

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO E DA RESISTÊNCIA DE UM
SISTEMA DE LAJES MISTAS PELO MÉTODO DA INTERAÇÃO
PARCIAL**

Gabriel Soriano de Araujo

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ANÁLISE DO COMPORTAMENTO E DA RESISTÊNCIA DE UM
SISTEMA DE LAJES MISTAS PELO MÉTODO DA INTERAÇÃO
PARCIAL"**

Gabriel Soriano de Araujo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (Co-orientador)
DEES - UFMG

Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES-UFMG

Prof. Dr. Vicente Custódio Moreira de Souza
UFF

Belo Horizonte, 11 de abril de 2008

DEDICATÓRIA

"A entrada para a mente do homem é o que ele aprende, a saída é o que ele realiza. Se sua mente não for alimentada por um fornecimento contínuo de novas idéias, que ele põe a trabalhar com um propósito, e se não houver uma saída por uma ação, sua mente torna-se estagnada. Tal mente é um perigo para o indivíduo que a possui e inútil para a comunidade".

Jeremias W. Jenks

Dedico este trabalho aos meus pais queridos, a toda minha família e a Deus que sempre me orienta nos meus caminhos da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall, pelo incentivo, dedicação, compromisso, motivação e amizade durante todo o trabalho orientado.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues, pelo o incentivo, apoio e interesse demonstrados no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, por todo o apoio, atenção e carinho durante todo o mestrado.

Às minhas irmãs, Bárbara Soriano e Camila Soriano, pelo carinho, paciência e incentivo nos momentos mais difíceis.

À minha namorada, Fernanda Thomaz Rabelo, pela compreensão, paciência, carinho e incentivo na realização do mestrado.

Aos meus colegas do curso de mestrado, pelas horas de estudo juntos, que me ajudaram bastante durante a realização do mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da EE/UFMG, pela colaboração, atenção, amizade e incentivo indispensáveis durante todo o curso.

Aos colegas de trabalho da Thyssenkrupp CSA, por toda compreensão, paciência e incentivo nos momentos difíceis.

À USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A pela concessão da bolsa de estudos.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	i
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivos	8
1.3 Descrição Sucinta dos Capítulos	9
PROGRAMA DE ENSAIOS E RESULTADOS	12
2.1 Considerações Gerais	12
2.2 Caracterização dos Modelos	14
2.3 Caracterização dos Materiais Empregados	15
2.3.1 Fôrma de aço (Deck Metálico)	15
2.3.2 Concreto	17
2.4 Preparação dos Modelos	18
2.5 Equipamentos de Aplicação de Carga e Reação	21
2.6 Instrumentação	23
2.7 Procedimentos de Ensaio	24
2.8 Resultados	25

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA MISTO	28
3.1 Considerações Iniciais	28
3.2 Comportamento Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade	28
3.3 Comportamento Carga x Flecha no Meio do vão.....	31
3.4 Comportamento Carga x Deformação no Aço	34
3.5 Modo de Colapso.....	36
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LONGITUDINAL PELO MÉTODO “M - K”	40
4.1. Considerações Iniciais	40
4.2. Método “m - k”	41
4.3. Determinação dos Valores de “m e k”	42
4.4. Resistência de Cálculo ao Cisalhamento Longitudinal (V_{USD})	48
4.5. Cálculo da Resistência da Laje Mista para Carga Uniformemente Distribuída.....	49
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LONGITUDINAL PELO MÉTODO DA INTERAÇÃO PARCIAL	52
5.1 Considerações Iniciais	52
5.2 Método da Interação Parcial	54
5.2.1 Modelo analítico da interação parcial.....	54
5.2.2 Determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal.....	60
5.2.3 Verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal	66
5.3 Exemplo de Aplicação	68
CONCLUSÕES	83
BIBLIOGRAFIA	88
ANEXO A	92
A.1 Gráficos de Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade	93
A.2 Gráficos de Carga x Flecha no Meio do Vão.....	99

A.3 Gráficos Carga x Deformação no Aço	105
ANEXO B	111
B.1 - Diagramas de Resistência dos Modelos Ensaiaados.....	112

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A_p – área efetiva da fôrma à tração reduzida pela influência das mossas e identações

A_s – área da seção transversal do painel da fôrma de aço

A_v – área do vazio do módulo típico da seção mista, dado pelo retângulo de lados w_f e d_d

B - largura da laje mista experimental

b - largura efetiva da laje mista, tomada sendo igual a 1m, ou largura do módulo típico da seção mista

b_d – largura do painel da fôrma de aço

d_d – altura do painel da fôrma de aço

d_p – distância do centro de gravidade da fôrma à face superior do concreto ou altura efetiva da laje mista

e – distância do centro de gravidade da área efetiva da fôrma metálica (à tração) à face externa da mesa inferior

e_p – distância da linha neutra plástica da fôrma metálica (à flexão) à face externa da mesa inferior

E_a – módulo de elasticidade longitudinal do aço

E_c – módulo de elasticidade do concreto

f_c – resistência à compressão do concreto

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto

f_d – tensão de cálculo para o aço

f_u – resistência à ruptura na tração do aço da fôrma

f_y – resistência ao escoamento do aço da fôrma

h_c – altura do concreto acima da mesa superior da fôrma de aço

h_t – altura total da laje mista, da extremidade inferior da fôrma de aço até a extremidade superior da laje de concreto

I – momento de inércia de uma seção transversal bruta da fôrma

I_{sf} – momento de inércia da fôrma de aço, calculado com $f_d = 0,6f_y$

k – intersecção da linha de regressão do cisalhamento longitudinal com o eixo das ordenas

L – comprimento do vão da laje, ou comprimento do modelo

L' – comprimento do vão de cisalhamento

LN – linha neutra da seção mista

LNP – linha neutra plástica da seção transversal

L_0 – comprimento do balanço nas extremidades do modelo

L_{sf} – distância da extremidade a uma seção da laje mista onde ocorre a interação total

L_x – distância do apoio a uma seção de laje mista

m – inclinação da reta de regressão linear do cisalhamento longitudinal

M_{at} – momento atuante em uma seção da laje mista

M_{ensaio} – momento fletor último no ponto de aplicação de carga da laje mista

$M_{f,Rd}$ - momento fletor resistente de cálculo à flexão da laje mista

$M_{p,R}$ - momento resistente da laje mista

M_{pa} - momento plástico da fôrma metálica

M_{pr} - momento plástico reduzido da fôrma metálica

M_R - momento fletor resistente da laje mista com interação total ao cisalhamento longitudinal

M_{Rd} - momento fletor resistente de cálculo

M_{Sd} - momento fletor atuante de cálculo

N_a - força normal de tração da fôrma metálica decomposta

N_{ac} - força normal de compressão na fôrma metálica

N_{at} - força normal de tração na fôrma metálica

N_c - força de compressão no concreto considerando interação parcial

N_{cf} - força de compressão no concreto considerando interação total

N_{pa} - força de escoamento à tração da fôrma metálica

P_{des} – carga correspondente ao deslizamento inicial de extremidade

P_k - carga última característica

$P_{méd}$ - carga última média

$P_{mín}$ - carga última mínima

P_u – carga concentrada; carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico

P_{ue} – carga P_u acrescida do peso próprio das vigas de aplicação de carga

P_{uek} - carga máxima característica acrescida do peso do aparato de aplicação de carga

p_p – peso próprio do painel da fôrma de aço

P_{plaje} – peso próprio teórico da laje mista por unidade de área

q_{var} – carga variável

t – espessura nominal da fôrma de aço

t_e – espessura da fôrma de aço sem recobrimento

V_{des} – carga de deslizamento de extremidade inicial medida nos ensaios

V_{us} – resistência nominal ao esforço cortante calculada

V_{usd} – resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal

V_{ut} – cisalhamento transversal último total incluindo o peso próprio do modelo (experimental)

V_{serv} – resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal para as cargas de serviço

W_d – carga uniformemente distribuída de cálculo sobre a laje mista

w_P - peso próprio da laje mista

$W_{serviço}$ – carga uniformemente distribuída de serviço sobre a laje mista

$X=1/L'$

x - altura do bloco de tensão do concreto

$$Y = V_{ut}/bd$$

y_{cg} – distância do centro de gravidade da fôrma de aço à sua extremidade inferior

z – braço de alavanca

Letras Gregas

ε_e – deformação do aço correspondente ao início do escoamento

σ_e – tensão correspondente ao início de escoamento do aço

γ_f – coeficiente de majoração das cargas

$\delta_{m\acute{a}x}$ – flecha máxima no meio do vão

ϕ_v – coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal

η - grau de interação parcial ao cisalhamento longitudinal da laje mista

τ - tensão de cisalhamento longitudinal

τ_{Rd} - resistência do concreto ao cisalhamento vertical

τ_u - tensão última de cisalhamento longitudinal

$\tau_{u,min}$ - menor tensão última média de cisalhamento longitudinal

$\tau_{u,Rd}$ - tensão última de cálculo ao cisalhamento longitudinal

$\tau_{u,Rk}$ - tensão última nominal ao cisalhamento longitudinal

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Características nominais dos modelos ensaiados.....	15
TABELA 2.2 - Dimensões e propriedades geométricas do DECK 60	16
TABELA 2.3 - Propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas na fabricação das fôrmas dos Decks 60 (valores médios medidos)	17
TABELA 2.4 - Propriedades mecânicas do concreto empregado em cada modelo ensaiado.....	18
TABELA 2.5 – Dados geométricos dos modelos e reação de apoio total última	26
TABELA 2.6 – Relação entre o momento fletor último do ensaio e o momento resistente	27
TABELA 3.1 - Carga de deslizamento de extremidade inicial e carga máxima do atuador hidráulico.....	31
TABELA 4.1 - Dados dos modelos e resultados dos ensaios	43
TABELA 4.2- Valores característicos dos ensaios	44
TABELA 4.3– Determinação dos parâmetros m e k	45
TABELA 4.4 – Relação entre os valores calculados e os valores experimentais (V_{us}/V_{ut})	46
TABELA 4.5 - Resultados da análise comparativa em serviço	49
TABELA 5.1 – Resultados do Método da Interação Parcial.....	64
TABELA 5.2 –Resultados dos ensaios pelos métodos $m - k$ e MIP	65
TABELA 5.3 – Método da Interação Parcial - carga uniformemente distribuída	73
TABELA 5.4— Método da Interação Parcial – duas cargas concentradas.....	77
TABELA 5.5 - Método da Interação Parcial - carga concentrada no meio do vão	80
TABELA 5.6-Análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos $m-k$ e MIP.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Seções transversais de estruturas mistas	2
FIGURA 1.2 -Exemplo de laje mista aço-concreto.....	3
FIGURA 1.3 - Formas típicas de ligação em lajes mistas	6
FIGURA 1.4 – Montagem para ensaio de laje mista – Shear Bond	7
FIGURA 1.5- Seção transversal típica do perfil do DECK 60.....	9
FIGURA 2.1 - Seção transversal típica do perfil do DECK 60.....	16
FIGURA 2.2 – Detalhe da armadura de combate à fissuração de retração e variação térmica.....	20
FIGURA 2.3 – Detalhe da cura do concreto utilizado nos modelos	20
FIGURA 2.4 – Esquema de aplicação de carga usado nos ensaios.....	22
FIGURA 2.5 – Detalhe da montagem para medição do deslizamento relativo de extremidade (end-slip)	23
FIGURA 2.6 - Localização dos extensômetros elétricos de resistência inferior e superior	24
FIGURA 2.7 – Condição de carregamento do ensaio	27
FIGURA - 3.1 Gráficos de carga x deslizamento relativo de extremidade	30
FIGURA 3.2 - Gráficos de carga x flecha no meio do vão	32
FIGURA 3.3 - Gráficos de carga x deformação no aço	35
FIGURA 3.4 - Detalhe do deslocamento horizontal relativo entre a fôrma de aço e o concreto (end-slip)	37
FIGURA 3.5 – Ocorrência de fissuras simetricamente dispostas e igualmente espaçadas.....	38
FIGURA 3.6 – Detalhe da fissura sob uma das linhas de carga no colapso....	38
FIGURA 3.7 – Seção transversal da extremidade do modelo após colapso....	39
FIGURA 4.1 - Resistência nominal característica ao cisalhamento longitudinal (modelos com $t = 0,80\text{mm}$)	47
FIGURA 4.2 - Resistência nominal característica ao cisalhamento longitudinal (modelos com $t = 0,95\text{ mm}$)	47

FIGURA 4.3 - (a) Condição assumida de carga distribuída em projeto;	50
(b) Condição de ensaio	50
FIGURA 5.1 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação total: LNP no concreto (b) e LNP na fôrma (c) – adaptada de SOUZA NETO (2001).....	55
FIGURA 5.2 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista com interação total e linha neutra plástica na fôrma metálica – adaptada de SOUZA NETO (2001).....	57
FIGURA 5.3 - Diagrama de resistência considerando a interação entre a força axial e o momento na fôrma de aço	58
FIGURA 5.4 - Variação da posição do centro de gravidade da fôrma em função da relação N_{cf}/N_{pa}	59
FIGURA 5.5 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação parcial	59
FIGURA 5.6 - Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação – adaptado de SOUZA NETO (2001).....	62
FIGURA 5.7-Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação do modelo 01A	62
FIGURA 5.8-Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação do modelo 03A	63
FIGURA 5.9 - Diagrama de interação parcial de cálculo – adaptada de SOUZA NETO (2001).....	66
FIGURA 5.10 - Verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal para laje mista não ancorada.....	67
FIGURA 5.11 – Exemplo para a laje mista utilizando-se o DECK 60-USIMINAS	69
FIGURA 5.12 –Exemplo de aplicação com carga uniformemente distribuída..	70
FIG.5.13-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) - carga uniformemente distribuída.....	74
FIGURA 5.14 – Exemplo de aplicação com duas cargas concentradas	75
FIGURA 5.15-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) - duas cargas concentradas aplicadas eqüidistantes dos apoios.....	78

FIGURA 5.16 – Exemplo de aplicação com carga concentrada no meio do vão	78
FIGURA 5.17-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) – carga concentrada aplicada no meio do vão.....	81
FIGURA A.1 - Modelo 01A (t = 0,80mm e L' = 800mm)	93
FIGURA A.2 - Modelo 01B (t = 0,80mm e L' = 800mm)	93
FIGURA A.3 - Modelo 01C (t = 0,80mm e L' = 800mm)	94
FIGURA A.4 - Modelo 02A (t = 0,80mm e L' = 450mm)	94
FIGURA A.5 - Modelo 02B (t = 0,80mm e L' = 450mm)	95
FIGURA A.6 - Modelo 02C (t = 0,80mm e L' = 450mm)	95
FIGURA A.7 - Modelo 03A (t = 0,95mm e L' = 800mm)	96
FIGURA A.8 - Modelo 03B (t = 0,95mm e L' = 800mm)	96
FIGURA A.9 - Modelo 03C (t = 0,95mm e L' = 800mm)	97
FIGURA A.10 - Modelo 04A (t = 0,95mm e L' = 450mm)	97
FIGURA A.11 - Modelo 04B (t = 0,95mm e L' = 450mm)	98
FIGURA A.12 - Modelo 04C (t = 0,95mm e L' = 450mm)	98
FIGURA A.13 - Modelo 01A (t = 0,80mm e L' = 800mm)	99
FIGURA A.14 - Modelo 01B (t = 0,80mm e L' = 800mm)	99
FIGURA A.15 -Modelo 01C (t = 0,80mm e L' = 800mm)	100
FIGURA A.16 - Modelo 02A (t = 0,80mm e L' = 450mm)	100
FIGURA A.17 - Modelo 02B (t = 0,80mm e L' = 450mm)	101
FIGURA A.18 - Modelo 02C (t = 0,80mm e L' = 450mm)	101
FIGURA A.19 - Modelo 03A (t = 0,95mm e L' = 800mm)	102
FIGURA A.20 - Modelo 03B (t = 0,95mm e L' = 800mm)	102
FIGURA A.21 - Modelo 03C (t = 0,95mm e L' = 800mm)	103
FIGURA A.22 – Modelo 04A (t = 0,95mm e L' = 450mm).....	103
FIGURA A.23 - Modelo 04B (t = 0,95mm e L' = 450mm)	104
FIGURA A.24 - Modelo 04C (t = 0,95mm e L' = 450mm)	104
FIGURA A.25 - Modelo 01A (t = 0,80mm e L' = 800mm)	105
FIGURA A.26 - Modelo 01B (t = 0,80mm e L' = 800mm)	105
FIGURA A.27 - Modelo 01C (t = 0,80mm e L' = 800mm)	106
FIGURA A.28 - Modelo 02A (t = 0,80mm e L' = 450mm)	106

FIGURA A.29 - Modelo 02B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)	107
FIGURA A.30 - Modelo 02C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)	107
FIGURA A.31 - Modelo 03A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)	108
FIGURA A.32 - Modelo 03B ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)	108
FIGURA A.33 - Modelo 03C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)	109
FIGURA A.34 - Modelo 04A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)	109
FIGURA A.35 - Modelo 04C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)	110
FIGURA B.1 - Diagrama de resistência - modelo 01A	112
FIGURA B.2 - Diagrama de resistência-modelo 01B	112
FIGURA B.3 - Diagrama de resistência-modelo 01C	113
FIGURA B.4 - Diagrama de resistência-modelo 02A	113
FIGURA B.5 - Diagrama de resistência-modelo 02B	114
FIGURA B.6 - Diagrama de resistência-modelo 02C	114
FIGURA B.7 - Diagrama de resistência-modelo 03A	115
FIGURA B.8 - Diagrama de resistência-modelo 03B	115
FIGURA B.9 - Diagrama de resistência-modelo 03C	116
FIGURA B.10 - Diagrama de resistência-modelo 04A	116
FIGURA B.11 - Diagrama de resistência-modelo 04B	117
FIGURA B.12 - Diagrama de resistência-modelo 04C	117

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento e a resistência de um sistema de lajes mistas aço-concreto, após a cura do concreto, utilizando-se o método da Interação Parcial. Esse método surge como uma alternativa ao método semi-empírico “ $m - k$ ”, e é fundamentado em um modelo analítico similar ao de vigas mistas com conectores dúcteis. Ao se determinar o grau de interação ao cisalhamento longitudinal entre a fôrma de aço e o concreto, ele permite estudar melhor o comportamento dúctil das fôrmas de aço, os projetos de mossas mais bem elaboradas e a sua utilização em grandes vãos. Para isto foram utilizados os resultados de um programa de ensaios de laboratório realizado por RODRIGUES & LAVALL (2005), onde se empregou o Steel DECK 60 da USIMINAS. Os ensaios visavam identificar e avaliar os vários parâmetros que influenciam as características globais da resistência do sistema misto. Esse programa experimental consistiu de ensaios em uma série de 12 modelos com vãos simples, bi-apoiados, submetidos à flexão e seguiu as mais importantes recomendações da literatura internacional sobre o assunto. A análise dos resultados do sistema, durante toda a fase de carregamento até o seu colapso, foi feita baseando-se nas relações carga x deslizamento relativo de extremidade (end-slip), carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço, que possibilitou conhecer o comportamento do sistema misto e definir precisamente o seu modo de colapso, a saber, o colapso por cisalhamento longitudinal. Assim, procurou-se estabelecer critérios e determinar expressões analíticas para o cálculo do carregamento último deste modo de colapso, através do método semi-empírico “ $m - k$ ” e do método da Interação Parcial, ambos recomendados pelo EUROCODE (1993). Finalmente, foram apresentadas as expressões de cálculo utilizadas no dimensionamento, cuja aplicação em um exemplo numérico permitiu fazer uma análise comparativa entre os dois métodos de cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal.

Palavras-chaves: laje mista aço-concreto, fôrma de aço, método $m - k$, método da interação parcial.

ABSTRACT

The main goal of this work is to evaluate the behavior and strength of a structural system of steel-concrete composite slabs after the concrete curing, based on Partial Shear Connection Method. This method is an alternative to the $m - k$ method and it is based on analytical model similar to composite beams using shear connectors. This method allows to determine the shear-bond interaction degree at the steel - concrete interface, allowing a better understanding of steel deck ductile behavior, the design of more performed embossments and the usage of larger spam. In order to do this, were used the results of a program of laboratory tests, developed by RODRIGUES & LAVALL (2005), where was adopted the Steel DECK 60 manufactured by USIMINAS. These laboratory tests were developed in order to identify and to evaluate the several parameters that affect the global characteristics of composite system strength. This test program was based on a series of 12 models one-way single spam, submitted to bending and followed the most important international recommendations about this subject. The analysis of results for the composite slab system during all loading stages until its failure was carried out basing on load x end-slip relation, load x midspan deflection relation and load steel strain relation, which allowed to understand the behavior and failure mode of the composite system, namely shear-bond failure. Keeping this in mind, the objective is to establish criteria and to determine analytical expressions for the design of the load carrying capacity of this failure mode through the $m - k$ method and Partial Shear Connection Method, which are recommended by EUROCODE (1993). Finally, the expressions used for the composite slabs design have been presented. The application in practical examples allowed to define a comparative analysis between these two design methods for evaluating the resistance to the longitudinal shear.

Keywords: steel-concrete composite slab, steel deck, $m - k$ method, partial shear connection method.

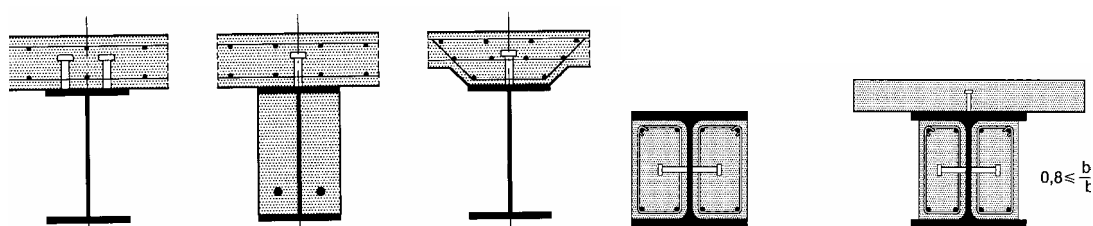
1

INTRODUÇÃO

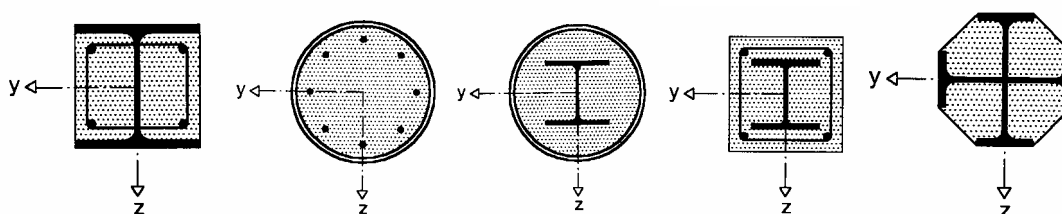
1.1 Considerações Iniciais

Denomina-se sistema misto de aço e concreto como aquele em que um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formando elementos estruturais como viga mista, pilar misto, laje mista ou ligação mista. Nesses elementos estruturais a resistência do concreto é integrada à resistência do perfil de aço, através do uso de conectores ou através da aderência natural entre esses materiais. Esses materiais possuem quase o mesmo coeficiente de dilatação térmica e uma combinação adequada de resistência, com o concreto eficiente à compressão e o aço à tração. A utilização desses sistemas mistos na construção civil amplia consideravelmente a gama de soluções em aço e concreto. No Brasil, a utilização desses sistemas tem aumentado consideravelmente, tanto em edifícios como em pontes.

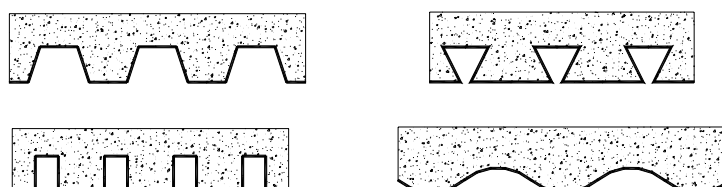
A FIG. 1.1 a seguir ilustra algumas estruturas mistas usuais.



Seções típicas de viga mista



Seções típicas de pilar misto



Seções típicas de laje mista

FIGURA 1.1 - Seções transversais de estruturas mistas

A ABNT NBR 8800 (1986) foi a primeira norma brasileira a tratar de sistemas mistos, abordando as vigas mistas, sem, no entanto, fazer referência a pilares mistos, lajes mistas e ligações mistas viga/pilar.

Posteriormente, a ABNT NBR 14323 (1999) incluiu o dimensionamento das lajes mistas com fôrma de aço incorporada e, recentemente, o projeto de revisão da ABNT NBR 8800 (2007) considera de forma abrangente as lajes mistas, as vigas mistas, os pilares mistos e as ligações mistas viga/pilar.

Adotando-se os elementos mistos nos sistemas estruturais, podem-se obter benefícios arquitetônicos e econômicos. Além disso, outras vantagens podem ser citadas:

- possibilidade de dispensa de fôrmas e escoramentos;
- redução de peso próprio e do volume da estrutura;
- aumento da precisão dimensional da construção;
- redução considerável do consumo de aço estrutural;
- redução das proteções contra incêndio e corrosão.

Entende-se por lajes mistas, o principal foco deste trabalho, aquelas lajes em que uma fôrma de aço de espessura nominal bastante delgada, usualmente entre 0,80mm e 1,25mm, é incorporada ao sistema de sustentação de cargas, funcionando como fôrma permanente, suportando o concreto antes da cura e as cargas de construção. Após a cura do concreto, a fôrma de aço e o concreto combinam-se para formar um único elemento estrutural misto, sendo que a fôrma de aço substitui a armadura positiva da laje. A FIG. 1.2 ilustra um sistema de laje mista.

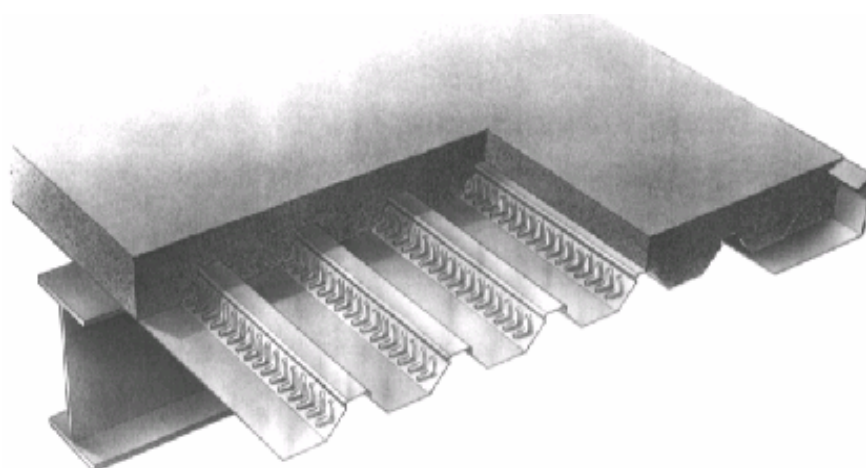


FIGURA 1.2 -Exemplo de laje mista aço-concreto

Observa-se que, em caso de vãos contínuos, uma armadura adicional deve ser colocada na laje para resistir aos momentos negativos. Em qualquer situação,

estruturas de telas soldadas também podem ser previstas para resistir às tensões de retração e temperatura ou para fornecer continuidade sobre eventuais apoios intermediários.

O sistema de lajes mistas constitui-se em tecnologia padrão nos países desenvolvidos e industrializados, principalmente na América do Norte, e nos últimos 30 anos tem-se intensificado as pesquisas referentes ao seu dimensionamento e comportamento estrutural. Elas se apresentam ao mercado como uma solução construtiva de grande aceitação pelos profissionais de engenharia, devido a facilidades de execução e montagem.

Diversos métodos vêm sendo adotados no processo de construção de fôrma para suportar o concreto durante a fase de execução no sistema de laje mista. Atualmente, o sistema de lajes mistas do tipo Steel Deck tem prevalecido como um método dos mais adequados em termos de construção de lajes, sendo utilizado também em construções convencionais de concreto armado. Para edifícios em estruturas de aço compõe um sistema eficiente, com grande agilidade construtiva e, conseqüentemente, bastante econômico.

As lajes com fôrma de aço incorporada, juntamente com as vigas mistas, constituem o sistema de piso mais usado nos países desenvolvidos e vêm aumentando, gradativamente, sua aplicação no Brasil. Dentre as vantagens do sistema com lajes mistas, destacam-se as seguintes:

- facilidade de instalação e maior rapidez construtiva;
- facilidade de adaptação para colocação de tubulações elétricas, hidráulicas, de comunicação e de ar condicionado;
- redução ou até eliminação da armadura positiva na laje acabada;
- dispensa de escoramento reduzindo o tempo de construção;
- maior segurança no trabalho, por funcionar como plataforma de serviço e de proteção aos operários que trabalham em andares inferiores;

- praticidade de execução, uma vez que a fôrma fica incorporada ao sistema, dispensando o processo de desforma;
- minimização do local de trabalho.

Dentre as desvantagens tem-se:

- maior quantidade de vigas secundárias, caso não se utilize o sistema escorado ou fôrmas de grande altura, devido à limitação dos vãos antes da cura do concreto;
- necessidade de utilização de forros suspensos, com funções estéticas.

Do ponto de vista do comportamento estrutural, a fôrma de aço deve ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface entre o aço e o concreto. Se não existir uma vinculação mecânica ou uma vinculação por atrito entre a fôrma de aço e o concreto, a fôrma não será capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal e, assim, a ação mista não será considerada efetiva.

RONDAL e MOUTAFIDOU (1996) observam que esta transferência de cisalhamento da fôrma para o concreto pode acontecer pelos seguintes meios:

- 1- ligação química: ligação resultante da aderência da pasta de cimento com a face da fôrma de aço;
- 2- ligação mecânica: é a resistência física produzida pelo concreto e molas estampadas na fôrma de aço, ou pelas ancoragens de extremidade;
- 3- ligação por atrito: resistência às forças de cisalhamento que atuam na interface da fôrma com o concreto, provocada pela reação vertical nos apoios ou por nervuras reentrantes na fôrma.

A FIG. 1.3 mostra formas típicas de meios de ligação em lajes mistas capazes de assegurar o comportamento misto entre os dois materiais:

- (a) ligações mecânicas fornecidas por saliências e reentrâncias (mossas) na alma e/ou na mesa do perfil da chapa;
- (b) ligações por atrito em perfis de chapas modelados numa forma reentrante;
- (c) ancoragens de extremidade fornecidas por conectores tipo *stud* ou por outro tipo de ligação local entre o concreto e a chapa metálica, somente em combinação com (a) ou (b);
- (d) ancoragem de extremidade obtida pela deformação das nervuras na extremidade da chapa, somente em combinação com (b).

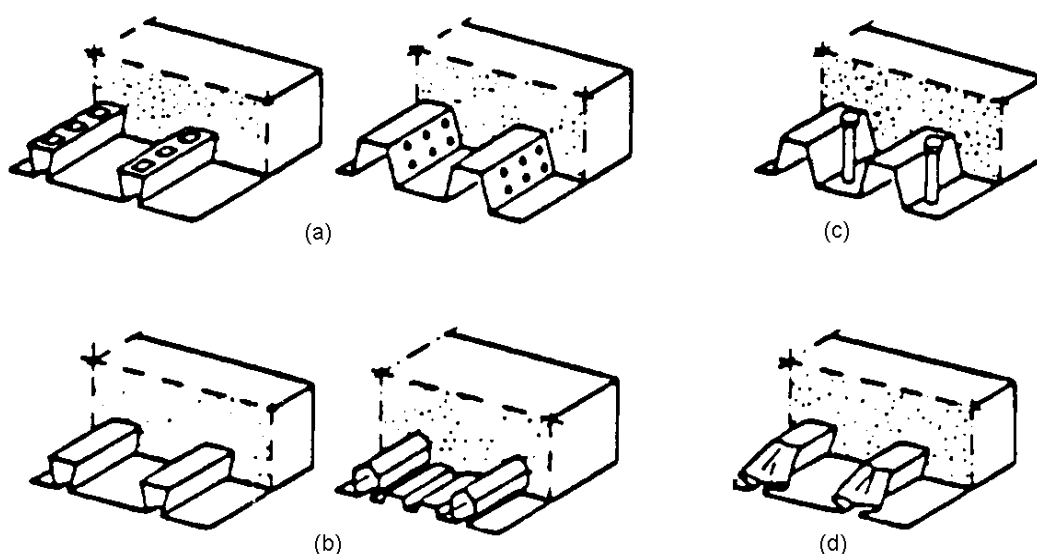


FIGURA 1.3 - Formas típicas de ligação em lajes mistas

O EUROCODE (1993) define três modos principais de colapso de uma laje mista: os colapsos por flexão, cisalhamento longitudinal e cisalhamento vertical.

Se a resistência para transferir o cisalhamento longitudinal permite a plastificação total da seção transversal de momento máximo com interação completa, acontece o colapso por flexão. De outro modo, a ligação ao cisalhamento falha, não há interação completa e o colapso da laje é definido como sendo por cisalhamento longitudinal.

De fato, existe uma enorme variedade na geometria das fôrmas e das mossas, trabalhando com diferentes eficiências na ligação mecânica. Devido a isso, existe um grande número de estudos realizados em diferentes países, pesquisando a geometria da fôrma, a posição e os desenhos das mossas, os quais têm grande influência no desempenho da ligação mecânica.

O dimensionamento das lajes mistas é baseado em ensaios experimentais, um deles denominado *Shear-Bond*. Devido ao fato de que cada fabricante adota um mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal próprio, torna-se necessária a realização de ensaios, uma vez que esta resistência depende principalmente do tipo deste mecanismo. Além do mais, os modelos numéricos para a verificação dessa resistência não estão, ainda, desenvolvidos o suficiente para simular o comportamento real do sistema misto. A FIG 1.4 ilustra a montagem para a realização do ensaio de verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal (*Shear-Bond*).

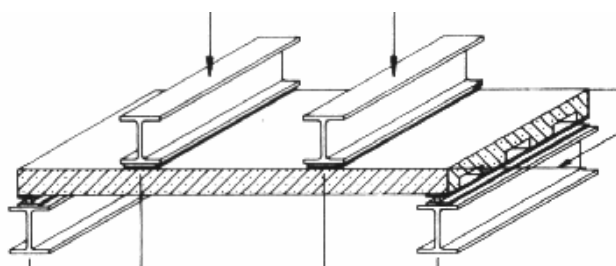


FIGURA 1.4 – Montagem para ensaio de laje mista – *Shear Bond*

Na verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal de lajes mistas utilizam-se dois métodos de cálculo que se baseiam nos ensaios

experimentais: o método semi-empírico m-k, largamente utilizado internacionalmente, e o método da Interação Parcial (MIP).

O método m-k, que tem sido empregado com bons resultados, principalmente em lajes mistas que apresentam comportamento frágil e vãos pequenos, não é adequado para se levar em conta a ancoragem de extremidade ou o uso de armadura de reforço do sistema misto.

O método da Interação Parcial é uma alternativa ao método m-k e, segundo JOHNSON (1994), ele explora melhor o comportamento dúctil das fôrmas com boa ligação mecânica e grandes vãos, além de permitir que se considere teoricamente a contribuição da ancoragem de extremidade na resistência ao cisalhamento longitudinal.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o método da Interação Parcial (MIP) para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema de lajes mistas, após a cura do concreto. O MIP é fundamentado em um modelo analítico, similar ao de vigas mistas com conectores dúcteis, que permite determinar o grau de interação ao cisalhamento longitudinal entre a fôrma de aço e o concreto em lajes mistas com comportamento dúctil.

Para se alcançar este objetivo, o estudo que será apresentado neste trabalho utiliza os resultados obtidos da pesquisa tecnológica desenvolvida por RODRIGUES & LAVALL (2005), intitulada *Estudo do comportamento estrutural do sistema de laje mista Deck 60 – USIMINAS*, quando se realizou uma análise teórico-experimental da resistência e do comportamento do sistema misto *DECK 60*.

Esse sistema de laje mista por sua vez possui uma fôrma de aço com características próprias, apresentando um perfil geométrico específico com a altura de 60 mm, ao invés dos 75 mm usualmente empregado, conforme mostra a FIG. 1.5, e um novo desenho das mossas em forma de V. Essa nova fôrma foi desenvolvida também com o objetivo de viabilizar sua aplicação em sistemas construtivos metálicos de baixo custo.

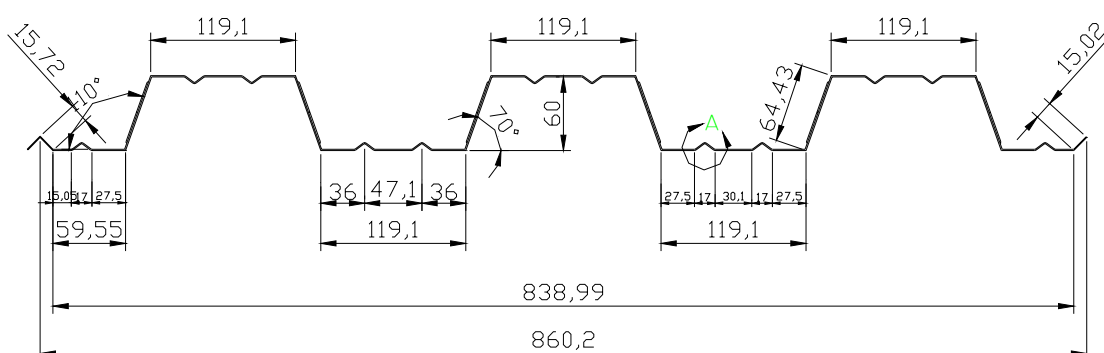


FIGURA 1.5- Seção transversal típica do perfil do DECK 60

A análise da resistência desse sistema de laje mista será feita inicialmente por meio do método “m - k”, método este recomendado pela NBR 14323 (1999) e, em seguida, pelo método da Interação Parcial, que permite melhor explorar o comportamento dúctil dos perfis e fôrmas de aço disponíveis no mercado, os projetos de mossas mais bem elaboradas e a utilização de vãos maiores.

