

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

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 apresentada como requisito
parcial para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia de Estruturas

por

Anselmo Silvino de Souza Neto

Dezembro de 2001

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, a minha madrinha Maria Abadia, e a Jesus Cristo, que guia minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall, por sua orientação, incentivo e amizade.

As meus irmãos, por seus auxílios imprescindíveis durante o mestrado.

À senhora Judith Papp Harsany e à senhora Francisca Lourenço por me acolherem com carinho e amor.

À minha namorada Cristina da Conceição Valladares pelo afeto e momentos felizes da minha vida, e pela força na realização deste trabalho.

Aos meus colegas do curso de mestrado na convivência simpática e ao meu amigo Paulo Pimentel que me ajudou durante o curso de mestrado.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Estruturas da EE/UFMG pela amizade e oportunidade de cursar o mestrado, e ao meu professor Adnauer Tarquínio Daltro da UFMT pela motivação para o mestrado.

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

À CODEME S.A. e à METFORM S.A. que contribuíram no desenvolvimento da pesquisa.

ÍNDICE

NOTAÇÃO	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivos	8
1.3. Organização do Texto	8
2. FÔRMA METÁLICA <i>STEEL DECK</i> MF-75	10
2.1. Considerações Gerais	10
2.2. Critérios de Carregamento	12
2.3. Critérios de Dimensionamento	16
2.3.1. Considerações Iniciais	16
2.3.2. Momento Fletor	19
2.3.3. Esforço Cortante	33
2.3.4. Interação Momento Fletor e Esforço Cortante	35
2.3.5. <i>Web Crippling</i>	36
2.3.6. Interação Momento Fletor e <i>Web Crippling</i>	42
2.3.7. Flecha	44
2.4. Considerações Finais	46
2.4.1. Exemplo do Dimensionamento da Fôrma <i>Steel Deck</i> MF-75 ..	46
2.4.2. Tabelas de Dimensionamento do <i>Steel Deck</i> MF-75	53

2.4.3. Influência das Mossas e Indentações na Resistência da Fôrma.....	56
2.4.4. Ensaio do <i>Steel Deck</i> MF-75	58
3. PROGRAMA DE ENSAIOS E RESULTADOS	61
3.1. Considerações Gerais	61
3.2. Caracterização dos Protótipos.....	62
3.3. Materiais Utilizados.....	64
3.3.1. Fôrma de Aço <i>Steel Deck</i> MF-75.....	64
3.3.2. Conector de Cisalhamento <i>Stud Bolt</i>	66
3.3.3. Concreto	67
3.3.4. Tela Soldada.....	69
3.4. Preparação dos Protótipos	69
3.5. Equipamentos de Ensaio e Instrumentação	71
3.6. Procedimentos de Ensaio	73
3.7. Resultados.....	74
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE LAJES MISTAS COM ANCORAGEM DE EXTREMIDADE	78
4.1. Considerações Gerais	78
4.2. Série MS	79
4.2.1. Comportamento Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade.....	79
4.2.2. Comportamento Carga x Flecha no Meio do Vão.....	80
4.2.3. Comportamento Carga x Deformação no Aço.....	86
4.2.4. Modo de Colapso.....	88
4.3. Série M x Série MS.....	91
4.4. Série S x Série M x Série MS	96
5. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SISTEMA DE LAJES MISTAS COM ANCORAGEM DE EXTREMIDADE	99
5.1. Considerações Iniciais.....	99

5.2. Método da Interação Parcial.....	100
5.2.1. Modelo Analítico da Interação Parcial	100
5.2.2. Determinação da Resistência ao Cisalhamento Longitudinal	106
5.2.3. Verificação da Resistência ao Cisalhamento Longitudinal	111
5.3. Determinação da Resistência da Ancoragem de Extremidade	113
5.4. Análise da Resistência da Ancoragem de Extremidade	118
5.4.1. Comparação de Resistência entre Lajes Ancoradas e Não Ancoradas.....	118
5.4.2. Influência da Ancoragem de Extremidade na Resistência dos Conectores da Viga Mista.....	119
5.5. Exemplo.....	122
6. INFLUÊNCIA DO ATRITO NA REGIÃO DOS APOIOS	134
6.1. Considerações Iniciais.....	134
6.2. Considerações sobre o Atrito	140
6.3. Métodos de Cálculo para a Consideração do Atrito	143
6.3.1. Patrick.....	143
6.3.2. Veljkovic'	145
6.3.3. Método do Atrito Aparente	149
6.3.4. Projeto para o EUROCODE 4 (1993)	151
6.4. Comparações e Análises	152
7. CONCLUSÕES	161
BIBLIOGRAFIA.....	164
ANEXO A	169
A.1 - Gráficos de Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade	169
A.2 - Gráficos de Carga x Flecha no Meio do Vão	176
A.3 - Gráficos de Carga x Deformação no Aço.....	183
A.4 - Modos de Colapso	190
A.5 - Série S x Série M x Série MS.....	192

ANEXO B	199
B.1 - Tabelas de Resistência de Laje Mista sem Ancoragem de Extremidade (<i>sobrecarga nominal máxima</i>)	199
B.2 - Tabelas de Resistência de Laje Mista com Ancoragem de Extremidade (<i>sobrecarga nominal máxima</i>)	202

NOTAÇÃO

Letras Romanas

A'_s - área efetiva do enrijecedor devida à flambagem local

af - apoio fixo

A_g - área bruta da seção da fôrma

am - apoio móvel

A_p - área efetiva da fôrma à tração reduzida pela influência das mossas e indentações

A_{po} - área efetiva da fôrma em b_o

A_s - área efetiva do enrijecedor usado no cálculo das propriedades da seção efetiva da fôrma

b - largura da laje mista

b, b_e - largura efetiva da placa

b_c - porção comprimida da chapa

b_n - largura da nervura

b_o - largura efetiva da nervura ao esforço cortante

c_d - coeficiente de correção relacionado à diferença entre a distribuição real de tensões normais na seção transversal da laje mista

c_m - coeficiente de correção relativo à não uniformidade das tensões de cisalhamento longitudinal entre o aço e o concreto

$C_{red.\ell}$ - fator de redução da resistência dos *studs* usados com fôrmas de aço nervuradas referente à direção da laje mista

$C_{red.t}$ - fator de redução da resistência dos *studs* usados com fôrmas de aço nervuradas referente à direção da viga mista

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 - módulo de elasticidade longitudinal

E_a - módulo de elasticidade longitudinal do aço

E_c - módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto

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

F_ℓ - força atuante no conector de cisalhamento desenvolvida na direção da laje mista

f - tensão de compressão na face externa da mesa comprimida

f_1, f_2 - tensões na alma da seção determinadas com base na seção efetiva

F_{at} - força de atrito causada pela reação vertical nos apoios

f_{cj} - resistência do concreto à compressão

f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão

f_{cr} - tensão crítica de flambagem elástica de placas

F_M - força de cisalhamento longitudinal fornecida pelas mossas

$f_{máx}$ - tensão de compressão máxima na borda da placa

F_t - força atuante no conector de cisalhamento desenvolvida na direção da viga mista

f_u - tensão limite de resistência nominal do aço

f_v - tensão última de cisalhamento longitudinal do ensaio em pequena escala

f_y - tensão limite de escoamento nominal do aço

h - altura da parte plana da alma

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

h_f - altura total da fôrma

h_{sb} - altura total do *stud bolt* após instalado

h_t - altura total da laje mista

I - momento de inércia da seção transversal bruta da fôrma

I_a - momento de inércia ideal do enrijecedor

I_{cc} - momento de inércia da seção fissurada da laje mista

I_{ef} - momento de inércia efetivo da fôrma

I_{eff}, I_{cd} - momento de inércia efetiva da seção da laje mista

I_{ensaio} - momento de inércia real do protótipo da laje mista ao longo do carregamento

I_{lm} - momento de inércia da laje mista

I_s - momento de inércia da seção bruta do enrijecedor

I_{uc} - momento de inércia da seção não fissurada da laje mista

k - coeficiente de flambagem de placas; valor obtido de ensaio ao cisalhamento longitudinal para o cálculo das lajes mistas pelo método $m-k$

k_v - coeficiente de flambagem por cisalhamento

L - vão entre apoios

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

LN - linha neutra elástica da seção transversal

LNP - linha neutra plástica da seção transversal

L_o - comprimento do balanço nas extremidades do protótipo

L_s - vão de cisalhamento

L_t - comprimento de transferência

L_x - distância do apoio a uma seção da laje mista

M - momento fletor

m - valor obtido de ensaio ao cisalhamento longitudinal para o cálculo das lajes mistas pelo método $m-k$

M_{cr} - momento que representa o início da fissuração do concreto

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_n - resistência nominal ao momento fletor da fôrma metálica

$M_{p,R}$ - 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 de cálculo

M_{Sd} , M_u - momento fletor atuante de cálculo

M_{usd} - momento fletor último da fôrma sob a linha de carga

M_{VRd} - momento fletor resistente de cálculo devido ao atrito no apoio

N - comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada

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 - carga concentrada; carga última da laje mista aplicada pelo atuador hidráulico
 P_{des} - carga correspondente ao deslizamento inicial de extremidade
 P_n - resistência nominal ao enrugamento da alma
 P_s - carga correspondente à flecha máxima de serviço
 P_{usd} - carga última total da fôrma
 q - carga uniformemente distribuída
 q_n - resistência de cálculo dos *studs* em lajes maciças
 r - raio de dobra da linha do esqueleto
 R - raio interno de dobra
 S_e - módulo de resistência elástico da seção efetiva
 t - espessura da fôrma sem camada de galvanização
 t_n - espessura nominal da fôrma
 V - reação de apoio total última da laje mista
 V_{cal} - reação de apoio calculada
 V_{ℓ} - resistência da ancoragem de extremidade
 $V_{\ell d}$ - resistência de cálculo da ancoragem de extremidade
 $V_{\ell k}$ - resistência nominal da ancoragem de extremidade
 $V_{\ell, \min}$ - menor valor da resistência nominal da ancoragem de extremidade
 V_n - resistência nominal ao cisalhamento vertical
 V_{sd} - reação de apoio de cálculo
 V_u - esforço cortante solicitante de cálculo
 V_{usd} - carga última de reação de apoio da fôrma
 w, b_o - largura da chapa
 w_c - peso próprio do concreto
 w_f - peso próprio da fôrma
 w_G - peso próprio da laje mista - valor nominal

w_o - sobrecarga nominal

w_p - peso próprio da laje mista

x - altura do bloco de tensão do concreto

y_{cg} - distância do centro de gravidade à face externa inferior da fôrma

z - braço de alavanca

Letras Gregas

α - ângulo de dobra

δ - flecha

Δ - aumento da altura da laje devido ao efeito de empoçamento

ε_n - coeficiente de veracidade

ε_o - deformação correspondente ao início de escoamento do aço

ϕ_b - coeficiente de resistência para barras fletidas

ϕ_{sb} - diâmetro do *stud bolt*

ϕ_v - coeficiente de resistência do cisalhamento longitudinal

ϕ_v - coeficiente de resistência do cisalhamento vertical

ϕ_w - coeficiente de resistência de enrugamento da alma

γ_g, γ_q - coeficiente de ponderação da carga permanente e da sobrecarga, respectivamente

γ_p - fator de majoração que considera o efeito de empoçamento

γ_v - coeficiente de resistência do cisalhamento longitudinal

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

η_{ensaio} - grau de interação ao cisalhamento longitudinal de um protótipo

λ - fator de esbeltez da placa; parâmetro de esbeltez da laje mista

μ - coeficiente de atrito

μ_{ap} - coeficiente de atrito aparente

ν - coeficiente de Poisson

θ - ângulo entre o plano da alma da fôrma e do plano da superfície de apoio

ρ - fator de redução da flambagem local da placa

σ_e - tensão correspondente ao início de escoamento do aço

τ - tensão de cisalhamento longitudinal

τ_M - tensão de cisalhamento longitudinal fornecida pelas mossas

τ_{Rd} - resistência do concreto ao cisalhamento vertical

τ_u - tensão última de cisalhamento longitudinal

$\tau_{u,m}$ - tensão de cisalhamento média dos protótipos não ancorados

$\tau_{u,min}$ - 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 - Propriedades do <i>Steel Deck</i> MF-75 para 1,00m de largura ..	11
TABELA 2.2 - Equações para o cálculo da resistência nominal a <i>web crippling</i> - P_n	39
TABELA 2.3 - Vãos máximos da fôrma de aço <i>Steel Deck</i> MF-75 - Cargas do EUROCODE 4 (1993).....	54
TABELA 2.4 - Vãos máximos da fôrma de aço <i>Steel Deck</i> MF-75 - Cargas do SDI (1995)	55
TABELA 2.5 - Vãos máximos da fôrma de aço <i>Steel Deck</i> MF-75 - Cargas do CSSBI 12M-84 (1988)	56
TABELA 2.6 - Dados de ensaios experimentais de flexão da fôrma	59
TABELA 2.7 - Propriedades mecânicas da chapa utilizada na fabricação do <i>Steel Deck</i> MF-75	59
TABELA 2.8 - Valores de ensaio e de cálculo da resistência do <i>Steel Deck</i> MF-75	60
TABELA 3.1 - Dimensões nominais dos protótipos das séries M, MS e S...	63
TABELA 3.2 - Propriedades do <i>Steel Deck</i> MF-75 para 1,00m de largura ..	64
TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas da chapa utilizada na fabricação do <i>Steel Deck</i> MF-75	65
TABELA 3.4 - Propriedades mecânicas do concreto de cada protótipo	68
TABELA 3.5 - Características particulares dos protótipos e carga última	75
TABELA 3.6 - Resultados dos ensaios da Série M	76
TABELA 3.7 - Resultados dos ensaios da Série MS	76
TABELA 3.8 - Resultados dos ensaios da Série S	77
TABELA 5.1 - Dados dos ensaios da Série M - Método da Interação Parcial	110
TABELA 5.2 - Dados dos ensaios da Série MS - Método da Interação Parcial	115
TABELA 5.3 - Método da Interação Parcial - laje sem ancoragem de extremidade: $V_{\ell d} = 0$	128

TABELA 5.4 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um <i>stud</i> a cada três nervuras: $V_{\ell d} = 36,13\text{kN/m}$	128
TABELA 5.5 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um <i>stud</i> a cada duas nervuras: $V_{\ell d} = 54,19\text{kN/m}$	129
TABELA 5.6 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um <i>stud</i> em cada nervura: $V_{\ell d} = 108,39\text{kN/m}$	129
TABELA 5.7 - Sobrecargas máximas referentes ao cisalhamento longitudinal, para lajes com e sem ancoragem de extremidade, à flexão e ao cisalhamento vertical.....	131
TABELA 5.8 - Sobrecargas máximas referentes à flecha	133
TABELA 6.1 - Dimensões nominais dos protótipos - SCHUSTER (1984)..	152
TABELA 6.2 - Dimensões nominais dos protótipos - VELJKOVIC' (1993).	153
TABELA 6.3 - Resultados de ensaios de MELO (1999) e teóricos	154
TABELA 6.4 - Resultados de ensaios de SCHUSTER (1984) e teóricos...	155
TABELA 6.5 - Resultados de ensaios de VELJKOVIC' (1993) e teóricos ..	156
TABELA 6.6 - Resultados de ensaios da Série MS e teóricos	158
TABELA 6.7 - Resistência da ancoragem de extremidade e do conector dos protótipos da Série MS - valores nominais	159
TABELA B.1 - Resistência da laje mista sem ancoragem de extremidade - Método <i>m-k</i>	200
TABELA B.2 - Resistência da laje mista sem ancoragem de extremidade - Método da Interação Parcial.....	201
TABELA B.3 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{\text{red.}\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> em cada nervura).....	203
TABELA B.4 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{\text{red.}\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 2 nervuras).....	204
TABELA B.5 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{\text{red.}\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 3 nervuras).....	205
TABELA B.6 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 30% de $C_{\text{red.}\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> em cada nervura).....	206
TABELA B.7 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade -	

30% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 2 nervuras).....	207
TABELA B.8 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 30% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 3 nervuras).....	208
TABELA B.9 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> em cada nervura).....	209
TABELA B.10 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 2 nervuras).....	210
TABELA B.11 - Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ (1 <i>stud bolt</i> a cada 3 nervuras).....	211

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	- Seções transversais de estruturas mistas	1
FIGURA 1.2	- Laje mista aço-concreto	2
FIGURA 1.3	- Meios de ligação mecânica ao cisalhamento longitudinal	4
FIGURA 1.4	- Meios de ligação por atrito	5
FIGURA 1.5	- Ensaio de protótipo de laje mista (a) e ensaio de laje mista em pequena escala (b)	6
FIGURA 2.1	- Seções típicas de fôrmas metálicas.....	10
FIGURA 2.2	- Seção transversal do <i>Steel Deck</i> MF-75.....	11
FIGURA 2.3	- Carregamento da fôrma metálica de vão simples de acordo com o EUROCODE 4 (situação de momento máximo)	13
FIGURA 2.4	- Efeito de empoçamento numa fôrma simplesmente apoiada	14
FIGURA 2.5	- Carregamentos da fôrma metálica de vão simples de acordo com o CSSBI 12M-84 (1988).....	15
FIGURA 2.6	- Dimensões e detalhes da geometria de uma onda da fôrma metálica <i>Steel Deck</i> MF-75.....	18
FIGURA 2.7	- Elementos enrijecidos , elementos não enrijecidos e elementos parcialmente enrijecidos segundo o AISI/96	20
FIGURA 2.8	- Flambagem local da mesa (a) e da alma (b) do perfil U	20
FIGURA 2.9	-Tensões impostas nas almas de uma onda da fôrma devidas ao momento fletor positivo.....	21
FIGURA 2.10	- Configuração da flambagem de placa simplesmente apoiada	22
FIGURA 2.11	- Distribuição de tensões na placa antes e após a flambagem	23
FIGURA 2.12	- Conceito da largura efetiva de placa com tensão de compressão uniforme	24
FIGURA 2.13	- Gráfico do fator de redução ρ com relação à esbeltez λ da placa	26

