DP 1.0)) (/ DPscr 1.0)) 2 0)) (command "text" "j" "c" p152 "0.5" "" (rtos (- (- (- (/ Pxss2 1.0)
(- (/ DP 1.0)) (/ DPscr 1.0)) 2 0)))
(command "mirror" "last" "" (list s3 (/ Px1 10.0)) (list s3 (+ (/ Px1 10.0)
5.0)) "n")
(command "text" "j" "c" p16 "0.5" "" (rtos (- (- (/ Px3 1.0) (/ DP 1.0)) (/
DPscr 1.0)) 2 0))
(command "clayer" "PROGRESSIVAS")
(command "line" (list (+ s3 s3 5.0) (- (/ Px1 10.0) 6.0)) (list (+ s3 s3 6.5)
(- (/ Px1 10.0) 6.0)) "")

(setq Pinf (if (<= ss s2) (/ (+ (- (- Px3 DP) DPscr) (- (- Px2 DP) DPscr) (- (- Pxss1
DP) DPscr)) 3) (/ (+ (- (- Px3 DP) DPscr) (- (- Pxss2 DP) DPscr) (- (- (- Pxss2 (- Px2 Pxss2))
DP) DPscr)) 3)))

(command "clayer" "TEXT0")

```

```

(command "text" (list (+ s3 s3 7.0) (- (/ Px1 10.0) 6.0)) "0.5" "" "PERDAS
PROGRESSIVAS")
"mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25))) "Perdas progressivas" ""
"mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "\u+03c81000 (%)" ""
"mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25))) "j"
"mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "\u+03c6(t\u+221E,t)" ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "\u+03B5cs(t\u+221E,t)
(\u+2030)" ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "\u+0394Ps+c+r (kN)" ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "P\u+221E, m\u00e9dio (kN)"
""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) "% perda" ""
"mc" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))) (rtos coefrel 2 2) ""
"mc" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) (rtos coefflu 2 2) ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) (rtos coefret 2 2) ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))) (rtos DPscr 2 0) ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))) (rtos Pinf 2 0) ""
"j" "mc" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))) (rtos (* (/ (- Pii Pinf)
Pii) 100) 2 2) ""
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 24)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 25)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26)))
(list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 5) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26)))
(list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 10) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27)))
(list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 15) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26)))
(list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 20) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26)))
(list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))))
(command "rectang" (list (+ s3 s3 35 25) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 26)))
(list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 27))))
"mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 29))) "j"
"mc" (list (+ s3 s3 35 30) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0 30))) "Evolu\u00e7\u00e3o das Tens\u00f5es
(kN/m\u00b2)" ""
"mc" (list (+ s3 s3 35 2 2 (/ Sginf 10000)/ (- Sgsup 10000)) (+ (+ (/ Px1 10.0) 6.0) h0 (- 0
31))) "\u+03c3cg" ""
(command "zoom" "extents")
(command "regen")
(princ)
)

```