Finalmente, serão feitas avaliações e comparações entre esses dois métodos de análise, através da resolução de exemplos para o modelo estrutural de laje mista em estudo.

1.3 Descrição Sucinta dos Capítulos

O texto é organizado em seis capítulos, sendo que neste primeiro o tema do trabalho é apresentado e os objetivos principais são definidos.

No segundo capítulo é apresentado o programa de ensaios de laboratório realizados na pesquisa tecnológica desenvolvida por RODRIGUES & LAVALL (2005), a fim de se identificar e considerar os vários parâmetros que têm maior influência na resistência estrutural do sistema misto. Esse programa experimental consistiu de ensaios de flexão do sistema de laje mista em 12 modelos com vãos simples bi-apoiados, os quais forneceram os dados necessários para a avaliação do comportamento e da resistência última do sistema de laje mista.

Neste capítulo, ainda são descritos e caracterizados todos os modelos adotados, assim como os materiais utilizados na sua fabricação, e também, são apresentados os procedimentos usados na preparação desses modelos. A montagem do equipamento de aplicação de carga e reação e os instrumentos utilizados para medir os deslocamentos dos protótipos e as deformações do aço durante os ensaios são também descritos e ilustrados, enfatizando-se que todos os procedimentos realizados durante o programa de ensaios seguiram recomendações aceitas internacionalmente.

No terceiro capítulo são analisados os resultados obtidos nos ensaios para o estudo do comportamento e da resistência do sistema misto por meio de tabelas e gráficos, com a finalidade de se determinar o modo de colapso deste sistema. São apresentadas e analisadas as curvas carga x deslizamento de extremidade, carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço, as quais foram obtidas das leituras feitas durante os ensaios, em todos os incrementos de carga de todas as fases do carregamento após a cura do concreto até o colapso. Com base nessas análises foi possível conhecer o comportamento do sistema de laje mista e definir, com precisão, o seu modo de colapso, definido como sendo cisalhamento longitudinal.

No quarto capítulo, baseando-se na análise dos resultados e na definição do modo de colapso, procurou-se estabelecer critérios para a verificação da resistência última ao cisalhamento longitudinal através do método “m - k”.

Expressões analíticas para o cálculo do carregamento último deste modo de colapso foram determinadas e apresentadas para que possam ser utilizadas pelos projetistas nos escritórios de cálculo.

Ainda no quarto capítulo, é apresentada expressão semi-empírica do método “m - k” adotada pela ABNT NBR 14323 (1999), a qual relaciona a resistência nominal à força cortante com os parâmetros obtidos dos ensaios realizados. Utilizou-se uma análise de regressão linear, usando-se o método dos mínimos quadrados para se obter as constantes m e k . Essa análise é feita para dois grupos de espessura de fôrma de aço, separadamente.

No quinto capítulo é apresentado o método da Interação parcial, conforme o EUROCODE (1993), para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista, através de expressões analíticas para o cálculo dessa resistência. Por essas expressões é possível determinar o grau de interação ao cisalhamento longitudinal entre o concreto e a fôrma de aço e também calcular a resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal, denominada de τ_{uRd} , para cada espessura de fôrma ensaiada. É apresentado, ainda, um exemplo de aplicação prática de dimensionamento de um sistema de laje mista para pisos de edifícios, desenvolvido pelo método da interação parcial e pelo método “m - k”.

Finalmente, as conclusões são apresentadas no sexto capítulo.

2

PROGRAMA DE ENSAIOS E RESULTADOS

2.1 Considerações Gerais

De acordo com VELJKOVIC' (1996), as lajes mistas comportam-se como elementos estruturais anisotrópicos, mas o seu dimensionamento é feito somente na direção longitudinal das nervuras. Esta simplificação torna os resultados da capacidade de carregamento conservadores.

O estudo do comportamento estrutural de um sistema de lajes mistas é feito de forma empírica, através da realização de ensaios em laboratório. Uma vez descobertos os estados limites envolvidos no problema, os pesquisadores desenvolvem modelos analíticos aproximados para representá-los, os quais permitem prever, com certa precisão, as suas ocorrências.

Os estados limites últimos a serem verificados em um sistema de lajes mistas são:

- colapso por flexão;
- colapso por cisalhamento longitudinal;
- colapso por cisalhamento transversal;
- colapso por punção.

Enquanto que os estados limites de serviço são:

- deslizamento relativo de extremidade;
- flecha;
- fissuras no concreto.

Os modelos analíticos desenvolvidos para se estudar os estados limites últimos por flexão, cisalhamento transversal e punção já estão bem estabelecidos na literatura técnica sobre o assunto, enquanto os modelos para se analisar o colapso por cisalhamento longitudinal ainda precisam ser mais bem definidos.

Dessa forma, a resistência de projeto do sistema de laje mista ao cisalhamento longitudinal deve ser determinada de forma empírica através do método “m e k” ou pelo método da Interação Parcial.

Com a finalidade de se estudar essa nova fôrma proposta e a fim de se identificar e considerar os vários parâmetros que têm maior influência na resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista, foi realizado um programa de ensaios no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES), cujos resultados experimentais são apresentados em RODRIGUES & LAVALL (2005).

Este procedimento tem sido recomendado praticamente por toda a literatura internacional sobre o assunto, tanto através de normas técnicas, quanto através de publicações ou artigos técnicos atualizados. Como exemplo, pode-se citar BRITISH STANDARD (1982), SCHUSTER (1984), CSSBI (1988-a), ASCE (1992), EUROCODE (1993), ABNT NBR 14323 (1999), entre outros, que confirmam esse procedimento. Para este trabalho, foram utilizadas as recomendações do EUROCODE (1993).

O programa de ensaios visou representar, o mais próximo possível, as condições práticas de instalação das lajes encontradas nas construções de edifícios. Os modelos consistiram de elementos de laje mista com a largura da seção transversal típica da fôrma de aço do DECK 60 (ver FIG 2.1).

Para a determinação dos parâmetros “m e k” e análise do sistema pelo método da interação parcial foi ensaiada, à flexão, uma série de doze modelos com vãos simples bi-apoiados, considerando-se duas espessuras das fôrmas de aço fabricadas pela USIMINAS, uma de 0,8 mm e outra de 0,95 mm. Os doze modelos foram subdivididos em dois grupos, sendo seis com espessura de 0,80 mm e seis de 0,95 mm, conforme mostra a TAB. 2.1. As fôrmas adotadas neste caso tinham as mossas padrão da USIMINAS.

A altura total das lajes (h_t) e os vãos de cisalhamento (L'), foram variados a fim de cobrir adequadamente o conjunto de parâmetros que têm maior influência no comportamento estrutural e na resistência do sistema misto (ver TAB. 2.1).

2.2 Caracterização dos Modelos

Um total de doze modelos foi testado, sendo seis com espessura 0,80 mm e seis com 0,95mm. A TAB. 2.1 fornece as características nominais de cada modelo assim como a numeração adotada no programa de ensaios.

Os modelos com espessura $t = 0,80\text{mm}$ foram subdivididos em dois grupos com três ensaios cada. Os modelos do grupo 01 possuíam altura total $h_t = 110$ mm e vão de cisalhamento $L' = 800\text{mm}$, enquanto os modelos do grupo 02 possuíam $h_t = 140$ e $L' = 450$ mm. Os modelos com espessura $t = 0,95$ mm foram subdivididos nos grupos 03 e 04 com três ensaios cada. Os modelos do grupo 03 possuíam características similares aos modelos do grupo 01 e os modelos do grupo 04 eram similares aos modelos do grupo 02.

TABELA 2.1 - Características nominais dos modelos ensaiados

Modelo	Espessura do deck t (mm)	Vão do modelo L (mm) *	Altura total do modelo h _t (mm) *	Vão de cisalhamento L' (mm) *	Largura do modelo B (mm)
01A	0,80	2.500	110	800	860
01B	0,80	2.500	110	800	860
01C	0,80	2.500	110	800	860
02A	0,80	2.500	140	450	860
02B	0,80	2.500	140	450	860
02C	0,80	2.500	140	450	860
03A	0,95	2.500	110	800	860
03B	0,95	2.500	110	800	860
03C	0,95	2.500	110	800	860
04A	0,95	2.500	140	450	860
04B	0,95	2.500	140	450	860
04C	0,95	2.500	140	450	860

* Ver Fig. 2.1

2.3 Caracterização dos Materiais Empregados

2.3.1 Fôrma de aço (Deck Metálico)

Todos os modelos estudados foram preparados no Campus Pampulha da UFMG, e transportados para o Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Escola de Engenharia da UFMG, após a concretagem da laje.

Todas as fôrmas de aço tinham uma camada de galvanização de zinco em sua superfície. Para a concretagem dos modelos não foi realizada a remoção de qualquer tratamento superficial químico ou orgânico presente no deck, que tenha sido empregado durante o processo de conformação a frio ou na preparação de camada de revestimento nas operações de acondicionamento e transporte.

Os decks dos modelos foram fabricados com aços ZAR 280 ($t = 0,80\text{mm}$) e ZAR 345 ($t = 0,95\text{mm}$), tendo comprimento de 2600 mm e largura nominal de 860 mm para ambas as espessuras. A FIG. 2.1 mostra uma seção transversal típica do DECK 60 com suas dimensões nominais. As mossas, responsáveis pela resistência ao cisalhamento longitudinal foram estampadas nas almas do perfil em forma de “V”, tendo uma profundidade nominal de 2,9 mm para as duas espessuras.

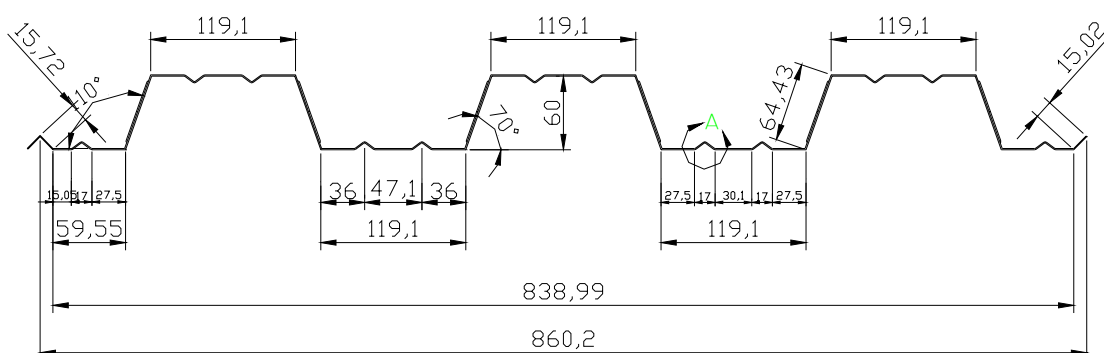


FIGURA 2.1 - Seção transversal típica do perfil do DECK 60

A TAB. 2.2 fornece as dimensões e as propriedades geométricas do DECK 60 empregado na fabricação dos modelos, onde t_e é a espessura sem recobrimento da camada de zinco, b_d é a largura do painel, d_d é a altura, A_s é a área da seção transversal do painel, pp é o peso próprio da fôrma de aço, y_{cg} é a distância do centro de gravidade da fôrma à sua extremidade inferior e I_{sf} é o momento de inércia da fôrma de aço, calculado com $f_d = 0,6f_y$.

TABELA 2.2 - Dimensões e propriedades geométricas do DECK 60

Espessura nominal da fôrma de aço t (mm)	t_e (mm)	b_d (mm)	d_d (mm)	A_s (mm ²)	pp (kg/m ²)	y_{cg} (mm)	I_{sf} (mm ⁴)
0,80	0,76	860,00	60,00	911,78	9,05	30	583992,46
0,95	0,91	860,00	60,00	1091,74	10,83	30	699254,82

As propriedades mecânicas do aço empregado na fabricação das fôrmas foram obtidas a partir de painéis representativos de ambas as espessuras. Os ensaios foram efetuados no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Usiminas, e foram realizados de acordo com a norma ASTM A370 (1997).

De acordo com o relatório de ensaios, os corpos de prova (CP) dividiram-se em 2 categorias de resistência mecânica, com valores médios das resistências ao escoamento de 340 MPa e 390 MPa e valores médios das resistências à ruptura na tração de 450 Mpa e 490 MPa. A TAB. 2.3, a seguir, mostra os resultados destes ensaios.

TABELA 2.3 - Propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas na fabricação das fôrmas dos Decks 60 (valores médios medidos)

Propriedades mecânicas do aço	t = 0,80 mm	t = 0,95 mm
Resistência ao escoamento - f_y (MPa)	340	390
Resistência à ruptura na tração - f_u (Mpa)	450	490
Porcentagem de alongamento (%)	28,88	25,78

Os valores apresentados correspondem às médias de três corpos de prova para cada fôrma de aço dos doze modelos, totalizando 36 CP ensaiados. A relação entre as resistências médias à ruptura na tração e as resistências médias ao escoamento resultou em 1,32 e 1,27, respectivamente, para as espessuras de 0,80 mm e 0,95 mm, podendo-se presumir que o aço possui um patamar de escoamento bem definido. As porcentagens de alongamento, 28,88% e 25,78%, indicam a grande ductilidade do aço empregado. Para o módulo de elasticidade nominal foi adotado o valor de 205.000 MPa.

2.3.2 Concreto

O concreto utilizado na construção dos modelos foi encomendado de uma usina central, tendo sido especificada uma resistência característica à

compressão, f_{ck} , maior ou igual a 20MPa. A resistência à compressão (f_c) foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (1960), na data de ensaio de cada modelo. A TAB. 2.4 apresenta os valores dessa resistência de acordo com a idade do concreto ensaiado, onde E_c é o módulo de elasticidade secante do concreto obtido de acordo com as prescrições da ABNT NBR 6118 (2003).

TABELA 2.4 - Propriedades mecânicas do concreto empregado em cada modelo ensaiado

Modelo	Idade do concreto (dias)	f_c (MPa)	E_c (*) (MPa)
01A	56	24,7	23.656,8
01B	38	17,0	19.626,0
01C	65	19,0	21.748,4
02A	81	21,2	21.916,7
02B	113	25,1	23.847,6
02C	77	19,9	21.234,1
03A	31	18,3	20.362,6
03B	58	21,0	21.813,1
03C	52	18,7	20.583,9
04A	71	20,3	21.446,4
04B	87	21,0	21.813,1
04C	120	25,0	23.800,0

(*) Valor calculado pela relação $E_c = 0,85 \times 5600 \times (f_c)^{0,5}$ prescrita pela ABNT NBR 6118 (2003).

Observa-se que na TAB. 2.4 que, na maioria dos casos, os ensaios do concreto, e conseqüentemente dos modelos, foram realizados em idades bem acima dos 28 dias, idade comumente aplicada para se avaliar a resistência característica do concreto.

2.4 Preparação dos Modelos

Durante a preparação dos modelos para o ensaio, placas de aço (#19x100 – ver FIG. 2.4) foram soldadas em pontos das extremidades de cada modelo, de

tal forma a simular a prática construtiva real de se fixar o deck metálico à mesa da viga de aço na qual ela se apoia.

Todos os modelos foram concretados com o vão do deck metálico apoiado em alguns pontos igualmente espaçados, de tal forma que a altura total da laje mista permanecesse praticamente uniforme sobre todo o seu vão. Certamente, isto não é o que acontece nas instalações de campo, onde o sistema geralmente só é apoiado em suas extremidades durante o lançamento do concreto. Entretanto, o fato de se obter uma espessura praticamente uniforme no laboratório leva a valores ligeiramente conservadores em relação à prática, principalmente quando se considera o cisalhamento longitudinal.

Antes do lançamento do concreto foi realizado um teste de “slump” para se verificar a consistência do mesmo. O concreto foi adensado com um vibrador tipo agulha e corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) foram moldados, de acordo com a ABNT NBR 5738 (1984), para ensaios de caracterização do material. Em cada concretagem, 9 (nove) corpos de prova foram moldados para a verificação da resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias, além de 6 (seis) corpos de prova, para cada modelo, para verificação da resistência e determinação do módulo de elasticidade secante.

Com a função de evitar o surgimento de fissuras oriundas da retração e da variação térmica do concreto foi colocada uma armadura de aço, consistindo de tela soldada, confeccionada a partir de barras trefiladas em aço com limite de escoamento de 600 MPa, localizada no topo da laje com um cobrimento de, aproximadamente, 20 mm (exige-se nos ensaios, que esta malha fique na zona comprimida da laje). A área de aço mínima desta malha, nas duas direções, era de pelo menos 0,1% da área de concreto acima da fôrma de aço (ver FIG. 2.2).



FIGURA 2.2 – Detalhe da armadura de combate à fissuração de retração e variação térmica



FIGURA 2.3 – Detalhe da cura do concreto utilizado nos modelos

Todos os modelos foram mantidos úmidos e cobertos com sacos de linhagem até que o concreto completasse 7 dias, quando ocorreu a desforma (ver FIG. 2.3). Os modelos foram então curados ao ar até serem ensaiados nas idades constantes na TAB. 2.4. Os corpos de prova foram desformados 7 dias após a sua execução e então curados ao ar.

2.5 Equipamentos de Aplicação de Carga e Reação

Para a aplicação da carga nos modelos foi utilizado um atuador hidráulico fixado a um pórtico de reação, usando-se uma bomba para o acionamento do pistão do mesmo. O atuador hidráulico possui linhas de fluxo e retorno de modo que o movimento do pistão pode ser feito em ambas às direções.

Os valores correspondentes às cargas foram medidos por meio de um anel dinamométrico com capacidade para 500 kN, acoplado ao atuador hidráulico. O anel dinamométrico foi calibrado anteriormente pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), sendo que cada divisão do relógio comparador correspondia a 0,8895 kN.

Um sistema de vigas metálicas, de acordo com a FIG. 2.4, foi empregado para transmitir cargas aos modelos. O peso total desse sistema foi de 3,7 kN e os modelos estavam apoiados em blocos de concreto. O trecho central de cada modelo ficou submetido à flexão pura, enquanto que nos trechos entre os pontos de aplicação da carga e o apoio, a força cortante era constante.

Adicionalmente, uma tira de borracha foi colocada entre o concreto e as vigas metálicas, com o objetivo de se distribuir a linha de carga de maneira uniforme. Com o propósito de eliminar qualquer restrição longitudinal indesejável foi utilizado um sistema de apoios de rolo e pino, atuando em conjunto com o sistema esférico de aplicação de carga. Esse sistema de aplicação de carga é similar àqueles indicados pelo EUROCODE (1993), CSSBI (1988-a) e Schuster (1984).

2.6 Instrumentação

Para medir os deslocamentos dos modelos durante os ensaios foram usados relógios comparadores digitais (RC) e transdutores de deslocamento (TD). A flecha no meio do vão foi registrada por meio de dois TD'S com precisão de 0,01 mm, simetricamente dispostos a, aproximadamente, 20 cm da borda da laje, e tomados como a média dos dois valores lidos.

O deslizamento relativo de extremidade na interface aço-concreto (*end-slip*) foi registrado através de dois RC'S com precisão de 0,001 mm, posicionados nas extremidades de cada modelo. Estes RC's, num total de quatro, dois de cada lado, foram fixados em uma cantoneira presa ao concreto da laje e ajustados horizontalmente à placa de apoio de aço (conforme FIG. 2.4 e 2.5). Os deslizamentos relativos de extremidade correspondem à média das medidas lidas nos relógios comparadores junto aos apoios móvel e fixo.



FIGURA 2.5 – Detalhe da montagem para medição do deslizamento relativo de extremidade (*end-slip*)

Foram colados extensômetros elétricos de resistência (EER) na fôrma de aço em todos os modelos para averiguar o estado de deformação do aço. Todos os

EER's foram instalados no centro do vão, sendo um na extremidade inferior e outro na extremidade superior do deck metálico, conforme mostrado na FIG. 2.6.

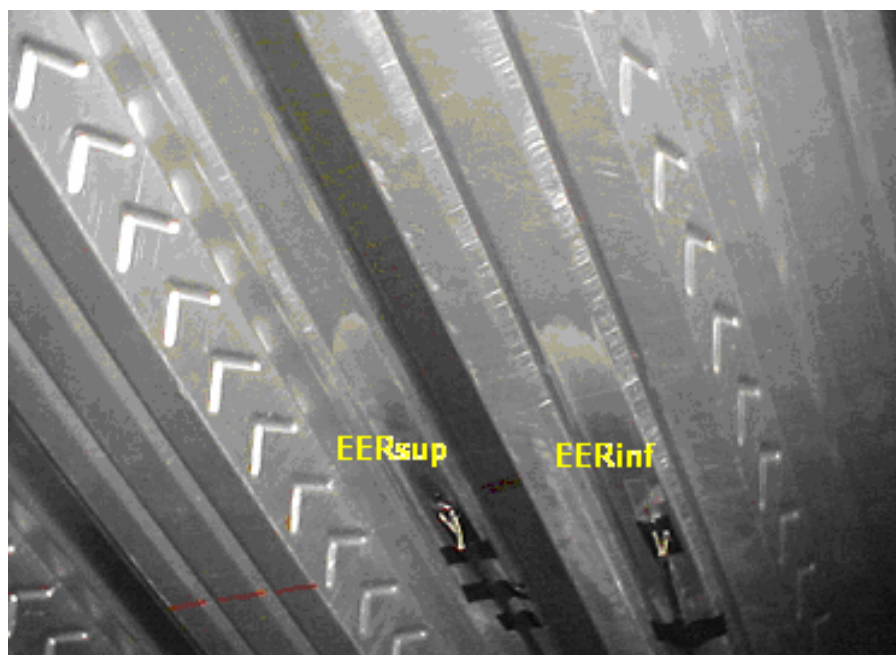


FIGURA 2.6 - Localização dos extensômetros elétricos de resistência inferior e superior

2.7 Procedimentos de Ensaio

Após o alinhamento do modelo no pórtico de carga e reação os medidores de deslocamento eram instalados e todas as dimensões pertinentes, tais como largura e altura total dos modelos, eram medidas nas seções transversais de ambas as extremidades e no centro do vão.

Após a retirada da pré-carga para a acomodação do sistema eram feitas as primeiras leituras dos deslocamentos e deformações e se iniciavam os ensaios. O carregamento era aplicado de forma gradual e crescente, tendo sido feitas leituras em todos os incrementos de carga. Para valores de carga acima da carga de fissuração, as leituras somente eram feitas após a estabilização do sistema.

O ensaio só terminava quando se atingia o colapso do modelo, ou seja, até a impossibilidade de acréscimo de carga pelo atuador hidráulico, com presença de grandes deslocamentos medidos.

A carga última do modelo é definida pelo valor máximo da carga atingida pelo atuador hidráulico no intervalo desde o início do ensaio até o colapso. Isso desde que, conforme o EUROCODE (1993), a flecha máxima no meio do vão não exceda $L/50$.

A evolução dos deslocamentos de extremidade, da flecha e da deformação do aço foi registrada para todos os incrementos de carga, assim como o processo de fissuração do concreto foi também monitorado ao longo do ensaio.

2.8 Resultados

Na TAB. 2.5 apresentam-se os resultados dos ensaios para todos os modelos analisados. As dimensões reais medidas, a carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico (P_u), a carga máxima acrescida do peso total do aparato de aplicação de carga (P_{ue}) e o peso próprio das lajes (pp_{laje}) são apresentados, bem como a reação de apoio total última (V_{ut}).

O esforço V_{ut} corresponde à reação de apoio total última, calculado considerando-se a carga máxima do atuador hidráulico acrescida do peso do sistema de vigas de 3,7kN (P_{ue}) e o peso próprio da laje (pp_{laje}), conforme indica a Eq. 2.1.

$$V_{ut} = \frac{P_{ue} + L.B.pp_{laje}}{2} \quad (2.1)$$

TABELA 2.5 – Dados geométricos dos modelos e reação de apoio total última

Modelo	t (mm)	B (m)	h _t (m)	d _p (m)	L (m)	L' (m)	P _u (kN)	P _{ue} (kN)	pp _{laje} (kN/m ²)	V _{ut} (kN)
01A	0,80	0,856	0,110	0,080	2,502	0,800	32,170	35,870	2,030	20,109
01B	0,80	0,859	0,110	0,080	2,487	0,794	33,710	37,410	2,030	20,873
01C	0,80	0,857	0,110	0,080	2,500	0,800	32,720	36,420	2,030	20,385
02A	0,80	0,861	0,143	0,113	2,500	0,451	57,170	60,870	2,760	33,405
02B	0,80	0,856	0,145	0,115	2,509	0,452	56,290	59,990	2,760	32,959
02C	0,80	0,858	0,145	0,115	2,499	0,450	63,450	67,150	2,760	36,534
03A	0,95	0,860	0,110	0,080	2,500	0,800	40,430	44,130	2,050	24,269
03B	0,95	0,861	0,115	0,085	2,500	0,800	40,650	44,350	2,050	24,381
03C	0,95	0,858	0,113	0,083	2,500	0,800	38,450	42,150	2,050	23,274
04A	0,95	0,860	0,146	0,116	2,505	0,452	62,856	66,556	2,780	36,272
04B	0,95	0,859	0,143	0,113	2,499	0,451	65,529	69,229	2,780	37,598
04C	0,95	0,858	0,143	0,113	2,500	0,450	67,581	71,281	2,780	38,622

Na TAB. 2.5 os dados geométricos e os valores de carga apresentados correspondem a:

t = espessura do deck;

B = largura do modelo;

h_t = altura total do modelo;

d_p = altura efetiva do modelo;

L = vão do modelo;

L' = vão de cisalhamento do modelo;

P_u = carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico durante o ensaio;

P_{ue} = carga P_u acrescida do peso do aparato de aplicação de carga;

pp_{laje} = peso próprio teórico da laje por unidade de área;

V_{ut} = cisalhamento transversal último total, conforme a Eq. 2.1.

A FIG. 2.7 a seguir ilustra a condição de carregamento dos ensaios.

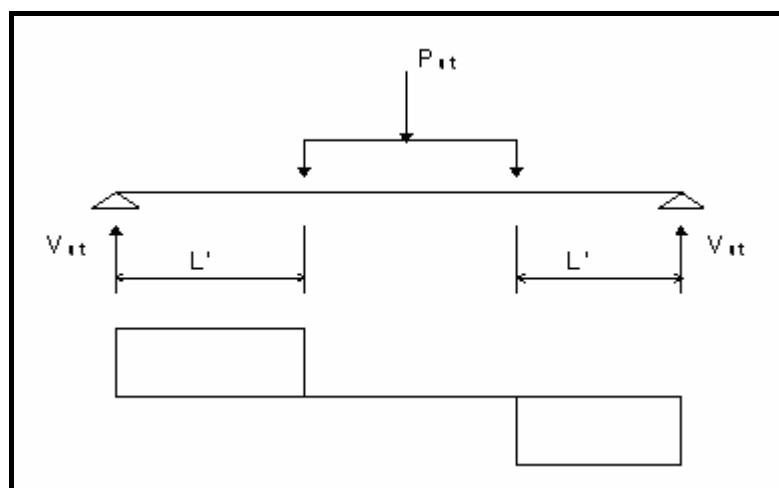


FIGURA 2.7 – Condição de carregamento do ensaio

A TAB. 2.6, a seguir, mostra a relação entre o momento fletor último do ensaio, M_{ensaio} , calculado no ponto de aplicação de carga, conforme a Eq. 2.2, e o momento resistente da laje com interação completa, M_R , calculado considerando a plastificação total da seção mista.

$$M_{\text{ensaio}} = V_{\text{ut}} \cdot L' - \frac{pp_{\text{laje}} \cdot L'^2}{2} \quad (2.2)$$

TABELA 2.6 – Relação entre o momento fletor último do ensaio e o momento resistente

Modelo	V_{ut} (kN)	M_{ensaio} (kN.mm)	M_R (kN.mm)	M_{ensaio}/M_R
01A	20,109	15437,47	22126,68	0,698
01B	20,873	15933,57	20929,20	0,761
01C	20,385	15658,11	21328,62	0,734
02A	33,405	14785,16	31933,52	0,463
02B	32,959	14615,45	33019,47	0,443
02C	36,534	16160,81	32339,68	0,500
03A	24,269	18759,00	27286,35	0,687
03B	24,381	18849,05	30293,30	0,622
03C	23,274	17962,90	28693,17	0,626
04A	36,272	16111,18	43281,96	0,372
04B	37,598	16674,12	42201,36	0,395
04C	38,622	17098,45	43141,44	0,396

3

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA MISTO

3.1 Considerações Iniciais

A análise dos resultados e do comportamento do sistema de laje mista DECK 60 durante toda a fase de carregamento, com o objetivo de se determinar o modo de colapso desse sistema, é apresentada a seguir. Para realização dessa análise, serão estudadas as relações carga x deslizamento relativo de extremidade (end-slip), carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço, através de gráficos comparativos para todos os modelos ensaiados.

3.2 Comportamento Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade

O Anexo A deste trabalho contém as curvas carga x deslizamento relativo de extremidade (end-slip) relativas aos apoios fixo e móvel de todos os modelos

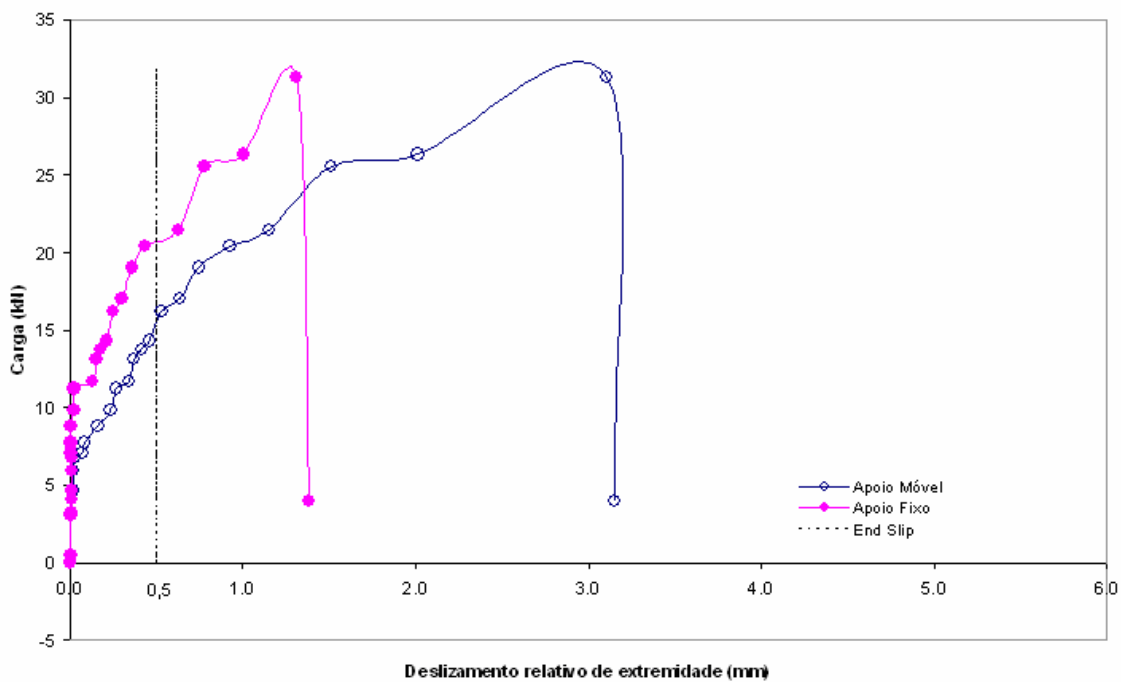
ensaiados. O deslizamento relativo de extremidade é dado pela média das medidas lidas nos RC's. As FIG. A.1 a A.6 referem-se aos modelos com $t = 0,80$ mm e as Fig. A.7 a A.12 referem-se aos modelos com $t = 0,95$ mm.

As FIG. 3.1a e 3.1b, a seguir, mostram as curvas carga x deslizamento relativo de extremidade para os apoios fixos e móveis dos modelos 01A e 03A, tomados como representativos dos demais modelos para ilustrar os comentários que serão feitos em seguida.

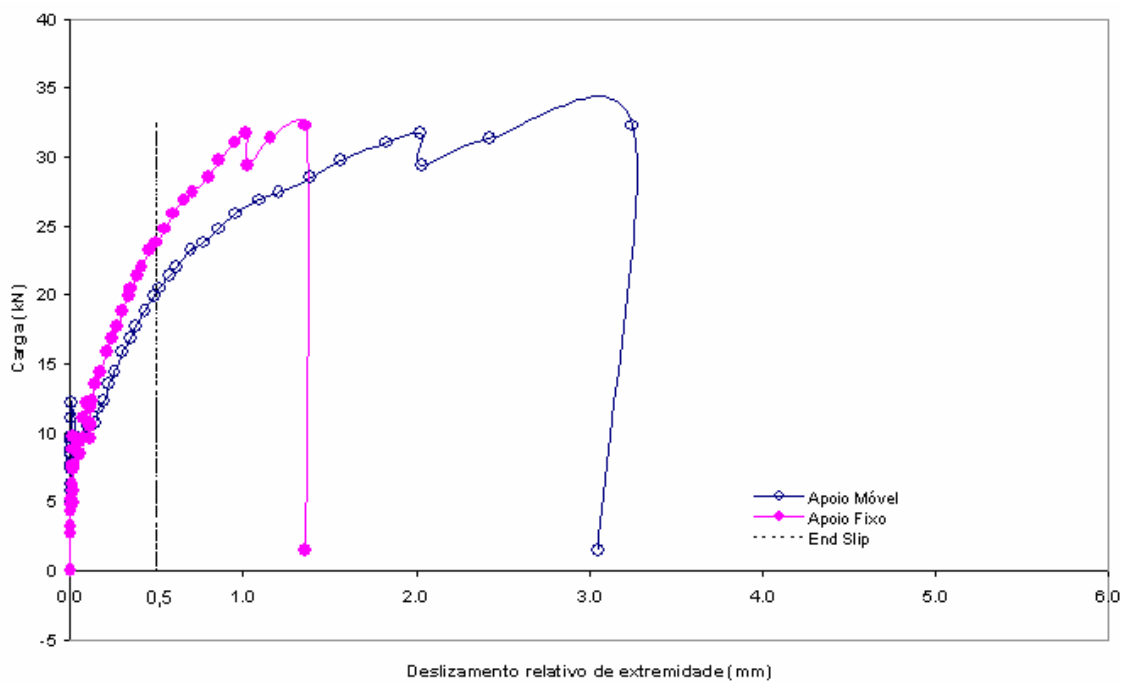
Os fatores mais relevantes que impedem o deslizamento relativo de extremidade são: a ligação química resultante da aderência natural entre o aço e o concreto, a ligação mecânica fornecida pelas mossas da fôrma de aço e o atrito entre o aço e o concreto nos apoios da laje, proporcional à reação vertical.

Observa-se na FIG. 3.1 que, inicialmente, o deslizamento horizontal relativo de extremidade é praticamente nulo, ocorrendo a interação completa ao cisalhamento entre a fôrma de aço e o concreto. Após a formação das primeiras fissuras, ocorre a quebra da ligação química entre a fôrma e o concreto, provocando deslizamentos relativos de extremidade e uma tendência de queda de carga, como mostram os gráficos.

A partir deste instante, a interação passa a ser parcial, sendo a ligação mecânica fornecida pelas mossas e o atrito nos apoios os responsáveis pela resistência ao deslizamento horizontal relativo, levando a um aumento nas cargas, além deste estágio, até a carga máxima de colapso.



(a) Modelo 01A



(b) Modelo 03A

FIGURA - 3.1 Gráficos de carga x deslizamento relativo de extremidade

Segundo o EUROCODE (1993), a carga de deslizamento de extremidade inicial, P_{des} , é aquela que provoca um deslizamento horizontal relativo de 0,5mm entre a fôrma de aço e o concreto, na extremidade do modelo. Os valores dessas cargas para os modelos ensaiados são apresentados na TAB. 3.1 e comparados com a carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico (P_u).