FIGURA 2.14 - Início de escoamento - (a) flange comprimido e (b) flange tracionado	27
FIGURA 2.15 - Seção transversal de um elemento enrijecido	28
FIGURA 2.16 - Elemento enrijecido com um enrijecedor intermediário	29
FIGURA 2.17 - Seção efetiva do enrijecedor.....	31
FIGURA 2.18 - Elemento enrijecido submetido a gradiente de tensão	32
FIGURA 2.19 - Gráfico da resistência ao cisalhamento com relação à esbeltez da alma.....	35
FIGURA 2.20 - Relação de interação do momento fletor e esforço cortante	36
FIGURA 2.21 - Falha por <i>web crippling</i> da viga I e fôrma devida a forças concentradas	37
FIGURA 2.22 - Condições de carregamento ensaiadas experimentalmente	38
FIGURA 2.23 - Casos de aplicação das Equações 2.36 a 2.40	40
FIGURA 2.24 - Gráfico da equação de interação de momento fletor e <i>web crippling</i>	43
FIGURA 2.25 - Variação do momento fletor e do momento de inércia de uma barra contínua sob carga uniformemente distribuída	44
FIGURA 2.26 - Janela principal do programa STEEL DECK para dimensionamento da fôrma metálica <i>Steel Deck</i> MF-75	47
FIGURA 2.27 - Exemplo do dimensionamento da fôrma metálica - dimensões em mm	48
FIGURA 2.28 - Ensaio à tração das chapas planas e das chapas com mossas	57
FIGURA 2.29 - Esquema de ensaio da fôrma metálica.....	58
FIGURA 3.1 - Seção transversal do <i>Steel Deck</i> MF-75.....	64
FIGURA 3.2 - Dimensões e detalhes da geometria das mossas	65
FIGURA 3.3 - Extremidade dos protótipos com <i>stud bolts</i>	67
FIGURA 3.4 - Esquema de aplicação de carga usado nos protótipos	71
FIGURA 3.5 - Esquema de aplicação de carga.....	72
FIGURA 3.6 - Sistema de apoio nas vigas de reação	73
FIGURA 4.1 - Curvas de carga x deslizamento relativo de extremidade ...	80
FIGURA 4.2 - Curvas de carga x flecha no meio do vão.....	82

FIGURA 4.3 - Variação da inércia da laje mista	84
FIGURA 4.4 - Curvas de carga x flecha no meio do vão - Série M	85
FIGURA 4.5 - Curvas de carga x flecha no meio do vão - Série MS	86
FIGURA 4.6 - Curvas de carga x deformação no aço	87
FIGURA 4.7 - Ilustração gráfica dos principais modos de falha da laje mista	88
FIGURA 4.8 - Representação gráfica dos modos de colapso dos protótipo da Série MS	89
FIGURA 4.9 - Ilustração gráfica do modo de colapso nos ensaios	90
FIGURA 4.10 - Curvas carga x flecha no meio do vão dos protótipos 3 e 10	92
FIGURA 4.11 - Curvas carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 2 e 10	94
FIGURA 4.12 - Curvas carga x deformação no aço dos protótipos 4 e 10...	95
FIGURA 4.13 - Gráfico do comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade das Séries M, S e MS.	97
FIGURA 4.14 - Gráfico do comportamento carga x flecha no meio do vão das Séries M, S e MS.	98
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)	101
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	103
FIGURA 5.3 - Diagrama de interação entre a força axial e o momento na fôrma de aço	104
FIGURA 5.4 - Variação da posição do centro de gravidade da fôrma em função da relação N_{cf}/N_{pa}	105
FIGURA 5.5 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação parcial	106
FIGURA 5.6 - Diagrama de interação parcial para a determinação do grau de interação	108

FIGURA 5.7 - Diagrama de Interação Parcial de Cálculo - Lajes mistas sem ancoragem de extremidade	112
FIGURA 5.8 - Verificação da laje mista não ancorada - cisalhamento longitudinal.....	113
FIGURA 5.9 - Diagrama de Interação Parcial de Cálculo - Lajes mistas com ancoragem de extremidade	116
FIGURA 5.10 - Verificação da laje mista ancorada - cisalhamento longitudinal.....	117
FIGURA 5.11 - Resistências de lajes ancoradas e não ancoradas ($h_t=180\text{mm}$, $t_n=0,80\text{m}$)	118
FIGURA 5.12 - Combinação das forças F_t e F_ℓ no <i>stud bolt</i>	119
FIGURA 5.13 - Relação entre as forças no <i>stud bolt</i> devido à viga mista e à laje mista.....	121
FIGURA 5.14 - Exemplo para laje mista com ancoragem de extremidade (um <i>stud bolt</i> a cada duas nervuras).....	123
FIGURA 5.15 - Laje mista contínua.....	131
FIGURA 6.1 - Relação de resistência entre os métodos <i>m-k</i> e da interação parcial	135
FIGURA 6.2 - Relação de resistência nominal das lajes mistas não ancoradas pelo método da interação parcial e <i>m-k</i>	137
FIGURA 6.3 - Relação de $\tau \times \lambda$ de lajes sem ancoragem de extremidade	139
FIGURA 6.4 - Forças de atrito na região do apoio na interface da laje mista	141
FIGURA 6.5 - Corpo de prova típico da laje mista em pequena escala ...	142
FIGURA 6.6 - Curva Tensão de Cisalhamento x Deslizamento Horizontal	144
FIGURA 6.7 - Diagrama de corpo livre para duas cargas lineares.....	144
FIGURA 6.8 - Diagrama de corpo livre para carga distribuída	146
FIGURA 6.9 - Ensaio em pequena escala da laje mista com tração na fôrma - <i>tension-push test</i>	146
FIGURA 6.10 - Diagrama de resistência ao cisalhamento longitudinal	148

FIGURA 6.11 - Análise de regressão multilinear para determinação de τ_M e μ	150
FIGURA A.1 - Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	169
FIGURA A.2 - Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	169
FIGURA A.3 - Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	170
FIGURA A.4 - Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	170
FIGURA A.5 - Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	171
FIGURA A.6 - Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	171
FIGURA A.7 - Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	172
FIGURA A.8 - Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	172
FIGURA A.9 - Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	173
FIGURA A.10 - Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	173
FIGURA A.11 - Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	174
FIGURA A.12 - Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	174
FIGURA A.13 - Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	175
FIGURA A.14 - Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	175
FIGURA A.15 - Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	176
FIGURA A.16 - Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	176
FIGURA A.17 - Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	177
FIGURA A.18 - Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	177
FIGURA A.19 - Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	178
FIGURA A.20 - Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	178
FIGURA A.21 - Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	179
FIGURA A.22 - Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	179
FIGURA A.23 - Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	180
FIGURA A.24 - Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	180
FIGURA A.25 - Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	181
FIGURA A.26 - Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	181
FIGURA A.27 - Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	182
FIGURA A.28 - Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	182
FIGURA A.29 - Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	183
FIGURA A.30 - Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	183

FIGURA A.31 - Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	184
FIGURA A.32 - Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	184
FIGURA A.33 - Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	185
FIGURA A.34 - Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	185
FIGURA A.35 - Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	186
FIGURA A.36 - Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	186
FIGURA A.37 - Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	187
FIGURA A.38 - Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	187
FIGURA A.39 - Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)	188
FIGURA A.40 - Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	188
FIGURA A.41 - Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	189
FIGURA A.42 - Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)	189
FIGURA A.43 - Modos de colapso dos protótipos da Série M ($t_n = 0,80\text{mm}$)	190
FIGURA A.44 - Modos de colapso dos protótipos da Série M ($t_n = 1,25\text{mm}$)	190
FIGURA A.45 - Modos de colapso dos protótipos da Série MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)	191
FIGURA A.46 - Modos de colapso dos protótipos da Série MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)	191
FIGURA A.47 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 2.....	192
FIGURA A.48 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 3.....	192
FIGURA A.49 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 4.....	193
FIGURA A.50 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 5.....	193
FIGURA A.51 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 8.....	194
FIGURA A.52 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 9.....	194

FIGURA A.53 - Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 10.....	195
FIGURA A.54 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 2.....	195
FIGURA A.55 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 3.....	196
FIGURA A.56 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 4.....	196
FIGURA A.57 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 5.....	197
FIGURA A.58 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 8.....	197
FIGURA A.59 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 9.....	198
FIGURA A.60 - Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 10.....	198

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento e a resistência das lajes mistas aço-concreto com ancoragem de extremidade simplesmente apoiadas após a cura do concreto, empregando-se a fôrma metálica *Steel Deck* MF-75. A ancoragem de extremidade foi fornecida por meio de conectores de cisalhamento do tipo *stud bolt*. Foram realizados ensaios de protótipos visando-se conhecer o comportamento e o modo de colapso das lajes mistas ancoradas na etapa de carregamento. Durante os ensaios flechas, deslizamentos relativos de extremidade na interface aço-concreto e deformações no aço da fôrma foram medidos para a análise do comportamento. É apresentado um estudo do comportamento e do dimensionamento da fôrma metálica isolada, considerando o sistema de laje mista antes da cura, para uma melhor compreensão a respeito da influência das propriedades da fôrma metálica na resistência das lajes mistas após a cura do concreto. O método da interação parcial, conforme a pré-norma europeia ENV - Eurocode 4, é utilizado para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal e verificação das lajes mistas ancoradas. Uma análise comparativa do comportamento é feita com os resultados de ensaios entre lajes ancoradas e não ancoradas para verificar a influência dos *stud bolts*. Resultados das expressões analíticas de dimensionamento das lajes mistas com e sem ancoragem serão avaliados e os valores de resistência são determinados em função da quantidade adotada de *stud bolts*. A influência do atrito na região dos apoios é significativa principalmente nas lajes de pequeno vão, mas não é considerada no método da interação parcial. Alguns métodos propostos são apresentados para a consideração desta influência na resistência ao cisalhamento longitudinal. Utilizando-se resultados de ensaios, estes métodos são analisados para avaliar a adequação dos mesmos.

Palavras-chaves: laje mista aço-concreto, interação parcial, ancoragem de extremidade, atrito.

ABSTRACT

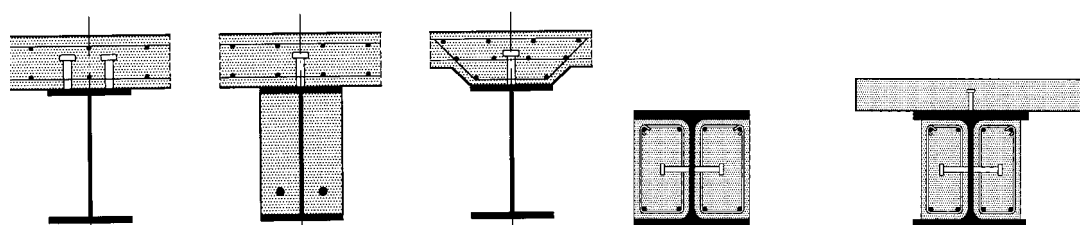
The main goal of this work is to evaluate the behavior and the strength of the simply supported steel-concrete composite slabs with end anchorage after the concrete cured, with using the profiled steel sheeting Steel Deck MF-75. The end anchorage was supplied by shear connectors stud bolts. Experiments with prototypes were carried out aiming to know the behavior and the failure mode of the composite anchored slab in all the loading stages. During the experiments deflections, end slippings in the interface steel-concrete and strains in the steel were measured for analysis of the behavior. A study of the behavior and the design of the profiled steel sheeting is presented considering the composite slab before the cure, for a better understanding regarding the influence of properties of the profiled steel sheeting in the resistance of composite slabs after the concrete cured. The partial interaction method, as described in the preliminary standard ENV - Eurocode 4, is used for the longitudinal shear strength and verification of composite anchored slabs. A comparative study of the behavior is made with the results of experiments among composite anchored slabs and non-anchored to verify the influence of stud bolts. Results of analytic expressions of composite slabs design with and without end anchorage are appraised and the resistance values will be calculate according to the adopted amount of stud bolts. The influence of the friction at the supports is mainly significant in composite slabs of small span, but it is not considered in the partial interaction method. Some proposed methods are presented for the consideration of this influence in the resistance to the longitudinal shear. With results of tests, these methods are analyzed to evaluate the veracity of the same ones.

Keywords: steel-concrete composite slab, partial interaction, end anchorage, friction.

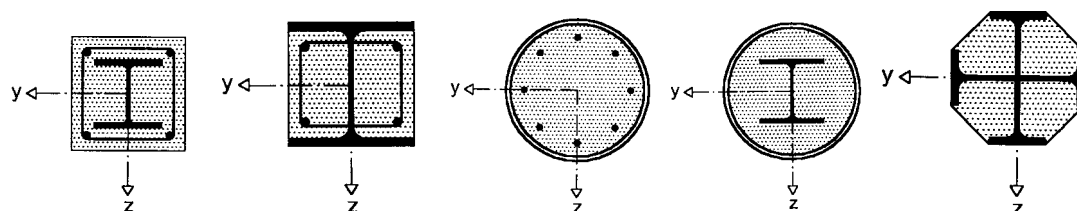
1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

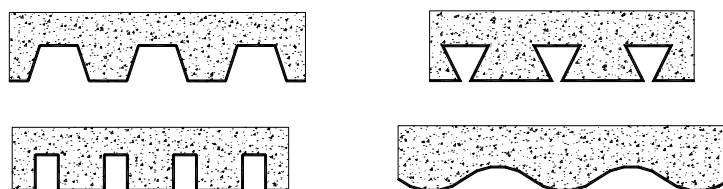
Em estruturas mistas de aço e concreto, a resistência de um elemento de concreto é incorporada à resistência de um perfil de aço. Estes elementos têm quase o mesmo coeficiente de dilatação térmica e uma combinação adequada de resistência, com o concreto eficiente à compressão e o aço à tração. A Figura 1.1 ilustra algumas estruturas mistas utilizadas.



Seções típicas de viga mista



Seções típicas de coluna mista



Seções típicas de laje mista

FIGURA 1.1 - Seções transversais de estruturas mistas

O concreto fornece proteção contra corrosão e isolamento térmico ao aço, além de restringir a flambagem local e a flambagem lateral com torção dos perfis metálicos esbeltos.

O bom desempenho das estruturas mistas, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico, tornou este sistema estrutural um método de construção muito utilizado em vários países, principalmente na Europa e na América do Norte.

A primeira norma brasileira a tratar dos sistemas mistos aço-concreto foi a NBR 8800 de 1986, ao abordar somente as vigas mistas. A recente norma de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio, a NBR 14323 de 1999, dispõe também dos critérios de dimensionamento das lajes e pilares mistos em temperatura ambiente com base nas normas européias.

O sistema de lajes mistas aço-concreto, tema aqui estudado, compõe-se de uma chapa metálica formada a frio incorporada à face inferior da camada de concreto, conforme ilustra a Figura 1.2. Na fase de concretagem, esta chapa age como fôrma permanente e após a cura do concreto como armadura positiva.

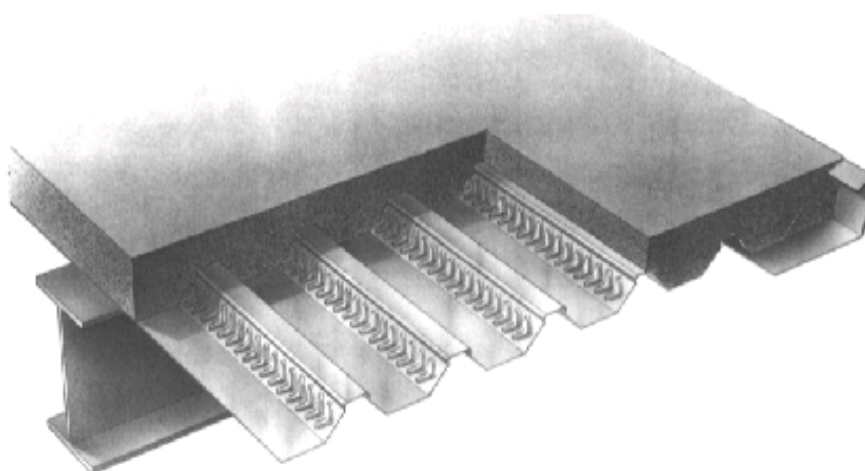


FIGURA 1.2 - Laje mista aço-concreto

No trabalho de VELJKOVIC' (1996), é relatado que o uso do sistema de lajes mistas com fôrma de aço incorporada em construções em estrutura metálica teve seu início na década de 1930. O sistema de laje mista oferece uma construção extremamente rápida sem a necessidade de escoramento, e às vezes é executado com concreto leve, como usado na Inglaterra e nos Estados Unidos, para a redução do peso próprio. O uso das lajes mistas estende-se também às construções em estruturas de concreto armado e em estruturas de madeira. No Brasil, FERREIRA (1999) recentemente estudou a aplicação do sistema de lajes mistas em estruturas de concreto armado.

Há muitas vantagens com relação ao uso do sistema de lajes mistas aço-concreto, principalmente quando utilizadas em edifícios de estruturas de aço. As principais são:

- O perfil metálico serve com fôrma permanente, diminuindo assim o custo dos materiais para a execução da fôrma e do processo de desforma;
- Rapidez na instalação da fôrma metálica. Além disso, desde que a fôrma metálica esteja livre de obstáculos, as outras etapas de instalação podem começar logo após a colocação da fôrma;
- O perfil metálico resiste às cargas de construção sem a necessidade de escoramento;
- Facilidade na distribuição das instalações elétricas, hidráulica, de comunicação e de ar condicionado. Além disso, a fôrma facilita a instalação dos conectores de cisalhamento quando construída com vigas mistas e aumenta a cobertura de concreto em volta do conector;

- A fôrma metálica age com armadura positiva na laje após a cura do concreto.

Apesar do sistema de lajes mistas apresentarem algumas desvantagens, elas são consideradas de pouca importância. Por exemplo, cuidados devem ser tomados para proteger a fôrma nos locais onde há carga concentrada, a superfície lisa da fôrma é escorregadia, e às vezes é necessária a colocação de proteção ao fogo.

O concreto e a fôrma metálica devem interagir de tal maneira que as tensões de cisalhamento longitudinal possam ser resistidas na interface aço-concreto. A transferência do cisalhamento pode ser fornecida através dos seguintes meios, os quais asseguram uma ação mista parcial ou total do sistema:

- Ligação mecânica: por meio de saliências, mossas e/ou indentações nas fôrmas - Figura 1.3(a) - ou por ancoragens de extremidade através de conectores de cisalhamento - Figura 1.3(b) ou pela deformação das nervuras na extremidade da fôrma - Figura 1.3(c);

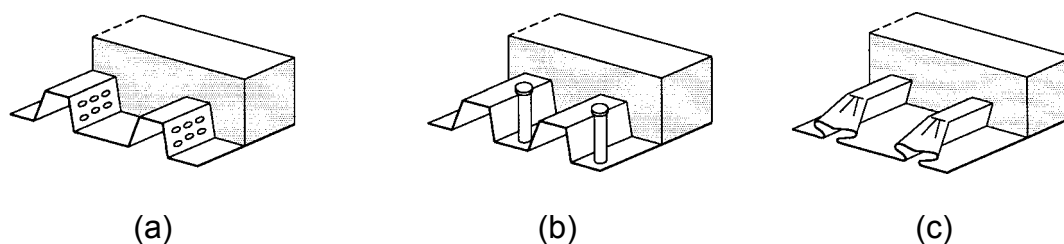


FIGURA 1.3 - Meios de ligação mecânica ao cisalhamento longitudinal

- Ligação por atrito: ligação desenvolvida por nervuras reentrantes conforme a Figura 1.4 e/ou por atrito nos apoios;

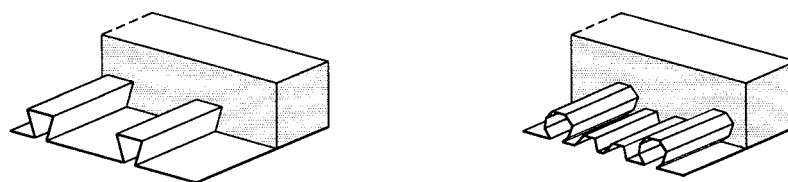


FIGURA 1.4 - Meios de ligação por atrito

- Ligação química: através da aderência da pasta de cimento com a fôrma metálica, quebrada quando ocorre o deslizamento entre a fôrma e o concreto.