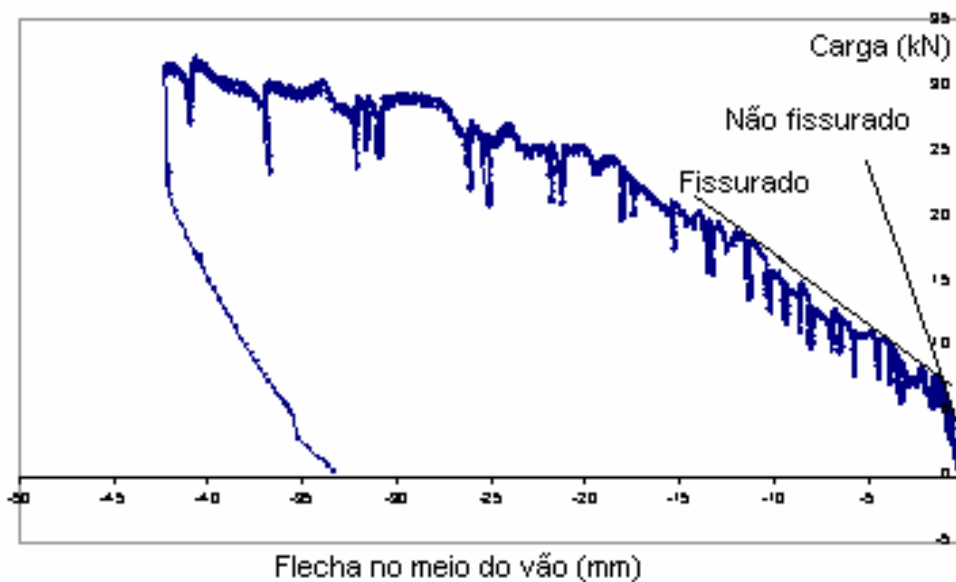
TABELA 3.1 - Carga de deslizamento de extremidade inicial e carga máxima do atuador hidráulico

Modelo	Carga de deslizamento de extremidade inicial (P_{des}) (kN)	Carga máxima do atuador hidráulico (P_u) (kN)	$\frac{P_u}{P_{des}}$
01A	16,200	32,170	1,986
01B	16,220	33,710	2,078
01C	16,750	32,720	1,953
02A	43,950	57,170	1,301
02B	34,480	56,290	1,633
02C	28,420	63,450	2,233
03A	20,490	40,430	1,973
03B	21,810	40,650	1,864
03C	22,580	38,450	1,703
04A	32,060	62,856	1,961
04B	30,790	65,529	2,128
04C	28,810	67,581	2,346

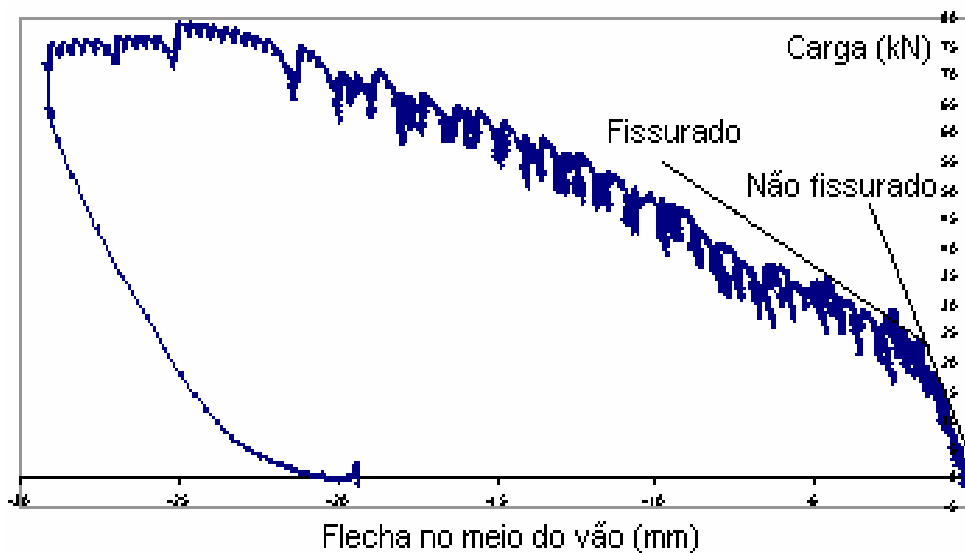
3.3 Comportamento Carga x Flecha no Meio do vão

A descrição geral do comportamento do sistema misto durante o carregamento é apresentada por meio de curvas carga x flecha no meio do vão. O Anexo A contém todas essas curvas, sendo que as FIG. A.13 a A.18 referem-se aos modelos com $t = 0,80$ mm, e as Fig. A.19 a A.24 referem-se aos modelos com $t=0,95$ mm. As FIG. 3.2.a e 3.2.b mostram os gráficos carga x flecha no meio

do vão para os modelos 01A e 04C, tomados como representativos para os demais modelos para ilustrar os comentários que serão feitos a seguir.



(a) Modelo 01A



(b) Modelo 04C

FIGURA 3.2 - Gráficos de carga x flecha no meio do vão

Observa-se nas FIG. 3.2 que, quando a carga é aumentada a partir do valor zero, dois estágios no comportamento carga x flecha no meio do vão são identificados na seção da laje mista: o não fissurado e o fissurado.

Estágio não fissurado

Durante este estágio nenhuma fissura visível foi observada em qualquer região do modelo, e a seção permaneceu com interação total até a fissura inicial. É possível que fissuras extremamente finas (micro fissuras) tenham sido formadas dentro da região de momento constante antes do aparecimento da fissura inicial. Contudo, elas não foram visíveis nas bordas laterais dos modelos.

Estágio fissurado

Este estágio foi identificado pela significativa mudança na rigidez inicial de cada modelo que ocorreu com o aparecimento da fissura inicial (a curva carga x flecha no meio do vão deixou de ser linearmente proporcional). Sem a presença dos mecanismos de transferência de cisalhamento (mossas e atrito nos apoios) os modelos não seriam capazes de suportar carga considerável além deste estágio de carregamento. Contudo, como pode ser observado nessas curvas, um aumento nas cargas além do estágio da fissura inicial foi possível até que ocorresse o colapso dos modelos.

De acordo com o EUROCODE (1993) pode-se classificar o comportamento do sistema de laje mista como dúctil ou frágil. O comportamento é classificado como dúctil se a carga máxima de colapso excede a carga que causa o deslizamento de extremidade inicial em mais que 10%. Ainda segundo o EUROCODE (1993), se a flecha no meio do vão correspondente à carga máxima exceder $L/50$, então a carga máxima de colapso deverá ser tomada como aquela que provoca a flecha $L/50$.

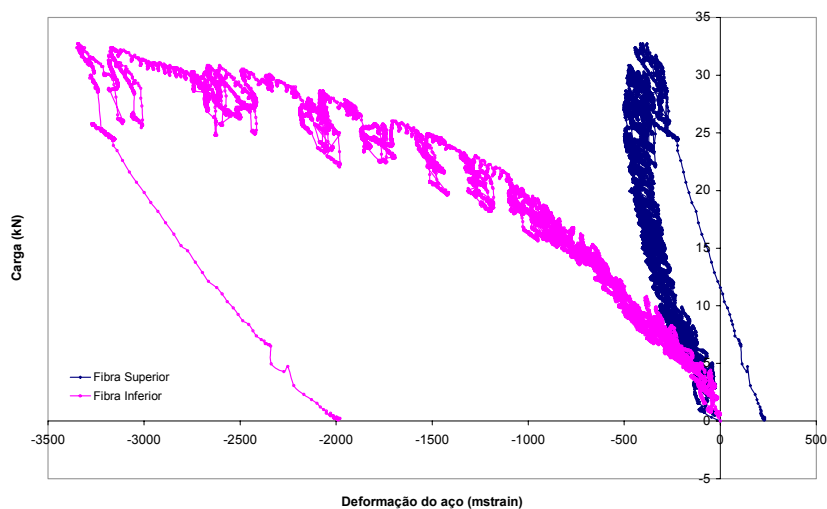
Na presente pesquisa, observou-se que todos os modelos ensaiados apresentaram comportamento dúctil, o que pode ser verificado através dos resultados mostrados na TAB. 3.1 e observando-se os gráficos carga x flecha no meio do vão, FIG. A.13 a A.24, do Anexo A.

3.4 Comportamento Carga x Deformação no Aço

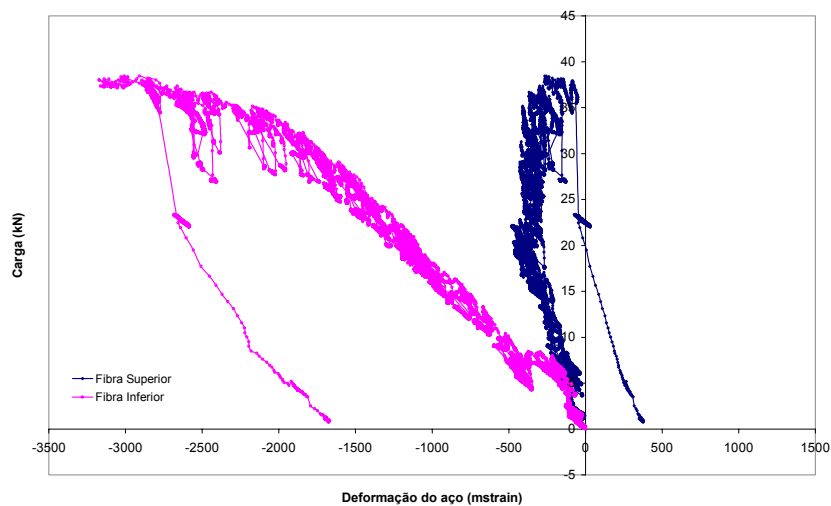
Os gráficos carga x deformação no aço para todos os modelos ensaiados são mostrados no Anexo A, FIG. A.25 a A.36. A deformação no aço, ϵ , é dada em micromilímetro por milímetro e foi obtida a partir da leitura das deformações nos EER's colados sob a fôrma de aço, na seção média da laje mista, localizados nas extremidades inferior e superior do steel deck, conforme mostrado na FIG. 2.6 do Capítulo 2.

As FIG. 3.3a e 3.3b apresentam as curvas carga x deformação no aço para os modelos 01C e 03C, onde os valores positivos indicam tração no aço e os valores negativos indicam compressão. Observa-se que ao longo de todo o ensaio a fôrma de aço ficou totalmente tracionada, tanto na parte inferior quanto na superior. Durante o estágio inicial, do concreto não fissurado, verifica-se um aumento simultâneo e linearmente proporcional das deformações de tração na fôrma, tanto na parte inferior quanto na superior, sugerindo a existência de uma única linha neutra na mesa de concreto.

Após a fissura inicial, verifica-se uma tendência de queda na carga aplicada. Com o auxílio dos mecanismos de transferência de cisalhamento observa-se, na seqüência do ensaio, novo aumento nas cargas além do estágio de fissura inicial e pode-se notar que a parte superior da fôrma tende a ficar menos tracionada. Isto significa a presença de duas linhas neutras na seção mista, caracterizando um comportamento de interação parcial entre o concreto e a fôrma de aço.



(a) Modelo 01C



(b) Modelo 03C

FIGURA 3.3 - Gráficos de carga x deformação no aço

Usando-se a expressão:

$$\sigma_e = E_s \cdot \varepsilon_e \quad (3.1)$$

onde:

σ_e é a tensão correspondente à resistência ao escoamento do aço da fôrma (f_y);

E_s é o módulo de elasticidade nominal do aço ($E_s = 205000$ MPa);

ε_e é a deformação do aço correspondente ao início do escoamento.

e utilizando-se os valores de σ_e (f_y) dados na TAB. 2.3, pode-se calcular, com bastante aproximação, a deformação ε_e correspondente ao início do escoamento. Desta maneira, para a espessura do deck $t = 0,80$ mm, a deformação correspondente ao início do escoamento é igual a 1659×10^{-6} $\mu\text{mm/mm}$ e, para $t = 0,95$ mm, o valor é 1902×10^{-6} $\mu\text{mm/mm}$.

Analisando-se os valores das deformações apresentadas nos gráficos das FIG. A.25 e A.36, pode-se observar que a mesa inferior da fôrma de aço alcançou sua resistência ao escoamento em seis casos, a saber: modelos 01A, 01B, 01C, 03A, 03B e 03C, todos com vão de cisalhamento igual 800 mm. Portanto, duas condições diferentes de tensão no aço foram encontradas, isto é, quando não há escoamento em nenhuma parte da fôrma e quando há escoamento somente na mesa inferior da fôrma de aço, que corresponde aos ensaios com vão de cisalhamento igual a 800mm.

O escoamento total da fôrma de aço não foi observado em nenhum dos modelos ensaiados. Desta maneira, baseado nestas evidências experimentais, o colapso deste sistema misto pode ou não ser precedido pelo escoamento da fôrma de aço, fenômeno que foi observado também por SCHUSTER(1984) e MELO (1999).

Ao longo dos ensaios de todos os modelos, não foi detectada qualquer deformação que caracterizasse o fenômeno de flambagem local na mesa superior da fôrma de aço.

3.5 Modo de Colapso

A descrição do modo de colapso desse sistema de laje mista, a ser apresentada a seguir, é fundamentada nos comentários e nas discussões feitos

durante a análise dos comportamentos carga x deslizamento relativo de extremidade, carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço, apresentados nas seções anteriores. As análises destes comportamentos permitiram uma melhor compreensão do modo de colapso alcançado pelo sistema misto nos testes de laboratório realizados.

Foi observado somente um único modo de colapso para todos os modelos ensaiados, que é o colapso por cisalhamento longitudinal (shear bond). Este estado limite último é caracterizado pela falha por cisalhamento da ligação entre as mossas da fôrma de aço e o concreto, fazendo com que o concreto da região do vão de cisalhamento, L' , perca sua ação composta com a fôrma de aço. Esta falha é indicada por um deslizamento horizontal relativo elevado entre a fôrma de aço e o concreto na extremidade do modelo (deslizamento relativo de extremidade), conforme mostra a FIG.3.4.



FIGURA 3.4 - Detalhe do deslocamento horizontal relativo entre a fôrma de aço e o concreto (end-slip)

Durante os ensaios observou-se que este modo de colapso caracterizou-se por uma intensa fissuração do concreto na região entre os pontos de aplicação de carga. As fissuras ocorriam em determinados passos de carga, eram igualmente espaçadas, simetricamente dispostas e suas aberturas

aumentavam gradativamente com o acréscimo do carregamento (ver FIG. 3.5). Observou-se também, no instante do colapso, a ocorrência de uma fissura maior, sob ou próximo às linhas de carga, conforme mostra a FIG. 3.6.

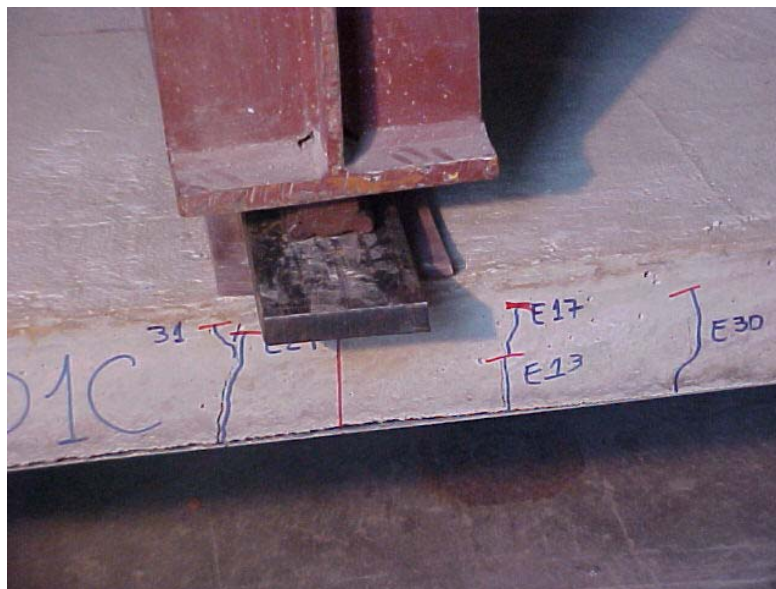


FIGURA 3.5 – Ocorrência de fissuras simetricamente dispostas e igualmente espaçadas

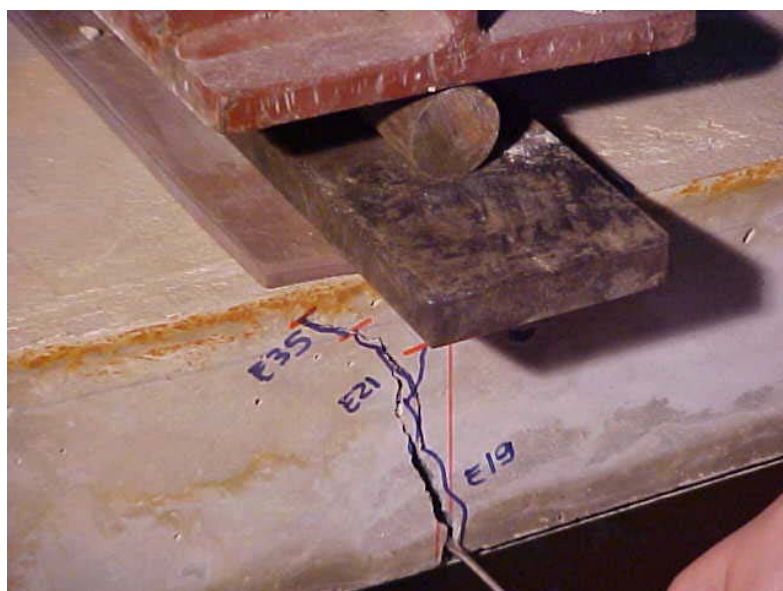


FIGURA 3.6 – Detalhe da fissura sob uma das linhas de carga no colapso.

Apesar do concreto na região do vão de cisalhamento, L' , perder sua ação composta com a fôrma de aço, em nenhum instante o concreto desta região

separou-se completamente da fôrma, ou seja, o mecanismo de transferência de cisalhamento (mossas), mesmo depois da carga máxima ter sido alcançada, evitou que o sistema fosse completamente desfeito (ver FIG. 3.7).



FIGURA 3.7 – Seção transversal da extremidade do modelo após colapso

A caracterização do colapso por cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista DECK 60 é similar a de outros sistemas do tipo steel deck com mossas, como relatado em SCHUSTER (1984) e MELO (1999).

4

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LONGITUDINAL PELO MÉTODO “M - K”

4.1. Considerações Iniciais

Uma vez definido o modo de colapso como sendo o cisalhamento longitudinal, o objetivo principal a ser alcançado neste capítulo é estabelecer critérios para o cálculo da resistência última ao cisalhamento longitudinal, procurando determinar expressões analíticas para a determinação do carregamento último deste modo de colapso.

O mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal entre a fôrma de aço e o concreto deve levar em conta os seguintes fatores:

- a) ligação química, resultante da aderência natural entre o aço e o concreto, normalmente destruída sob impacto;

- b) resistência mecânica fornecida pelas mossas da fôrma de aço;
- c) resistência por atrito nos apoios da laje, entre o aço e o concreto, proporcional à reação vertical.

Dessa forma, o EUROCODE (1993) apresenta dois métodos para se calcular a resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas: o método semi-empírico “m – k” e o método da Interação Parcial. Neste Capítulo será empregado o método “m – k”, o qual é recomendado pela NBR 14323 (1999).

4.2. Método “m - k”

Baseado em ensaios experimentais, como apresentados no Capítulo 2, o método “m - k” apresentado pelo EUROCODE (1993) foi desenvolvido e é considerado internacionalmente o método padrão para o cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal. Neste método, a resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas é dada por uma equação semi-empírica, que relaciona a resistência nominal à força cortante com os parâmetros obtidos nos ensaios.

As expressões semi-empíricas apresentadas pelo CSSBI (1988), pelo EUROCODE (1993) e pela NBR 14323 (1999) são bastante similares. Neste trabalho será utilizada a expressão adotada pela NBR 14323 (1999), que segue uma relação linear e é dada por:

$$V_{us} = bd_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right) \quad (4.1)$$

onde:

V_{us} é a resistência nominal ao cisalhamento longitudinal, em kN por m de largura;

m e k são constantes empíricas obtidas por meio de ensaios;

b é a largura efetiva da laje, em geral tomada igual a um metro;

d_p é a distância do centro de gravidade da fôrma à face superior do concreto, em m (altura efetiva da laje mista);

L' é o vão de cisalhamento, em m.

As constantes “ m e k ” da Eq. 4.1 serão determinadas a partir dos resultados experimentais através de uma análise de regressão linear usando o método dos mínimos quadrados. Esta análise será feita para cada grupo de espessura da fôrma de aço, separadamente.

É importante ressaltar que, adotando-se este método, são considerados todos os fatores que afetam o mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal, como a ligação química entre o aço e o concreto, a resistência mecânica fornecida pelas mossas e a resistência por atrito nos apoios. A ligação química entre o aço e o concreto é rompida após a formação das primeiras fissuras.

4.3. Determinação dos Valores de “ m e k ”

A TAB. 4.1 mostra os dados geométricos dos modelos, bem como os resultados dos ensaios necessários para a determinação dos parâmetros “ m e k ”, utilizando-se adequadamente a Eq. 4.1.

TABELA 4.1 - Dados dos modelos e resultados dos ensaios

Modelo	t (mm)	B (m)	h _t (m)	d _p (m)	L (m)	L' (m)	P _u (kN)	P _{ue} (kN)	pp _{laje} (kN/m ²)	V _{ut} (kN)
01A	0,80	0,856	0,110	0,080	2,502	0,800	32,170	35,870	2,030	20,109
01B	0,80	0,859	0,110	0,080	2,487	0,794	33,710	37,410	2,030	20,873
01C	0,80	0,857	0,110	0,080	2,500	0,800	32,720	36,420	2,030	20,385
02A	0,80	0,861	0,143	0,113	2,500	0,451	57,170	60,870	2,760	33,405
02B	0,80	0,856	0,145	0,115	2,509	0,452	56,290	59,990	2,760	32,959
02C	0,80	0,858	0,145	0,115	2,499	0,450	63,450	67,150	2,760	36,534
03A	0,95	0,860	0,110	0,080	2,500	0,800	40,430	44,130	2,050	24,269
03B	0,95	0,861	0,115	0,085	2,500	0,800	40,650	44,350	2,050	24,381
03C	0,95	0,858	0,113	0,083	2,500	0,800	38,450	42,150	2,050	23,274
04A	0,95	0,860	0,146	0,116	2,505	0,452	62,856	66,556	2,780	36,272
04B	0,95	0,859	0,143	0,113	2,499	0,451	65,529	69,229	2,780	37,598
04C	0,95	0,858	0,143	0,113	2,500	0,450	67,581	71,281	2,780	38,622

Na TAB. 4.1 os dados geométricos e os valores de carga apresentados correspondem a:

t = espessura do deck;

B = largura do modelo;

h_t = altura total do modelo;

d_p = altura efetiva do modelo;

L = vão do modelo;

L' = vão de cisalhamento do modelo;

P_u = carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico durante o ensaio;

P_{ue} = carga P_u acrescida do peso do aparato de aplicação de carga;

pp_{laje} = peso próprio teórico da laje por unidade de área;

V_{ut} = cisalhamento transversal último total, dado por:

$$V_{ut} = \frac{P_{ue} + L \cdot B \cdot pp_{laje}}{2} \quad (4.2)$$

Considerando-se os resultados dos ensaios apresentados na TAB. 4.1, a resistência ao cisalhamento longitudinal será determinada conforme as prescrições do EUROCODE (1993). Para isto, constrói-se a TAB. 4.2, onde são apresentados os valores característicos dos ensaios.

TABELA 4.2- Valores característicos dos ensaios

Modelo	P_u (kN)	$P_{uméd}$ (kN)	$P_u/P_{uméd}$	$P_{umín}$ (kN)	P_{uk} (kN)	P_{uek} (kN)	V_{utk} (kN)
01A	32,17		0,98				
01B	33,71	32,87	1,03	32,17	28,95	32,65	18,50
01C	32,72		1,00				
02A	57,17		0,97				
02B	56,29	58,97	0,95	56,29	50,66	54,36	30,14
02C	63,45		1,08				
03A	40,43		1,01				
03B	40,65	39,84	1,02	38,45	34,60	38,31	21,35
03C	38,45		0,97				
04A	62,86		0,96				
04B	65,53	65,32	1,00	62,86	56,57	60,27	33,13
04C	67,58		1,03				

Segundo o EUROCODE (1993), quando dois grupos de três ensaios são adotados, deve-se calcular o valor médio ($P_{uméd}$) das cargas máximas aplicadas pelo atuador hidráulico (P_u) de cada grupo.

Se o desvio de qualquer resultado individual em um grupo não exceder 10% da média do grupo ($P_u/P_{uméd}$), a carga característica deste grupo (P_{uk}) é considerada como o valor mínimo do grupo ($P_{umín}$) reduzido de 10%.

O valor de P_{uek} é obtido somando-se à carga característica (P_{uk}) o peso total do aparato de aplicação de cargas. A força de cisalhamento transversal última (V_{utk}), incluindo o peso próprio do modelo, é calculada conforme a Eq. 4.2.

Dessa forma, é possível determinar os valores de m e k para o cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal, considerando a *reta característica*

determinada a partir dos valores característicos apresentados na TAB. 4.2. Para tanto, a Eq. 4.1 deve ser reescrita da seguinte forma:

$$Y = mX + k \quad (4.3)$$

Nesta equação m é a inclinação da reta, k é sua interseção com o eixo das ordenadas e os valores de X e Y correspondem a:

$$X = \frac{1}{L'} \quad \text{e} \quad Y = \frac{V_{utk}}{bd_p} \quad (4.4)$$

A TAB. 4.3 a seguir, apresenta os resultados da análise dos valores característicos obtidos nos ensaios, mostrando as coordenadas X e Y , determinadas conforme a Eq. (4.4), e os parâmetros m e k para cada grupo de espessura de fôrma.

TABELA 4.3– Determinação dos parâmetros m e k

Modelo	V_{utk} (kN)	$X(m^{-1})$	$Y(kN/m^2)$	Parâmetros
01A				$m = 37,473$ (kN/m)
01B	18,500	1,250	270,157	
01C				
02A				$k = 223,32$ (kN/m ²)
02B	30,144	2,212	306,22	
02C				
03A				$m = 33,539$ (kN/m)
03B	21,351	1,250	299,82	
03C				
04A				$k = 257,89$ (kN/m ²)
04B	33,130	2,212	332,09	
04C				

Utilizando-se os valores de m e k obtidos dos valores característicos para cada grupo de espessura, apresentam-se, na TAB. 4.4, os valores calculados da

resistência nominal à força cortante, V_{us} , para cada modelo ensaiado, empregando-se a Eq. (4.1). São apresentados, ainda, os resultados máximos experimentais (V_{ut}) e as relações entre os valores calculados e os experimentais (V_{us}/V_{ut}).

TABELA 4.4 – Relação entre os valores calculados e os valores experimentais (V_{us}/V_{ut})

Modelo	B (m)	d_p (m)	L' (m)	Parâmetros	V_{us} (kN)	V_{ut} (kN)	V_{us}/V_{ut}
01A	0,856	0,080	0,800	$m = 37,473$ (kN/m)	18,501	20,109	0,920
01B	0,859	0,080	0,794		18,590	20,873	0,891
01C	0,857	0,080	0,800		18,522	20,385	0,909
02A	0,861	0,113	0,451	$k = 223,32$ (kN/m ²)	29,811	33,405	0,892
02B	0,856	0,115	0,452		30,145	32,959	0,915
02C	0,858	0,115	0,450		30,252	36,534	0,828
03A	0,860	0,080	0,800	$m = 33,539$ (kN/m)	20,627	24,269	0,850
03B	0,861	0,085	0,800		21,942	24,381	0,900
03C	0,858	0,083	0,800		21,351	23,274	0,917
04A	0,860	0,116	0,452	$k = 257,89$ (kN/m ²)	33,129	36,272	0,913
04B	0,859	0,113	0,451		32,251	37,598	0,858
04C	0,858	0,113	0,450		32,230	38,622	0,834

Os resultados apresentados na TAB. 4.4 indicam uma boa correlação entre os valores calculados (V_{us}) e os resultados experimentais (V_{ut}) para todos os modelos ensaiados, onde os valores calculados variaram de 82,8% a 92,00% dos valores experimentais.

As FIG. 4.1 e 4.2 apresentam os gráficos da resistência nominal última ao cisalhamento longitudinal para os grupos de modelos com espessuras $t=0,80\text{mm}$ e $t=0,95\text{mm}$, respectivamente. Essas figuras mostram os resultados experimentais, compondo dois grupos bem definidos e distintos de três ensaios cada, correspondentes aos valores de $X=1/L'$, conforme prevê o EUROCODE (1993). Adicionalmente são apresentadas também as retas características que definem as resistências nominais ao cisalhamento longitudinal, com os correspondentes valores de m e k .

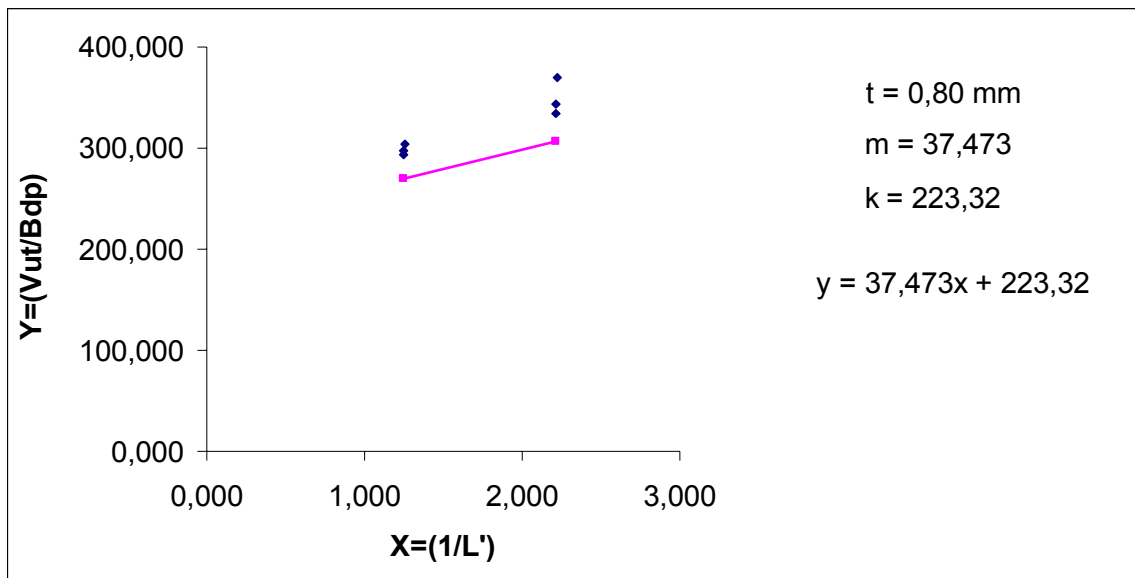


FIGURA 4.1 - Resistência nominal característica ao cisalhamento longitudinal (modelos com $t = 0,80\text{mm}$)

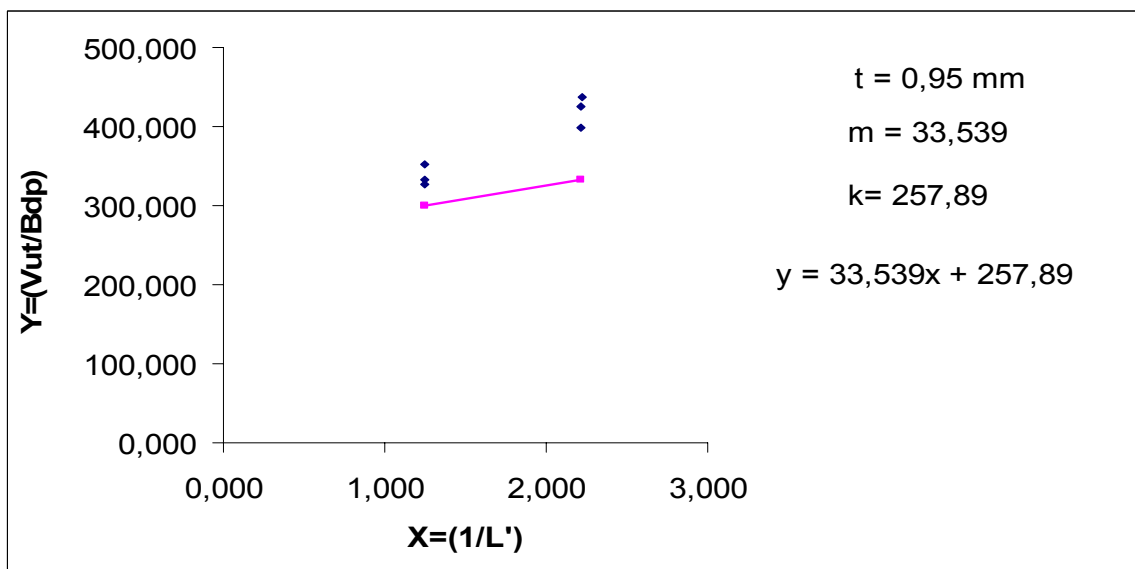


FIGURA 4.2 - Resistência nominal característica ao cisalhamento longitudinal (modelos com $t = 0,95 \text{ mm}$)

4.4. Resistência de Cálculo ao Cisalhamento Longitudinal (V_{usd})

A resistência nominal ao cisalhamento longitudinal, com base no método semi-empírico “m - k”, é calculada usando-se a Eq. 4.1. Com os valores dos parâmetros m e k , determinados a partir dos resultados dos ensaios (ver TAB. 4.3), a equação pode ser usada diretamente no cálculo dos sistemas de laje mista.

Os procedimentos de cálculo adotados neste trabalho são baseados nos conceitos do método dos estados limites e, sendo assim, a Eq. 4.1 deve ser multiplicada por um coeficiente de resistência, resultando na seguinte expressão para determinação da resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal:

$$V_{\text{usd}} = \phi_v b d_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right) \quad (4.5)$$

Onde ϕ_v é o coeficiente de resistência ao cisalhamento.

O coeficiente de resistência ao cisalhamento, ϕ_v , deve levar em conta as variações adversas na resistência dos materiais e na mão de obra, bem como as aproximações inerentes à própria equação em relação ao comportamento real. O EUROCODE (1993) recomenda também que o valor de cálculo obtido com esse coeficiente para as cargas de serviço não ultrapasse a carga de deslizamento de extremidade inicial dividida por 1,20. Neste trabalho o valor de ϕ_v igual a 0,70 é adotado.

A TAB. 4.5 apresenta os resultados da análise comparativa entre a carga de deslizamento de extremidade inicial medida nos ensaios, (V_{des}), e a resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal para as cargas de serviço (V_{serv}). Note-se que, em todos os casos, os valores resultaram maiores do que 1,2.

TABELA 4.5 - Resultados da análise comparativa em serviço

Modelo	X(m ⁻¹)	Y(kN/m ²)	Parâmetros	V _{des} (kN)	V _{serv} (kN)	V _{des} /V _{ser}
01A	1,250	293,645	m = 37,473 (kN/m)	12,124	9,25	1,3
01B	1,259	303,745		12,128	9,29	1,3
01C	1,250	297,326		12,400	9,26	1,3
02A	2,217	343,349	k= 223,32 (kN/m ²)	26,795	14,91	1,8
02B	2,212	334,811		22,054	15,07	1,5
02C	2,222	370,264		19,019	15,13	1,3
03A	1,250	352,743	m = 33,539 (kN/m)	14,299	10,31	1,4
03B	1,250	333,146		14,961	10,97	1,4
03C	1,250	326,812		15,339	10,68	1,4
04A	2,212	363,597	k= 257,89 (kN/m ²)	20,874	16,56	1,3
04B	2,217	387,344		20,229	16,13	1,3
04C	2,222	398,354		19,237	16,11	1,2

4.5. Cálculo da Resistência da Laje Mista para Carga Uniformemente Distribuída

A Eq. 4.1 e, conseqüentemente, a Eq. 4.5 foram estabelecidas para o esquema de carregamento ilustrados na FIG. 2.7, isto é, duas cargas concentradas equidistantes dos apoios. Por outro lado, os projetos de lajes são geralmente feitos considerando-se cargas uniformemente distribuídas em toda a área da laje. Assim sendo, torna-se necessário modificar ambas as equações. A modificação mais usual e inclusive recomendada pelo CSSBI (1988), pelo ASCE (1992) e pelo próprio EUROCODE (1993), como uma aproximação conservadora e para criar uma condição de carga uniforme equivalente, é a alteração no valor do vão de cisalhamento L' .

O vão de cisalhamento L' , para uma carga uniformemente distribuída, é obtido igualando-se a área sob o diagrama da força cortante desse carregamento (condição de projeto), com a área sob o diagrama da força cortante para o sistema com duas cargas concentradas simetricamente dispostas (condição de

ensaio), com ambos os carregamentos resultando no mesmo valor máximo da força cortante.

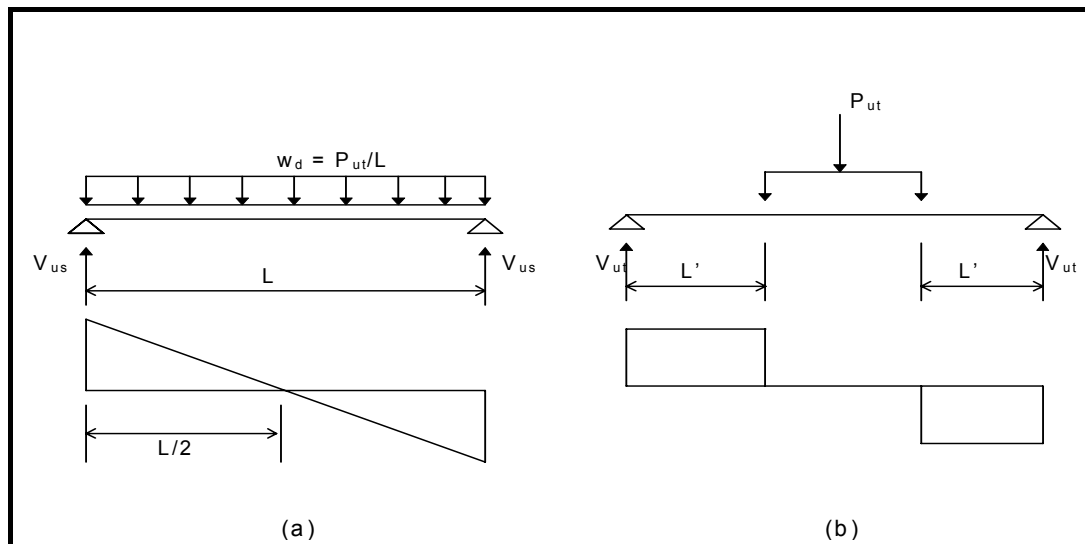


FIGURA 4.3 - (a) Condição assumida de carga distribuída em projeto; (b) Condição de ensaio

A FIG. 4.3 ilustra estes dois casos, onde na determinação de L' deve-se fazer $V_{us} = V_{ut}$. Desta igualdade resulta que L' deverá ser igual a $L/4$ no caso de cargas uniformemente distribuídas. Este valor tem sido adotado por todas as especificações internacionais pesquisadas neste trabalho.

Substituindo-se $L' = L/4$ e $\phi_v = 0,70$ na Eq. 4.5, resulta na seguinte expressão para determinação da resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal, V_{usd} , no caso de carga uniformemente distribuída:

$$V_{usd} = 0,70bd_p \left(m \frac{4}{L} + k \right) \quad (4.6)$$

No projeto de lajes, o carregamento usual é expresso em termos da carga uniformemente distribuída w_d . A análise da FIG. 4.3 permite estabelecer uma relação entre V_{usd} e w_d , dada por:

$$V_{usd} = w_d \frac{L}{2} \quad (4.7)$$

Igualando-se as Eq. 4.6 e 4.7, tem-se:

$$w_d = 1,4bd_p \frac{1}{L} \left(m \frac{4}{L} + k \right) \quad (4.8)$$

A Eq. 4.8 representa a carga última de cálculo que pode ser aplicada na laje. Para se determinar o carregamento de serviço basta dividir o valor de w_d pelo coeficiente de majoração de cargas γ_f correspondente. De acordo com os critérios da NBR 6118 (1978), o valor de γ_f é igual a 1,4. Introduzindo-se este valor na Eq. 4.8, a carga de serviço uniformemente distribuída fica:

$$w_{serv} = 1,0bd_p \frac{1}{L} \left(m \frac{4}{L} + k \right) \quad (4.9)$$

As expressões aqui determinadas consideram as condições de vãos simplesmente apoiados, mesmo que na prática a laje seja contínua sobre os apoios internos. A análise considerando vão simples está normalmente associada a um sistema que consiste de uma série de lajes colocadas de extremidade a extremidade, simplesmente apoiadas, sem nenhuma condição de transmitir momento negativo aos apoios internos. Mesmo com a existência da armadura de retração nos apoios internos, onde a laje é contínua, é prática comum efetuar a análise como vão simples, considerando-se que tal armadura tenha apenas a função de controlar fissuras de retração e ou de variação térmica do concreto.

5

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LONGITUDINAL PELO MÉTODO DA INTERAÇÃO PARCIAL

5.1 Considerações Iniciais

Conforme já dito anteriormente, o EUROCODE (1993) apresenta dois métodos para se calcular a resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas: o método semi-empírico “ m - k ” e o método da Interação Parcial (MIP).

O método “m e k” tem mostrado ser um critério de cálculo adequado principalmente para as fôrmas metálicas que apresentam um comportamento frágil e estão submetidas a vãos pequenos. Porém, este método apresenta algumas falhas para as fôrmas metálicas com comportamento dúctil e sujeitas a vãos maiores, conforme descrito por JOHNSON (1994):

1. O método “m e k” não é baseado em um modelo analítico, de maneira que, quando as dimensões, os materiais ou os carregamentos diferem daqueles

usados nos ensaios, devem ser feitas algumas hipóteses conservadoras. Exemplificando, pode-se citar o cálculo do vão de cisalhamento (L') para carregamento uniformemente distribuído descrito em 4.5;

2. Para se ampliar a faixa de aplicação das lajes mistas muitos ensaios adicionais são necessários, como por exemplo para se considerar as ancoragens de extremidade ou o uso de armaduras longitudinais de reforço na resistência das mesmas;
3. O método de análise dos resultados dos ensaios é o mesmo, não importando se o comportamento é dúctil ou frágil. O EUROCODE (1993) usa um fator de penalização de 0,80, quando o comportamento é frágil, o que não representa adequadamente as vantagens de se usar fôrmas com projetos de mossas mais bem elaborados.

De acordo com o EUROCODE (1993), o método da Interação Parcial, que só deve ser utilizado em lajes com comportamento dúctil, surge como uma alternativa ao método “ m e k ”, e, segundo JOHNSON (1994), ele explora melhor o comportamento dúctil das fôrmas de aço disponíveis no mercado, os projetos de mossas mais bem elaboradas e a utilização de grandes vãos. Além disto, este método permite que se avalie teoricamente a contribuição da ancoragem de extremidade, do tipo *stud bolt*, e das armaduras longitudinais, aumentando a resistência ao cisalhamento longitudinal.

O método da Interação Parcial é fundamentado em um modelo analítico similar ao de vigas mistas com conectores dúcteis. Ele permite determinar o grau de interação ao cisalhamento longitudinal entre a fôrma de aço e o concreto em lajes mistas com comportamento dúctil.

Neste capítulo será apresentado o método da Interação parcial para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal e critérios para o dimensionamento ao momento fletor positivo das lajes mistas, simplesmente apoiadas, após a cura do concreto, conforme o Anexo E do EUROCODE (1993).

Ao final do capítulo serão apresentados exemplos práticos visando comparar os resultados obtidos pelo método $m - k$ com os obtidos pelo método da Interação Parcial.

5.2 Método da Interação Parcial

5.2.1 Modelo analítico da interação parcial

O estudo do modelo analítico do Método da Interação Parcial a ser apresentado nesse capítulo segue a formulação desenvolvida em MELO (1999) e SOUZA NETO (2001);

Conforme SOUZA NETO (2001), o comportamento da laje mista na flexão é bastante complexo devido às variações das propriedades da fôrma e do concreto e depende também da interação ao cisalhamento longitudinal. Apesar disto, o modelo para análise a ser apresentado a seguir é bastante simplificado, mas torna possível uma análise racional do comportamento deste sistema misto.

O modelo analítico do método da interação parcial, utilizado para se verificar a resistência das lajes mistas ao momento fletor positivo, segue a mesma filosofia do modelo usado para o cálculo das vigas mistas, ou seja, considera-se a plastificação total da seção transversal de momento máximo. Este modelo, então, pode ser mais bem compreendido estudando-se uma nervura típica da laje mista totalmente plastificada.

A FIG. 5.1 mostra a distribuição de tensões normais na seção transversal desta nervura, considerando-se a interação total e a linha neutra de plastificação, LNP, situada no concreto ou na fôrma.

Há basicamente duas hipóteses de cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista: interação total e interação parcial ao cisalhamento longitudinal.

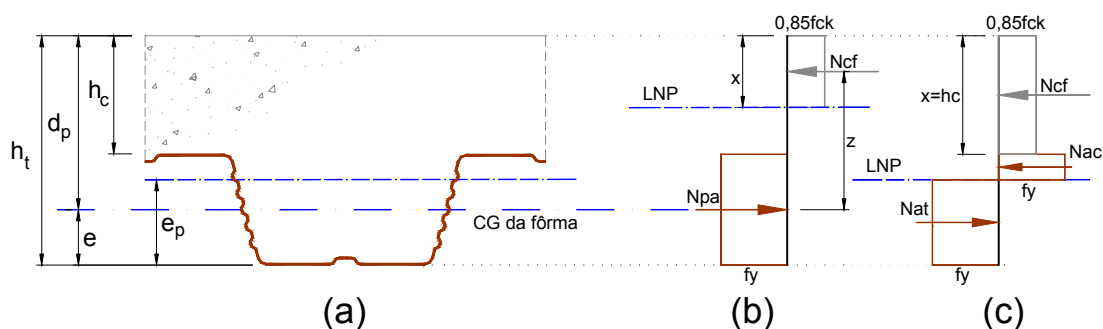


FIGURA 5.1 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação total: LNP no concreto (b) e LNP na fôrma (c) – adaptada de SOUZA NETO (2001)

Onde,

b - largura efetiva da laje mista, tomada sendo igual a 1m, ou largura do módulo típico da seção mista;

d_p - altura efetiva da laje mista: $d_p = h_t - e$;

e - distância do centro de gravidade da área efetiva da fôrma metálica (submetida à tração) à face externa da mesa inferior;

e_p - distância da linha neutra plástica da fôrma metálica (submetida à flexão) à face externa da mesa inferior;

h_c - altura de concreto acima da mesa superior da fôrma metálica;

h_t - altura total da laje mista;

f_y - limite de escoamento nominal do aço;

$0,85f_{ck}$ - resistência característica do concreto à compressão considerando o efeito Rüşh;

x - altura do bloco de tensão do concreto;

z - braço de alavanca;

N_{ac} - força normal de compressão na fôrma metálica;

N_{at} - força normal de tração na fôrma metálica;

N_{pa} - força de escoamento à tração da fôrma metálica;

N_{cf} - força de compressão no concreto considerando interação total.

Interação total

Inicialmente considera-se a hipótese de que haja interação total entre a fôrma de aço e o concreto. Neste caso não há deslizamento horizontal relativo entre o aço e o concreto, ocorrendo a flexão da seção mista, totalmente solidária, em relação a um único eixo neutro, que pode estar na mesa de concreto ou na fôrma de aço.

A distribuição de tensões normais devidas à flexão da laje é mostrada na Figuras 5.1(b), quando a linha neutra plástica, LNP, se localiza acima da fôrma metálica (no concreto) - e na Figura 5.1(c), quando a linha neutra plástica, LNP, está na fôrma metálica.

LNP no concreto

Quando a linha neutra plástica, LNP, se encontra acima da fôrma, para que haja equilíbrio é necessário que a força de compressão no concreto, N_{cf} , seja igual à força de escoamento à tração da fôrma de aço, N_{pa} , ou seja:

$$N_{cf} = N_{pa} = A_p \cdot f_y \quad (5.1)$$

onde A_p é a área efetiva da fôrma à tração reduzida pela influência das mossas e indentações nela presentes.

A altura do bloco do diagrama de tensão no concreto é dada por:

$$x = \frac{N_{cf}}{b(0,85f_{ck})} \leq h_c \quad (5.2)$$

O momento resistente nominal da laje mista, $M_{p,R}$, é dado por:

$$M_{p,R} = N_{cf}(d_p - 0,5x) \quad (5.3)$$

LNP na fôrma metálica

No caso em que a linha neutra plástica, LNP, se localiza na fôrma metálica, a compressão acontece em todo o concreto ($x=h_c$) e em uma parte da fôrma, conforme ilustra a FIG. 5.2(b). Neste caso, N_{cf} é menor que N_{pa} e é calculado por:

$$N_{cf} = b \cdot h_c \cdot 0,85f_{ck} \quad (5.4)$$

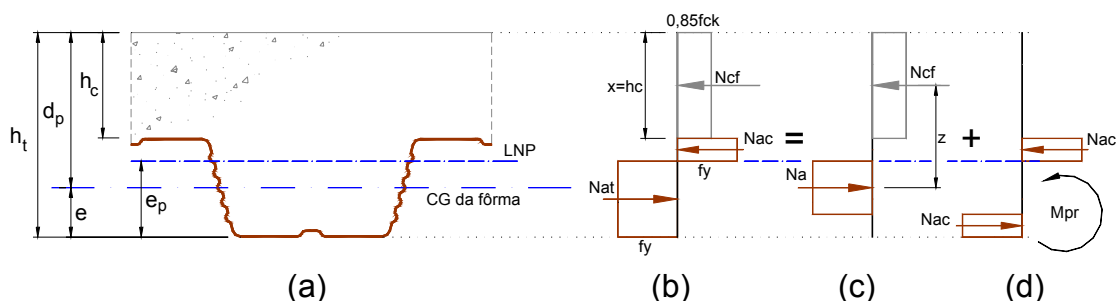


FIGURA 5.2 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista com interação total e linha neutra plástica na fôrma metálica – adaptada de SOUZA NETO (2001)

O diagrama das forças atuantes na laje, ilustrado na FIG. 5.2(b), é decomposto, por simplificação, nos diagramas 5.2(c) e 5.2(d). A força de tração na fôrma, N_{at} , é decomposta nas forças N_{ac} e N_a , onde:

$$N_a = N_{cf} \quad (5.5)$$

A resistência nominal ao momento fletor é, então, dada por:

$$M_{p,R} = N_{cf} \cdot z + M_{pr} \quad (5.6)$$

As forças iguais e opostas N_{ac} fornecem o momento resistente M_{pr} , ou seja, M_{pr} é igual ao momento plástico da fôrma M_{pa} , reduzido pela presença da força

normal de tração N_a . A relação entre M_{pr}/M_{pa} e N_{cf}/N_{pa} depende da fôrma, mas segundo JOHNSON (1994), ela é típica conforme a linha contínua ABC na FIG. 5.3. Esta curva é aproximada no EUROCODE (1993) pela Eq. 5.7, linha tracejada ADC, na FIG.5.3.

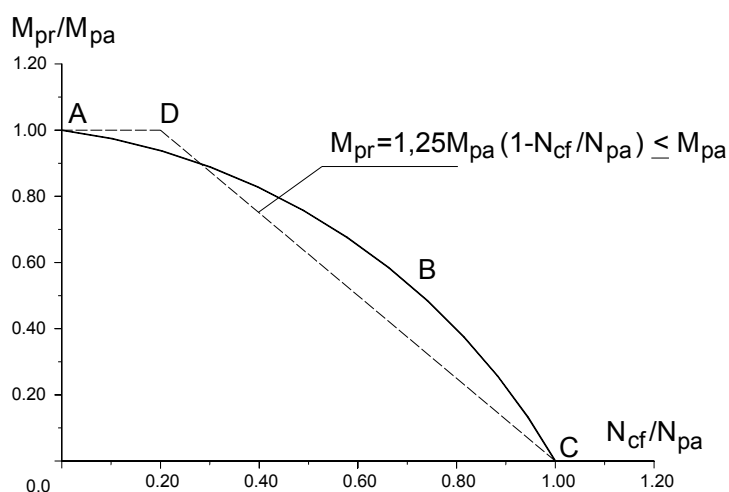


FIGURA 5.3 - Diagrama de resistência considerando a interação entre a força axial e o momento na fôrma de aço

$$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (5.7)$$

Onde,

M_{pr} - momento plástico reduzido da fôrma metálica;

M_{pa} - momento plástico da fôrma metálica.

O braço de alavanca z é variável, depende da relação N_{cf}/N_{pa} e pode ser calculado segundo as Eq. 5.8 e 5.9 validadas por ensaios, ilustradas graficamente na FIG.5.4.

$$z = h_t - 0,5 \cdot x - e_v \quad (5.8)$$

$$e_v = +e_p - (e_p - e) \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \quad (5.9)$$

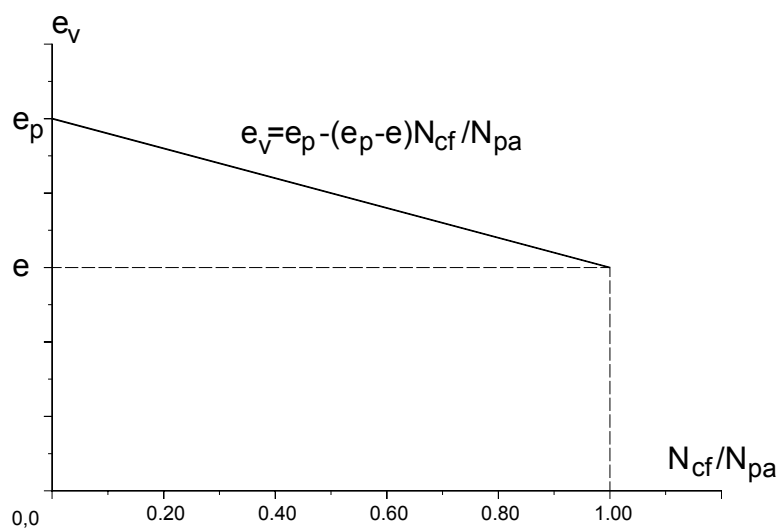


FIGURA 5.4 - Variação da posição do centro de gravidade da fôrma em função da relação N_{cf}/N_{pa}

Interação Parcial

Considerando a hipótese de haver interação parcial ao cisalhamento entre o concreto e a fôrma de aço, ocorrerá o deslizamento horizontal relativo entre o concreto e a fôrma de aço, e formam-se duas linhas neutras na seção da laje: uma no concreto e outra na fôrma metálica, conforme a FIG.5.5(b). A força de compressão no concreto, N_c , é menor que N_{cf} e depende da resistência ao cisalhamento longitudinal.

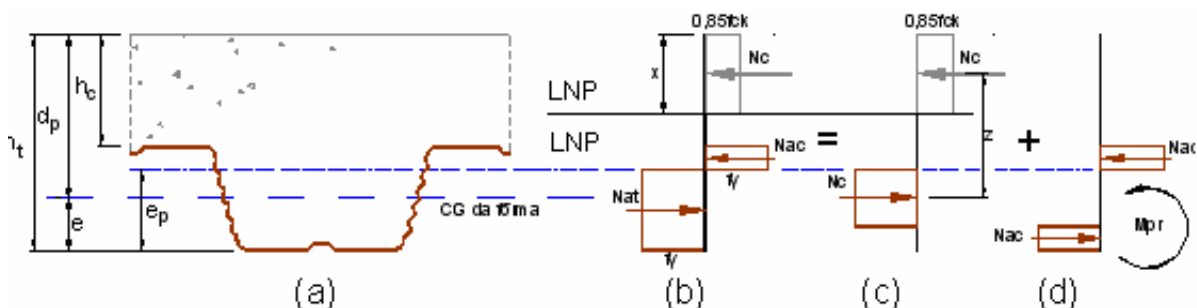


FIGURA 5.5 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação parcial

A altura x do bloco de tensão é dada por:

$$x = \frac{N_c}{b(0,85f_{ck})} < h_c \quad (5.10)$$

O cálculo da resistência da laje com interação parcial segue o mesmo procedimento da laje com interação total com a linha neutra plástica na fôrma metálica. A determinação da resistência nominal à flexão, $M_{p,R}$, é feita conforme as Eq. 5.5 a 5.9, sendo que N_{cf} é substituído por N_c , ou seja:

$$z = h_t - 0,5 \cdot x - e_p + (e_p - e) \frac{N_c}{N_{pa}} \quad (5.11)$$

$$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \left(1 - \frac{N_c}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (5.12)$$

$$M_{p,R} = N_c \cdot z + M_{pr} \quad (5.13)$$

5.2.2 Determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal

Para se determinar a resistência ao cisalhamento longitudinal, é necessário calcular a resistência ao cisalhamento fornecido pelas mossas do Deck metálico.

Com os dados de ensaios dos materiais e dos modelos das lajes mistas é possível determinar os parâmetros para verificação da resistência da laje ao cisalhamento longitudinal.

Através dos resultados de cada ensaio realizado é possível determinar o grau de interação parcial ao cisalhamento, η , para cada modelo de laje mista com comportamento dúctil, que é definido por:

$$\eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (5.14)$$

Donde se calcula a força de compressão N_c transferida para o concreto dentro do vão de cisalhamento L' :

$$N_c = \eta \cdot N_{cf} \quad (5.15)$$

A hipótese básica admitida desse método é que no estado limite último da laje ocorre uma completa redistribuição das tensões de cisalhamento horizontais na interface aço-concreto, de tal forma que a tensão última média de cisalhamento longitudinal, τ_u , pode ser calculada através da Eq. 5.16:

$$\tau_u = \frac{N_c}{b(L'+L_o)} = \frac{\eta \cdot N_{cf}}{b(L'+L_o)} \quad (5.16)$$

onde L_o é comprimento do balanço nas extremidades do modelo ($L_o = 50\text{mm}$).

O diagrama de resistência para a interação parcial de cada modelo, ilustrado na FIG.5.6, deve ser traçado para se determinar o grau de interação, utilizando-se as equações 5.10 a 5.13 com valores obtidos dos ensaios. $M_{p,R}$ é o momento fletor resistente nominal de um modelo, dado pela Eq. 5.13.

O momento fletor último de ensaio, M_{ensaio} , calculado pela Eq. 2.2, é dividido pelo momento fletor resistente nominal da laje, M_R , que considera a interação total e é calculada pela Eq. 5.3.

Seguindo o caminho $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ do diagrama de resistência para a interação parcial, o grau de interação ao cisalhamento longitudinal de um modelo específico, η_{ensaio} , pode ser determinado.

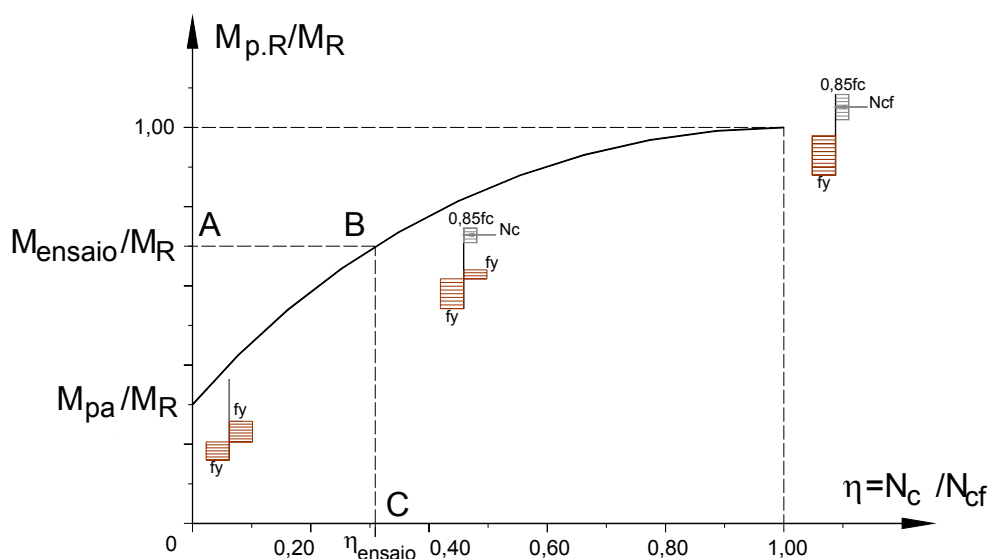


FIGURA 5.6 - Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação – adaptado de SOUZA NETO (2001)

Nas FIG.5.7 e 5.8 encontram-se o diagrama de resistência para a interação parcial dos modelos 01A e 03A, respectivamente, obtidos com os dados de ensaios.

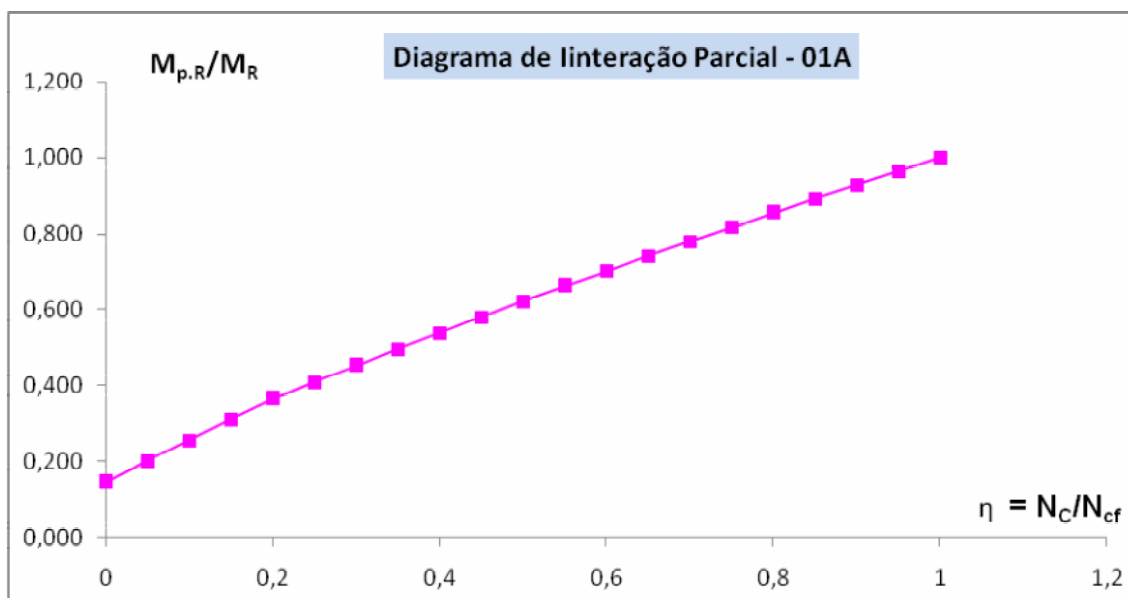


FIGURA 5.7-Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação do modelo 01A

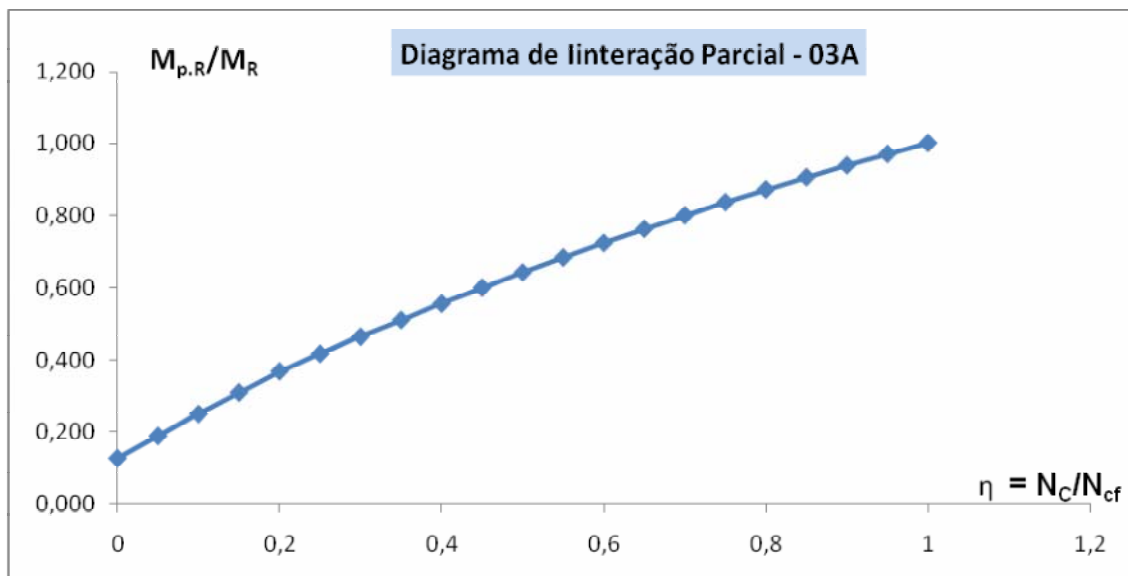


FIGURA 5.8-Diagrama de resistência para a determinação do grau de interação do modelo 03A

Os valores dos momentos resistentes plásticos da fôrma metálica, M_{pa} , foram obtidos por meio de ensaios realizados no LAEES por RODRIGUES & LAVALL (2005), considerando modelos de decks metálicos isolados que visavam comprovar a capacidade portante das fôrmas com espessuras $t=0,80$ mm e $t=0,95$ mm.

Após a determinação do valor de η_{ensaio} , a intensidade da força de compressão no concreto, N_c , é dada por:

$$N_c = \eta_{ensaio} \cdot N_{cf} \quad (5.19)$$

A resistência última ao cisalhamento longitudinal, τ_u , para cada modelo ensaiado, é dada por:

$$\tau_u = \frac{N_c}{b(L' + L_o)} \quad (5.20)$$

A resistência nominal ao cisalhamento, $\tau_{u.Rk}$, é o menor dos valores encontrados de τ_u , $\tau_{u.mín}$, reduzido de 10%, ou seja:

$$\tau_{u.Rk} = 0,90\tau_{u.mín} \quad (5.21)$$

Finalmente, a resistência de cálculo ao cisalhamento, $\tau_{u.Rd}$, é dada por:

$$\tau_{u.Rd} = \frac{\tau_{u.Rk}}{\gamma_v} = \frac{0,90 \cdot \tau_{u.mín}}{\gamma_v} \quad (5.22)$$

Onde γ_v é o coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal adotado como sendo $\gamma_v = 1,25$ de acordo com o EUROCODE (1993).

Os graus de interação e as resistências ao cisalhamento longitudinal dos modelos ensaiados são apresentados na TAB. 5.1.

TABELA 5.1 – Resultados do Método da Interação Parcial

Modelo	η	N_c (kN)	τ_u (kN/cm ²)	$\tau_{u.mín}$ (kN/cm ²)	$\tau_{u.Rk}$ (kN/cm ²)	$\tau_{u.Rd}$ (kN/cm ²)
01A	0,595	184,45	0,025	0,0250	0,0225	0,0180
01B	0,651	201,81	0,028			
01C	0,625	193,75	0,027			
02A	0,360	111,60	0,026			
02B	0,344	106,64	0,025			
02C	0,400	124,00	0,029			
03A	0,554	235,88	0,032	0,0270	0,0243	0,0190
03B	0,501	213,32	0,029			
03C	0,491	209,06	0,029			
04A	0,270	114,96	0,027			
04B	0,293	124,75	0,029			
04C	0,301	128,16	0,030			

Os valores de N_{cf} foram calculados através da Eq. 5.1, adotando-se a área bruta da fôrma metálica com os valores obtidos no ensaio do aço. A TAB. 2.6 contém os valores de M_{ensaio} e M_R .

Conforme SOUZA NETO (2001), o EUROCODE (1993) permite que A_p seja determinado ao excluir as áreas da fôrma onde se localizam as mossas, o que torna o seu valor muito conservador, ou por ensaios experimentais da fôrma. Um outro modo de se calcular A_p é proposto por VELJKOVIC (1993) através dos resultados dos ensaios de laje mista, o qual inclui, de maneira mais apropriada, os efeitos das regiões estampadas e da conformação a frio da fôrma, além da ação benéfica da restrição do concreto.

A TAB. 5.2 é apresentada com o objetivo de comparar a eficiência dos dois métodos de cálculo apresentados nesse trabalho para verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal: o método semi-empírico $m - k$ e o método da Interação Parcial. Nela são mostrados os valores calculados das resistências nominais à força cortante, V_{us} , para os modelos ensaiados e os respectivos valores obtidos nos ensaios, V_{ut} . As relações $V_{us(m-k)}/V_{ut}$ e $V_{us(MIP)}/V_{ut}$ mostram a boa correlação entre os dois métodos avaliados.

TABELA 5.2 – Resultados dos ensaios pelos métodos $m - k$ e MIP

Modelo	$V_{ut}(\text{ensaio})$ (kN)	$V_{us(m-k)}$ (kN)	$V_{us(MIP)}$ (kN)	$V_{us(m-k)}/V_{ut}$	$V_{us(MIP)}/V_{ut}$
01A	20,109	18,501	17,830	0,920	0,887
01B	20,873	18,590	17,504	0,891	0,839
01C	20,385	18,522	17,565	0,909	0,862
02A	33,405	29,811	29,803	0,892	0,892
02B	32,959	30,145	30,188	0,915	0,916
02C	36,534	30,252	30,141	0,828	0,825
03A	24,269	20,627	19,490	0,850	0,803
03B	24,381	21,942	20,808	0,900	0,853
03C	23,274	21,351	20,154	0,917	0,866
04A	36,272	33,129	33,417	0,913	0,921
04B	37,598	32,251	32,749	0,858	0,871
04C	38,622	32,230	32,877	0,834	0,851

5.2.3 Verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal

Uma vez definida a resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal para cada espessura de fôrma, $\tau_{u,Rd}$, a força de compressão na laje pode ser calculada em qualquer seção a uma distância L_x a partir da extremidade, ou seja:

$$N_c = b \cdot L_x \cdot \tau_{u,Rd} \leq N_{cf} \quad (5.23)$$

Assim, é possível determinar a resistência de cálculo ao momento fletor, M_{Rd} , em qualquer seção da laje mista. O comprimento mínimo, L_{sf} , para haver interação total entre o aço e o concreto é:

$$L_{sf} = \frac{N_{cf}}{b \cdot \tau_{u,Rd}} \quad (5.24)$$

Tomando-se o valor da força N_c e levando-o nas equações do método da Interação Parcial (Eq. 5.10 a 5.13), determina-se o diagrama de interação parcial de cálculo, $M_{Rd} \times L_x$, ilustrado na FIG.5.9, utilizado para o dimensionamento, onde $M_{f,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo à flexão, considerando a interação completa.

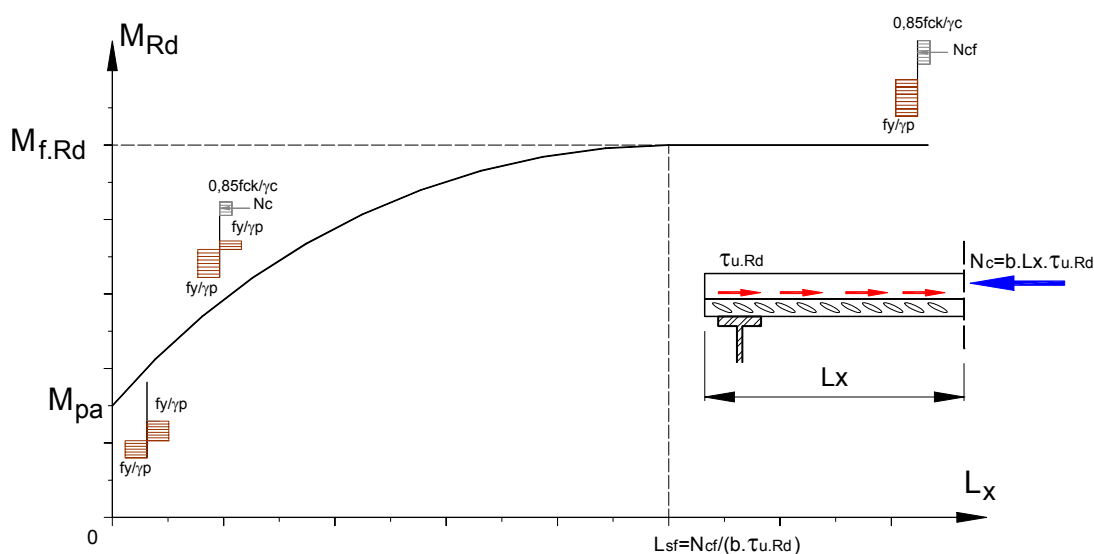


FIGURA 5.9 - Diagrama de interação parcial de cálculo – adaptada de SOUZA NETO (2001)

Observa-se neste gráfico que o valor mínimo para o comprimento L_{sf} , é o valor que, a partir do qual, a interação ao cisalhamento é completa e o colapso da laje ocorre por flexão. Dessa forma, duas situações podem ocorrer:

1. Para $L_x \geq L_{sf}$, a interação ao cisalhamento é total, ocorrendo colapso por flexão;
2. Para $L_x < L_{sf}$, a interação ao cisalhamento é parcial, ocorrendo colapso por cisalhamento longitudinal.

A resistência de cálculo ao momento fletor em cada seção transversal de uma laje mista bi-apoiada, M_{Rd} , fica representada no diagrama de interação parcial de cálculo. Em lajes sem ancoragem de extremidade, considera-se que a resistência da laje no apoio é somente da fôrma metálica.

Para um dimensionamento seguro, a curva de resistência, M_{Rd} , deve ficar sempre acima ou tangenciar o diagrama de momento fletor para o carregamento aplicado, isto é, $M_{Sd} \leq M_{Rd}$, como mostra a FIG.5.10.

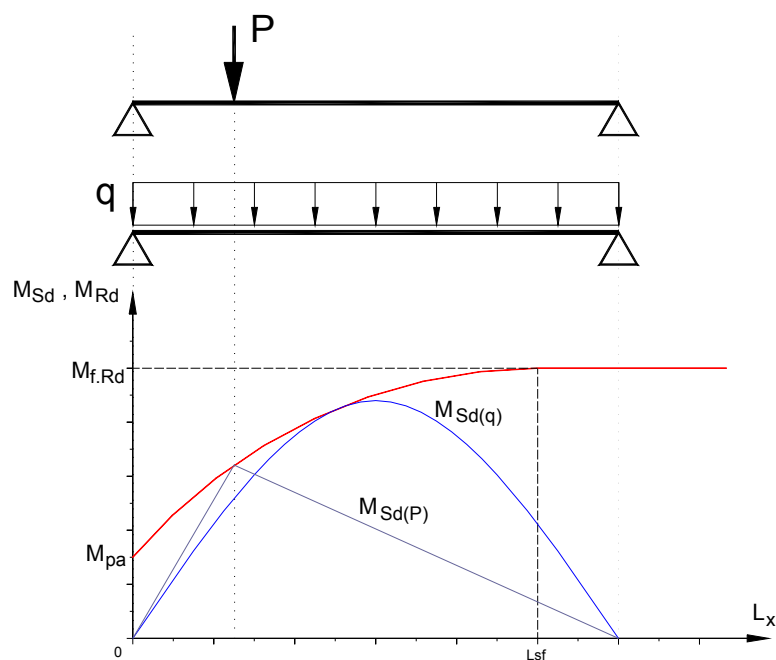


FIGURA 5.10 - Verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal para laje mista não ancorada

Diferentes tipos de carregamento podem ser utilizados na verificação pelo diagrama. Na FIG. 5.10, uma laje mista simplesmente apoiada é verificada para os casos de carregamento uniformemente distribuído (q) e de uma carga concentrada (P).

A seção transversal crítica é definida pelo ponto no qual a curva de M_{Sd} tangencia a curva de M_{Rd} . Se tal seção estiver posicionada a uma distância do apoio menor que L_{sf} , o colapso é considerado por cisalhamento longitudinal, caso contrário, o colapso se dá por flexão.

5.3 Exemplo de Aplicação

Considerando-se uma laje mista aço-concreto de largura unitária e utilizando-se a fôrma metálica Deck 60, pede-se determinar a carga máxima que pode ser aplicada na laje mista, considerando a resistência ao cisalhamento longitudinal, através do método “ $m - k$ ” e do método da Interação Parcial. Serão considerados três modos distintos de carregamento:

- carregamento uniformemente distribuído;
- duas cargas concentradas aplicadas eqüidistantes dos apoios;
- carga concentrada aplicada no meio do vão.

Os coeficientes de ponderação das ações estão de acordo com a NBR 8800 (1986). Os dados necessários para a resolução do exemplo são apresentados a seguir, referindo-se à FIG. 5.11.