As indentações são definidas como saliências na fôrma externas à laje mista e as mossas são cavidades na fôrma, internas à laje mista.

Os efeitos da ancoragem de extremidade levam a um melhor desempenho no comportamento e na resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas, pois restringem o deslizamento relativo fôrma metálica e concreto. Também pode-se armar o concreto de modo a aumentar a capacidade de carregamento da laje mista. A força de atrito que aparece na interface aço-concreto, ocasionada pela reação de apoio, auxilia na resistência ao cisalhamento longitudinal. A aderência química da pasta de cimento com a fôrma metálica não é considerada na resistência por causa de sua natureza frágil.

O EUROCODE 4 (1993) define três modos principais de colapso de uma laje mista - colapso por flexão, por cisalhamento longitudinal e por cisalhamento vertical.

Se a resistência para transferir o cisalhamento longitudinal permite a plastificação total da seção transversal de momento máximo com interação completa, então 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.

O cisalhamento vertical é resistido principalmente pelo concreto nas nervuras e se torna crítico quando a razão vão/altura da laje diminui.

Existe uma grande variedade de geometria de fôrmas e de mossas/indentações, tendo eficiências diferentes na ligação mecânica. Por isso, estudos são realizados, pesquisando-se a geometria da fôrma e a geometria das mossas, as quais têm grande influência no desempenho da ligação mecânica.

O estudo do comportamento e da resistência do sistema de lajes mistas é baseado em ensaios experimentais. Dois dos procedimentos de ensaios mais utilizados, mostrados na Figura 1.5, são: o ensaio de protótipos - *shear-bond* - e o ensaio em pequena escala - *push test* - que leva em consideração os efeitos do atrito na região dos apoios.

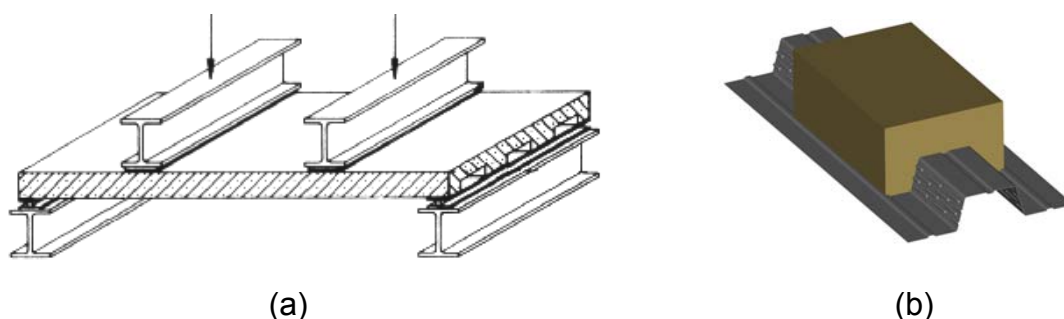


FIGURA 1.5 - Ensaio de protótipo de laje mista (a) e ensaio de laje mista em pequena escala (b)

A realização dos ensaios é necessária porque cada fabricante de um sistema de laje mista adota um mecanismo de resistência ao cisalhamento longitudinal próprio e, como foi colocado anteriormente, a resistência e o comportamento dependem principalmente das características desse mecanismo.

Na verificação ao cisalhamento longitudinal utilizam-se dois métodos de cálculo que se baseiam nos ensaios experimentais: o método semi-empírico $m-k$, largamente utilizado na América do Norte e o método da interação parcial.

O método $m-k$ tem sido o mais adequado para as lajes mistas sem ancoragem de extremidade e sem a armadura positiva, enquanto que o método da interação parcial permite considerar a influência tanto da ancoragem quanto da armadura positiva nas lajes mistas.

Segundo JOHNSON (1994), o método da interação parcial não é adequado para lajes que utilizam fôrmas que transmitem o cisalhamento longitudinal somente por meio do atrito (ver Figura 1.4). Não há um modelo conceitual satisfatório e para este caso utiliza-se o método $m-k$.

Diversos pesquisadores apontam uma falha no método da interação parcial do EUROCODE 4 (1993): a resistência ao cisalhamento longitudinal advém principalmente da resistência das mossas, subestimando a força do atrito na interface da fôrma com o concreto na região do apoio, que também contribui na resistência, principalmente em lajes com pequenos vãos de cisalhamento.

Para admitir a força de atrito no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal, ensaios das lajes mistas em pequena escala, como mostra a Figura 1.3(b), são avaliados.

Além de separar a resistência mecânica da resistência do atrito, os ensaios em pequena escala fornecem parâmetros para a análise da laje através de métodos numéricos e diminuem os custos de execução e de materiais dos ensaios.

1.2. Objetivos

Os objetivos a serem alcançados neste trabalho são os seguintes:

- Estudo sucinto do comportamento e do cálculo da fôrma metálica isolada, considerando o sistema de laje mista antes da cura;
- Análise do comportamento e da resistência do sistema misto, a partir da investigação experimental de protótipos de lajes mistas simplesmente apoiadas com ancoragem de extremidade, utilizando o conector pino com cabeça - *stud bolt* - por meio das curvas carga x flecha no meio do vão, carga x deslizamento relativo de extremidade e carga x deformação no aço;
- Apresentação do procedimento para a verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas ancoradas, de acordo com o EUROCODE 4 (1993);
- Estudo da influência do atrito na região dos apoios da laje mista no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal.

1.3. Organização do Texto

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

No segundo capítulo faz-se um estudo sobre o comportamento e o dimensionamento da fôrma metálica isolada - *Steel Deck* MF-75 - antes da cura do concreto. O dimensionamento é feito através da norma americana AISI (1996) para perfis de chapa fina conformados a frio. Os critérios de carregamento e de dimensionamento são aqueles específicos para o

sistema de laje mista. Um programa desenvolvido em linguagem de programação *DELPHI 5* é apresentado contendo a verificação para os estados limites envolvidos.

No terceiro capítulo, é apresentado o programa de ensaios realizados bem como os seus resultados. Os ensaios dos protótipos das lajes mistas ancoradas e não ancoradas e os ensaios de caracterização dos materiais - chapa de aço da fôrma e concreto - empregados nos protótipos são descritos e os resultados apresentados em tabelas. Esses resultados fornecem os dados para o dimensionamento da laje mista.

No quarto capítulo são analisados os resultados obtidos dos ensaios para o estudo do comportamento e da resistência do sistema misto com ancoragem de extremidade. Comparações entre os resultados dos ensaios das lajes mistas com e sem ancoragem são feitas para distinguir os principais aspectos do comportamento e apontar a influência da ancoragem de extremidade na resistência ao cisalhamento longitudinal.

No quinto capítulo, a determinação da capacidade de carregamento do sistema misto com ancoragem de extremidade é feita através do método da interação parcial, conforme o EUROCODE 4 (1993). Os resultados das expressões analíticas de dimensionamento de lajes ancoradas e não ancoradas são comparados e os valores de resistência das lajes mistas são calculados em função da quantidade de *stud bolts* adotada.

A influência do atrito na região dos apoios da laje mista é estudada no sexto capítulo. Alguns métodos propostos por diversos autores são apresentados para a consideração desta influência. Utilizando-se resultados de ensaios de protótipos, estes métodos são comparados e analisados para avaliar a adequação dos mesmos.

Finalmente, as conclusões são apresentadas no capítulo sete.

2. FÔRMA METÁLICA *STEEL DECK* MF-75

2.1. Considerações Gerais

As fôrmas metálicas estão disponíveis no mercado externo com uma grande diversidade de geometrias e tamanhos e normalmente consistem de chapas finas formadas a frio. Na Figura 2.1 são ilustradas algumas seções típicas de fôrma metálica usada na construção de lajes mistas.

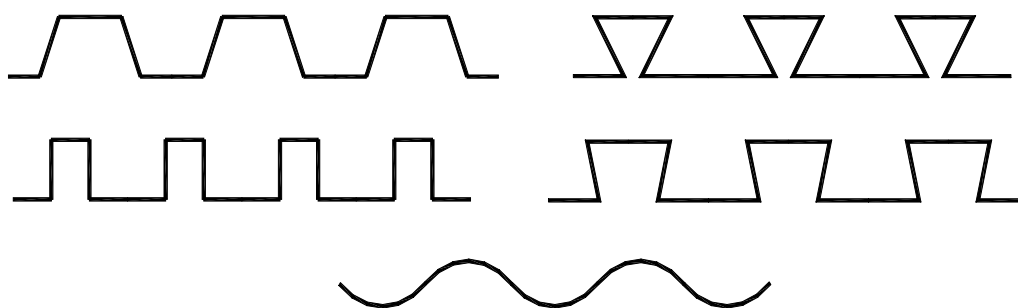


FIGURA 2.1 - Seções típicas de fôrmas metálicas

A fôrma metálica geralmente trabalha na direção longitudinal às nervuras, deve resistir isoladamente às cargas atuantes na fase construtiva da laje e satisfazer os critérios de cálculo para um dimensionamento seguro.

O comportamento nesta fase é o de perfis de chapa fina e o dimensionamento pode ser feito através de normas técnicas para perfis de chapa fina por meio de cálculos ou por meio de ensaios experimentais: AISI (1996), EUROCODE 3 - Parte 1.3 (1996), etc.

As variações das dimensões da fôrma dependem da funcionalidade do sistema misto, por exemplo, obtenção de maior capacidade de carregamento durante a fase construtiva, principalmente para se alcançar maiores vãos sem a utilização de escoramento e maior capacidade de carregamento da laje.

Por razões econômicas as fôrmas metálicas são muito finas e segundo o DESIGN MANUAL FOR COMPOSITE SLABS (1995) geralmente possuem espessura entre 0,80mm e 1,20mm. De acordo com SCHUSTER (1976) a altura das fôrmas usuais pode variar de 38mm a 76mm.

Em geral, a chapa é galvanizada nas faces contra corrosão. SCHUSTER (1976) menciona que pode-se fazer um tratamento com fosfato na superfície da chapa, para fornecer uma certa contribuição na resistência ao cisalhamento longitudinal no comportamento misto da laje de modo a aumentar a rugosidade e conseguir um maior atrito.

A fôrma metálica empregada nas lajes mistas estudadas neste trabalho foi o *Steel Deck* MF-75 fabricado pela Metform S.A., ilustrada na Figura 2.2, de espessuras de 0,80mm e 1,25mm com mossas estampadas nas almas. Na galvanização consegue-se aproximadamente 0,02mm de zinco em cada face da fôrma. A Tabela 2.1 fornece as características da seção transversal do *Steel Deck* MF-75 sem considerar a camada de zinco.

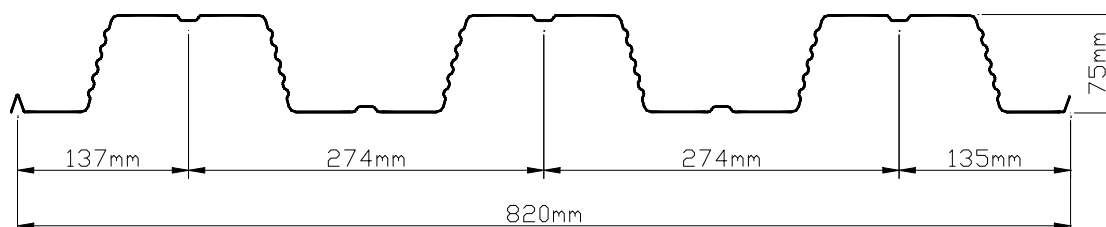


FIGURA 2.2 - Seção transversal do *Steel Deck* MF-75

TABELA 2.1 - Propriedades do *Steel Deck* MF-75 para 1,00m de largura

t_n (mm)	t (mm)	h_f (mm)	A_g (mm ²)	y_{cg} (mm)	I (mm ⁴)	w_f (kN/m ²)
0,80	0,76	74,98	1.082	37,49	1.069.500	0,083
0,95	0,91	75,13	1.315	37,57	1.300.070	0,101
1,25	1,21	75,43	1.722	37,72	1.703.330	0,133

Onde,

t_n - espessura nominal da fôrma;

t - espessura da fôrma sem camada de galvanização;

h_f - altura total da fôrma;

A_g - área bruta da seção da fôrma;

y_{cg} - distância do centro de gravidade à face externa inferior da fôrma;

I - momento de inércia da seção transversal bruta;

w_f - peso próprio da fôrma.

Neste capítulo, serão apresentados os critérios de carregamento e os critérios de cálculo para o dimensionamento da fôrma metálica, *Steel Deck* MF-75, durante a fase de construção do sistema de laje mista, quando a fôrma metálica deve resistir isoladamente às cargas externas atuantes, satisfazendo os requisitos para os estados limites últimos e de utilização. O dimensionamento será baseado na norma norte-americana AISI (1996), utilizando-se o método dos estados limites e um programa em linguagem *Delphi* foi desenvolvido para automatizar o cálculo da resistência do *Steel Deck* MF-75.

A norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio possui um texto-base que ainda está em aprovação, e é fundamentado no AISI (1996), embora inclua algumas recomendações e procedimentos do EUROCODE 3 (1996) e da norma australiana AS/NZS 4600 (1996).

2.2. Critérios de Carregamento

Algumas normas e manuais técnicos consideram distintos carregamentos na fase de construção da laje mista. Ao observar diferentes hipóteses de carregamento, deve-se obter a situação mais desfavorável para o

dimensionamento a fim de assegurar que os estados limites não sejam alcançados.

Os critérios adotados pelo EUROCODE 4 (1993), CSSBI (1988) e SDI (1995) serão apresentados a seguir.

EUROCODE 4 (1993)

O EUROCODE 4 (1993) define as seguintes cargas para o cálculo da fôrma metálica:

- peso do concreto fresco;
- peso da fôrma metálica;
- cargas de construção, incluindo o amontoamento do concreto durante a construção;
- carga temporária de armazenamento;
- efeito de empoçamento.

O peso próprio da fôrma metálica, o peso do concreto e o efeito de empoçamento são considerados cargas permanentes.

As cargas de construção representam o peso de todas as operações envolvidas na concretagem e consideram qualquer impacto ou vibração que possa ocorrer. A Figura 2.3, a seguir, mostra o esquema de carregamento para fôrma de vão simples.

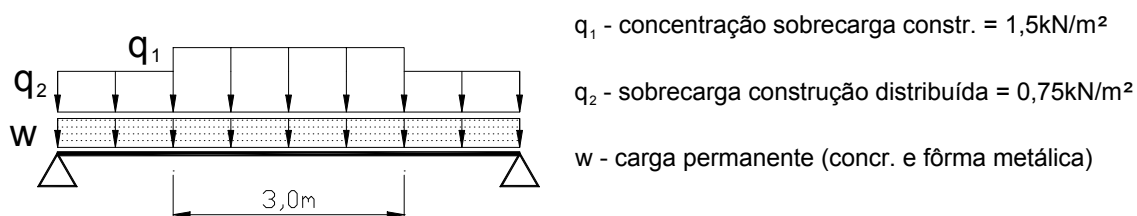


FIGURA 2.3 - Carregamento da fôrma metálica de vão simples de acordo com o EUROCODE 4 (situação de momento máximo)

Numa área qualquer de 3m por 3m, além do peso próprio do concreto e da fôrma, a carga de construção e o peso do concreto excedente são considerados juntos e tomados como $q_1=1,5\text{kN/m}^2$ (valor nominal). Uma carga nominal de construção de $q_2=0,75\text{kN/m}^2$ deve ser acrescentada na área restante. Estas cargas devem estar dispostas de modo a causar as condições mais desfavoráveis ao dimensionamento da fôrma metálica.

O efeito de empoçamento - *ponding effect* - é o aumento da altura do concreto causado pela flexão da fôrma, conforme ilustrado na Figura 2.4, onde h_c é a altura total da laje mista e Δ é o aumento da altura da laje devido ao efeito de empoçamento.

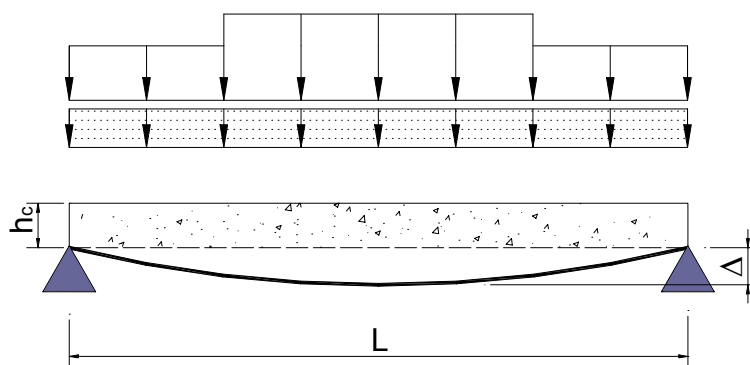


FIGURA 2.4 - Efeito de empoçamento numa fôrma simplesmente apoiada

Se a flecha central da fôrma, δ , causada pelo peso próprio do concreto e da fôrma, calculada para o estado limite de utilização, for menor que $L/250$ (L é o vão da fôrma entre apoios) e menor que 20mm, então o efeito de empoçamento pode ser ignorado. Caso um desses limites seja ultrapassado, então o efeito deve ser admitido. O EUROCODE 4 (1993) sugere, para a consideração deste efeito, que a altura do concreto seja acrescida de $0,70\delta$ em todo o vão da laje.

CSSBI 12M-84 (1988)

Segundo o CSSBI 12M-84 (1988), a fôrma deve resistir isoladamente aos efeitos das cargas combinadas devido ao peso do concreto, da fôrma e às seguintes sobrecargas mínimas de construção combinadas separadamente:

- uma carga uniformemente distribuída $q=1,0\text{kN/m}^2$ ou
- uma carga linear transversal $P=2,2\text{kN/m}$.