Dados:

Fôrma metálica Deck 60:

$t=0,80\text{mm}$	$A_p=10,602\text{cm}^2/\text{m}$
$d_d=60\text{mm}$	$e=e_p=30,0\text{mm}$
$f_y=28\text{kN/cm}^2$ (ZAR 280)	$E_a=20500\text{kN/cm}^2$
$L=2500\text{mm}$	

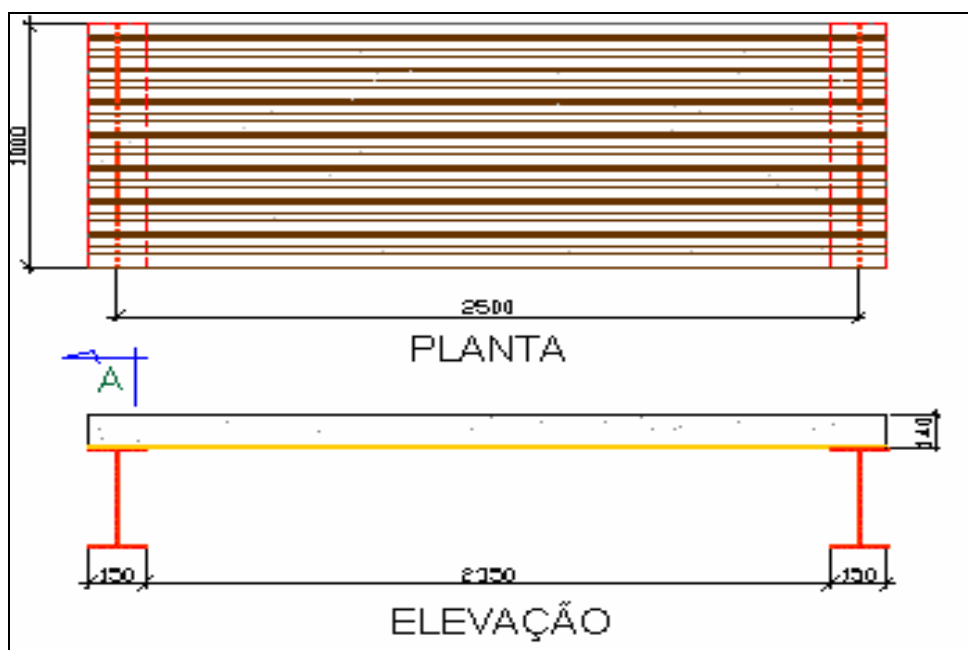


FIGURA 5.11 – Exemplo para a laje mista utilizando-se o DECK 60-USIMINAS

Laje mista:

$$h_t = 140 \text{ mm}$$

$$d_p = h_t - e = 110 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$w_p = 2,76 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{ck} = 2 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_c = 2.129 \text{ kN/cm}^2$$

$$m = 37,473 \text{ kN/m}$$

$$k = 223,32 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{u,Rd} = 0,018 \text{ kN/cm}^2 \quad (t = 0,80 \text{ mm})$$

Onde,

A_p - área efetiva da fôrma à tração;

b - largura unitária da laje;

d_p - altura efetiva da laje mista;

e - distância do centro de gravidade da área efetiva da fôrma metálica (à tração) à face externa da mesa inferior;

E_a - módulo de elasticidade do aço;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

e_p - distância da linha neutra plástica da fôrma metálica (à flexão) à face externa da mesa inferior;

f_{ck} - resistência característica à compressão do concreto

f_y - limite de escoamento do aço da fôrma;

d_d - altura da fôrma metálica;

h_t - altura total da laje mista;

L - vão total da laje;

L' - vão de cisalhamento;

t - espessura nominal da fôrma de aço;

w_p - peso próprio da laje mista;

q_{var} - carga variável

$\tau_{u,Rd}$ - resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal da laje mista;

γ_g, γ_q - coeficientes de ponderação da carga permanente e da carga variável, respectivamente.

Caso 1 - Carga uniformemente distribuída

A FIG. 5.12 mostra o esquema do carregamento aplicado na laje mista.

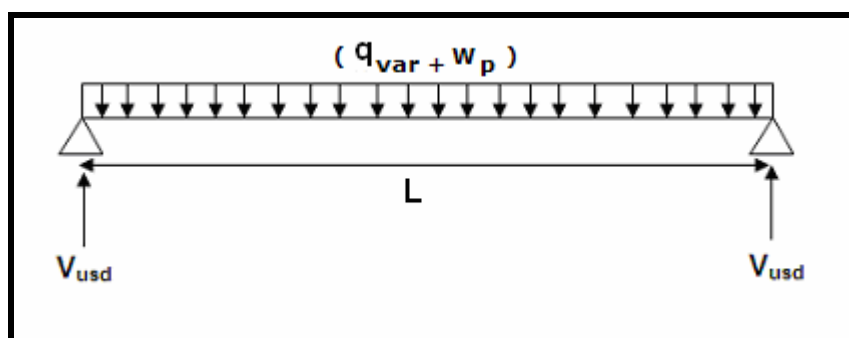


FIGURA 5.12 –Exemplo de aplicação com carga uniformemente distribuída

Solução:

- *Verificação ao cisalhamento longitudinal*

Método m-k

A resistência ao cisalhamento longitudinal pelo método *m-k* é obtida pela Eq.4.5.

$$V_{\text{usd}} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right) \quad (4.5)$$

Onde,

V_{usd} - resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal;

ϕ_v - coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal ($\phi_v=0,70$);

L' - vão de cisalhamento para carga uniformemente distribuída ($L' = L/4$).

Logo, aplicando-se os fatores de ponderação adequados para os materiais empregados e igualando-se a reação de apoio com V_{usd} , tem-se:

$$\frac{[\sum (\gamma_g \cdot w_p) + \sum (\gamma_q \cdot q_{\text{var}})]L}{2} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{4}{L} + k \right)$$

$$\frac{(1,4 \cdot 2,76 + 1,5 \cdot q_{\text{var}})2,5}{2} = 0,70 \cdot 1 \cdot 0,111 \left(37,473 \cdot \frac{4}{2,5} + 223,32 \right)$$

=

Método da Interação Parcial

A localização da linha neutra plástica da laje mista é determinada em função do valor de N_{cf} . Se a força de tração da fôrma de aço for menor que a força de compressão no concreto na altura h_c , então a linha neutra fica posicionada acima da fôrma de aço.

$$N_{cf} = \text{menor} \begin{cases} A_p \cdot f_y / \gamma_{ap} = 10,602 \cdot 28 / 1,10 = 269,871 \text{ kN/m} \\ h_c \cdot b \cdot 0,85 f_{ck} / \gamma_c = 8,0 \cdot 100 \cdot 0,85 \cdot 2 / 1,4 = 971,428 \text{ kN/m} \end{cases}$$

Sendo γ_{ap} e γ_c fatores de resistência do aço e do concreto - EUROCODE (1993).

$N_{cf} = 269,871 \text{ kN/m}$ - A linha neutra plástica se localiza acima da fôrma metálica.

A seção crítica, onde ocorrerá o colapso, se encontra entre o apoio ($L_x=0$ mm) e a seção de momento fletor máximo, isto é, $L_x=1250$ mm. Como a carga máxima é função do ponto onde a curva de momento de cálculo, M_{Sd} , tangencia a curva de resistência, M_{Rd} , de acordo com a FIG.5.10 os outros pontos onde as curvas se interceptam darão, conseqüentemente, uma carga maior que a máxima admitida. Portanto, pode-se calcular aproximadamente a carga máxima quando se igualar o momento de cálculo, M_{Sd} , com o de resistência, M_{Rd} , em várias seções no intervalo entre o apoio e a seção de momento máximo, ou seja $0 < L_x \leq 1250 \text{ mm}$, tirando-se o menor valor da carga encontrada.

A Tab.5.3 resume o procedimento de cálculo da carga máxima, q_{var} , atuante uniformemente distribuída para este exemplo. Na tabela, L_x é a seção considerada, N_c é a força de compressão no concreto (Eq. 5.23), x é a altura do bloco de tensão do concreto (Eq. 5.10), M_{pr} é o momento plástico reduzido da fôrma metálica (Eq. 5.12), z é o braço de alavanca (Eq.5.11) e $M_{p,Rd}$ é o momento resistente de cálculo (Eq. 5.13) da laje mista aço-concreto.

Para o cálculo da carga máxima atuante foi desenvolvida e aplicada a Eq. 5.25.

$$q_{var} = \frac{2M_{Rd} - 1,4 \cdot w_p \cdot L_x (L - L_x)}{1,5 \cdot L_x \cdot (L - L_x)} \quad (5.25)$$

O momento atuante, M_{sd} , ao longo do vão para as seções indicadas, considerando a carga máxima determinada, é dado conforme a Eq. 5.26.

$$M_{sd} = V_{usd} \cdot L_x - \frac{(1,4w_p + 1,5q_{var}) \cdot L_x^2}{2} \quad (5.26)$$

TABELA 5.3 – Método da Interação Parcial - carga uniformemente distribuída

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	X (mm)	Z (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	M_{Rd} (kN.m/m)	q_{var} (kN/m ²)	M_{sd} (kN.m)
1	0	0	0,000	110,000	2,813	2,813	-	0,000
2	100	18	1,482	109,259	2,813	4,780	23,977	2,844
3	200	36	2,965	108,518	2,813	6,720	16,901	5,451
4	300	54	4,447	107,776	2,813	8,633	14,863	7,821
5	400	72	5,929	107,035	2,578	10,285	13,749	9,954
6	500	90	7,412	106,294	2,344	11,910	13,304	11,850
7	550	99	8,153	105,924	2,226	12,713	13,228	12,709
8	600	108	8,894	105,553	2,109	13,509	13,224	13,509
9	650	117	9,635	105,182	1,992	14,298	13,278	14,249
10	700	126	10,376	104,812	1,875	15,081	13,383	14,931
11	800	144	11,859	104,071	1,640	16,626	13,724	16,116
12	900	162	13,341	103,329	1,405	18,145	14,225	17,064
13	1000	180	14,824	102,588	1,171	19,637	14,879	17,775
14	1100	198	16,306	101,847	0,936	21,102	15,694	18,249
15	1200	216	17,788	101,106	0,702	22,541	16,690	18,486
16	1250	225	18,529	100,735	0,585	23,250	17,264	18,515
17	1300	234	19,271	100,365	0,467	23,953	17,896	18,486
18	1400	252	20,753	99,624	0,233	25,338	19,362	18,249
19	1500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	21,146	17,775
20	1600	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	22,134	17,064
21	1700	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	23,588	16,116
22	1800	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	25,664	14,931
23	1900	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	28,637	13,509
24	2000	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	33,007	11,850
25	2100	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	39,784	9,954
26	2200	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	51,337	7,821
27	2300	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	74,777	5,451
28	2400	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	145,685	2,844
29	2500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	-	0,000

De acordo com a TAB. 5.3, a carga $q_{var}=13,224 \text{ kN/m}^2$ foi a de menor valor ao longo do vão L, nas seções indicadas, sendo definida como a carga uniformemente distribuída máxima permitida para este modelo estrutural. Os momentos fletores atuantes ao longo dessas seções foram calculados considerando este valor máximo.

A FIG.5.13 ilustra a relação entre o momento fletor atuante, M_{Sd} , e o momento fletor resistente, M_{Rd} , mostrando um dimensionamento seguro, uma vez que $M_{Sd} \leq M_{Rd}$ em todo o vão da laje mista. A seção transversal crítica é definida pelo ponto no qual a curva de M_{Sd} tangencia a curva de M_{Rd} . Como $L_x = 600\text{mm} \leq L_{sf} = 1499\text{mm}$, o colapso é considerado por cisalhamento longitudinal.

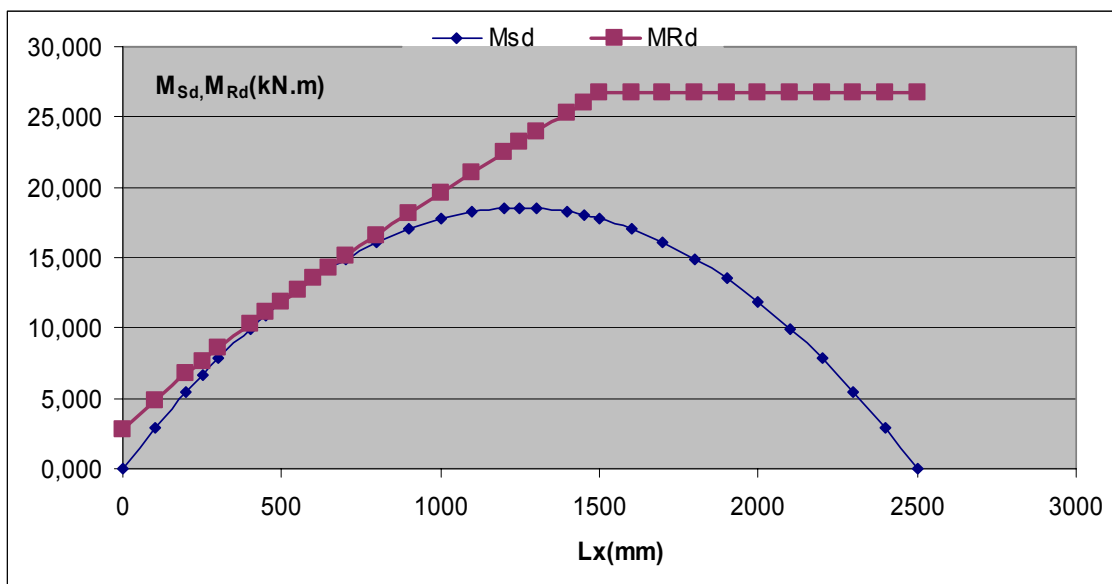


FIG.5.13-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) - carga uniformemente distribuída

Caso 2 -Duas cargas concentradas aplicadas eqüidistantes dos apoios

A FIG. 5.14 mostra o carregamento aplicado no sistema misto em estudo.

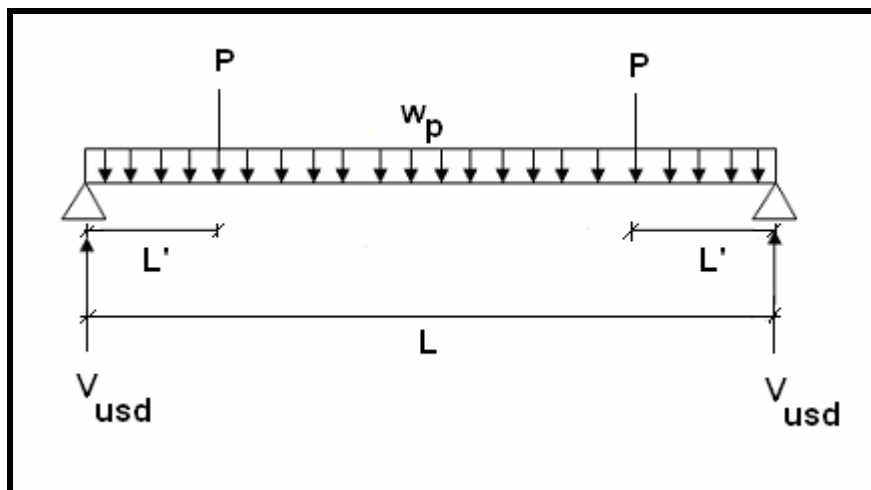


FIGURA 5.14 – Exemplo de aplicação com duas cargas concentradas

Solução:

- *Verificação ao cisalhamento longitudinal*

Método m-k

De acordo com a expressão do método *m – k*:

$$V_{\text{usd}} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right)$$

Onde,

V_{usd} - resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal;

ϕ_v - coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal ($\phi_v=0,70$);

L' = vão de cisalhamento ($L'=0,45\text{m}$).

Logo, aplicando-se os fatores de ponderação adequados para os materiais empregados e igualando-se a reação de apoio com V_{usd} tem-se:

$$\frac{[\sum(\gamma_g \cdot w_p)]L + \sum(\gamma_q \cdot 2P)}{2} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{1}{L} + k \right)$$

$$\frac{[(1,4 \cdot 2,76)2,5 + 1,5 \cdot 2P]}{2} = 0,70 \cdot 1 \cdot 0,111 \left(37,473 \cdot \frac{1}{0,45} + 223,32 \right)$$

=

Método da Interação Parcial

Seguindo a mesma sistemática de cálculo do caso anterior, a TAB. 5.4 resume o procedimento para o cálculo da carga concentrada máxima atuante. Neste caso, esta carga é determinada ao se igualar o momento atuante, M_{sd} , ao momento resistente, M_{Rd} , no ponto de aplicação da carga, onde se encontra a seção crítica ($L_x = 450\text{mm}$).

O momento atuante, M_{sd} , no ponto de aplicação da carga concentrada, considerando os fatores de ponderação adequados, é dado conforme a Eq. 5.27.

$$M_{\text{sd}} = \left(1,5P + \frac{1,4w_p \cdot L}{2} \right) \cdot L_x - \frac{(1,4w_p) \cdot L_x^2}{2} \quad (5.27)$$

Da TAB. 5.4 determina-se o valor do momento resistente, M_{Rd} , na seção crítica $L_x = 450\text{mm}$ que, levando-se na Eq. 5.27, obtém-se:

=

TABELA 5.4— Método da Interação Parcial – duas cargas concentradas

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	x (mm)	z (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	M_{Rd} (kN.m/m)	M_{sd} (kN.mm)
1	0	0	0,000	110,000	2,813	2,813	0,000
2	100	18	1,482	109,259	2,813	4,780	2,534
3	200	36	2,965	108,518	2,813	6,720	5,030
4	300	54	4,447	107,776	2,813	8,633	7,487
5	400	72	5,929	107,035	2,578	10,285	9,906
6	450	81	6,671	106,665	2,461	11,101	11,101
7	500	90	7,412	106,294	2,344	11,910	11,250
8	600	108	8,894	105,553	2,109	13,509	11,521
9	700	126	10,376	104,812	1,875	15,081	11,753
10	800	144	11,859	104,071	1,640	16,626	11,946
11	900	162	13,341	103,329	1,405	18,145	12,100
12	1000	180	14,824	102,588	1,171	19,637	12,216
13	1100	198	16,306	101,847	0,936	21,102	12,294
14	1200	216	17,788	101,106	0,702	22,541	12,332
15	1300	234	19,271	100,365	0,467	23,953	12,332
16	1400	252	20,753	99,624	0,233	25,338	12,294
17	1500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	12,216
18	1600	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	12,100
19	1700	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,946
20	1800	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,753
21	1900	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,521
22	2000	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,250
23	2050	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,101
24	2100	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	9,906
25	2200	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	7,487
26	2300	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	5,030
27	2400	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	2,534
28	2500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	0,000

A FIG.5.15 ilustra a relação entre o momento fletor atuante, M_{sd} , e o momento fletor resistente, M_{Rd} , mostrando um dimensionamento seguro, uma vez que $M_{sd} \leq M_{Rd}$ em todo o vão da laje mista. A seção transversal crítica é definida pelo ponto no qual a curva de M_{sd} tangencia a curva de M_{Rd} . Neste caso, sendo $L_x = 450\text{mm} \leq L_{sf} = 1499\text{mm}$, o colapso é considerado por cisalhamento longitudinal.

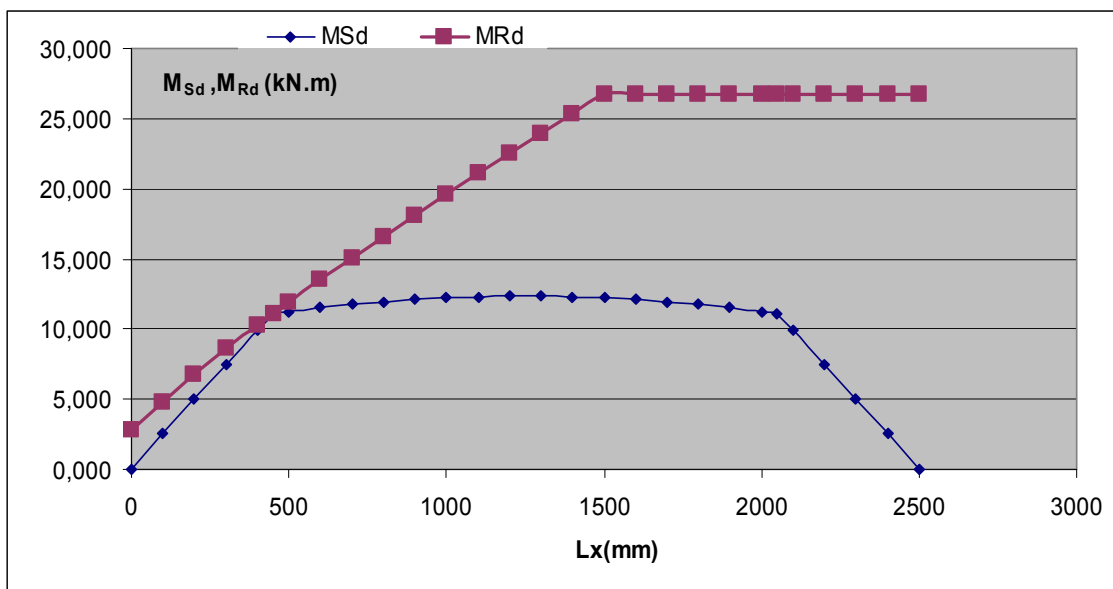


FIGURA 5.15-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) - duas cargas concentradas aplicadas equidistantes dos apoios

Caso 3 – Carga concentrada aplicada no meio do vão

A FIG. 5.16 ilustra o modelo estrutural com a carga concentrada aplicada no meio do vão.

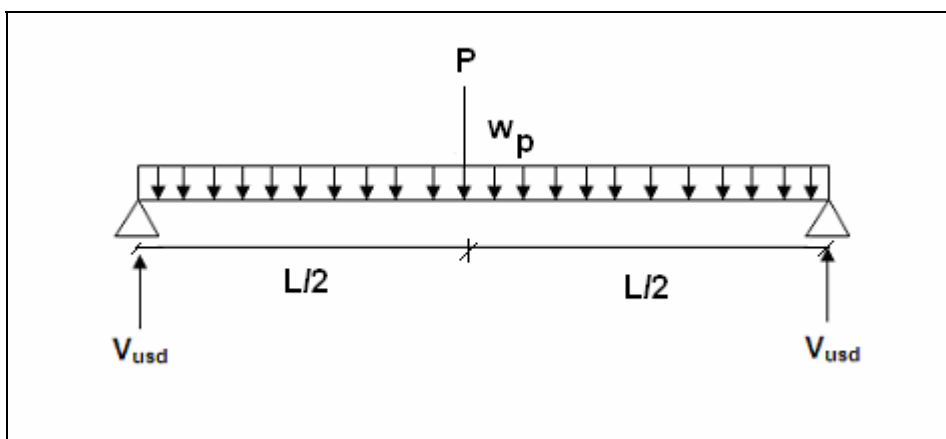


FIGURA 5.16 – Exemplo de aplicação com carga concentrada no meio do vão

Solução:

- *Verificação ao cisalhamento longitudinal*

Método m-k

De acordo com a expressão do método $m - k$:

$$V_{\text{usd}} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right)$$

Onde,

V_{usd} - resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal;

ϕ_v - coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal ($\phi_v=0,70$);

L' = vão de cisalhamento ($L'=1,25\text{m}$).

Logo, aplicando-se os fatores de ponderação adequados para os materiais empregados e igualando-se a reação de apoio com V_{usd} , tem-se:

$$\frac{[\sum(\gamma_g \cdot w_p)]L + \sum(\gamma_q \cdot P)}{2} = \phi_v \cdot b \cdot d_p \left(m \frac{1}{L'} + k \right)$$

$$\frac{[(1,4 \cdot 2,76)2,5 + 1,5 \cdot P]}{2} = 0,70 \cdot 1 \cdot 0,111 \left(37,473 \cdot \frac{1}{1,25} + 223,32 \right)$$

=

Método da Interação Parcial

Seguindo a mesma sistemática de cálculo do caso anterior, a TAB. 5.5 resume o procedimento para o cálculo da carga concentrada máxima atuante. Neste caso, esta carga é determinada ao se igualar o momento atuante, M_{sd} , ao momento resistente, M_{Rd} , no ponto de aplicação da carga, onde se encontra a seção crítica ($L_x = 1250\text{mm}$).

TABELA 5.5 - Método da Interação Parcial - carga concentrada no meio do vão

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	x (mm)	z (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	M_{Rd} (kN.m/m)	M_{sd} (kN.m)
1	0	0	0,000	110,000	2,813	2,813	0,000
2	100	18	1,482	109,259	2,813	4,780	2,082
3	200	36	2,965	108,518	2,813	6,720	4,126
4	300	54	4,447	107,776	2,813	8,633	6,131
5	400	72	5,929	107,035	2,578	10,285	8,097
6	450	81	6,671	106,665	2,461	11,101	9,066
7	500	90	7,412	106,294	2,344	11,910	10,025
8	600	108	8,894	105,553	2,109	13,509	11,914
9	700	126	10,376	104,812	1,875	15,081	13,764
10	800	144	11,859	104,071	1,640	16,626	15,576
11	900	162	13,341	103,329	1,405	18,145	17,349
12	1000	180	14,824	102,588	1,171	19,637	19,083
13	1100	198	16,306	101,847	0,936	21,102	20,779
14	1200	216	17,788	101,106	0,702	22,541	22,436
15	1250	225	18,529	100,735	0,585	23,250	23,250
16	1300	234	19,271	100,365	0,467	23,953	22,436
17	1400	252	20,753	99,624	0,233	25,338	20,779
18	1500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	19,083
19	1600	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	17,349
20	1700	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	15,576
21	1800	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	13,764
22	1900	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	11,914
23	2000	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	10,025
24	2050	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	9,066
25	2100	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	8,097
26	2200	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	6,131
27	2300	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	4,126
28	2400	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	2,082
29	2500	269,871	22,225	98,888	0,000	26,687	0,000

O momento atuante, M_{sd} , no ponto de aplicação da carga concentrada, considerando os fatores de ponderação adequados, é dado conforme a Eq. 5.28.

$$M_{sd} = \left(\frac{1,5P}{2} + \frac{1,4w_p \cdot L}{2} \right) \cdot L_x - \frac{(1,4w_p) \cdot L_x^2}{2} \quad (5.28)$$

Da TAB. 5.5 determina-se o valor do momento resistente, M_{Rd} , na seção crítica $L_x=1250\text{mm}$ que, levando-se na Eq. 5.28, obtém-se:

=

A FIG.5.17 ilustra a relação entre o momento fletor atuante, M_{sd} , e o momento fletor resistente, M_{Rd} , mais uma vez mostrando um dimensionamento seguro, uma vez que $M_{sd} \leq M_{Rd}$ em todo o vão da laje mista. A seção transversal crítica é definida pelo ponto no qual a curva de M_{sd} tangencia a curva de M_{Rd} . Neste caso, sendo $L_x = 1250\text{mm} \leq L_{sf} = 1499\text{mm}$, o colapso é considerado por cisalhamento longitudinal.

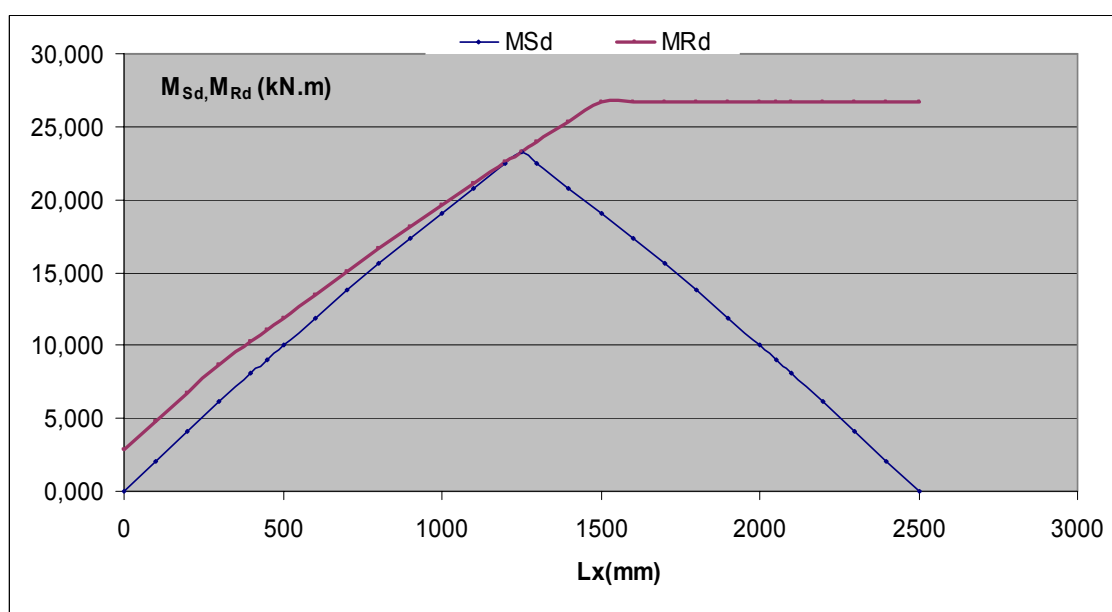


FIGURA 5.17-Verificação da laje mista ao cisalhamento longitudinal (MIP) – carga concentrada aplicada no meio do vão

A TAB. 5.6 apresenta a análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos m-k e MIP.

TABELA 5.6-Análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos *m-k* e MIP

Casos	m-k	MIP	m-k / MIP
1	$q_{var} = 9,16 \text{ kN/m}^2$	$q_{var} = 13,22 \text{ kN/m}^2$	0,69
2	$P = 12,66 \text{ kN}$	$P = 13,81 \text{ kN}$	0,92
3	$P = 19,80 \text{ kN}$	$P = 21,58 \text{ kN}$	0,92

6

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar a análise do comportamento e da resistência de um sistema de laje mista aço-concreto, durante todas as fases do carregamento após a cura do concreto até o colapso, por meio do método da Interação Parcial.

Para se alcançar este objetivo foram utilizados os resultados do programa de ensaios de laboratório, realizados por RODRIGUES & LAVALL (2005), onde se empregou o Steel DECK 60 da USIMINAS. Os ensaios visavam identificar e avaliar os vários parâmetros que influenciam as características globais da resistência do sistema misto e, dessa forma, identificar o seu modo de colapso.

Esse programa consistiu de uma série de ensaios de flexão do sistema de laje mista, em 12 modelos com vãos simples bi-apoiados, os quais forneceram os dados necessários para a avaliação da resistência última e do comportamento do sistema de laje mista. Dos 12 modelos, 6 foram construídos com espessura da fôrma de aço igual a 0,80 mm, enquanto os outros 6 tiveram fôrmas com

espessuras de 0,95 mm. O vão dos modelos (L), a altura total das lajes (h_t), bem como os vãos de cisalhamento (L'), foram variados com o objetivo de se cobrir, adequadamente, o conjunto de parâmetros que têm maior influência no comportamento estrutural do sistema misto.

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios basearam-se nas recomendações internacionais mais utilizadas na literatura técnica sobre o assunto, permitindo afirmar que o trabalho desenvolvido seguiu uma metodologia adequada e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

A avaliação dos resultados dos ensaios foi feita baseando-se nas relações carga x deslizamento relativo de extremidade, carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço, as quais foram obtidas das leituras feitas nos ensaios, em todos os incrementos de carga, de todas as fases do carregamento após a cura do concreto até o colapso.

Essa análise mostrou-se adequada para o conhecimento do comportamento dúctil de todos os modelos ensaiados e permitiu determinar, com precisão, o modo de colapso do sistema misto, definido como colapso por *cisalhamento longitudinal*. A maneira como esse colapso se caracterizou para este sistema de laje mista é bastante similar à de outros sistemas do tipo fôrma de aço com mossa, como relatado na bibliografia sobre o assunto, o que confirma a adequação da metodologia utilizada no presente trabalho.

Em função dos resultados experimentais dos ensaios e, posteriormente, com a definição do modo de colapso, procurou-se estabelecer critérios para o cálculo da resistência última ao cisalhamento longitudinal, visando determinar expressões analíticas que pudessem ser utilizadas em escritórios de projeto. Para isso, foram estudados os dois métodos recomendados pelo EUROCODE (1993): o método $m - k$ e o método da Interação Parcial.

O método “ $m - k$ ” tem sido empregado internacionalmente com bons resultados, principalmente para fôrmas que apresentam comportamento frágil e vãos pequenos, não sendo, entretanto, adequado para se levar em conta a ancoragem de extremidade ou o uso da armadura longitudinal de reforço na resistência do sistema misto.

Nesse trabalho foi utilizada a expressão semi-empírica adotada na NBR 14323 (1999), onde as constantes m e k foram determinadas a partir dos dados experimentais, considerando a reta característica traçada a partir de um modelo estatístico apropriado. As análises realizadas para se definir os valores de m e k da reta característica e para determinar o coeficiente de resistência ao cisalhamento, $\phi_v = 0,70$, apresentaram boa correlação quando levada em conta a análise comparativa em serviço e outras normas técnicas internacionais. Isso confirma, novamente, a consistência e confiabilidade dos resultados que foram aqui alcançados, atendendo aos critérios exigidos.

O método da Interação Parcial (MIP) surge como uma alternativa ao método “ $m - k$ ” na verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal, explorando melhor o comportamento dúctil das fôrmas com boa ligação mecânica e grandes vãos. Além do mais, esse método permite que se considerem as contribuições das ancoragens de extremidade e das armaduras de reforço, aumentando a resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista.

O modelo analítico utilizado no método da Interação Parcial para análise do sistema de laje mista permite uma melhor compreensão do comportamento desse sistema, o que possibilita ampliar a sua faixa de aplicação sem a necessidade de muitos ensaios adicionais.

Os dois métodos mostraram-se bastante eficientes no cálculo da resistência nominal ao cisalhamento longitudinal dos modelos ensaiados e apresentaram boa correlação com os resultados obtidos nos ensaios, como se observou na

TAB. 5.2. O exemplo prático de aplicação desenvolvido no CAP. 5 permitiu fazer uma análise comparativa entre os dois métodos apresentados, em relação à resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal.

As aplicações nos exemplos com cargas concentradas mostraram uma excelente correlação entre os resultados obtidos pelos métodos “ $m - k$ ” e MIP, sendo que a diferença de aproximadamente 9% entre eles pode ser atribuída ao coeficiente de resistência que no método “ $m - k$ ” vale $\phi_v = 0,70$ e no MIP vale $\phi_v = 1/1,25 = 0,80$.

No exemplo com carga distribuída, o resultado pelo método “ $m - k$ ” mostrou-se mais conservador em relação ao MIP, o que pode ser atribuído aos seguintes fatores, entre outros:

- o coeficiente de resistência $\phi_v = 0,70$ do método “ $m - k$ ” é mais conservador do que o coeficiente $\phi_v = 0,80$ do MIP;
- a aproximação utilizada no método “ $m - k$ ”, para transformar a condição do ensaio em laboratório, com duas cargas concentradas, numa condição equivalente de carga uniformemente distribuída, utilizada em projetos, onde se adota $L' = L/4$, é conservadora;
- a resistência nominal das mossas ao cisalhamento, $\tau_{u,Rk}$, obtida no MIP conforme a metodologia do EUROCODE (1993) é conservadora, uma vez que incorpora a influência da resistência ao cisalhamento devida ao atrito da região dos apoios, superestimando, dessa forma, a resistência das lajes mistas, principalmente aquelas de vãos maiores.

Após essas considerações, algumas propostas para desenvolvimento em estudos posteriores podem ser apresentadas, uma vez que vários aspectos interessantes e relevantes surgiram no decorrer deste trabalho, os quais devem ser pesquisados e estudados:

- observou-se que o efeito do atrito dos apoios na resistência ao cisalhamento longitudinal não é considerado adequadamente pelo método da Interação

Parcial, devendo, portanto, esse efeito ser mais bem estudado, o que levará, certamente, a uma melhor avaliação da resistência nominal das mossas ao cisalhamento;

- o uso de conectores de cisalhamento, do tipo *Stud Bolt*, nas extremidades das lajes mistas, aumenta a resistência ao cisalhamento longitudinal, uma vez que dificulta o deslizamento horizontal relativo entre o concreto e a fôrma de aço, contribuindo para o aumento do grau de interação ao cisalhamento longitudinal. O efeito desse uso pode ser estudado pelo método da Interação Parcial;
- é importante ressaltar que esse sistema de lajes mistas também pode ser empregado em construções convencionais de concreto armado. Sugere-se, então, a realização de um estudo mais aprofundado da aplicação desse sistema de piso em estruturas de concreto armado, tendo-se em vista que no Brasil esse sistema tem sido usado, principalmente, em construções com estruturas de aço;
- tendo em vista que a resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista depende principalmente da vinculação mecânica entre a fôrma de aço e o concreto, acredita-se que possam ser estudados outros tipos de mossas, com formas e direções diferentes, para se avaliar a eficiência e influência das mossas nesta resistência do sistema misto;

BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 5739 (1960): *Ensaio de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6118 (1978): *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 5738 (1984): *Concreto: Moldagem e cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8800 (1986): *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Método dos Estados Limites*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2ª ed.

ABNT NBR 14323 (1999): *Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8800 (2007): *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Versão novembro de 2007. Rio de Janeiro.

ANSI/ASCE 3-91 (1992) - *Standard for the Structural Design of Composite Slabs*, American Society of Civil Engineers, ASCE STANDARDS, December.

ASTM A370 – 97a (1997) – *Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products*.

BRITISH STANDARD (1982) - *Structural Use of Steelwork in Building, Part 4, Code of Practice for Design Floor with Profiled Steel Sheeting*, British Standards Institution

CSSBI (1988-a) - CRITERIA FOR THE TESTING OF COMPOSITE SLABS - Canadian Sheet Steel Building Institute, Willodale, Ontario, Canada, revised November.

CSSBI (1988-b) - CRITERIA FOR THE DESIGN OF COMPOSITE SLABS Canadian Sheet Steel Building Institute, Willodale, Ontario, Canada, November.

CSSBI (1988-c) - STANDARD FOR COMPOSITE STEEL DECK - Canadian Sheet Steel Building Institute, Willodale, Ontario, Canada, revised December.

DANIELS, B. J. and CRISINEL, M. (1993) - *Composite Slab Behavior and Strength Analysis. Part I : Calculation Procedure*. Journal of Structural Engineering (ASCE). Vol 119, N° 1, January, pag. 16 a 35.

DANIELS, B. J. and CRISINEL, M. (1993) - *Composite Slab Behavior and Strength Analysis. Part II : Comparisions with Test Results and Parametric Analysis*. Journal of Structural Engineering (ASCE). Vol 119, N° 1, January, pag. 36 a 49.

EUROCODE (1993) - *Design of Composite Steel and Concrete Structures, Parts 3.4, 7 and 10.3*. European Prestandard

JOHNSON, R. P. (1994) - *Composite Structures of Steel and Concrete - Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*, vol. 01, Blackwell Scientific Publications, 2ª edição, Oxford.

MELO, C. B. F. (1999) - *Análise do Comportamento e da Resistência do Sistema de Lajes Mistas*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais, Fevereiro

MELO, C. B. F., LAVALL, A. C. C., CALIXTO, J. M. F., PIMENTA, R. J., MONTEIRO, R. C. (1997) - *Análise da Resistência e do Comportamento do Sistema de Lajes Mistas - "Steel Deck"*: XXVIII Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural. São Carlos: EESC-USP. Vol 1, p. 13-22

QUEIROZ G, PIMENTA, R. J. & MATA L.A.C. - (2001) – *Elementos das estruturas mistas aço-concreto*. Belo Horizonte,-MG, Novembro.

RODRIGUES F. C. & LAVALL A. C. C. (2005) – *Estudo do comportamento estrutural do sistema de laje mista DECK 60 – USIMINAS*. Relatório técnico

RONDAL, J. & MOUTAFIDOU, A. (1996) - Study of Shear Bond in Steel Composite Slabs, p. 259-264

SCHUSTER, Reinhold M., (1984) - *Strength and Behaviour of the P - 2430 - 12HB, Composite Slab System (normal weight concrete)*, Report N° WRI 110-12-02 Department of Civil Engineering, University of Waterloo

SOUZA NETO, A. S. (2001) - *Análise do Comportamento e da Resistência de um Sistema de Lajes Mistas com ancoragem de extremidade com considerações sobre a fôrma de aço isolada e o atrito nos apoios*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro

SOUZA NETO, A. S., LAVALL, A. C. C., MELO, C. B. F., CALIXTO, J. M. F., PIMENTA, R. J., MONTEIRO, R. C. (2000) – *Capacidade de carregamento de lajes mistas aço concreto com ancoragem de extremidade*. XXIX Jornadas Sul-

americanas de Engenharia Estrutural. Montevideu: Universidad de la República. Vol 1, p. 1-12 .

SOUZA NETO, A. S., LAVALL, A. C. C., MELO, C. B. F., CALIXTO, J. M. F., PIMENTA, R. J. (2001) — *Análise do Comportamento e da Resistência de Lajes Mistas com Stud Bolt* –IV Seminário Internacional – O uso de estruturas metálicas na construção civil e I Congresso internacional da construção metálica – I CICOM. São Paulo. Vol 1, p. 1-12

STEEL DECK INSTITUTE (1995) - *Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks*, SDI - Steel Deck Institute, Canton, Ohio, Pub. 29

VELJKOVIC', M. (1993) - Development of a New Sheeting Profile for Composite Floor - Experimental Study and Interpretation - Research Report, Division of Steel Structures - Luleå University of Technology, Tuleå - Swedish.

VELJKOVIC', M. (1996) - *Behaviour and Resistance of Composite Slabs - Experiments and Finite Element Analysis* - Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Tuleå - Swedish.