Pode-se assumir que a carga linear é aplicada com uma largura de 300mm. A Figura 2.5 mostra carregamentos que produzem momentos fletores máximos de uma fôrma simplesmente apoiada segundo o CSSBI 12M-84 (1988).

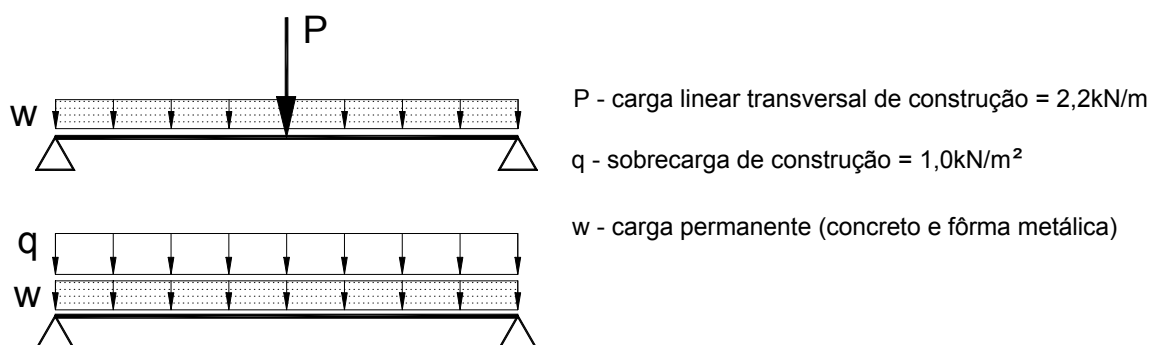


FIGURA 2.5 - Carregamentos da fôrma metálica de vão simples de acordo com o CSSBI 12M-84 (1988)

O CSSBI 12M-84 (1988) considera o efeito de empoçamento no fator de majoração da carga permanente.

SDI (1995)

O SDI (1995) apresenta os mesmos critérios de carregamento dados pelo CSSBI 12M-84 (1988) mas despreza o efeito de empoçamento. Além disso, nas fôrmas simplesmente apoiadas, a carga de concreto deve ser aumentada em 50% quando não existe controle na colocação do concreto.

Apesar das considerações de carregamentos anteriores, podem existir situações em que seja necessário uma atenção especial a outros tipos de carga ou condições específicas, tais como:

- carga dinâmica;
- carga concentrada;
- ações para a fôrma trabalhando como diafragma;
- ação do momento nas duas direções da fôrma;
- exposição a ambientes corrosivos;
- aditivos no concreto;
- outras condições que podem afetar o dimensionamento, fabricação ou transporte.

2.3. Critérios de Dimensionamento

2.3.1. Considerações Iniciais

As fôrmas metálicas usadas na construção da laje mista geralmente consistem de chapas finas. Considera-se que os perfis de chapa fina são compostos por elementos de placa, os quais são propensos ao fenômeno denominado de flambagem local, pois possuem altos valores da razão largura/espessura da chapa.

O comportamento da chapa pode ser analisado no regime elástico ao se usar a teoria de placas finas. No entanto, a análise dos perfis de chapa fina torna-se muito complexa devido a fatores tais como a resistência pós-flambagem, a flambagem por cisalhamento, o dobramento a frio da chapa, a presença de enrijecedores, de mossas e/ou de indentações, etc. Por essas razões, a determinação da capacidade de carregamento é simplificada baseando-se em ensaios experimentais e no conceito da largura efetiva.

Considerando-se que a espessura da seção seja uniforme, o cálculo das características geométricas é feito ao assumir que a espessura concentra-se na linha do esqueleto e, portanto, as seções retilíneas e curvas (cantos) de um perfil são idealizadas em linhas.

A seção transversal da fôrma *Steel Deck* MF-75 tem seu formato trapezoidal e um enrijecedor intermediário localiza-se nas mesas superior e inferior. A configuração geométrica e as dimensões de uma onda da fôrma são ilustradas na Figura 2.6, onde R é o raio de dobra, r é o raio de dobra da linha do esqueleto, α é o ângulo de dobra e t é a espessura da fôrma sem a camada de zinco.

No dimensionamento da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75 as almas são consideradas totalmente planas, ignora-se a presença das mossas para simplificação do cálculo. Somente uma onda da forma é analisada no dimensionamento e os valores dos resultados são proporcionais à largura considerada da fôrma.

O cálculo das características geométricas da fôrma metálica é baseado nas larguras efetivas dos elementos de placa que a compõem, os quais são propensos à flambagem local. A influência dos enrijecedores é admitida nos cálculos.

Como a área efetiva diminui sob o aumento do momento fletor, a localização da linha neutra pode mudar para uma posição mais próxima do flange tracionado. Deste modo, um processo iterativo é necessário para o cálculo das larguras efetivas.

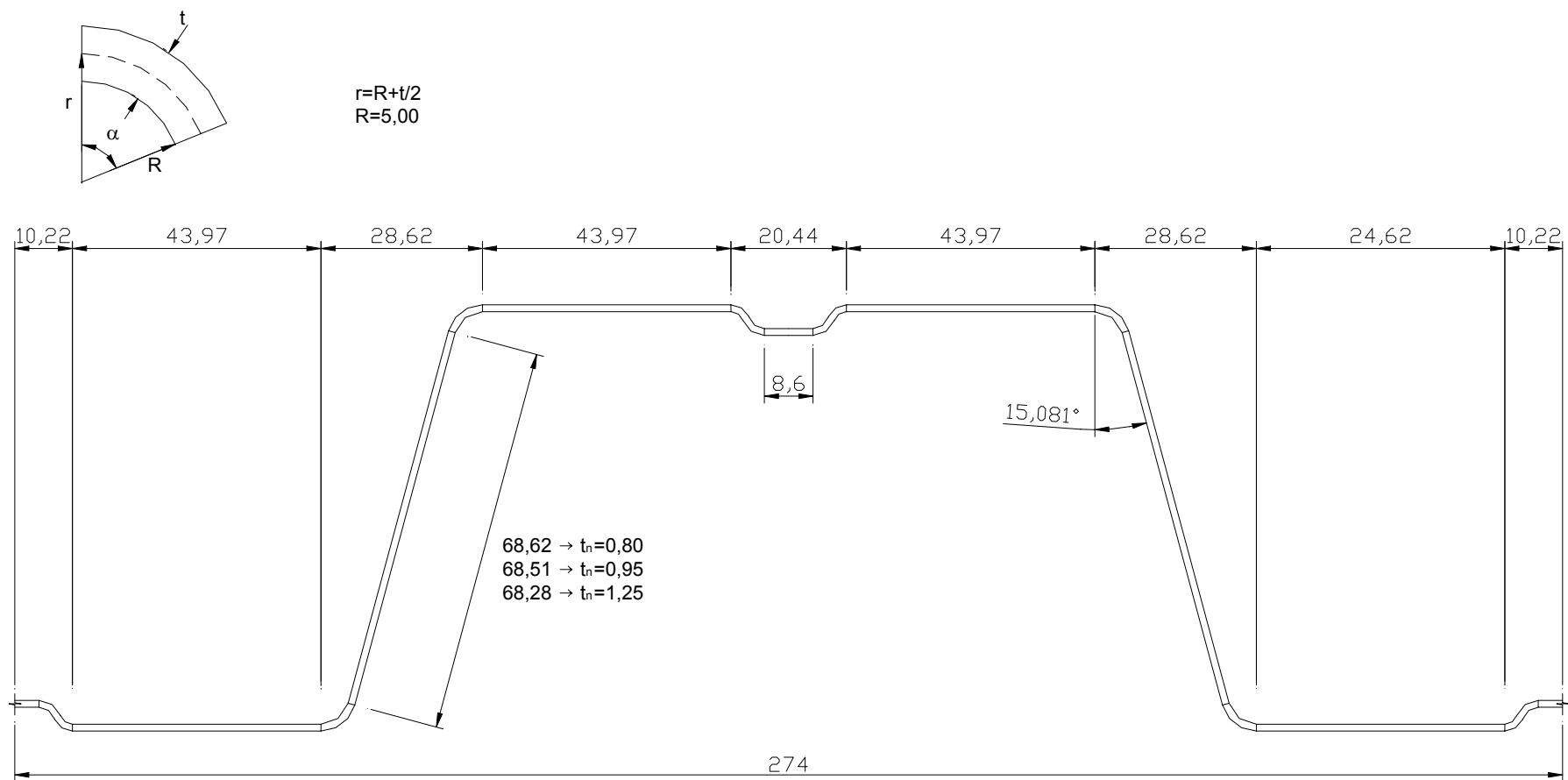


FIGURA 2.6 - Dimensões e detalhes da geometria de uma onda da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75

Para o dimensionamento da fôrma metálica são adotados os critérios do AISI (1996) baseados no método dos estados limites. A fôrma metálica de um sistema de laje mista fica submetida principalmente ao momento fletor e ao esforço cortante e apresenta os seguintes estados limites:

- Estados Limites Últimos:
 - Momento Fletor;
 - Esforço Cortante;
 - Interação Momento Fletor e Esforço Cortante;
 - *Web Crippling*;
 - Interação Momento Fletor e *Web Crippling*.
- Estados Limites de Utilização:
 - Flecha Máxima.

2.3.2. Momento Fletor

Os elementos de placa que formam um perfil, veja Figura 2.7, são classificados, segundo o AISI (1996), em:

- elemento enrijecido: elemento plano com as duas bordas apoiadas por meio de almas ou mesas na direção longitudinal do perfil.
- elemento parcialmente enrijecido (com borda enrijecedora): elemento plano com uma das bordas apoiada por meio de enrijecedores de borda na direção longitudinal do perfil.
- elemento não enrijecido: elemento plano apoiado em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil.

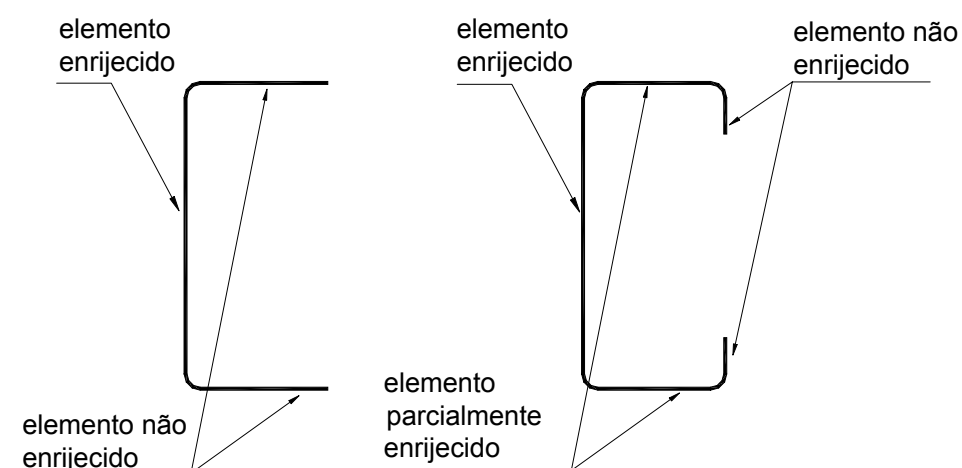


FIGURA 2.7 - Elementos enrijecidos, elementos não enrijecidos e elementos parcialmente enrijecidos segundo o AISI/96

Quando as placas ficam sujeitas a tensões de compressão, elas podem flambar localmente com uma tensão menor do que a de escoamento. A Figura 2.8 mostra a flambagem local da alma e da mesa de um perfil U.

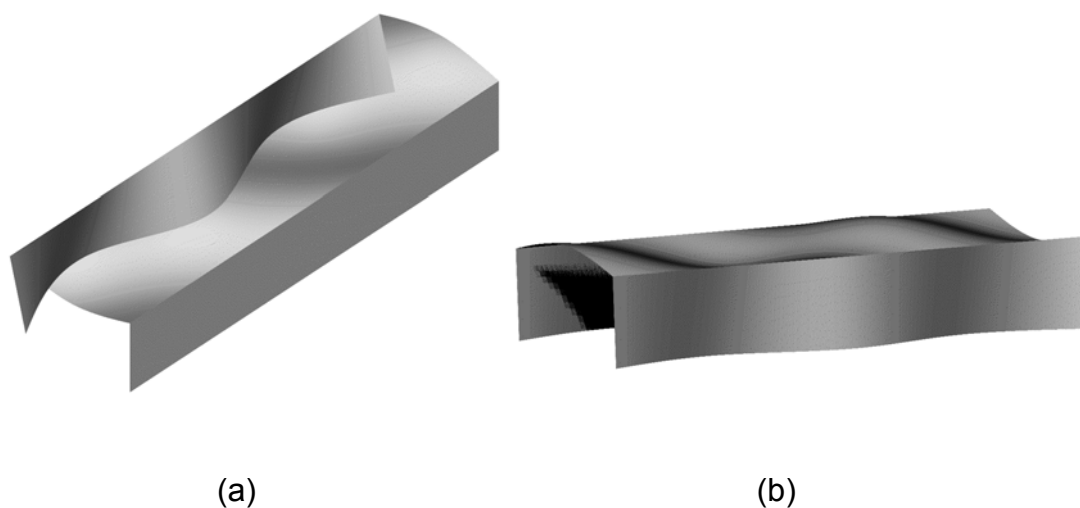


FIGURA 2.8 - Flambagem local da mesa (a) e da alma (b) do perfil U

A distribuição de tensões nas almas devida à ação de flexão imposta na seção da fôrma é mostrada na Figura 2.9.

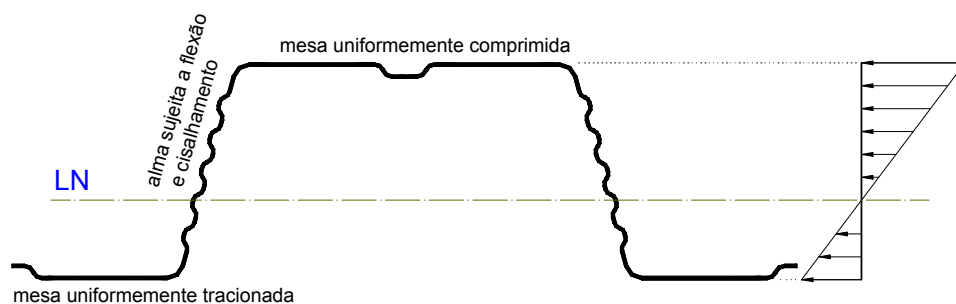


FIGURA 2.9 -Tensões impostas nas almas de uma onda da fôrma devidas ao momento fletor positivo

Assumindo-se que as bordas longitudinais das chapas comprimidas estejam simplesmente apoiadas (elementos enrijecidos), o valor da tensão crítica de flambagem elástica, oriundo da teoria clássica da estabilidade elástica, é dada pela Equação 2.1.

$$f_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad (2.1)$$

Onde,

f_{cr} - tensão crítica de flambagem elástica de placas;

k - coeficiente de flambagem de placas;

E - módulo de elasticidade longitudinal;

ν - coeficiente de Poisson;

t - espessura da placa;

w - largura da placa.

Resistência pós-flambagem

O ocorrência da flambagem local não implica imediatamente em colapso por causa da resistência pós-flambagem, o qual permite que o elemento resista a tensões superiores àquelas correspondentes ao f_{cr} .

No instante da flambagem da placa as fibras centrais, onde os deslocamentos são maiores, têm pouca participação no acréscimo de carga. O aumento de carga é resistido pelas regiões próximas das bordas longitudinais onde as fibras transversais tornam-se tracionadas e passam a se opor ao aumento dos deslocamentos como é ilustrado na Figura 2.10.

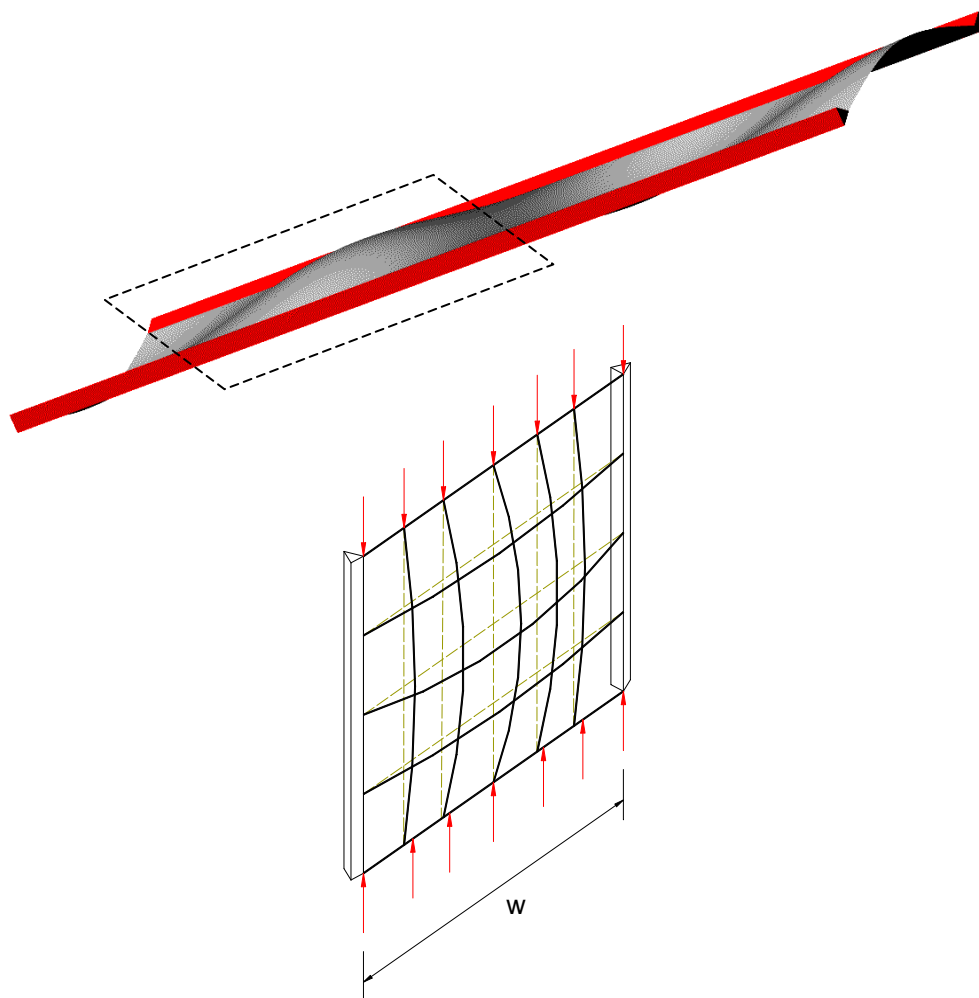


FIGURA 2.10 - Configuração da flambagem de placa simplesmente apoiada

Antes da flambagem, a distribuição de tensão na largura da chapa, f_1 , é uniforme como é ilustrada na Figura 2.11(a). Logo após a flambagem, a tensão de compressão se redistribui ao longo da mesa de maneira mostrada na Figura 2.11(b). As tensões são maiores nas bordas e menores no centro. Com aumento da carga aplicada, essa não-uniformidade aumenta progressivamente, Figura 2.11(c).

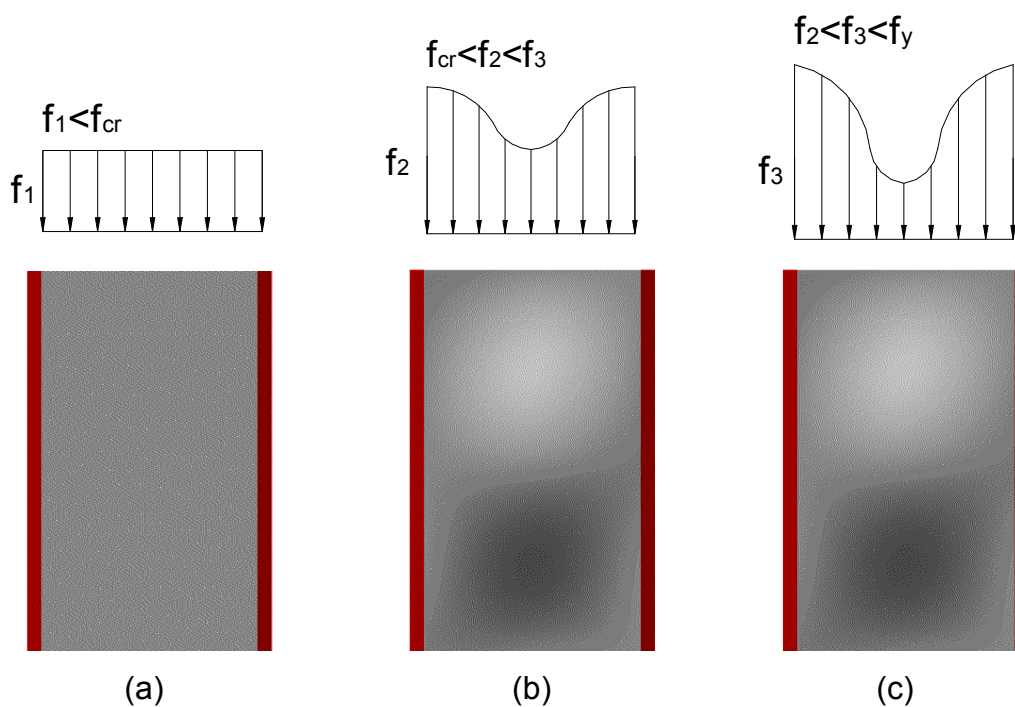


FIGURA 2.11 - Distribuição de tensões na placa antes e após a flambagem

Segundo YU (2000), a redistribuição de tensões continua até que a tensão na borda atinja o limite de escoamento do aço e assim a placa entra em colapso.

A resistência da placa aumenta em relação àquela determinada pela tensão crítica de flambagem local, principalmente nos elementos enrijecidos. Nos elementos não enrijecidos este aumento não é muito significativo.

Conceito de largura efetiva

A resistência pós-flambagem é considerada ao se usar o conceito da largura efetiva introduzido por von Karman *et al.* em 1932, o qual é ilustrado na Figura 2.12 para uma placa simplesmente apoiada sob compressão uniforme.

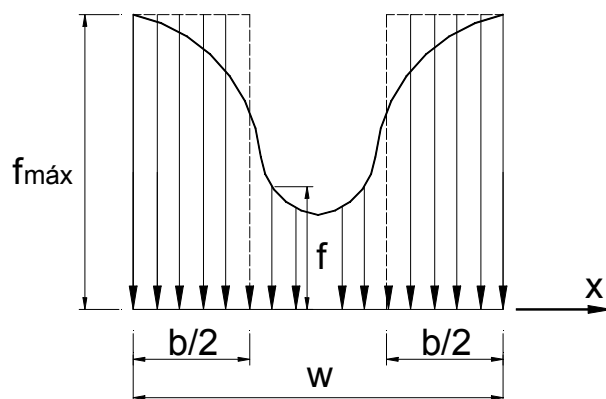


FIGURA 2.12 - Conceito da largura efetiva de placa com tensão de compressão uniforme

A largura efetiva, b , é uma largura fictícia de chapa sobre a qual uma distribuição uniforme de tensão, $f_{máx}$, produz a mesma resultante de força da distribuição real de tensão sobre toda a largura da chapa, ou seja:

$$\int_0^w f \cdot dx = b \cdot f_{máx} \quad (2.2)$$

A formulação de von Karman para o cálculo da largura efetiva em chapas perfeitas é dada pelas Equações 2.3 e 2.4.

$$\frac{b}{w} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{máx}}{f_{cr}}} \quad (2.4)$$

Onde,

λ - fator de esbeltez;

$f_{máx}$ - tensão de compressão máxima na borda da placa;

f_{cr} - tensão crítica de flambagem elástica da placa;

w - largura da placa;

b - largura efetiva da placa (veja a Figura 2.12).

Com relação às chapas reais, elas são portadoras de imperfeições: tensões residuais, imperfeições geométricas, etc. Novas formulações foram propostas ao se levar em conta estas imperfeições através de investigações experimentais e teóricas. A formulação de Winter, Equação 2.5, é a mais difundida e adotada em diversas especificações tais como o AISI (1996), o EUROCODE 3 - Parte 1.3 (1996), entre outras.

$$\frac{b}{w} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda}\right) \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (2.5)$$

Onde,

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{m\acute{a}x}}{f_{cr}}} = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t}\right) \sqrt{\frac{f_{m\acute{a}x}}{E}} \quad (2.6)$$

Através dessas equações, a largura efetiva, b, pode ser determinada da seguinte maneira:

$$b = w \quad \text{quando } \lambda \leq 0,673 \quad (2.7)$$

$$b = \rho \cdot w \quad \text{quando } \lambda > 0,673 \quad (2.8)$$

Onde ρ é o fator de redução:

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

A Figura 2.13 mostra a relação entre ρ e λ .

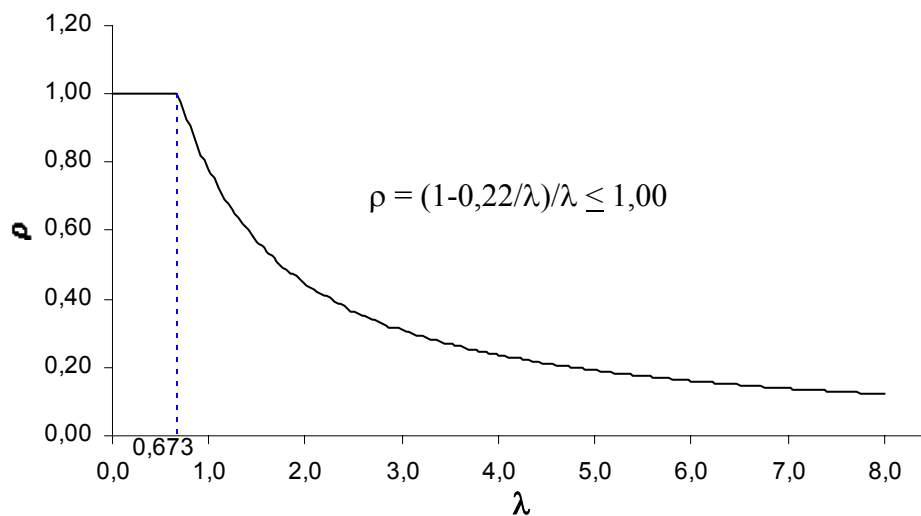


FIGURA 2.13 - Gráfico do fator de redução ρ com relação à esbeltez λ da placa

Cálculo do momento fletor resistente - $\phi_b M_n$

Os critérios do AISI (1996) determinam que o cálculo do momento fletor resistente da fôrma metálica baseado no início de escoamento da face externa da mesa, é dado por:

$$\phi_b \cdot M_n \quad (2.10)$$

Sendo,

$$M_n = f_y \cdot S_e \quad (2.11)$$

Onde,

ϕ_b - coeficiente de resistência para barras fletidas ($\phi_b = 0,95 \Rightarrow$ *Steel/Deck MF-75*);

M_n - resistência nominal ao momento fletor;

S_e - módulo de resistência elástico da seção efetiva;

f_y - tensão limite de escoamento nominal do aço.

Cálculo do módulo de resistência elástico da seção efetiva - S_e

O comportamento à flexão do módulo típico da fôrma é determinado através de um procedimento iterativo. Inicialmente, adota-se o valor da tensão de escoamento na face mais solicitada (face de onde o centro de gravidade fica mais afastado) e considera-se uma distribuição linear de tensão ao longo da altura da seção transversal, conforme a Figura 2.14.

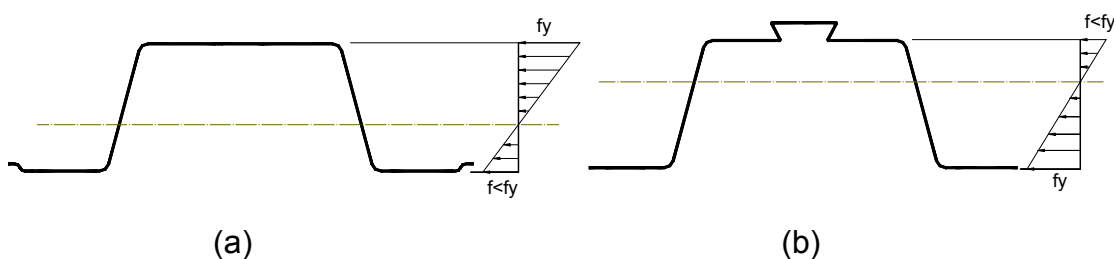


FIGURA 2.14 - Início de escoamento - (a) flange comprimido e (b) flange tracionado

As larguras efetivas correspondentes a cada elemento comprimido da seção são determinadas, e conseqüentemente obtém-se as características geométricas da seção efetiva. Para esta seção é determinada uma nova posição do centro de gravidade, a região comprimida da alma muda de posição e outro diagrama de tensão longitudinal é obtido. Faz-se sucessivos cálculos até que a posição do centro de gravidade convirja.

O módulo de resistência elástico da seção, S_e , é obtido quando a tensão de escoamento, f_y , atinge a fibra externa da mesa, que pode estar tracionada ou comprimida. Seu valor depende das larguras efetivas dos elementos de placa comprimidos que compõem a fôrma e da posição da linha neutra.

As regiões das placas submetidas a tensões de tração são consideradas totalmente efetivas.

Largura efetiva da mesa comprimida sem enrijecedor intermediário

A largura efetiva de um elemento enrijecido uniformemente comprimido é dada pelas Equações 2.6 a 2.9, mostradas novamente a seguir:

$$\lambda = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \cdot \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}} \quad (2.6)$$

$$b = w \quad \text{se } \lambda \leq 0,673 \quad (2.7)$$

$$b = \rho \cdot w \quad \text{se } \lambda > 0,673 \quad (2.8)$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda} \right) \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

Onde,

w - largura da mesa ilustrada na Figura 2.15;

λ - fator de esbeltez;

t - espessura da mesa;

f - tensão de compressão na face externa da mesa comprimida;

k - coeficiente de flambagem da placa: k=4 (placa enrijecida).

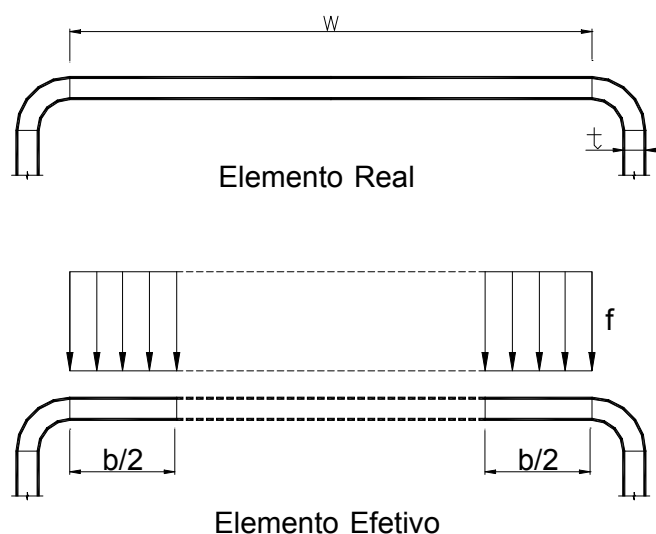


FIGURA 2.15 - Seção transversal de um elemento enrijecido

Largura efetiva da mesa comprimida com um enrijecedor intermediário

Segundo YU (2000), quando a razão largura/espessura da mesa enrijecida comprimida é relativamente alta, a eficiência estrutural da seção pode ser melhorada ao se colocar um enrijecedor intermediário na mesa, conforme mostra a Figura 2.16.

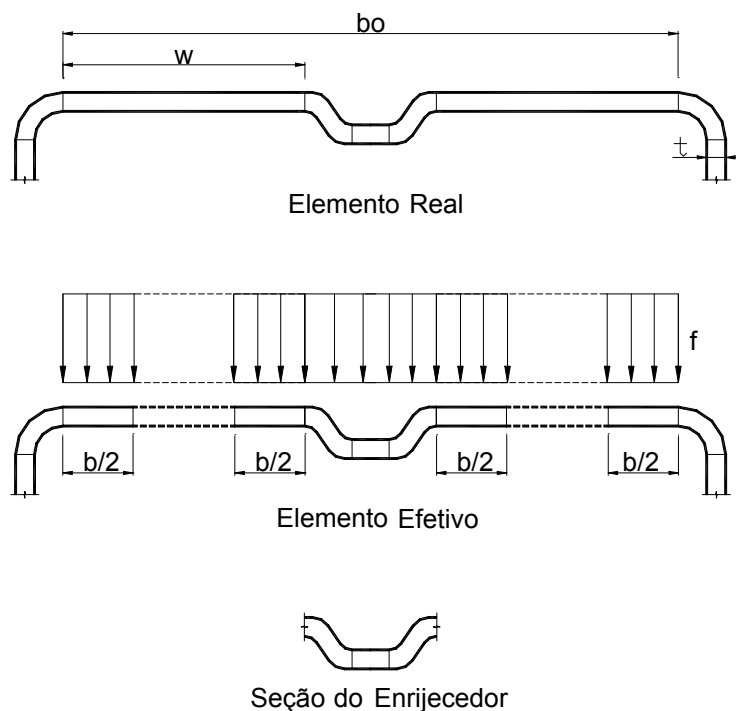


FIGURA 2.16 - Elemento enrijecido com um enrijecedor intermediário

No caso da mesa uniformemente comprimida com um enrijecedor intermediário, o cálculo da largura efetiva é dado por três casos:

Caso I: Para $b_0/t \leq S$

$$I_a = 0 \quad (\text{não há necessidade de enrijecedor intermediário}) \quad (2.12)$$

$$b = w \quad (2.13)$$

$$A_s = A'_s \quad (2.14)$$

Caso II: Para $S < b_o/t \leq 3S$

$$I_a = t^4 \cdot \left[\left(50 \frac{(b_o/t)}{S} \right) - 50 \right] \quad (2.15)$$

$$k = 3(I_s/I_a)^{1/2} + 1 \leq 4 \quad (2.16)$$

$$A_s = A'_s (I_s/I_a) \leq A'_s \quad (2.17)$$

Caso III: Para $b_o/t \geq 3S$

$$I_a = t^4 \cdot \left[\left(128 \frac{(b_o/t)}{S} \right) - 285 \right] \quad (2.18)$$

$$k = 3(I_s/I_a)^{1/3} + 1 \leq 4 \quad (2.19)$$

$$A_s = A'_s (I_s/I_a) \leq A'_s \quad (2.20)$$

Onde,

$$S = 1,28 \sqrt{E/f_y} ;$$

k - coeficiente de flambagem de placa;

b_o, w - larguras ilustradas na Figura 2.16;

A'_s - área efetiva do enrijecedor devida à flambagem local; o centro de gravidade do enrijecedor é considerado localizado no centro de gravidade da sua área bruta, como mostra a Figura 2.17;

A_s - área efetiva do enrijecedor usado no cálculo das propriedades da seção efetiva da fôrma;

I_a - momento de inércia ideal do enrijecedor de maneira que a placa se comporte como um elemento totalmente enrijecido;

I_s - momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao seu eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido;

b e A'_s são calculados de acordo com as Equações 2.6 a 2.9.

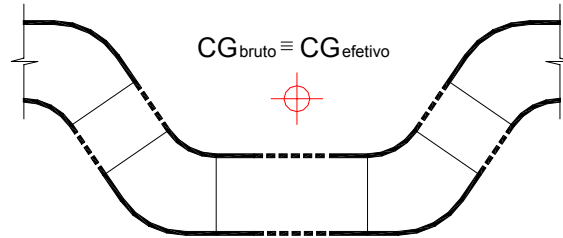


FIGURA 2.17 - Seção efetiva do enrijecedor

Largura efetiva de alma com gradiente de tensão

O desenvolvimento de uma solução analítica exata para almas com gradiente de tensão é bastante complexo, por isso muitos dos critérios de dimensionamento do AISI (1996) são baseados em resultados de ensaio. As larguras efetivas b_1 e b_2 , mostradas na Figura 2.18, são determinadas de acordo com as seguintes equações:

$$b_1 = \frac{b_e}{(3 - \psi)} \quad (2.21)$$

Para $\psi \leq -0,236$,

$$b_2 = b_e/2 \quad (2.22)$$

Para $\psi > -0,236$,

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (2.23)$$

Sendo que $(b_1 + b_2) \leq b_c$

Onde,

b_e - largura efetiva determinada de acordo com as Equações 2.6 a 2.9, substituindo-se f por f_1 e k determinado por:

$$k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi) \quad (2.24)$$

$$\psi = f_2/f_1 \quad (2.25)$$

b_c - porção comprimida da chapa;

f_1, f_2 - tensões na alma da seção mostradas na Figura 2.18, determinadas com base na seção efetiva; f_1 é tensão de compressão (+) e f_2 é tensão de tração (-).