ANEXO A

**APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GRÁFICA DOS
RESULTADOS**

A.1 Gráficos de Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade

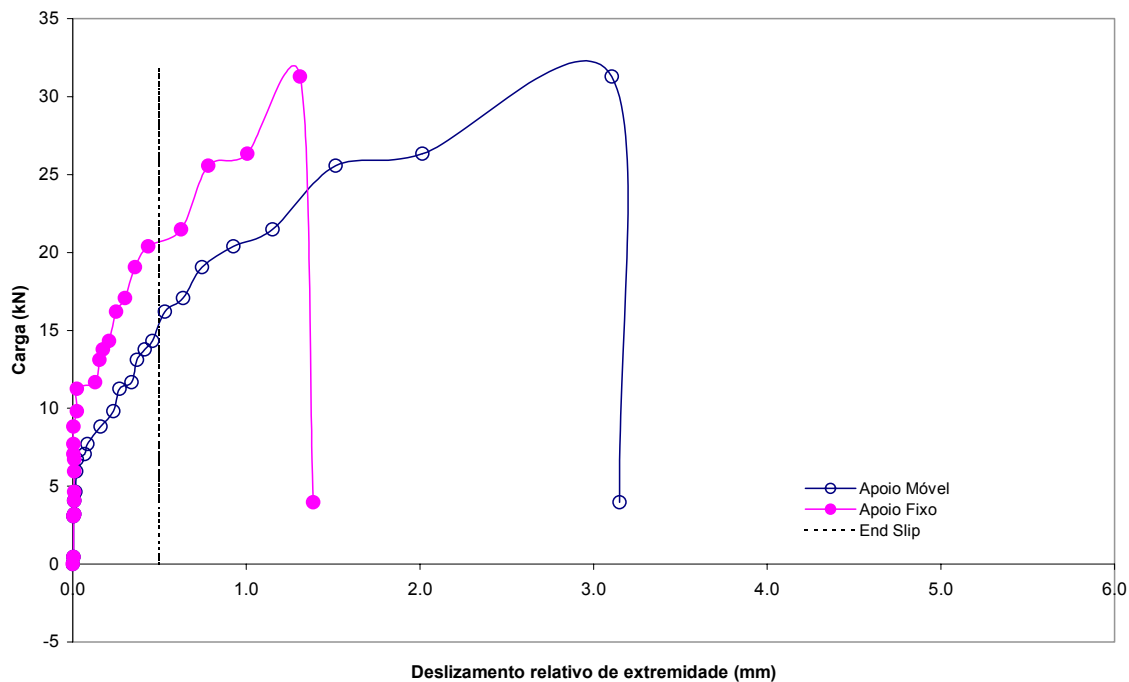


FIGURA A.1 - Modelo 01A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

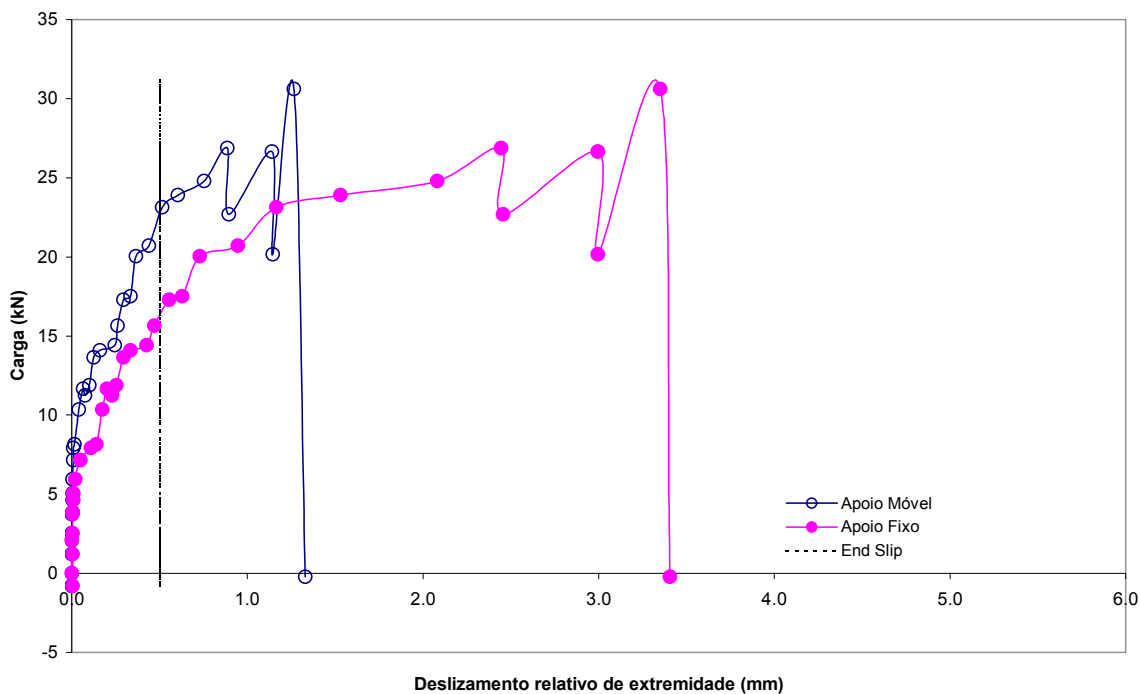


FIGURA A.2 - Modelo 01B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

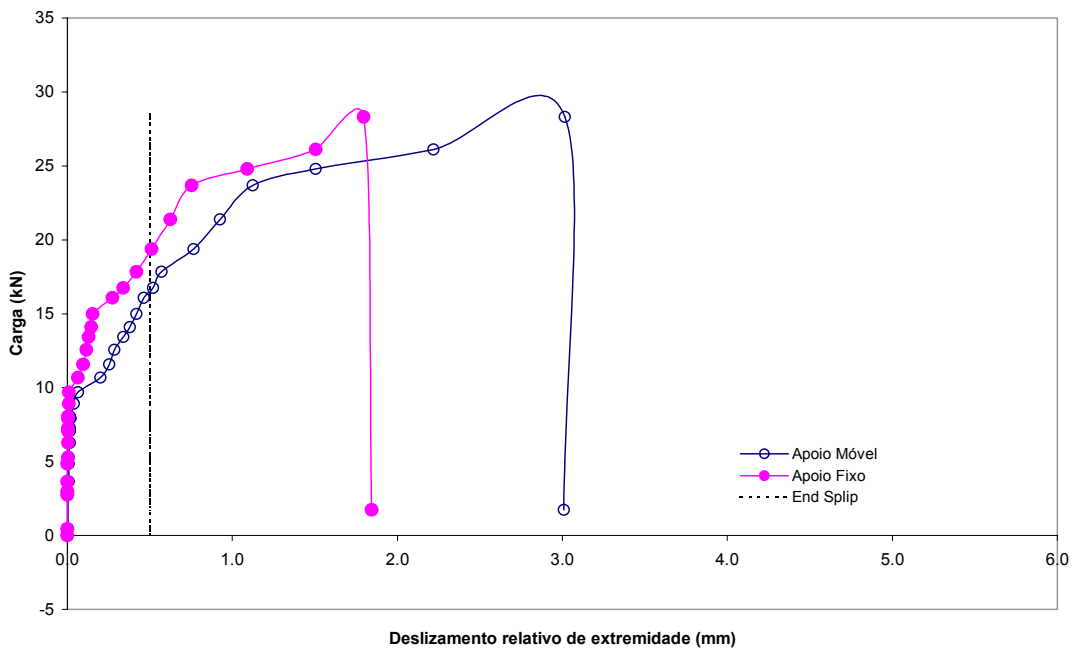


FIGURA A.3 - Modelo 01C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

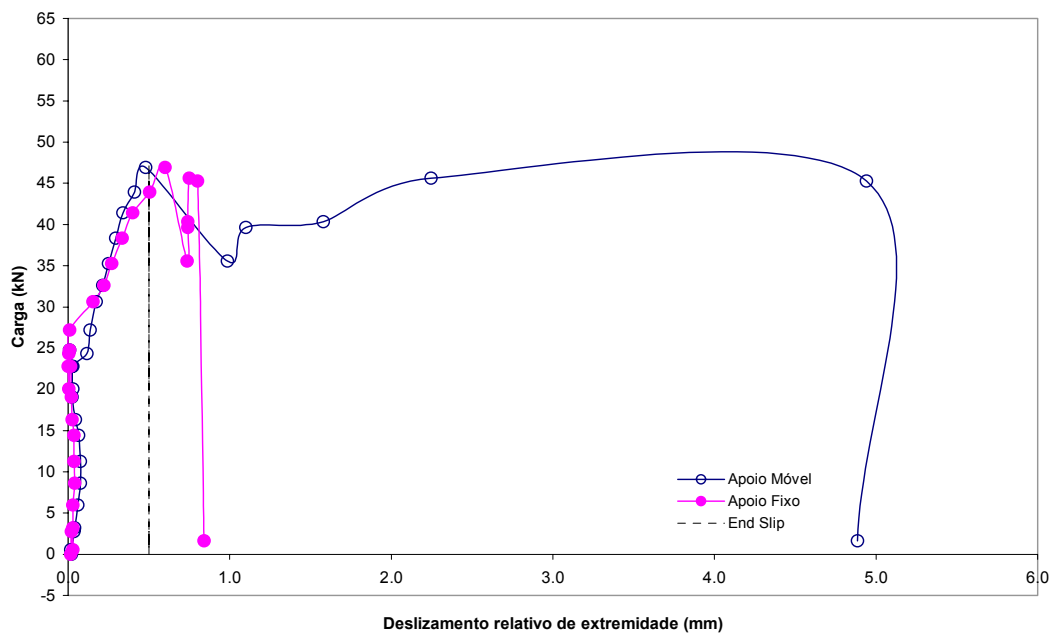


FIGURA A.4 - Modelo 02A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

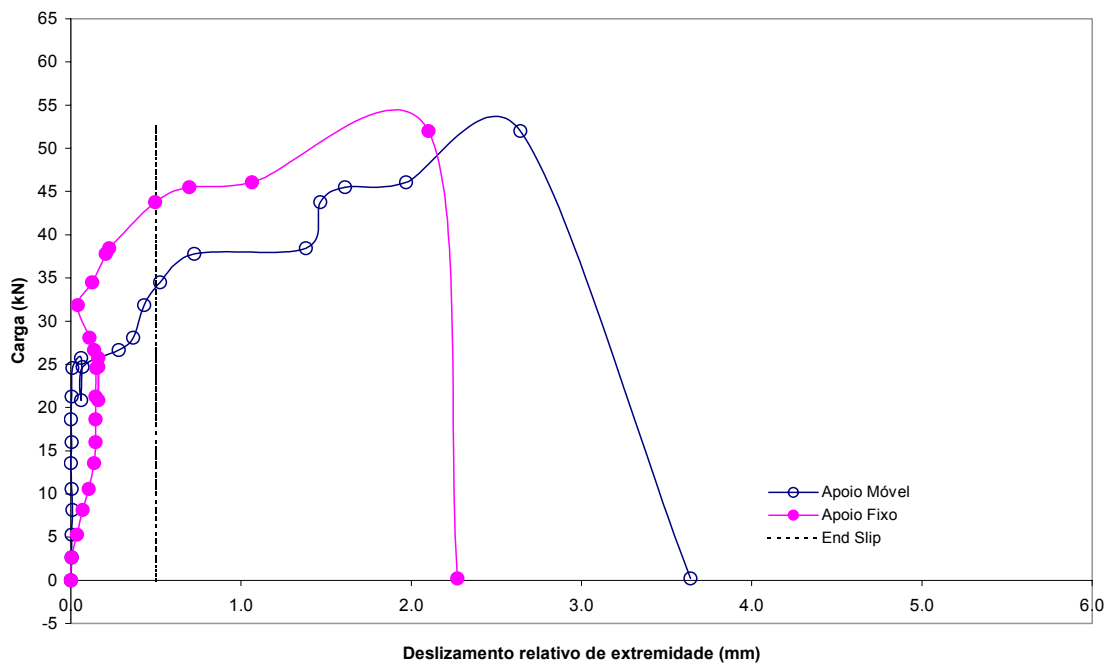


FIGURA A.5 - Modelo 02B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

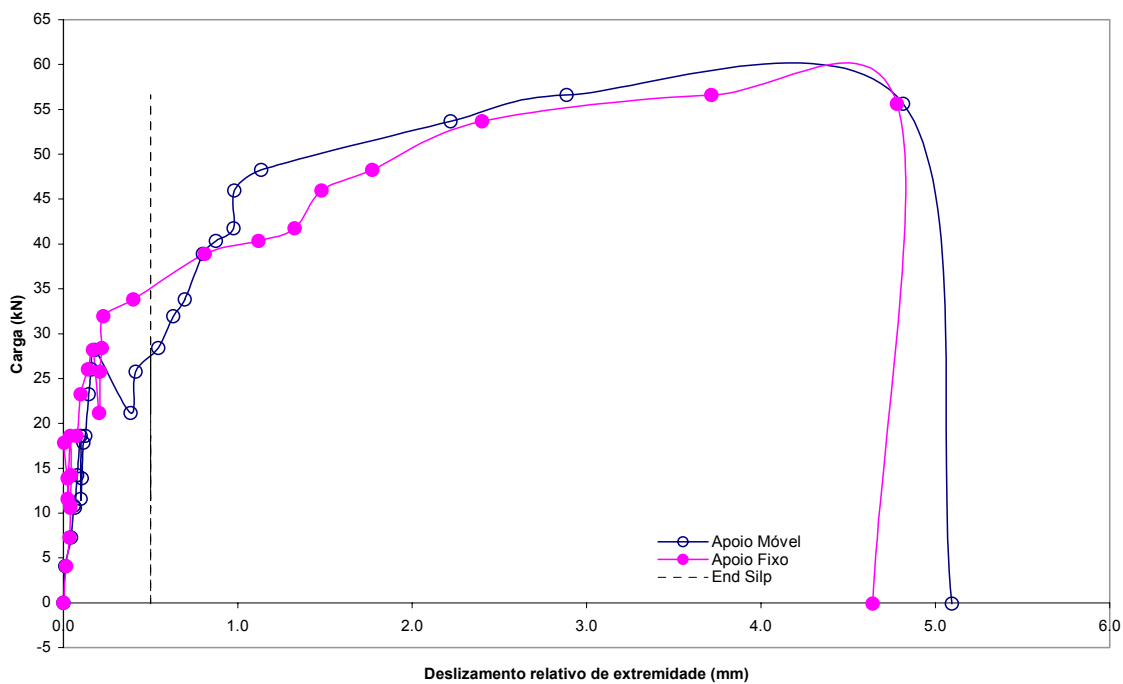


FIGURA A.6 - Modelo 02C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

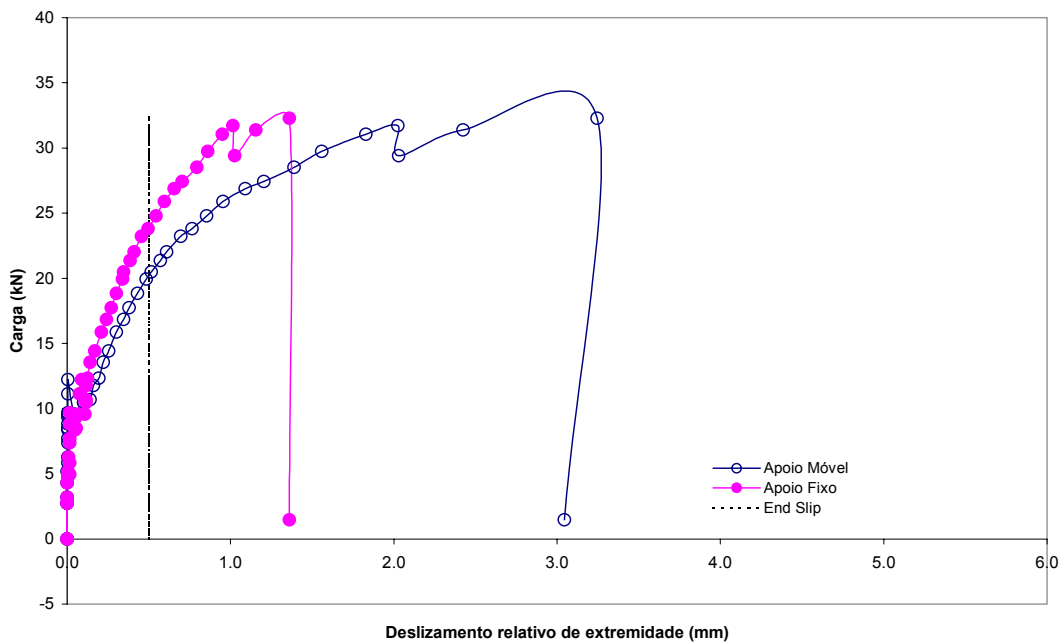


FIGURA A.7 - Modelo 03A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

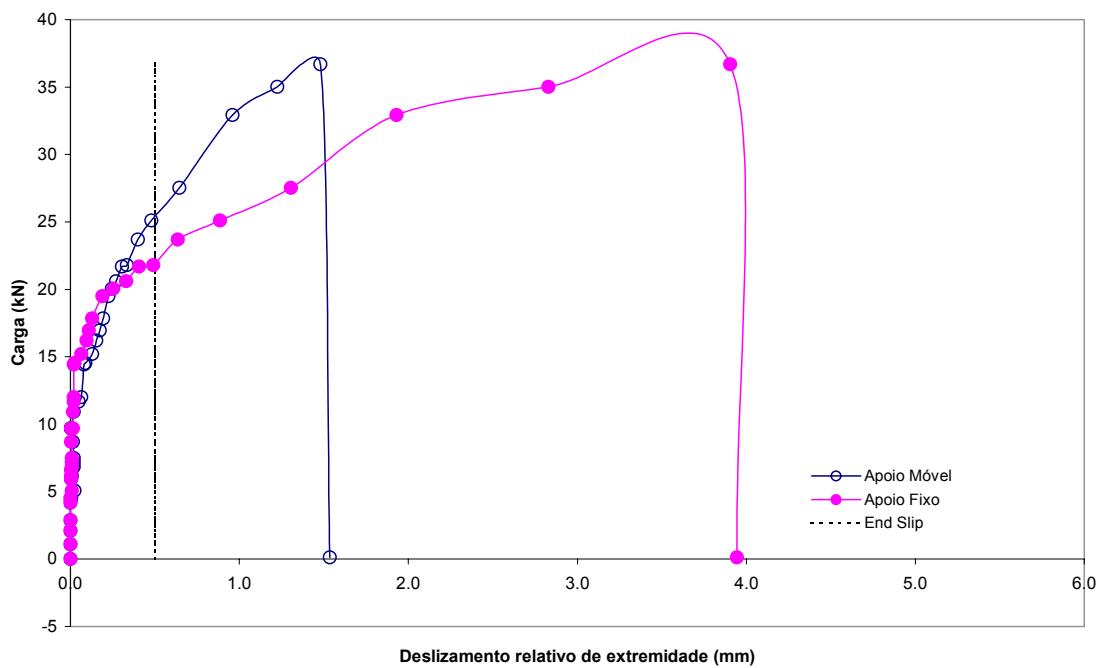


FIGURA A.8 - Modelo 03B ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

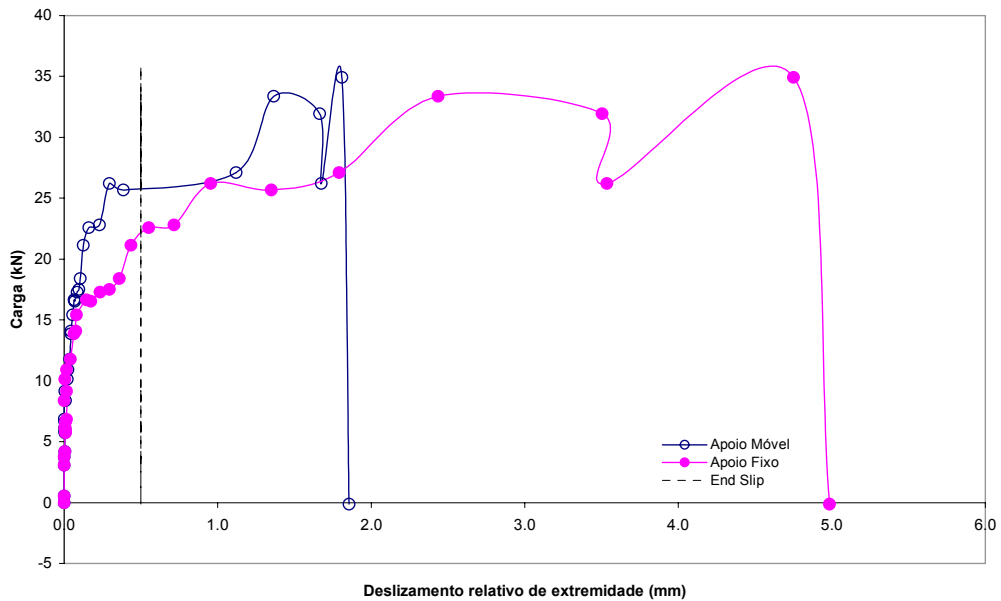


FIGURA A.9 - Modelo 03C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

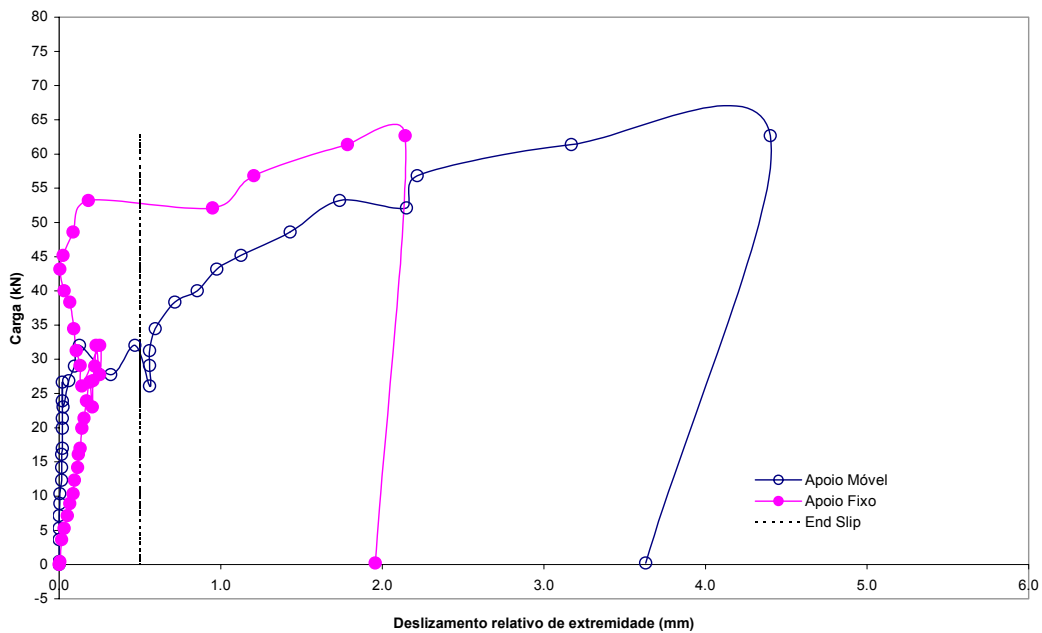


FIGURA A.10 - Modelo 04A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

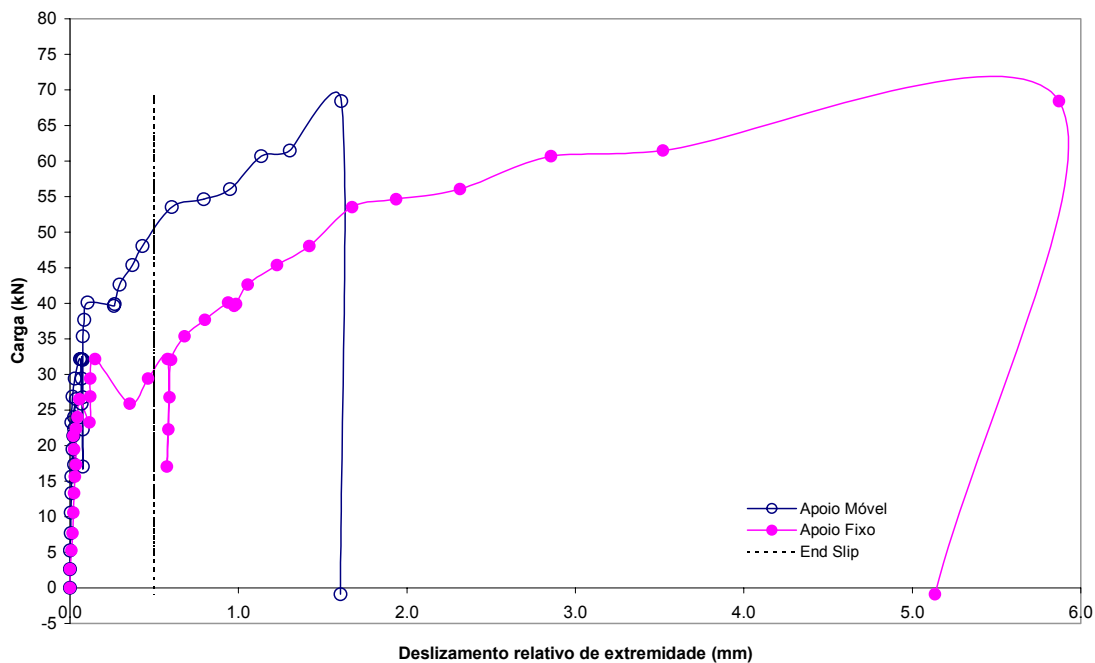


FIGURA A.11 - Modelo 04B ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

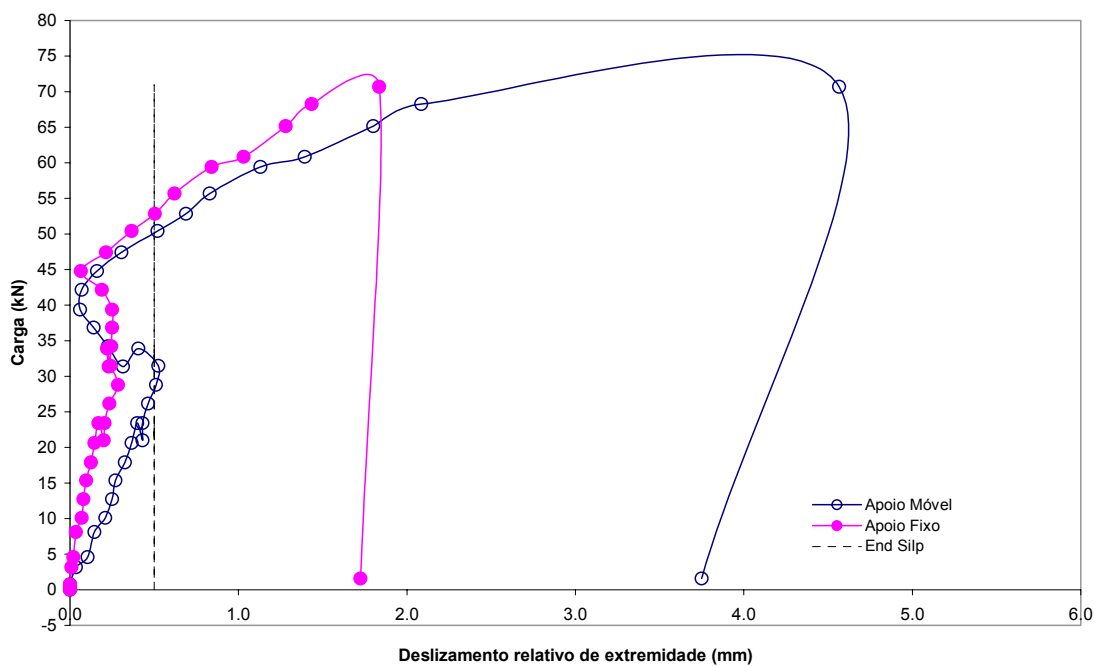


FIGURA A.12 - Modelo 04C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

A.2 Gráficos de Carga x Flecha no Meio do Vão

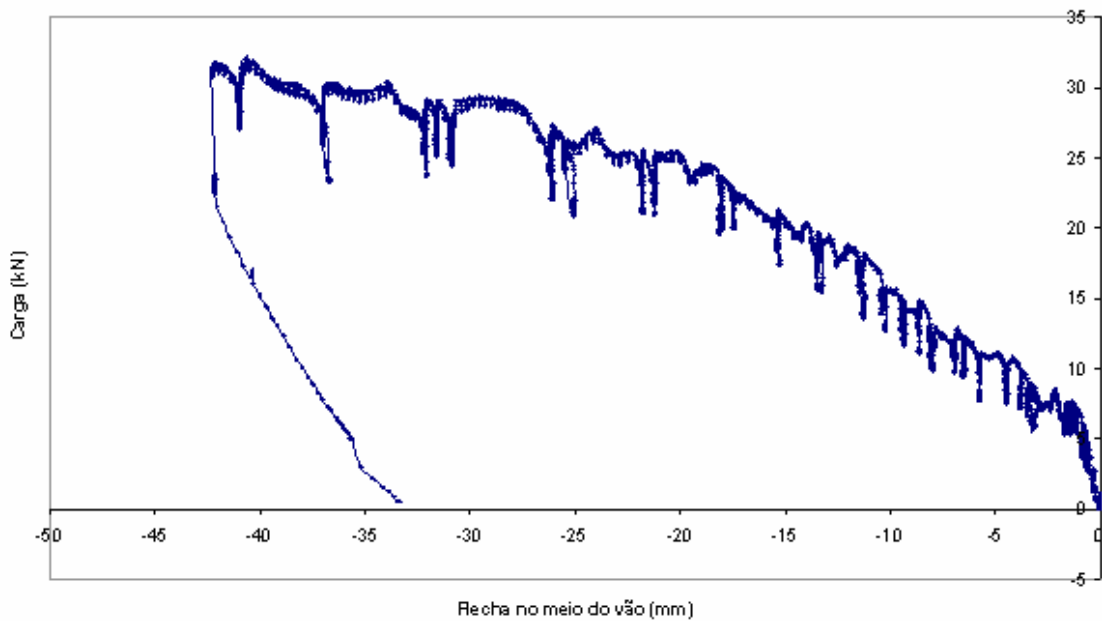


FIGURA A.13 - Modelo 01A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

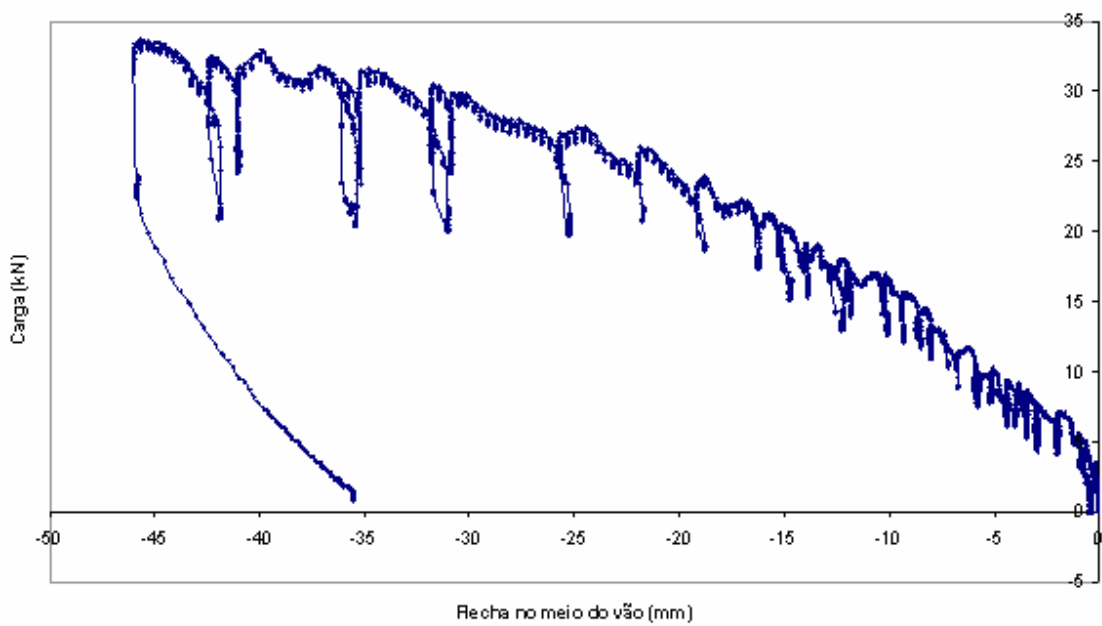
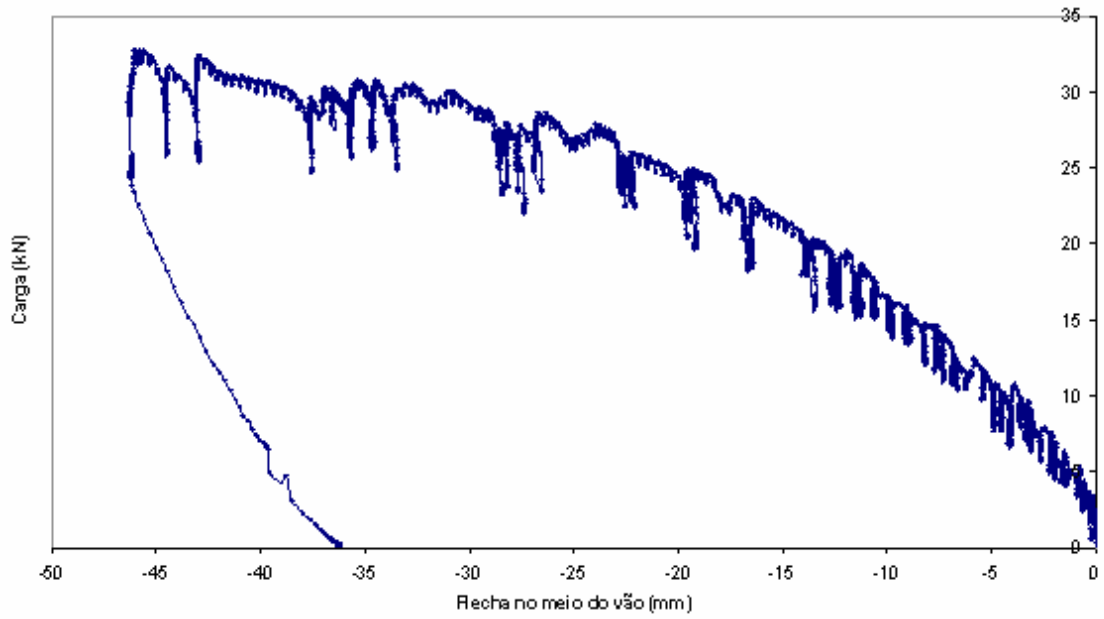
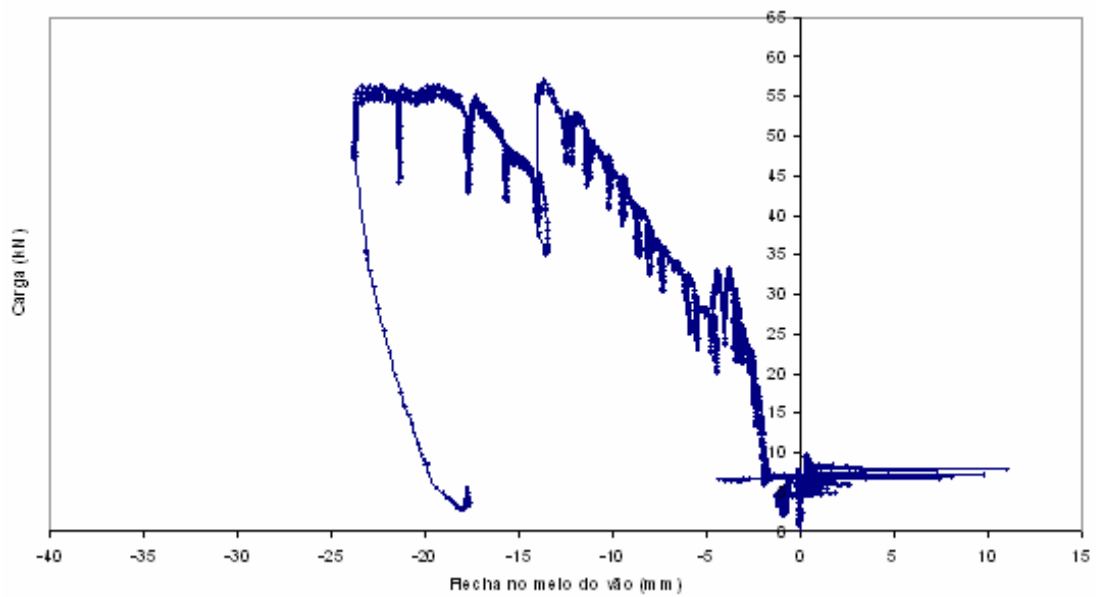
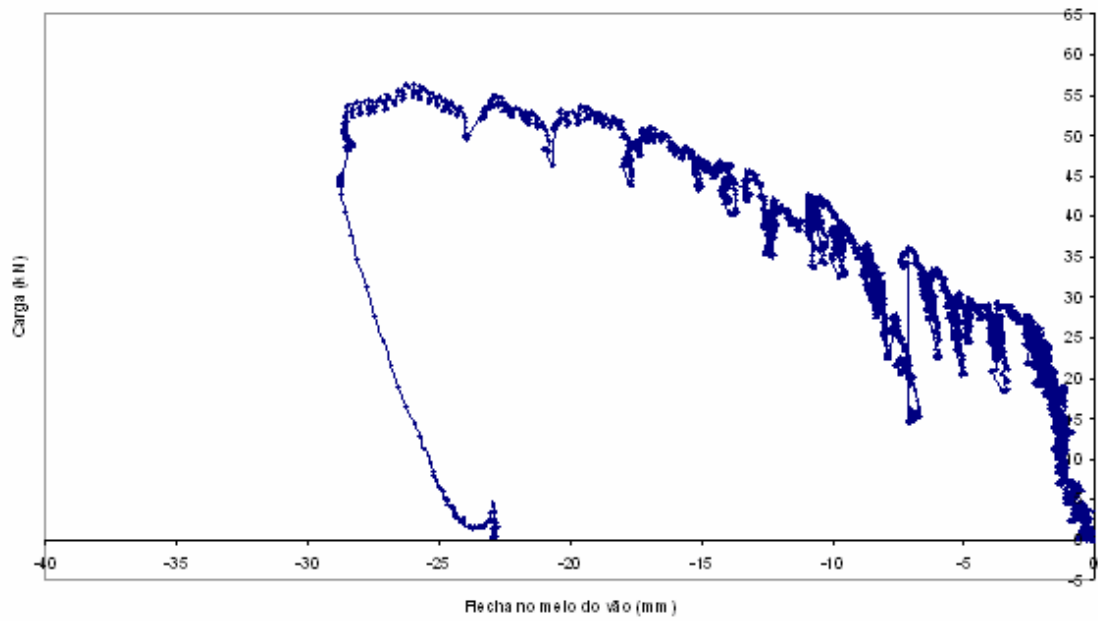
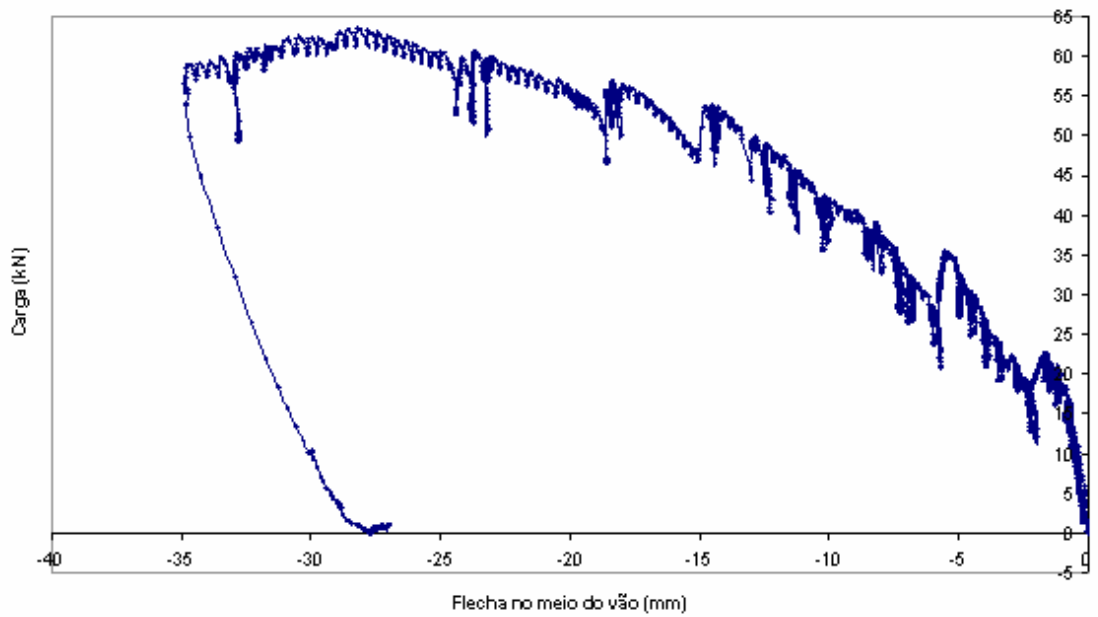
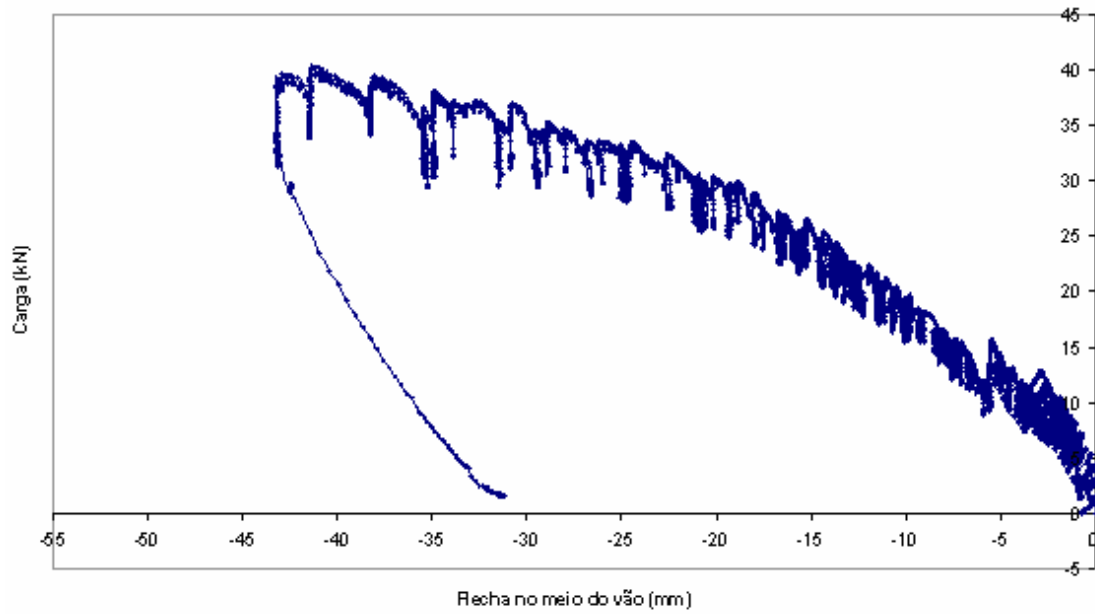
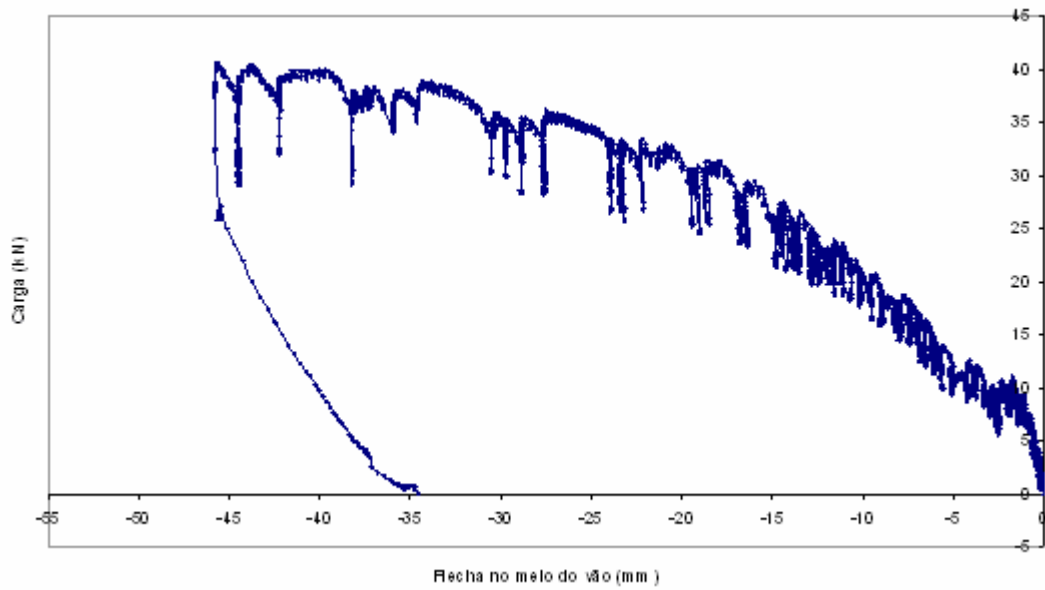
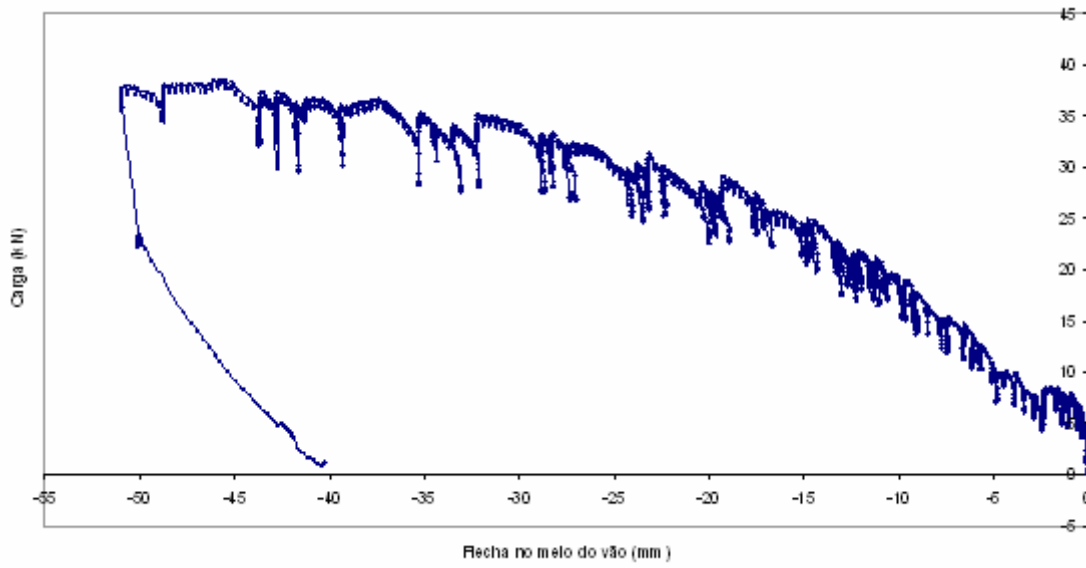
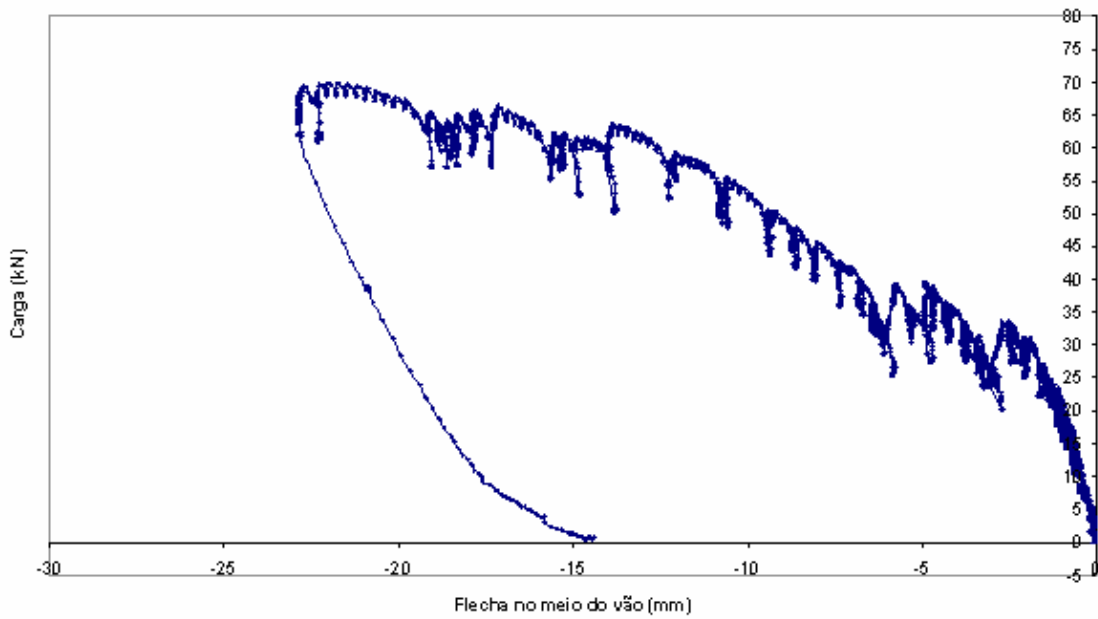


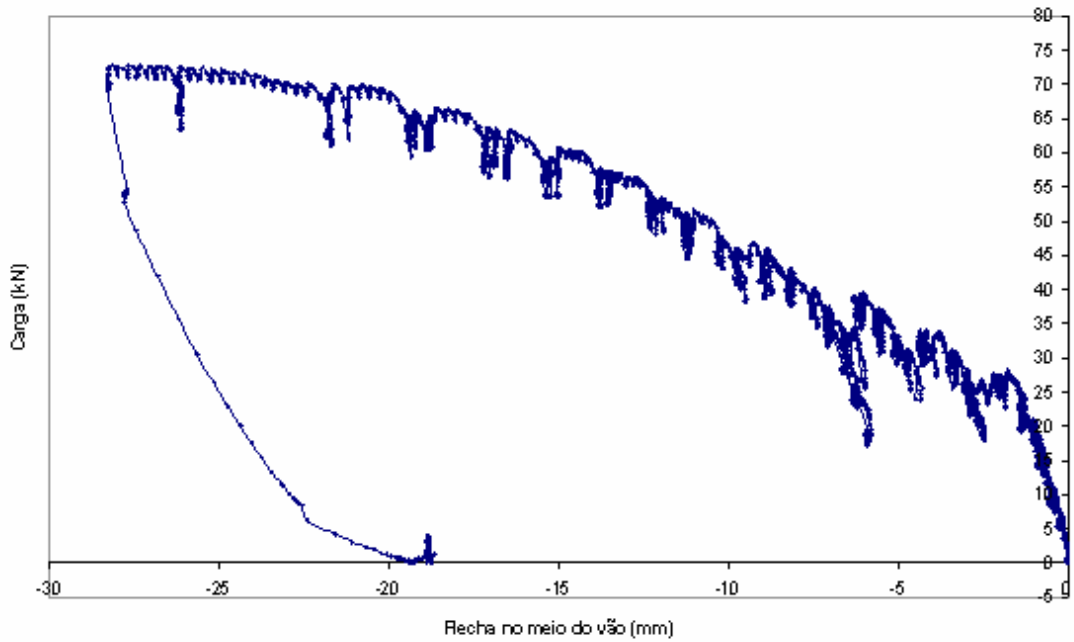
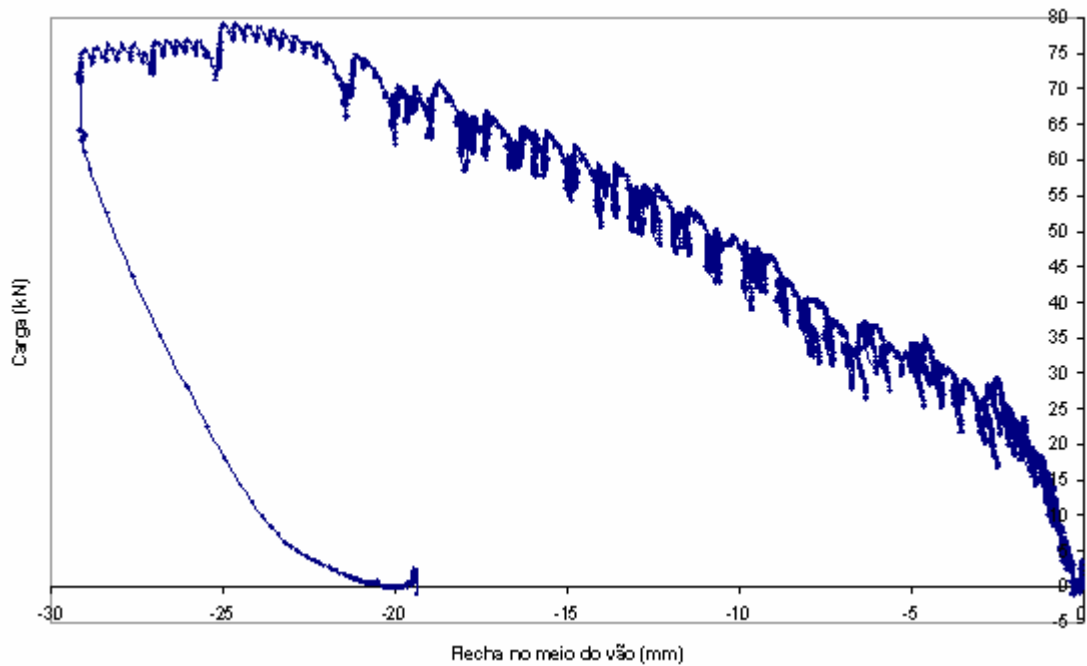
FIGURA A.14 - Modelo 01B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

FIGURA A.15 -Modelo 01C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)FIGURA A.16 - Modelo 02A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

FIGURA A.17 - Modelo 02B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)FIGURA A.18 - Modelo 02C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

FIGURA A.19 - Modelo 03A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)FIGURA A.20 - Modelo 03B ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

FIGURA A.21 - Modelo 03C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)FIGURA A.22 – Modelo 04A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

FIGURA A.23 - Modelo 04B ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)FIGURA A.24 - Modelo 04C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

A.3 Gráficos Carga x Deformação no Aço

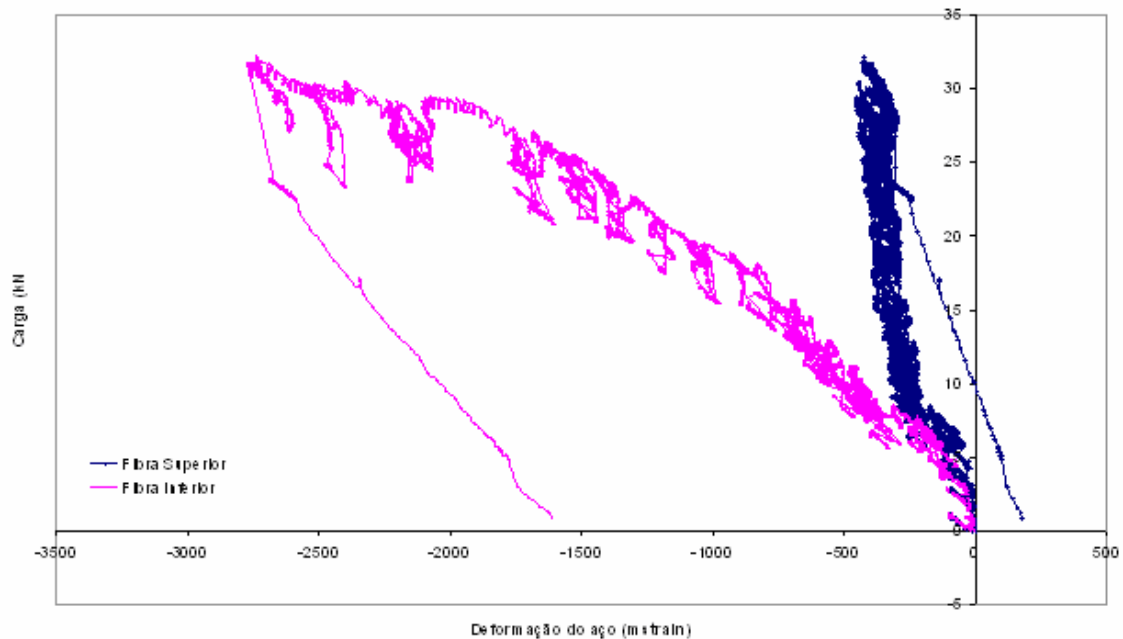


FIGURA A.25 - Modelo 01A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

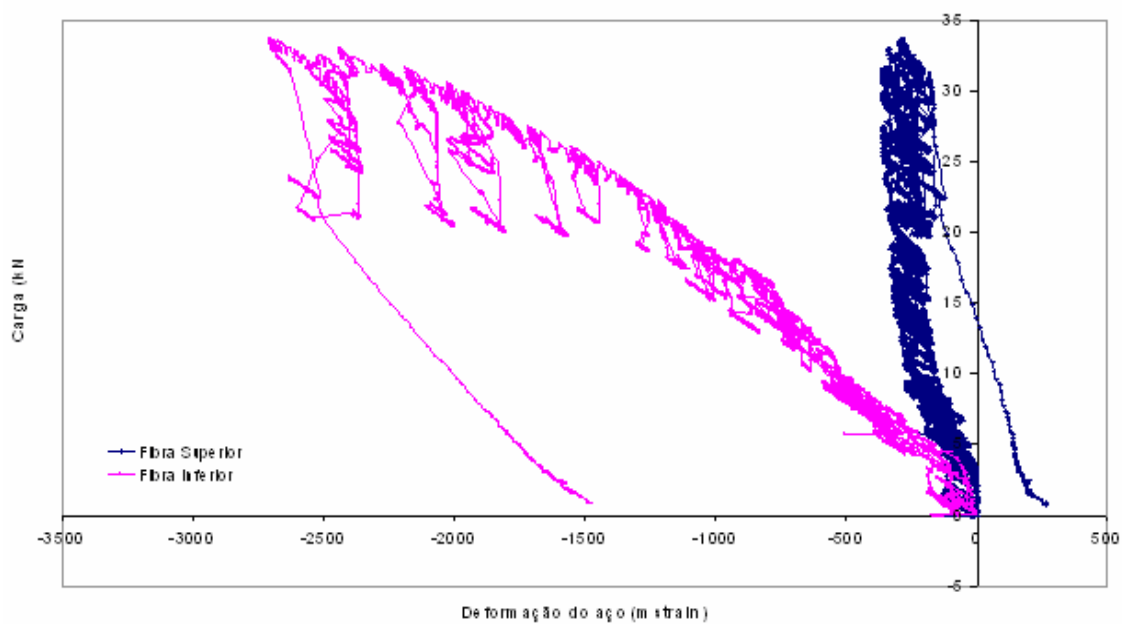


FIGURA A.26 - Modelo 01B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

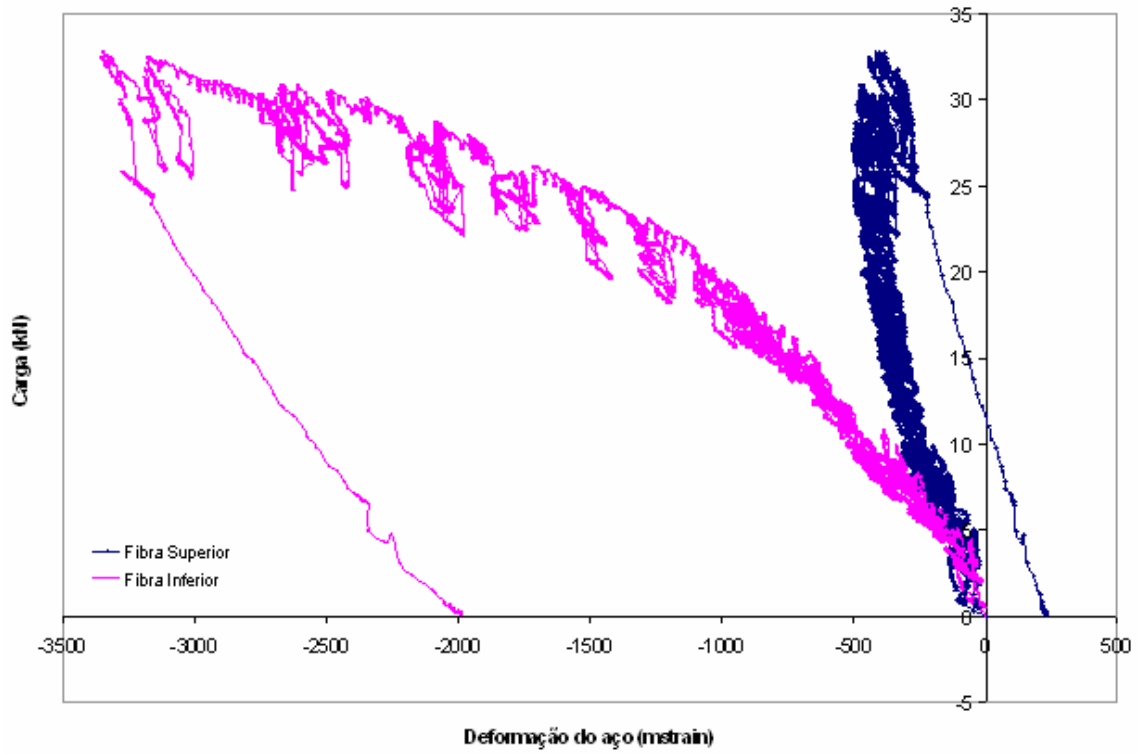


FIGURA A.27 - Modelo 01C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

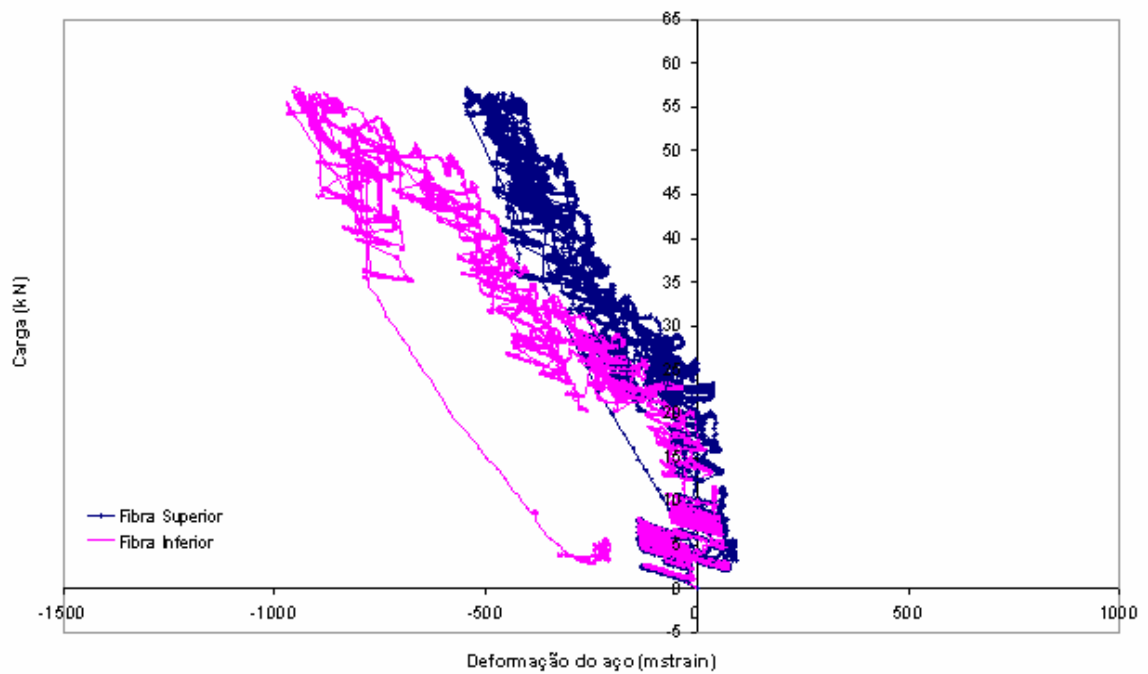
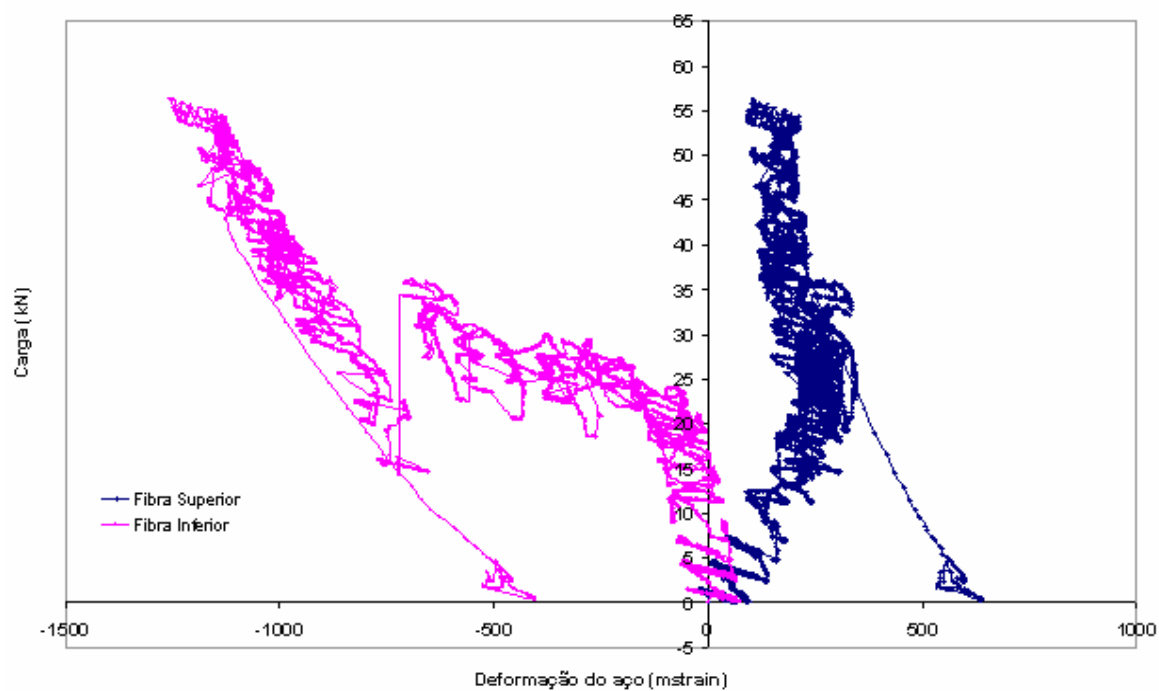
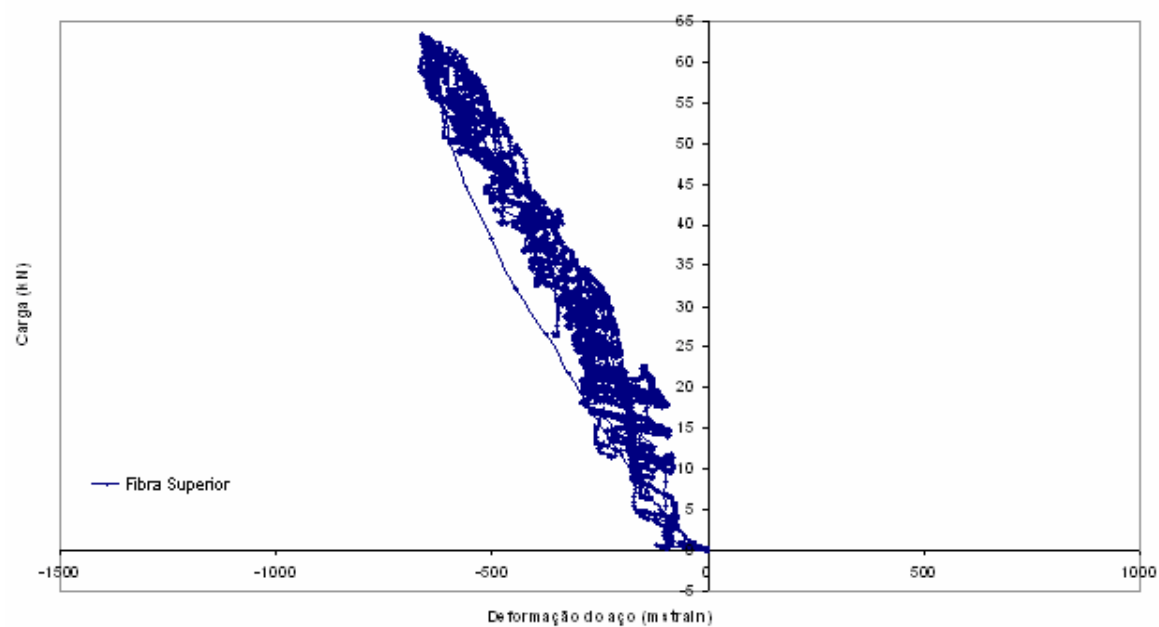
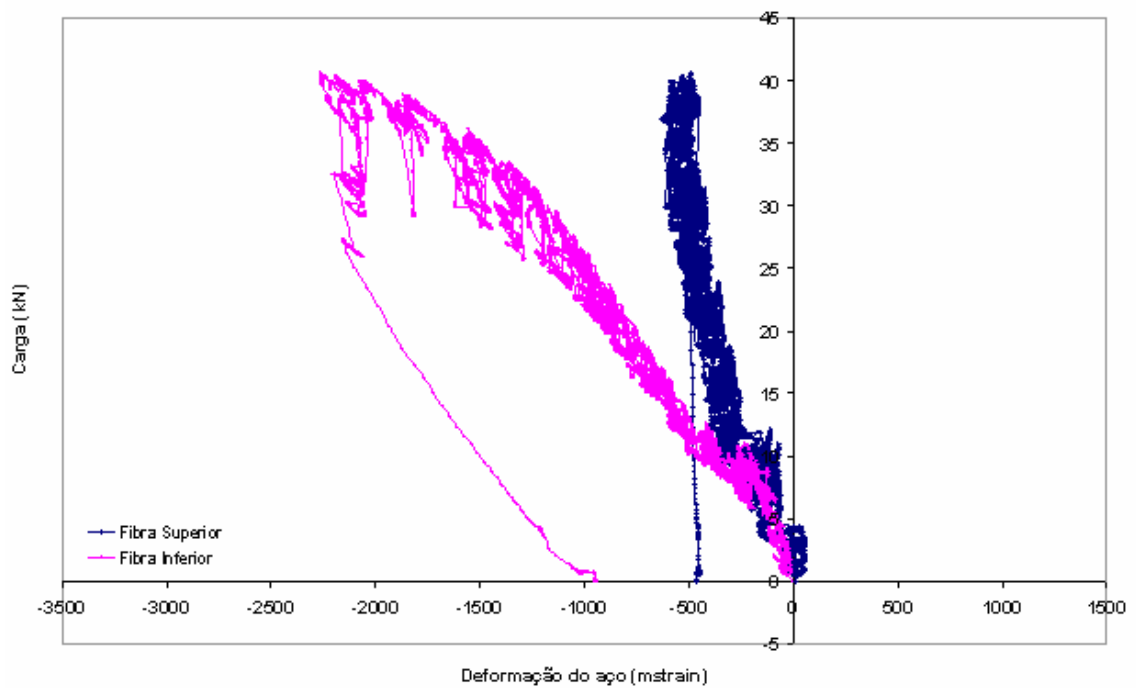
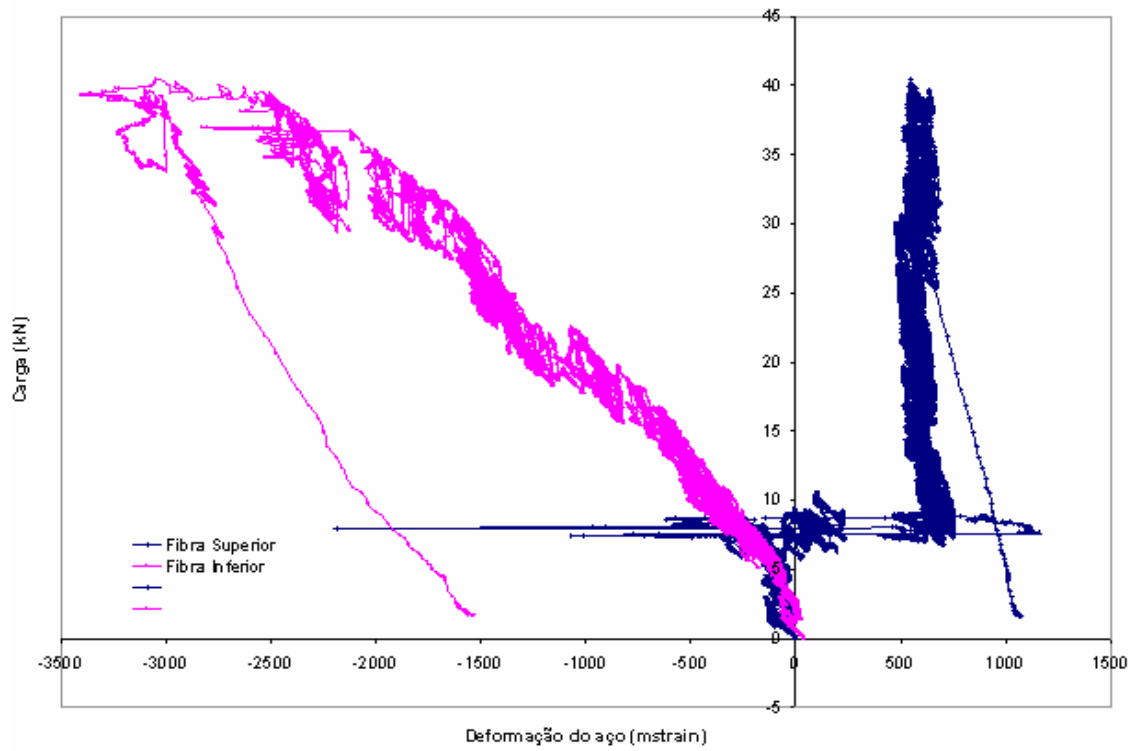


FIGURA A.28 - Modelo 02A ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

FIGURA A.29 - Modelo 02B ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)FIGURA A.30 - Modelo 02C ($t = 0,80\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)



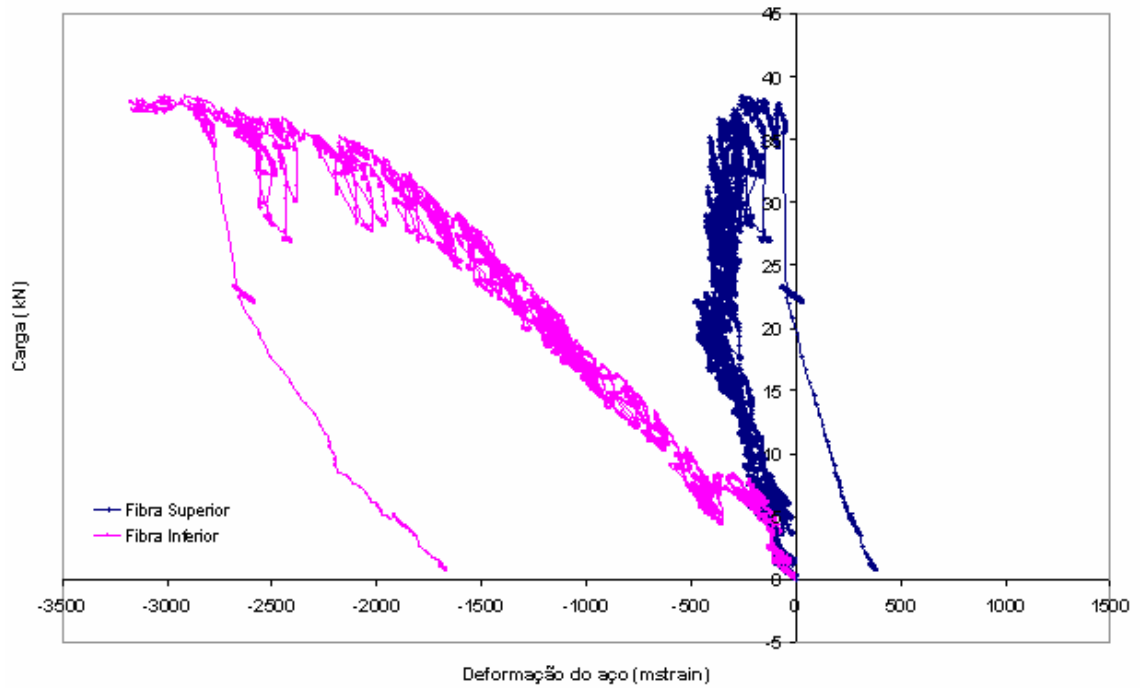


FIGURA A.33 - Modelo 03C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 800\text{mm}$)

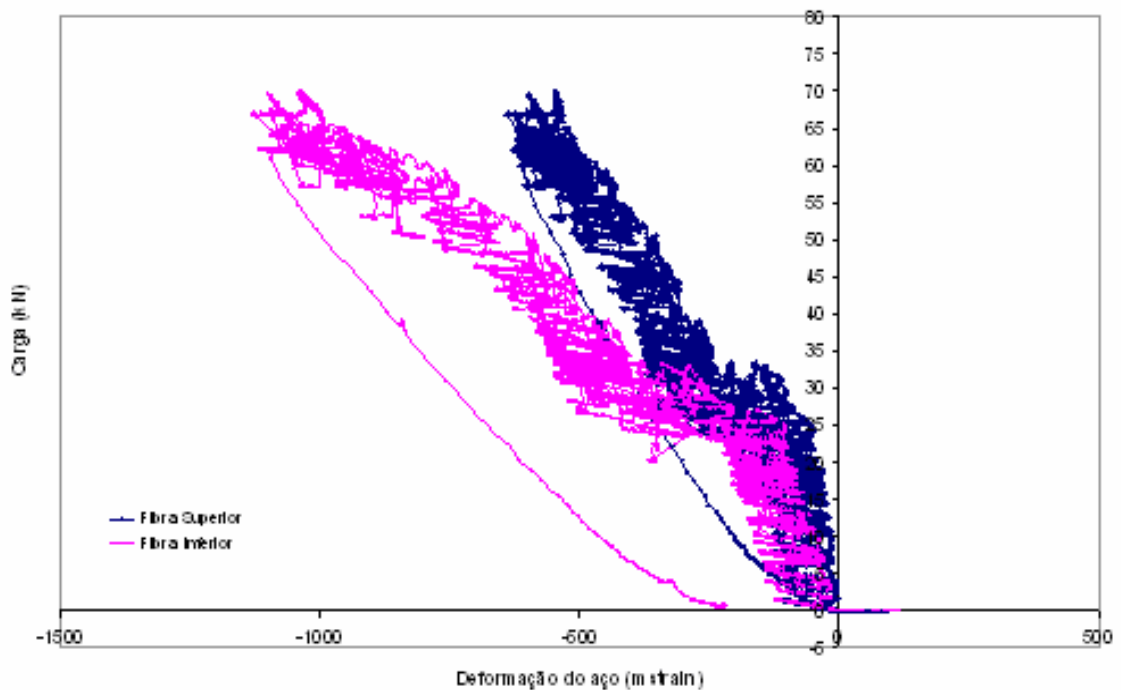
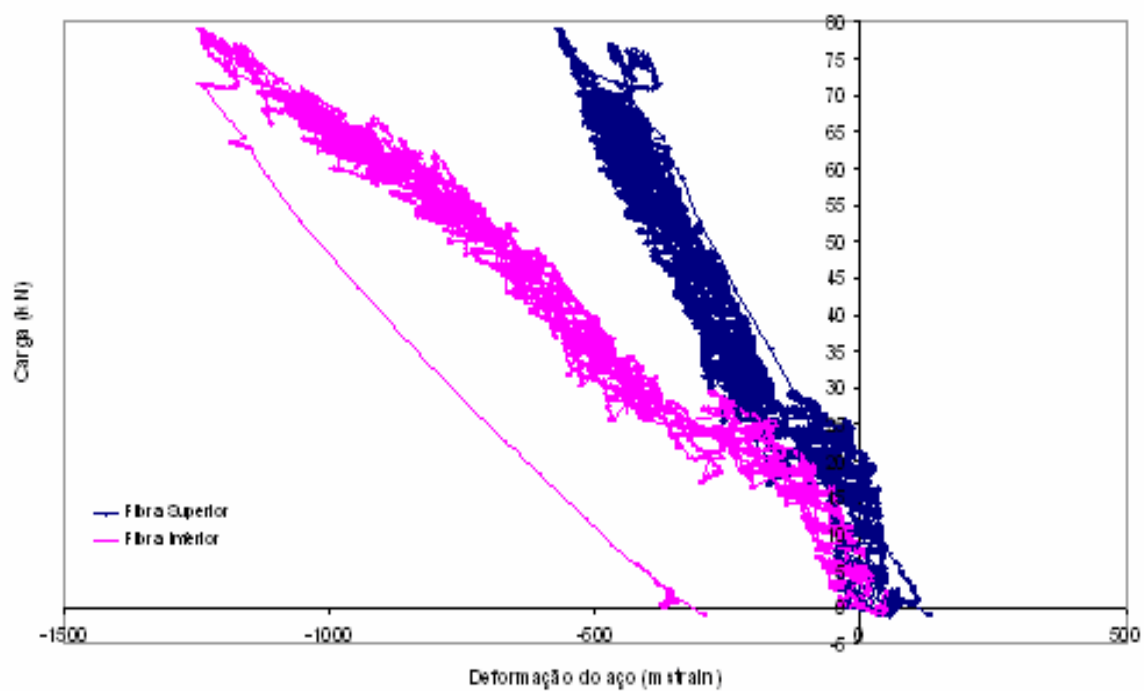


FIGURA A.34 - Modelo 04A ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

FIGURA A.35 - Modelo 04C ($t = 0,95\text{mm}$ e $L' = 450\text{mm}$)

ANEXO B

DIAGRAMAS DE RESISTÊNCIA PARA A INTERAÇÃO PARCIAL DOS MODELOS ENSAIADOS

B.1 - Diagramas de Resistência dos Modelos Ensaados

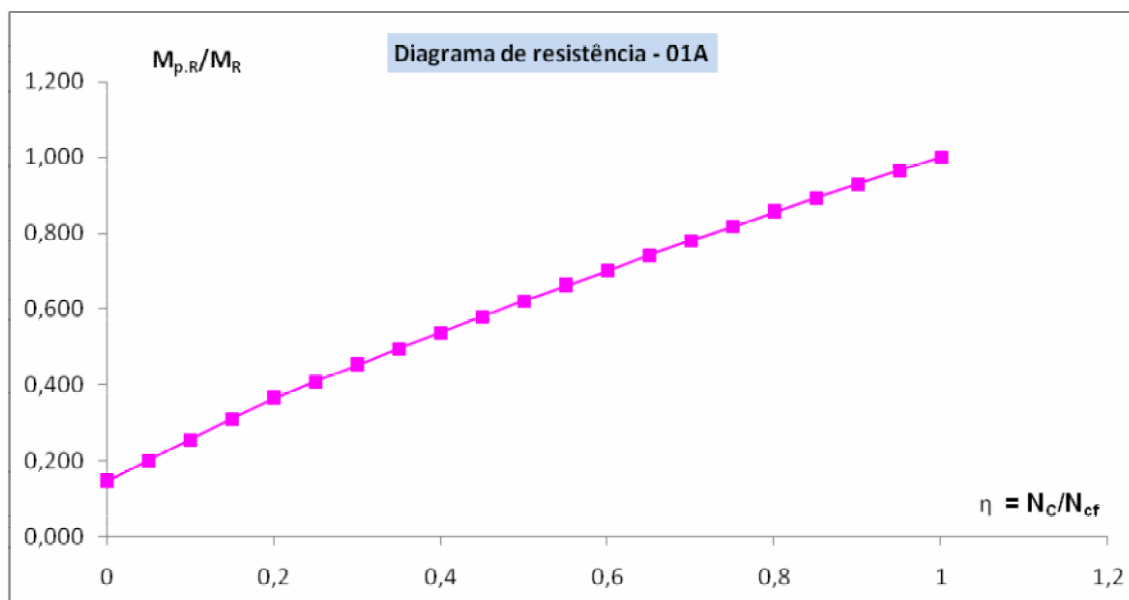


FIGURA B.1 - Diagrama de resistência - modelo 01A

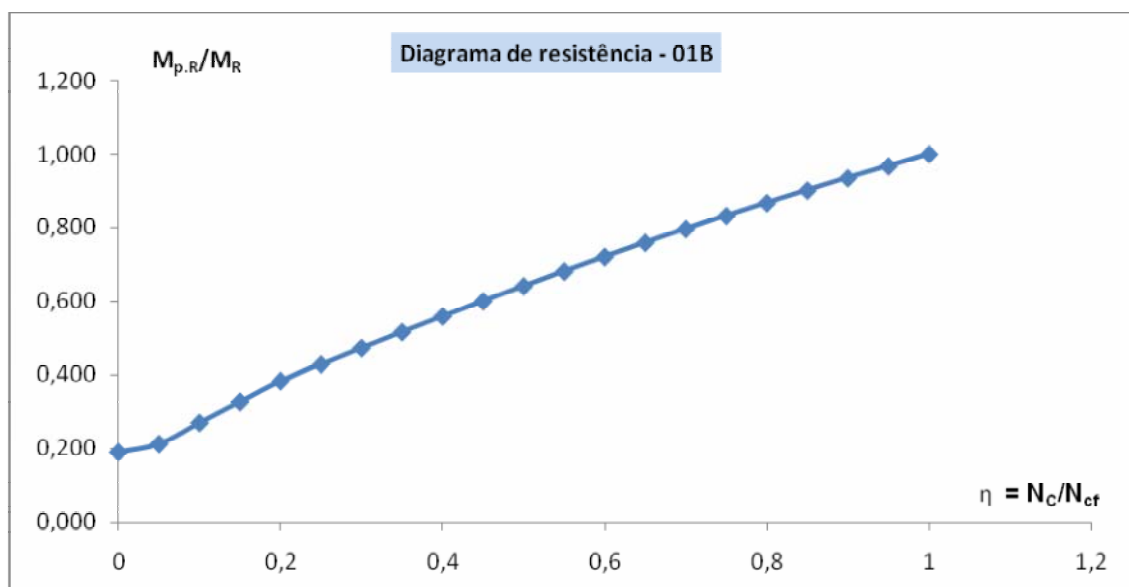


FIGURA B.2 - Diagrama de resistência-modelo 01B

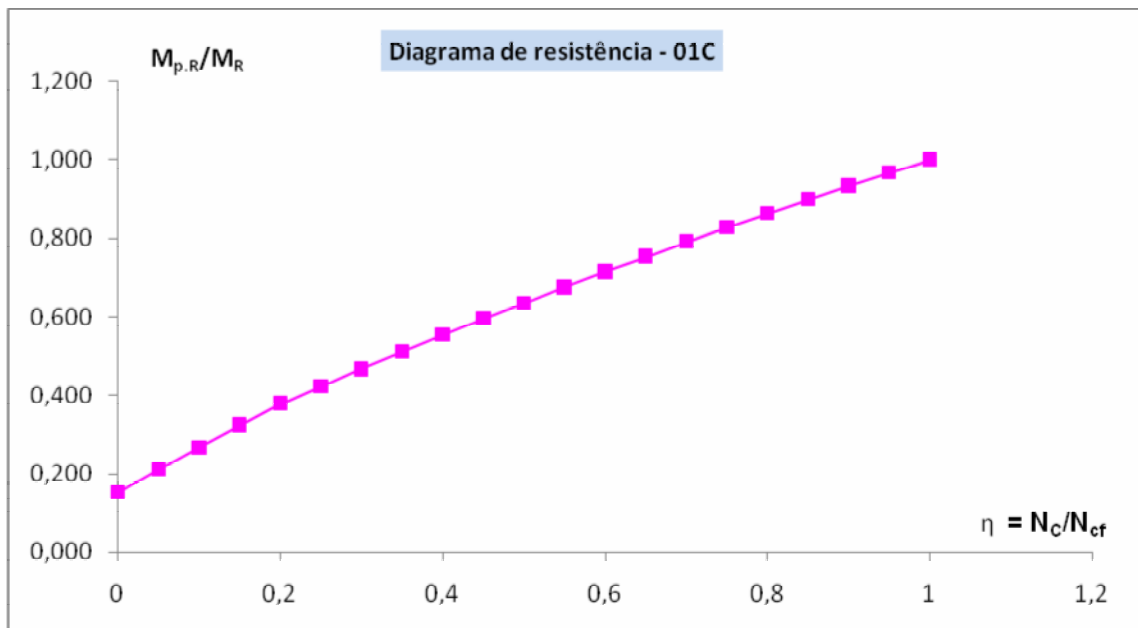


FIGURA B.3 - Diagrama de resistência-modelo 01C

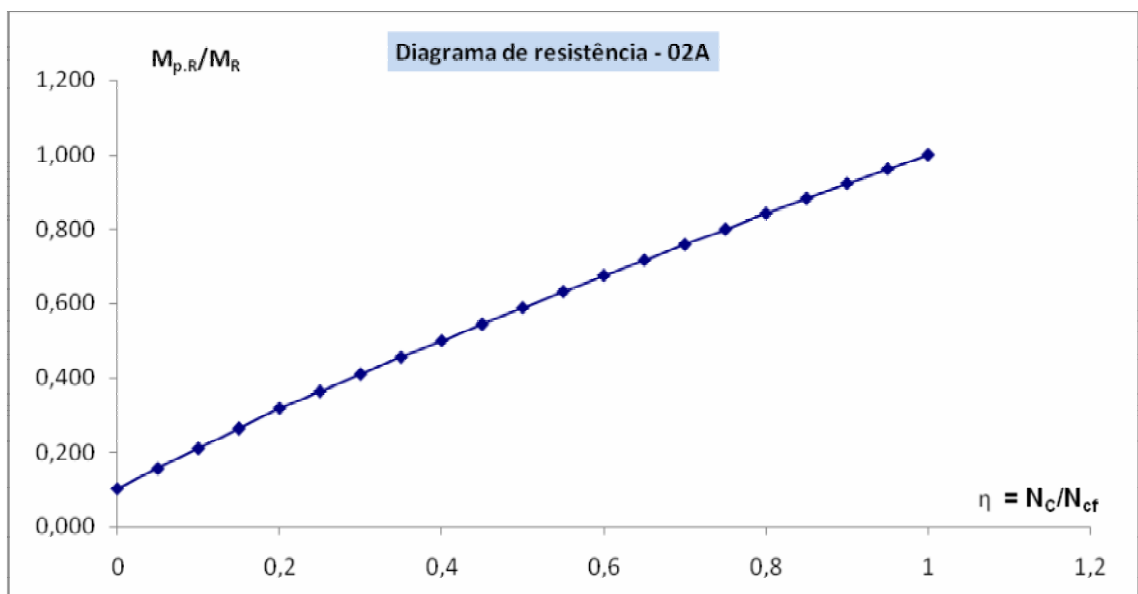


FIGURA B.4 - Diagrama de resistência-modelo 02A

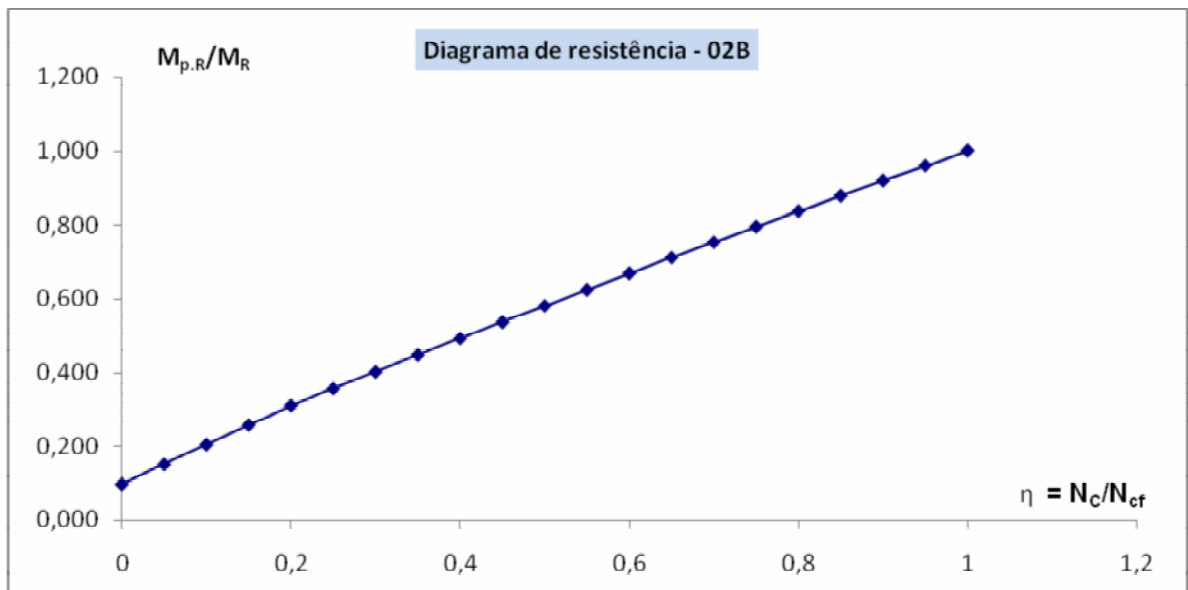


FIGURA B.5 - Diagrama de resistência-modelo 02B

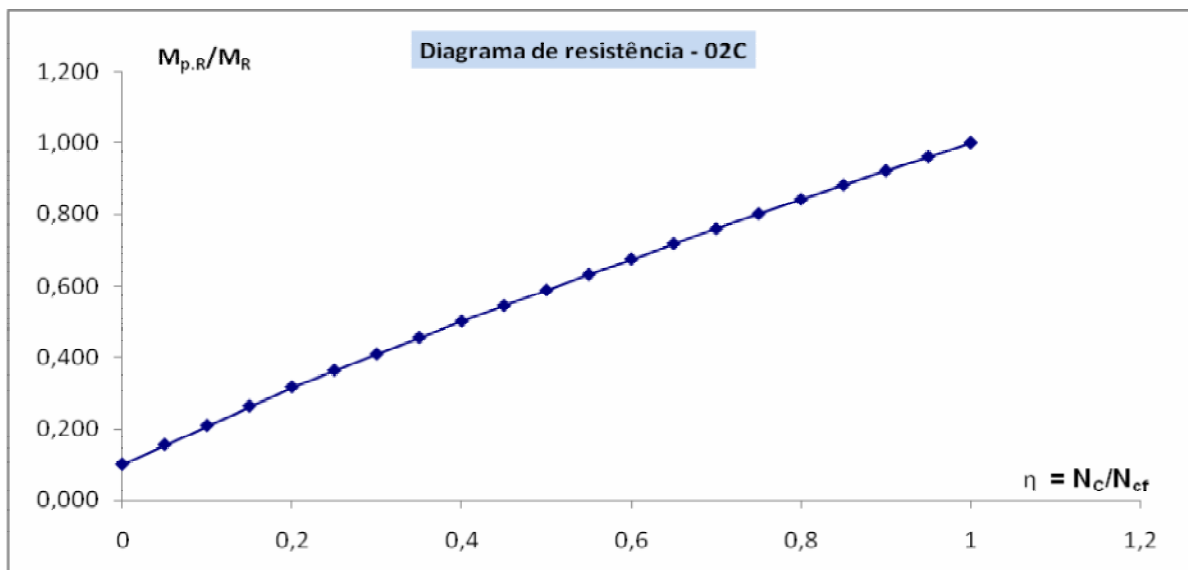


FIGURA B.6 - Diagrama de resistência-modelo 02C

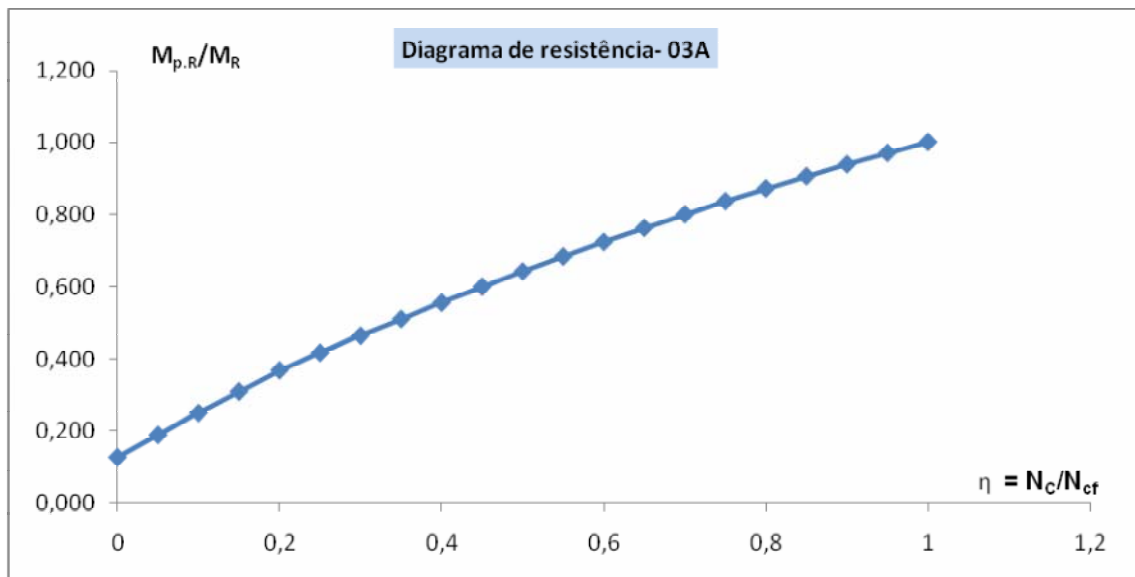


FIGURA B.7 - Diagrama de resistência-modelo 03A

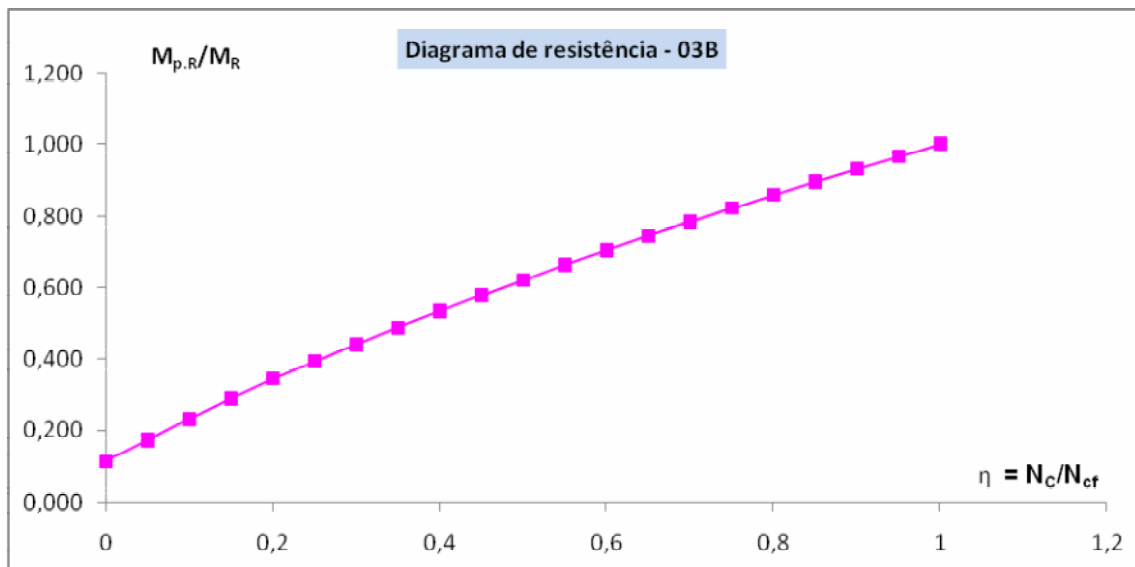


FIGURA B.8 - Diagrama de resistência-modelo 03B

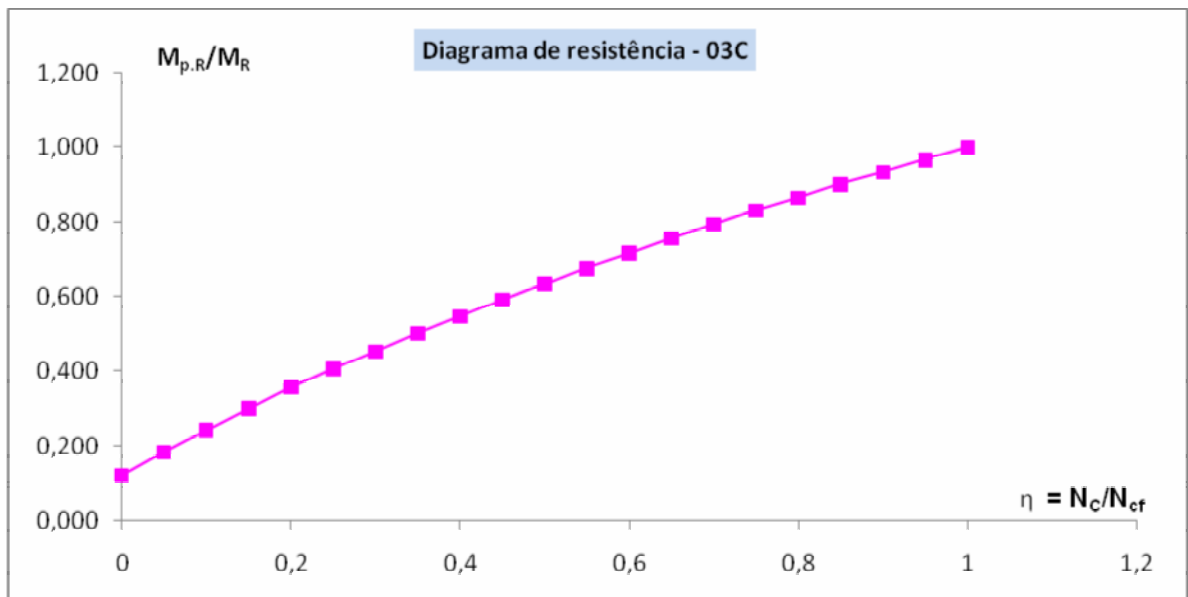


FIGURA B.9 - Diagrama de resistência-modelo 03C

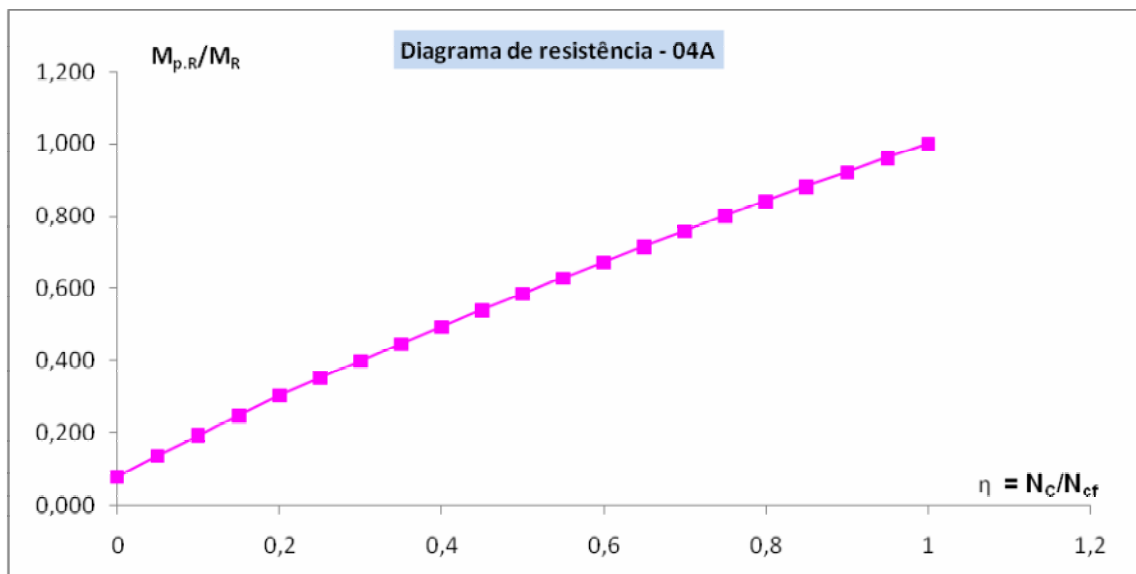


FIGURA B.10 - Diagrama de resistência-modelo 04A

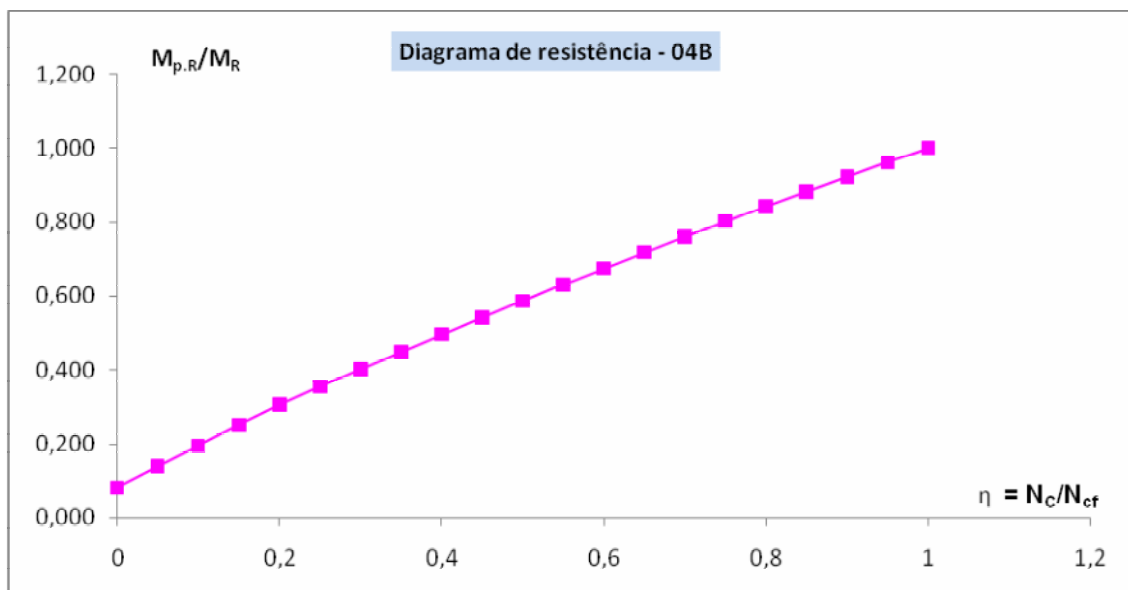


FIGURA B.11 - Diagrama de resistência-modelo 04B

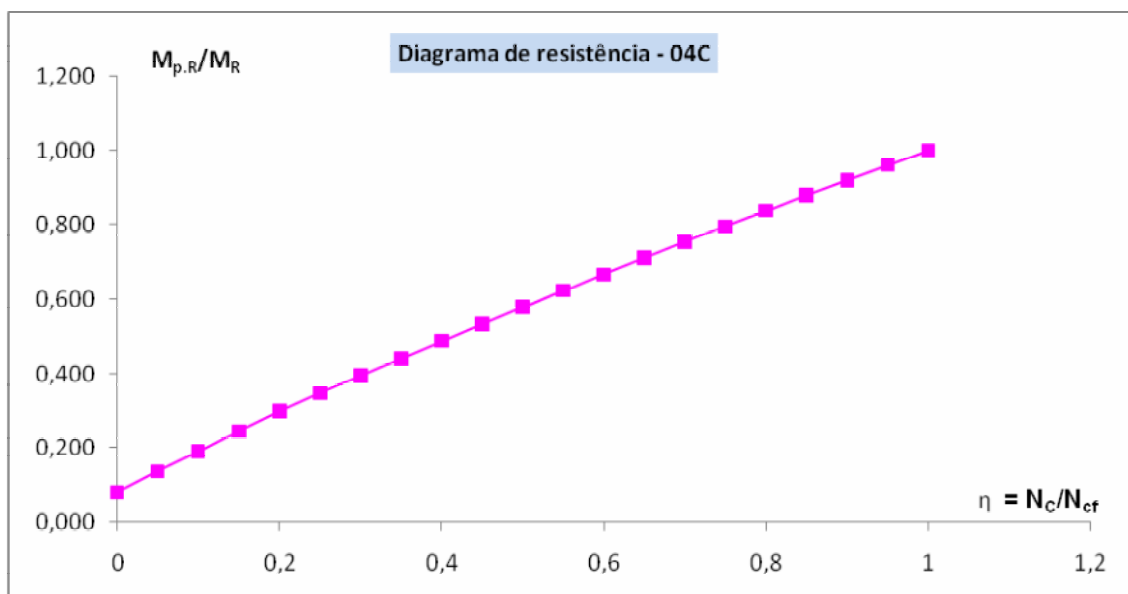


FIGURA B.12 - Diagrama de resistência-modelo 04C

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)