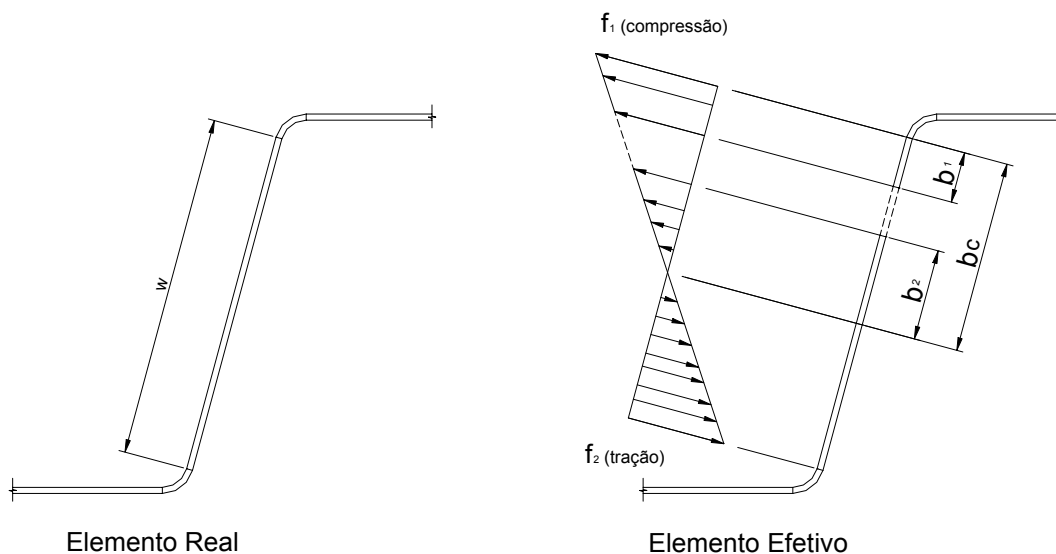


FIGURA 2.18 - Elemento enrijecido submetido a gradiente de tensão

O AISI (1996) permite determinar a capacidade de carregamento da fôrma à flexão baseado na reserva de capacidade inelástica, ou seja, a seção trabalha no regime inelástico assumindo uma curva tensão-deformação elasto-plástica perfeita, tanto para tração quanto para compressão. Este cálculo pode ser feito desde que o perfil atenda aos critérios do item C3.1.1(b) da norma, que retrata da reserva da capacidade inelástica.

Somente a fôrma *Steel Deck* MF-75 de espessura de 1,25mm atende ao critérios do AISI (1996), mas a sua máxima deformação de compressão é aquela que corresponde ao início de escoamento do aço e, portanto, a resistência ao momento fletor fica restrita ao regime elástico.

2.3.3. Esforço Cortante

No caso das fôrmas metálicas, conforme o *Steel Deck* MF-75, considera-se que apenas a alma resiste às tensões de cisalhamento.

Em almas que apresentam a relação altura/espessura relativamente pequena, a resistência ao esforço cortante é geralmente governada pelo escoamento do aço ao cisalhamento, com uma tensão de cisalhamento máxima de $f_y/\sqrt{3}$ (critério de von Misses).

Quando a alma da seção possui uma relação altura/espessura relativamente alta, a capacidade ao esforço cortante é governada pela flambagem local da alma ao cisalhamento. A flambagem por cisalhamento é caracterizado pela formação de ondas inclinadas na chapa. A expressão da tensão crítica de flambagem ao cisalhamento no regime elástico é dada por:

$$\tau_{cr} = \frac{k_v \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 \quad (2.26)$$

Onde,

k_v - coeficiente de flambagem por cisalhamento;

E - módulo de elasticidade longitudinal;

ν - coeficiente de Poisson;

h - altura da chapa;

t - espessura da chapa.

O valor de k_v depende das condições de contorno e da relação comprimento/altura da chapa.

No caso de flambagem no regime inelástico, a equação acima deixa de ser válida. Com base em análises experimentais, BASLER *apud* MALITE &

SÁLES (1993) propôs uma expressão da tensão crítica de flambagem no regime inelástico, usada atualmente na norma AISI (1996).

Segundo o AISI (1996), a resistência de cálculo ao esforço cortante, $\phi_v \cdot V_n$, de uma alma simples é dada a seguir:

1 - Para $h/t \leq 0,96\sqrt{E \cdot k_v/f_y}$ - Escoamento da alma ao cisalhamento

$$V_n = 0,60f_y \cdot h \cdot t \quad (2.27)$$

$$\phi_v = 1,0 \quad (2.28)$$

2 - Para $0,96\sqrt{E \cdot k_v/f_y} < h/t \leq 1,415\sqrt{E \cdot k_v/f_y}$ - Flambagem no regime inelástico

$$V_n = 0,64t^2 \cdot \sqrt{k_v \cdot f_y \cdot E} \quad (2.29)$$

$$\phi_v = 0,9 \quad (2.30)$$

3 - Para $h/t > 1,415\sqrt{E \cdot k_v/f_y}$ - Flambagem no regime elástico

$$V_n = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k_v \cdot t^3}{12(1-\nu^2) \cdot h} \quad (2.31)$$

$$\phi_v = 0,9 \quad (2.32)$$

Onde,

V_n - resistência nominal ao esforço cortante;

ϕ_v - coeficiente de resistência para o esforço cortante;

t - espessura da alma;

h - altura do plano da alma;

k_v - coeficiente de flambagem ao cisalhamento, sendo $k_v = 5,34$ para almas não enrijecidas.

A Figura 2.19 mostra graficamente a resistência ao cisalhamento segundo o AISI (1996).

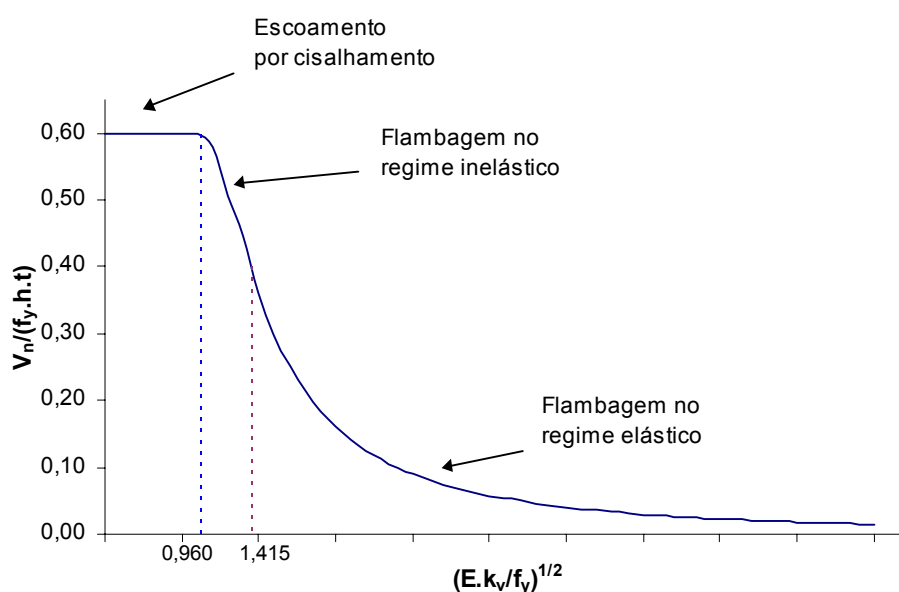


FIGURA 2.19 - Gráfico da resistência ao cisalhamento com relação à esbeltez da alma

2.3.4. Interação Momento Fletor e Esforço Cortante

Segundo YU (2000), quando atuam altas tensões normais e de cisalhamento, a alma de uma seção delgada pode flambar sob uma tensão normal ou de cisalhamento menor do que aquela calculada isoladamente.

Para perfis sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo, M_u , e esforço cortante solicitante de cálculo, V_u ,

deverão satisfazer a seguinte Equação 2.33, ilustrada graficamente na Figura 2.20.

$$\left(\frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \right)^2 + \left(\frac{V_u}{\phi_v \cdot V_n} \right)^2 \leq 1,00 \quad (2.33)$$

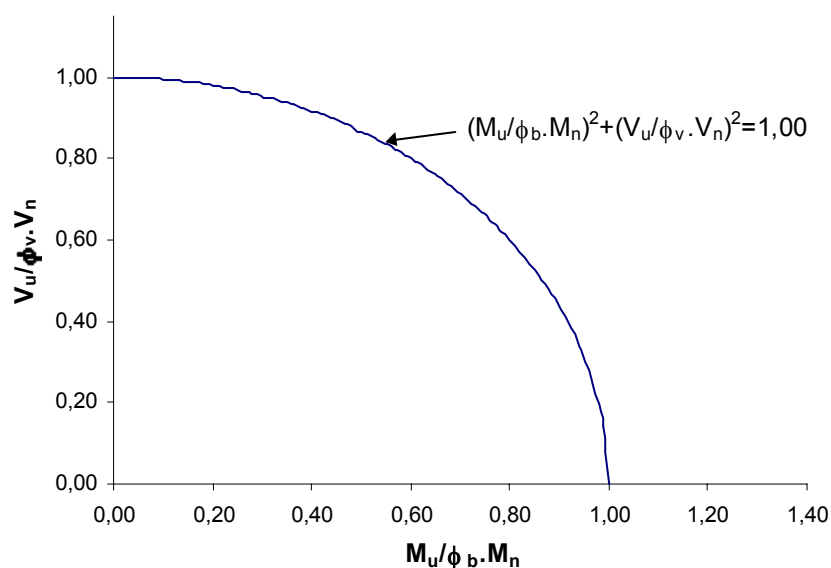


FIGURA 2.20 - Relação de interação do momento fletor e esforço cortante

2.3.5. Web Crippling

As almas dos perfis metálicos podem ficar danificadas localmente quando são submetidas (compressão) à força concentrada ou reação de apoio. A Figura 2.21 ilustra a falha por *web crippling* de um perfil I e de uma fôrma metálica.

A verificação a *web crippling* é aplicada a almas de barras fletidas sujeitas a cargas concentradas ou a reações de apoio que comprimem a alma, atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal e no plano da alma, e sem enrijecedores transversais.

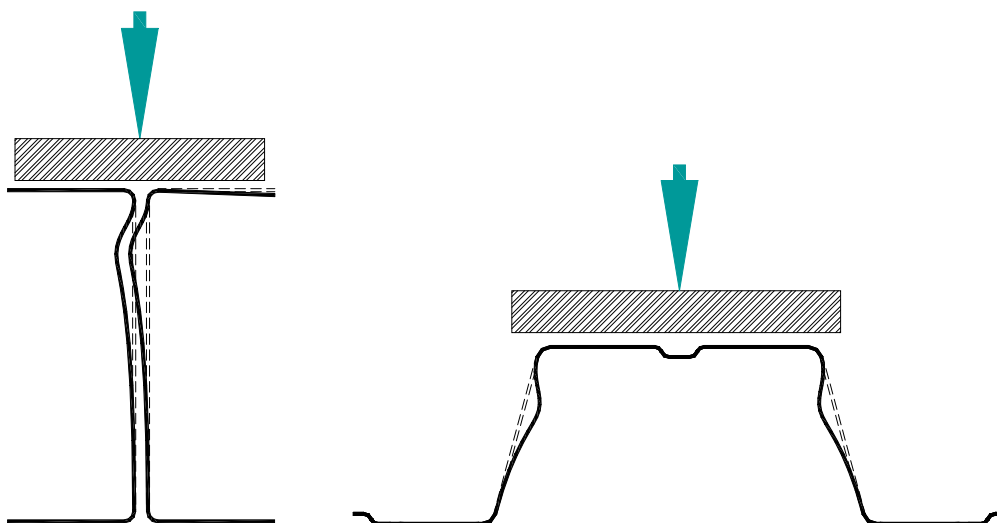


FIGURA 2.21 - Falha por *web crippling* da viga I e fôrma devida a forças concentradas

A análise teórica do *web crippling* é complexa e envolve vários fatores, tais como a distribuição de tensão não uniforme sob a carga aplicada e regiões adjacentes à alma, flambagem da alma, escoamento local na região de aplicação da carga, almas inclinadas, entre outros. A verificação é baseada em ensaios experimentais.

A norma americana AISI (1996) prevê quatro condições de carregamento para a verificação de *web crippling* provocada por carga concentrada em almas de vigas não enrijecidas:

- Carregamento em uma mesa de extremidade;
- Carregamento em uma mesa interna;
- Carregamento em duas mesas de extremidade;
- Carregamento em duas mesas interna.

Estas quatro condições são ilustradas na Figura 2.22.

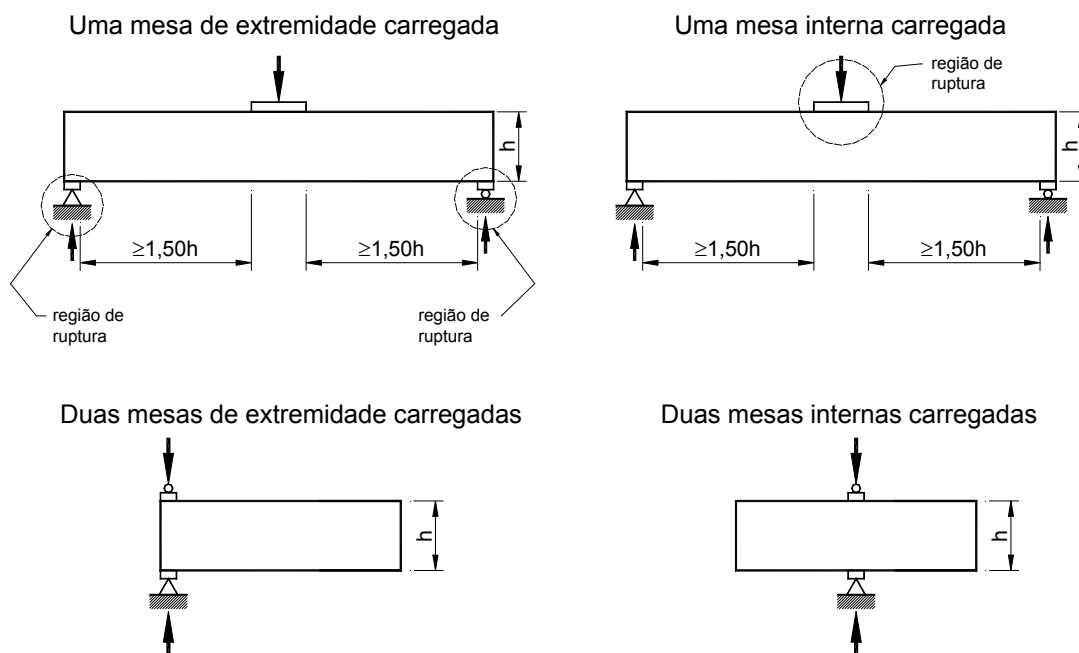


FIGURA 2.22 - Condições de carregamento ensaiadas experimentalmente

De acordo com YU (2000), quando a distância entre duas cargas concentradas é maior que $1,5h$, considera-se que apenas uma mesa está carregada, caso contrário admite-se que as duas mesas estão carregadas.

A mesa é de extremidade quando a distância da carga concentrada atuante até a extremidade é menor que $1,5h$, caso contrário a mesa é interna.

A resistência de cálculo a *web crippling* é dada por:

$$\phi_w \cdot P_n \quad (2.34)$$

Onde,

P_n - resistência nominal a *web crippling*;

ϕ_w - coeficiente de resistência de *web crippling*.

O coeficiente de resistência de *web crippling* para almas simples não enrijecidas é:

$$\phi_w = 0,75 \quad (2.35)$$

A resistência nominal a *web crippling* é calculada seguindo-se a Tabela 2.2.

TABELA 2.2 - Equações para o cálculo da resistência nominal a *web crippling* - P_n

P_n		Perfis com almas simples	
		Mesas enrijecidas ou parcialmente enrijecidas	Mesas não enrijecidas
Forças aplicadas em mesas opostas com espaçamento $> 1,5h$ <i>uma mesa carregada</i>	Força na extremidade da viga $< 1,5h$ <i>mesa extremidade</i>	Eq. (2.36)	Eq. (2.37)
	Força interna $\geq 1,5h$ <i>mesa interna</i>	Eq. (2.38)	Eq. (2.38)
Forças aplicadas em mesas opostas com espaçamento $\leq 1,5h$ <i>duas mesas carregadas</i>	Força na extremidade da viga $< 1,5h$ <i>mesa extremidade</i>	Eq. (2.39)	Eq. (2.39)
	Força interna $\geq 1,5h$ <i>mesa interna</i>	Eq. (2.40)	Eq. (2.40)

As equações enumeradas na Tabela 2.2 estão relacionadas a seguir, com P_n em Newton, f_y e E em MPa, N , t e h em mm. A Figura 2.23 ilustra os casos de aplicação das Equações 2.36 a 2.40.

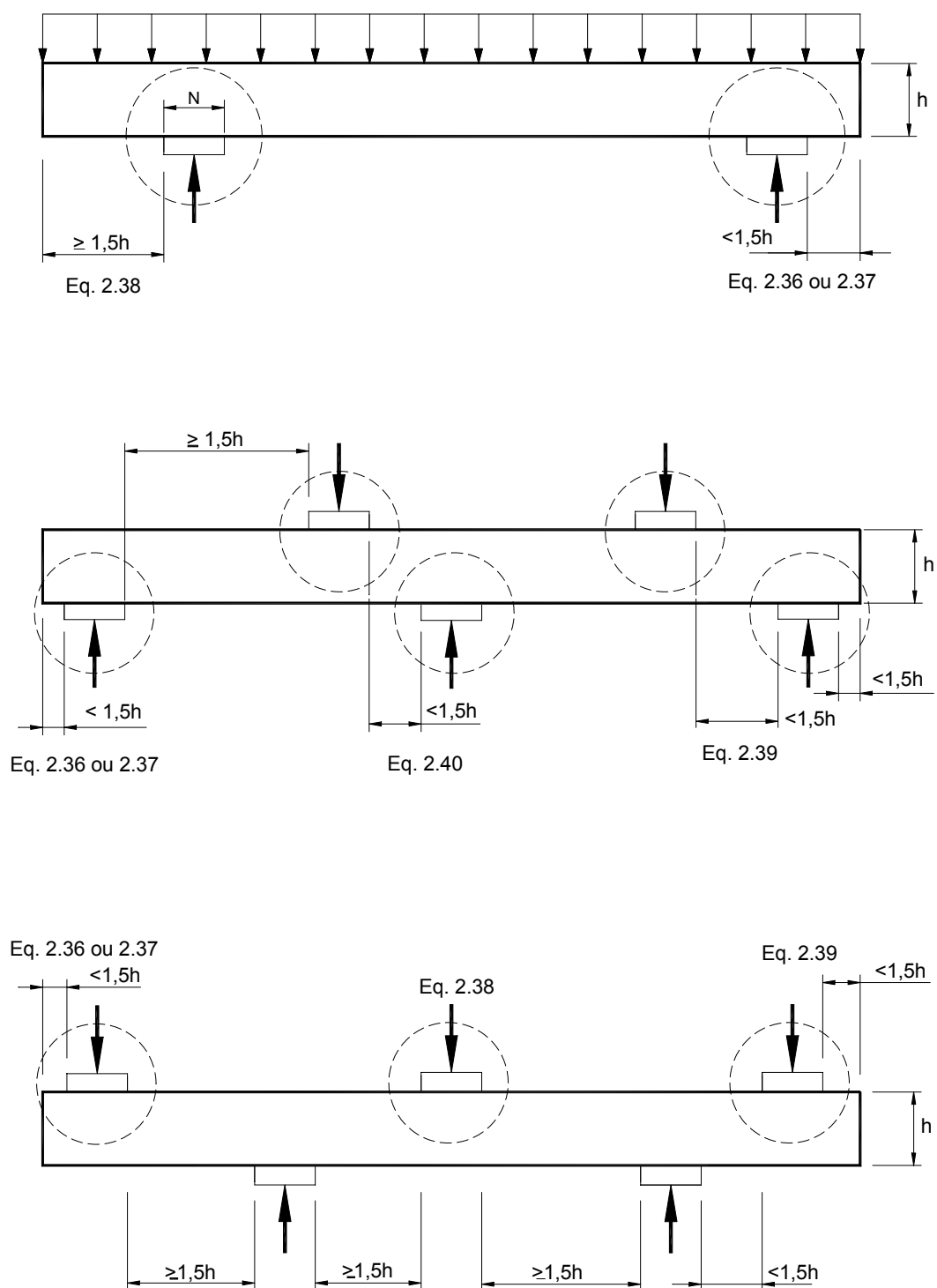


FIGURA 2.23 - Casos de aplicação das Equações 2.36 a 2.40

$$P_n = t^2 k C_3 C_4 C_9 C_\theta [331 - 0,61(h/t)] [1 + 0,01(N/t)] \quad (2.36)$$

$$P_n = t^2 k C_3 C_4 C_9 C_\theta [217 - 0,28(h/t)] [1 + 0,01(N/t)] \quad (2.37)$$

Quando $N/t > 60$, o fator $[1 + 0,01(N/t)]$ pode ser aumentado para $[0,71 + 0,015(N/t)]$

$$P_n = t^2 k C_1 C_2 C_9 C_\theta [538 - 0,74(h/t)] [1 + 0,007(N/t)] \quad (2.38)$$

Quando $N/t > 60$, o fator $[1 + 0,007(N/t)]$ pode ser aumentado para $[0,75 + 0,011(N/t)]$

$$P_n = t^2 k C_3 C_4 C_9 C_\theta [244 - 0,57(h/t)] [1 + 0,01(N/t)] \quad (2.39)$$

$$P_n = t^2 k C_1 C_2 C_9 C_\theta [771 - 2,26(h/t)] [1 + 0,0013(N/t)] \quad (2.40)$$

Quando $f_y \geq 459 \text{ MPa}$ o valor de $k C_3$ pode ser tomado como 1,34.

Onde,

$$C_1 = 1,22 - 0,22k \quad (2.41)$$

$$C_2 = 1,06 - 0,06(R/t) \leq 1,0 \quad (2.42)$$

$$C_3 = 1,33 - 0,33k \quad (2.43)$$

$$C_4 = 1,15 - 0,15(R/t) \quad (0,5 \leq C_4 \leq 1,0) \quad (2.44)$$

$$C_9 = 6,9 \quad (2.45)$$

$$C_\theta = 0,7 + 0,3(\theta/90)^2 \quad (2.46)$$

$$k = 894(f_y/E) \quad (2.47)$$

Onde,

N - comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada (ver Figura 2.23). Para o caso de forças iguais aplicadas em ambas as mesas, com comprimentos de atuação diferentes, adotar o menor valor de N;

h - altura da parte plana da alma;

R - raio interno de dobramento;

t - espessura da alma;

θ - ângulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio, em graus ($45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

As equações podem ser usadas somente para almas não enrijecidas tendo $h/t \leq 200$, $N/t \leq 210$, $N/h \leq 3,50$, $R/t \leq 7,00$ e $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

Quando a resistência de cálculo $\phi_w P_n$ é inferior à carga concentrada aplicada, devem ser previstos enrijecedores transversais nestas seções.

2.3.6. Interação Momento Fletor e *Web Crippling*

As barras constituídas de almas simples sujeitas a combinação de *web crippling* e momento fletor têm a capacidade de resistência a *web crippling* significativamente reduzida.

A combinação de momento fletor e *web crippling* pode ser crítica em barras simplesmente apoiadas com carga concentrada no meio do vão e em barras contínuas nos apoios intermediários.

Segundo o AISI (1996), a resistência de perfis de almas simples não enrijecidas sujeitos à flexão e cargas concentradas deverá satisfazer as condições a seguir, onde P_u é a carga de cálculo solicitante. A equação é baseada em ensaios experimentais.

Para $\frac{P_u}{\phi_w \cdot P_n} \leq 0,39$:

$$\frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \leq 1,0 \quad (2.48)$$

Para $0,39 < \frac{P_u}{\phi_w \cdot P_n} \leq 1,0$:

$$1,07 \cdot \left(\frac{P_u}{\phi_w \cdot P_n} \right) + \left(\frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \right) \leq 1,42 \quad (2.49)$$

A interação de momento fletor e *web crippling* é ilustrada graficamente na Figura 2.24.

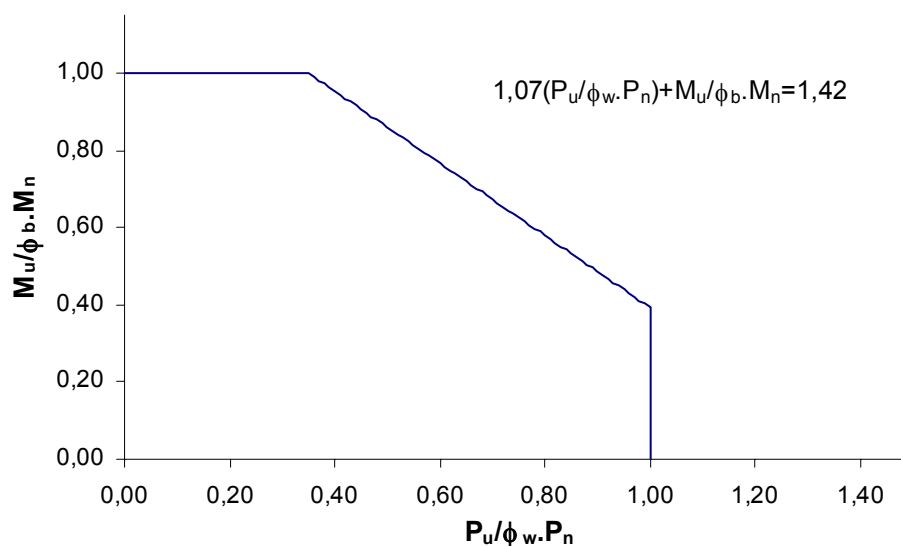


FIGURA 2.24 - Gráfico da equação de interação de momento fletor e *web crippling*

Nos apoios internos das fôrmas contínuas não é feita a verificação da interação entre o momento fletor e *web crippling*.

2.3.7. Flecha

A flecha das barras formadas por perfis de chapa fina é calculada usando-se a inércia efetiva da seção, e calculada sempre no regime elástico.

Para se determinar a inércia efetiva da seção da fôrma metálica, os critérios do AISI (1996) especificam que as Equações 2.6 a 2.9, para o cálculo das larguras efetivas dos elementos da seção que compõem a fôrma, podem ser usadas.

Se os elementos da seção são totalmente efetivos, conseqüentemente o momento de inércia será constante ao longo de todo o vão da barra. Em caso contrário, o momento de inércia pode variar em função da variação do momento fletor ao longo do vão, como ilustra a Figura 2.25.

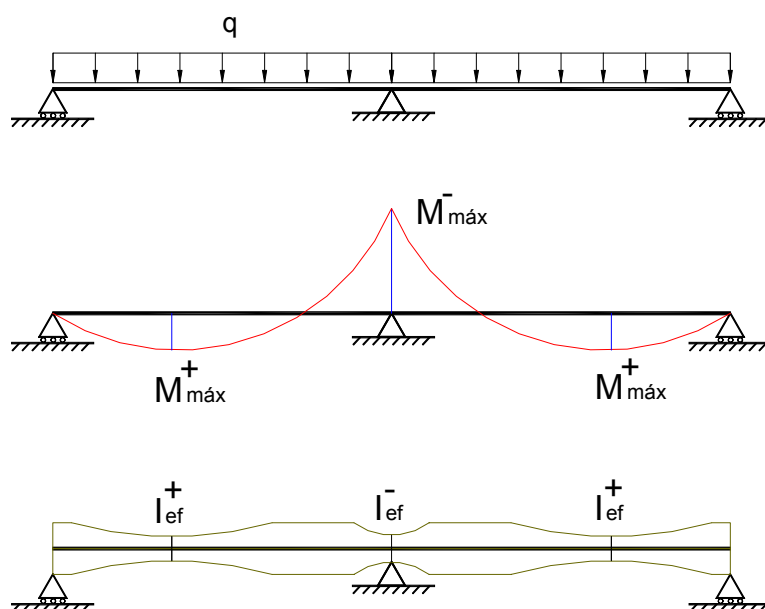


FIGURA 2.25 - Variação do momento fletor e do momento de inércia de uma barra contínua sob carga uniformemente distribuída

Se for necessário um cálculo mais preciso da flecha, um método numérico deve ser usado, no qual a barra deve ser dividida em elementos de barras com inércias diferentes. A inércia de cada elemento depende do momento fletor atuante.

Segundo YU (2000), se uma análise simples é usada, a flecha de uma barra simplesmente apoiada pode ser calculada com base em um momento de inércia constante determinado para a seção de momento máximo – o erro geralmente seria pequeno e conservador. Para o caso de barras contínuas, a flecha pode ser calculada utilizando-se a média dos momentos de inércia das seções de momento máximo positivo e negativo.

O EUROCODE 4 (1993) e o SDI (1995) permitem que os esforços solicitantes das fôrmas contínuas sejam determinados sem considerar a variação de rigidez no comprimento da fôrma.

Determinação da Flecha

O EUROCODE 4 (1993), o CSSBI 12M-84 (1988) e o SDI (1995) limitam a flecha em $L/180$ ou 20mm, o que for menor, onde L é o vão entre os apoios.

Os critérios do EUROCODE 4 (1993) consideram o peso de concreto adicional devido ao efeito de empoçamento no cálculo da flecha. Considerações sobre este efeito foram mencionadas no item 2.2 deste capítulo.

De acordo com o CSSBI 12M-84 (1988), a flecha é calculada com base na carga permanente uniformemente distribuída, dada pelas seguintes equações:

Para fôrmas simplesmente apoiadas,

$$\delta_o = \frac{5W_1 \cdot L^4}{384E_a \cdot I_{ef}} \cdot \gamma_p \quad (2.50)$$

Para fôrmas contínuas de dois vãos iguais,

$$\delta = 0,42\delta_0 \quad (2.51)$$

Para fôrmas contínuas de três ou mais vãos iguais,

$$\delta = 0,53\delta_0 \quad (2.52)$$

Onde,

δ - flecha máxima no meio do vão;

w_1 - carga permanente uniformemente distribuída;

L - vão entre apoios;

E_a - módulo de elasticidade longitudinal do aço;

I_{ef} - momento de inércia efetivo da fôrma;

γ_p - fator de majoração que considera o efeito de empoçamento da fôrma - $\gamma_p=1,10$.

Para fôrmas de vãos desiguais a flecha poderá ser calculada com a análise mais precisa.

2.4. Considerações Finais

2.4.1. Exemplo do Dimensionamento da Fôrma *Steel Deck* MF-75

Para exemplificar o dimensionamento da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75, foi elaborado um programa em linguagem de programação *Delphi*. O programa cuja janela principal é apresentado na Figura 2.26, determina particularmente as características geométricas e as resistências da fôrma segundo os critérios do AISI (1996).

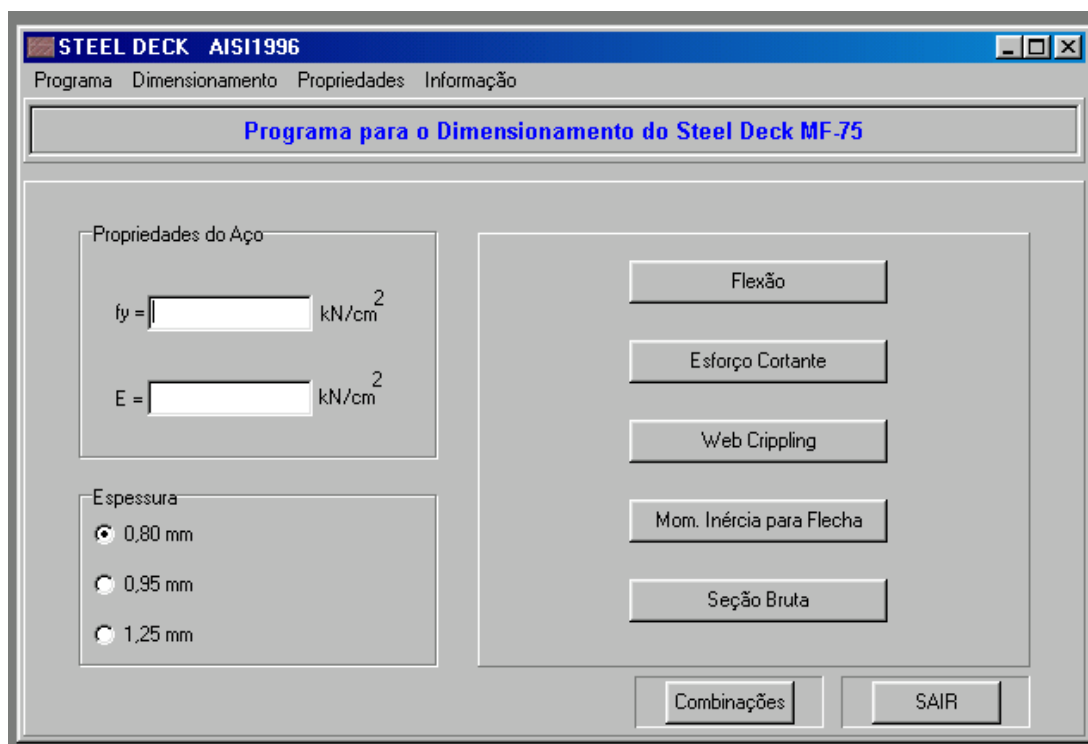


FIGURA 2.26 - Janela principal do programa STEEL DECK para dimensionamento da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75

O programa abrange todas as informações sobre as características geométricas e resistências para a verificação dos estados limites da fôrma em estudo. Os dados básicos de entrada são a resistência limite ao escoamento do aço e o seu módulo de elasticidade. As espessuras nominais do *Steel Deck* MF-75 são 0,80mm, 0,95mm e 1,25mm.

No exemplo a ser apresentado, relacionado com as Figuras 2.6 (página 18) e 2.27, dimensiona-se a fôrma metálica *Steel Deck* MF-75 para todos os estados limites últimos apresentados. Os critérios de carregamento e os critérios para verificação da flecha seguirão as prescrições do EUROCODE 4 (1993). Os coeficientes de ponderação das ações na fase de construção estão de acordo com a NBR 8800 (1986). Os dados necessários para o exemplo são apresentados a seguir.

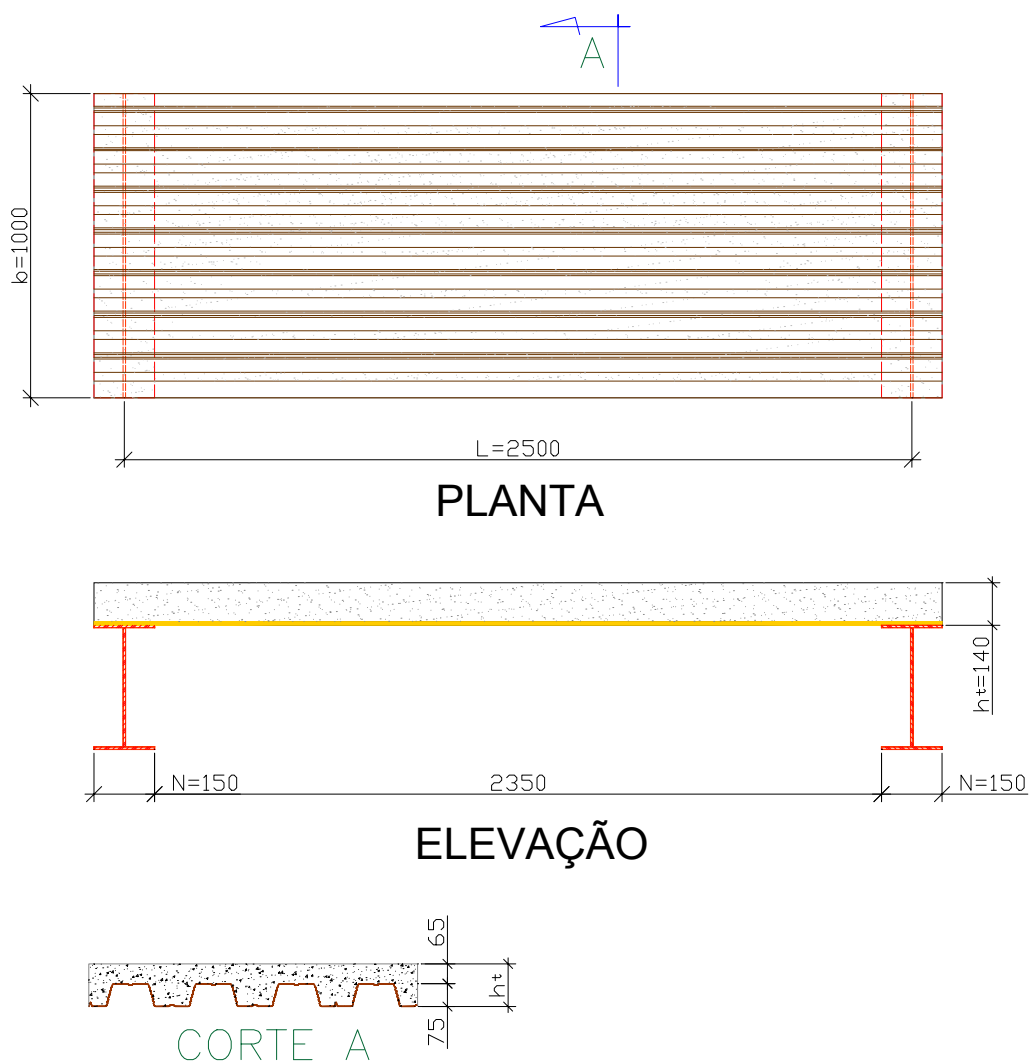


FIGURA 2.27 - Exemplo do dimensionamento da fôrma metálica -
dimensões em mm

A espessura da fôrma sem a camada de proteção contra corrosão para o dimensionamento da fôrma é $t=0,80\text{mm}-0,04\text{mm}=0,76\text{mm}$.

$$t_f=0,80\text{mm}$$

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

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

$$L=2500\text{mm}$$

$$N=150\text{mm}$$

$$w_f=0,083\text{kN/m}^2$$

$$w_c=2,46\text{kN/m}^2$$

$$f_y=28\text{kN/cm}^2$$

$$E_a=20500\text{kN/cm}^2$$

Onde,

t_n - espessura nominal da fôrma de aço;

h_t - altura total da laje;

b - largura da fôrma;

L - vão total da fôrma;

w_f - peso próprio da fôrma ($\gamma_a=77,0\text{kN/m}^3$);

w_c - peso próprio do concreto para $h_t=140\text{mm}$ ($\gamma_c=24,0\text{kN/m}^3$);

γ_g, γ_q - coeficiente de ponderação da carga permanente e da sobrecarga, respectivamente, na fase de construção.

Solução:

Peso próprio da laje - q_P

$$q_P = 0,083 + 2,46$$

$$q_P = 2,55\text{kN/m}$$

Sobrecarga de construção - q_{SC}

$$q_{SC} = 1,50\text{kN/m}$$

Estado Limite de Utilização – flecha no meio do vão

Considera-se apenas a carga devido ao peso próprio - nominal

$$q = q_P = 2,55\text{kN/m}$$

O momento nominal no meio do vão deverá ser calculado para determinar a inércia efetiva, portanto:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{2,55 \cdot 2,5^2}{8} = 1,99\text{kN} \cdot \text{m/m}$$

Utilizando-se o programa STEEL DECK, ao entrar com o valor do momento nominal dos dados do aço e da espessura da fôrma, tem-se que a inércia

efetiva, I_{ef} , para o cálculo da flecha é $106,95\text{cm}^4/\text{m}$ – o mesmo valor da inércia totalmente efetiva (ver Tabela 2.1).

Cálculo da flecha no meio do vão

$$\delta = \frac{5q \cdot L^4}{384E_a \cdot I_{ef}} = \frac{5 \cdot 0,0255 \cdot 250^4}{384 \cdot 20500 \cdot 106,95}$$

$$\delta = 0,59\text{cm}$$

A flecha limite, δ_{emp} , para não se levar em consideração o efeito de empoçamento do concreto de acordo com o EUROCODE 4 (1993) é:

$$\delta_{emp} = \text{menor} \begin{cases} L/250 = 250/250 = 1,00\text{cm} \\ 2,00\text{cm} \end{cases}$$

$$\delta_{emp} = 1,00\text{cm}$$

Portanto, a flecha calculada atende aos limites de flecha do efeito de empoçamento e, conseqüentemente, da flecha admissível $L/180=1,39\text{cm}$.

Estados Limites Últimos

Momento fletor no meio do vão

$$M_u = \left(\sum \gamma_g \cdot q_P + \sum \gamma_q \cdot q_{SC} \right) \cdot \frac{L^2}{8} = (1,20 \cdot 0,083 + 1,30 \cdot 2,46 + 1,30 \cdot 1,50) \cdot \frac{2,50^2}{8}$$

$$M_u = 4,10\text{kN} \cdot \text{m/m}$$

Esforço cortante no apoio

$$V_u = \left(\sum \gamma_P \cdot q_P + \sum \gamma_{SC} \cdot q_{SC} \right) \cdot \frac{L}{2} = (1,20 \cdot 0,083 + 1,30 \cdot 2,41 + 1,30 \cdot 1,50) \cdot \frac{2,50}{2}$$

$$V_u = 6,56\text{kN/m}$$

Resistências de Cálculo

Momento Fletor (conforme apresentado na seção 2.3.2):

O valor de resistência da fôrma ao momento fletor advém do programa STEEL DECK, ao se entrar com as características do aço e espessura da fôrma, logo:

$$\phi_b \cdot M_n = f_y \cdot S_e = 5,84 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$M_u / \phi_b \cdot M_n = 0,70 < 1,0 \quad \quad \quad \mathbf{OK}$$

Esforço Cortante (conforme apresentado na seção 2.3.3):

$$h/t = 68,62/0,76$$

$$h/t = 90,30$$

$$0,96 \sqrt{E \cdot k_v / f_y} = 0,96 \sqrt{20500 \cdot 5,34 / 28} = 60,03$$

$$1,415 \sqrt{E \cdot k_v / f_y} = 1,415 \sqrt{20500 \cdot 5,34 / 28} = 88,48$$

$h/t > 1,415 \sqrt{E \cdot k_v / f_y}$ (flambagem por cisalhamento da alma no regime elástico)

$$V_n = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k_v \cdot t^3}{12(1-\nu^2)h} = \frac{\pi^2 20500 \cdot 5,34 \cdot 0,076^3}{12(1-0,30^2) \cdot 6,862}$$

$$V_n = 6,33 \text{ kN/alma} = 2 \cdot 6,33 \text{ kN} / 0,274 \text{ m}$$

$$V_n = 46,20 \text{ kN/m}$$

$$\phi_v = 0,90$$

Componente vertical de resistência, sendo $15,08^\circ$ a inclinação da alma da fôrma (Figura 2.6, página 18):

$$\phi_v \cdot V_n \cdot \cos 15,08^\circ = 0,90 \cdot \cos 15,08^\circ \cdot 46,20$$

$$\phi_v \cdot V_n \cdot \cos 15,08^\circ = 40,20 \text{ kN/m} \quad (\text{valor confirmado pelo programa})$$

$$V_u / \phi_v \cdot V_n \cdot \cos 15,08^\circ = 0,16 < 1,0 \quad \textbf{OK}$$

Web Crippling (conforme apresentado na seção 2.3.4):

$$h/t = 90,30 < 200$$

$$N/t = 150/0,76 = 197,37 \quad 60 < N/t < 210$$

$$N/h = 150/68,62 = 2,19 < 3,50$$

$$R/t = 5,00/0,76 = 6,59 < 7,00$$

$$45^\circ \leq \theta = 74,92^\circ \leq 90^\circ$$

Neste exemplo, para a reação de extremidade aplica-se a Equação 2.36 para uma mesa de extremidade carregada:

$$P_n = t^2 k C_3 C_4 C_9 C_0 [331 - 0,61(h/t)] [1 + 0,01(N/t)] \quad (\text{Equação 2.36})$$

$N/t > 60$, o fator $[1 + 0,01(N/t)]$ é substituído por $[0,71 + 0,015(N/t)]$:

$$P_n = t^2 k C_3 C_4 C_9 C_0 [331 - 0,61(h/t)] [0,71 + 0,015(N/t)]$$

$$k = 894(f_y/E) = 894 \cdot 280/205000 = 1,221$$

$$C_3 = 1,33 - 0,33k = 1,33 - 0,33 \cdot 1,221 = 0,927$$

$$C_4 = 1,15 - 0,15(R/t) = 1,15 - 0,15 \cdot 5,00/0,76 = 0,16 \quad (0,5 \leq C_4 \leq 1,0)$$

$$\text{Logo, } C_4 = 0,50$$

$$C_9 = 6,90$$

$$C_\theta = 0,7 + 0,3(\theta/90)^2 = 0,70 + 0,30(74,92/90)^2 = 0,908$$

$$P_n = 0,76^2 \cdot 1,221 \cdot 0,927 \cdot 0,50 \cdot 6,90 \cdot 0,908 [331 - 0,61 \cdot 90,289] [0,71 + 0,015 \cdot 197,368]$$

$$P_n = 2074,17 \text{ N/alma} = 15,14 \text{ kN/m}$$

$$\phi_w = 0,75$$

$$\phi_w \cdot P_n = 11,35 \text{ kN/m} \quad (\text{valor confirmado pelo programa})$$

$$V_u / \phi_w \cdot P_n = 0,58 < 1,0 \quad \text{OK}$$

2.4.2. Tabelas de Dimensionamento do *Steel Deck* MF-75

A seguir são apresentadas tabelas de dimensionamento da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75 utilizada em lajes mistas. São admitidos todos os estados limites apresentados neste capítulo.

Os resultados do dimensionamento mostrados na Tabela 2.3 são baseados nas cargas do EUROCODE 4 (1993), na Tabela 2.4 as cargas são baseadas

no SDI (1995) e na Tabela 2.5 as cargas são baseadas no CSSBI 12M-84 (1988).

As tabelas foram elaboradas utilizando-se os coeficientes de ponderação das cargas com valor de 1,30, tanto para a carga permanente quanto para a sobrecarga na fase de construção. Foram adotadas para as larguras externas e internas dos apoios 75mm e 150mm, respectivamente.

TABELA 2.3 - Vãos máximos da fôrma de aço *Steel Deck* MF-75 - Cargas do EUROCODE 4 (1993)

Altura total da laje mista (mm)	Espessura da fôrma (mm)	Peso próprio da laje mista (kN/m ²)	Vãos máximos da fôrma sem escoramento			
			Vão Simples (mm)	Vão Duplo (mm)	Vão Triplo (mm)	Balanço (mm)
130	0,80	2,27	2.760	2.910	3.090	1.470
	0,95	2,28	3.490	3.670	4.100	1.690
	1,25	2,32	3.890	4.390	4.570	1.920
140	0,80	2,50	2.600	2.750	2.910	1.410
	0,95	2,52	3.380	3.530	3.840	1.630
	1,25	2,55	3.800	4.240	4.460	1.870
150	0,80	2,74	2.450	2.610	2.740	1.350
	0,95	2,75	3.230	3.420	3.620	1.580
	1,25	2,79	3.720	4.090	4.360	1.820
160	0,80	2,97	2.330	2.480	2.600	1.300
	0,95	2,99	3.050	3.310	3.420	1.540
	1,25	3,02	3.650	3.970	4.270	1.790
170	0,80	3,21	2.210	2.360	2.470	1.250
	0,95	3,23	2.900	3.150	3.240	1.480
	1,25	3,26	3.570	3.850	4.190	1.740
180	0,80	3,44	2.110	2.260	2.350	1.210
	0,95	3,46	2.760	2.960	3.090	1.420
	1,25	3,50	3.490	3.740	4.120	1.700
190	0,80	3,68	2.010	2.160	2.240	1.170
	0,95	3,70	2.630	2.830	2.940	1.370
	1,25	3,73	3.410	3.640	4.050	1.670
200	0,80	3,91	1.920	2.070	2.150	1.140
	0,95	3,93	2.520	2.720	2.820	1.330
	1,25	3,97	3.340	3.550	3.950	1.630

TABELA 2.4 - Vãos máximos da fôrma de aço *Steel Deck* MF-75 - Cargas do SDI (1995)

Altura total da laje mista (mm)	Espessura da fôrma (mm)	Peso próprio da laje mista (kN/m ²)	Vãos máximos da fôrma sem escoramento			
			Vão Simples (mm)	Vão Duplo (mm)	Vão Triplo (mm)	Balanço (mm)
130	0,80	2,27	2.150	3.270	3.560	1.230
	0,95	2,28	2.830	3.710	4.120	1.470
	1,25	2,32	3.370	4.390	4.540	1.760
140	0,80	2,50	2.010	3.160	3.430	1.190
	0,95	2,52	2.630	3.580	3.960	1.420
	1,25	2,55	3.280	4.240	4.380	1.710
150	0,80	2,74	1.880	3.050	3.310	1.160
	0,95	2,75	2.470	3.470	3.820	1.380
	1,25	2,79	3.180	4.100	4.240	1.660
160	0,80	2,97	1.760	2.960	3.200	1.130
	0,95	2,99	2.320	3.360	3.690	1.340
	1,25	3,02	3.100	3.980	4.120	1.610
170	0,80	3,21	1.660	2.820	3.100	1.110
	0,95	3,23	2.180	3.260	3.570	1.300
	1,25	3,26	3.020	3.870	4.000	1.570
180	0,80	3,44	1.570	2.680	3.020	1.080
	0,95	3,46	2.070	3.170	3.460	1.250
	1,25	3,50	2.960	3.760	3.890	1.540
190	0,80	3,68	1.490	2.540	2.930	1.060
	0,95	3,70	1.960	3.090	3.360	1.220
	1,25	3,73	2.910	3.670	3.790	1.510
200	0,80	3,91	1.420	2.420	2.840	1.040
	0,95	3,93	1.870	3.010	3.260	1.180
	1,25	3,97	2.850	3.580	3.910	1.480

TABELA 2.5 - Vãos máximos da fôrma de aço *Steel Deck* MF-75 - Cargas do CSSBI 12M-84 (1988)

Altura total da laje mista (mm)	Espessura da fôrma (mm)	Peso próprio da laje mista (kN/m ²)	Vãos máximos da fôrma sem escoramento			
			Vão Simples (mm)	Vão Duplo (mm)	Vão Triplo (mm)	Balanço (mm)
130	0,80	2,27	3.120	3.270	3.560	1.230
	0,95	2,28	3.550	3.710	4.120	1.460
	1,25	2,32	3.800	4.390	4.460	1.850
140	0,80	2,50	2.970	3.160	3.430	1.190
	0,95	2,52	3.450	3.580	3.960	1.420
	1,25	2,55	3.710	4.240	4.350	1.790
150	0,80	2,74	2.780	3.050	3.310	1.160
	0,95	2,75	3.340	3.470	3.820	1.380
	1,25	2,79	3.630	4.100	4.240	1.730
160	0,80	2,97	2.620	2.960	3.200	1.130
	0,95	2,99	3.250	3.360	3.690	1.340
	1,25	3,02	3.550	3.980	4.120	1.680
170	0,80	3,21	2.470	2.820	3.100	1.100
	0,95	3,23	3.140	3.260	3.570	1.310
	1,25	3,26	3.450	3.870	4.000	1.640
180	0,80	3,44	2.340	2.680	3.020	1.080
	0,95	3,46	3.060	3.170	3.460	1.280
	1,25	3,50	3.370	3.760	3.890	1.600
190	0,80	3,68	2.220	2.540	2.930	1.060
	0,95	3,70	2.910	3.090	3.360	1.250
	1,25	3,73	3.320	3.670	3.790	1.560
200	0,80	3,91	2.120	2.420	2.840	1.030
	0,95	3,93	2.780	3.010	3.260	1.220
	1,25	3,97	3.240	3.580	3.700	1.530

2.4.3. Influência das Mossas e Indentações na Resistência da Fôrma

JOHNSON (1994) relata que a região da seção onde estão estampadas as mossas e indentações pode não ser totalmente efetiva para resistir as tensões longitudinais de compressão ou tração. Portanto, além da flambagem local, as mossas e indentações também reduzem o momento de inércia da fôrma.

O EUROCODE 4 (1993) propõe que a influência das mossas/indentações na fôrma deveria ser mostrada por meio de ensaios, ou então, as regiões das mossas deveriam ser completamente desprezadas para o cálculo das características geométricas efetivas.

Em seu relatório de pesquisa, VELJKOVIC' (1993) apresenta uma análise sucinta da influência das mossas na resistência à tração da alma de uma fôrma de aço. Foram ensaiadas à tração, chapas das mesas e da alma com mossas da fôrma e os resultados comparados no gráfico tensão x deformação. O resultado é ilustrado pela Figura 2.28. O aço da chapa tem espessura nominal de 0,85mm e o formato da mossa é do tipo "V", direcionado horizontalmente com relação à forma.

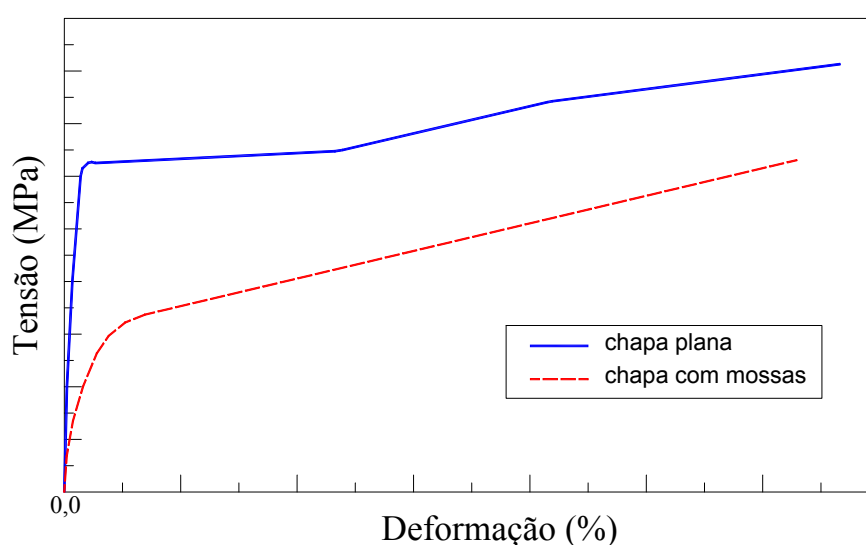


FIGURA 2.28 - Ensaio à tração das chapas planas e das chapas com mossas

Segundo VELJKOVIC' (1993), as chapas com mossas apresentam uma redução na resistência e na rigidez, principalmente porque as deformações de flexão nas dobras das mossas são somadas à deformação longitudinal de tração. Além disso, a espessura da fôrma e a altura das mossas influem no diagrama tensão x deformação.

2.4.4. Ensaio do *Steel Deck* MF-75

No Laboratório de Análise Experimental de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas – LAEES, MELO (1999) realizou 6 ensaios de protótipos de fôrmas metálicas para comprovar a capacidade de carregamento, sendo 3 protótipos com fôrma de espessura nominal de 0,80mm e 3 protótipos com fôrma de espessura nominal de 1,25mm.

A Figura 2.29 ilustra o esquema de ensaio das fôrmas. Duas cargas concentradas foram simetricamente aplicadas por meio de um atuador hidráulico manual. O incremento de carga foi feito até não ser mais possível o acréscimo de carga. Todos os protótipos tinham 3,00m de comprimento.

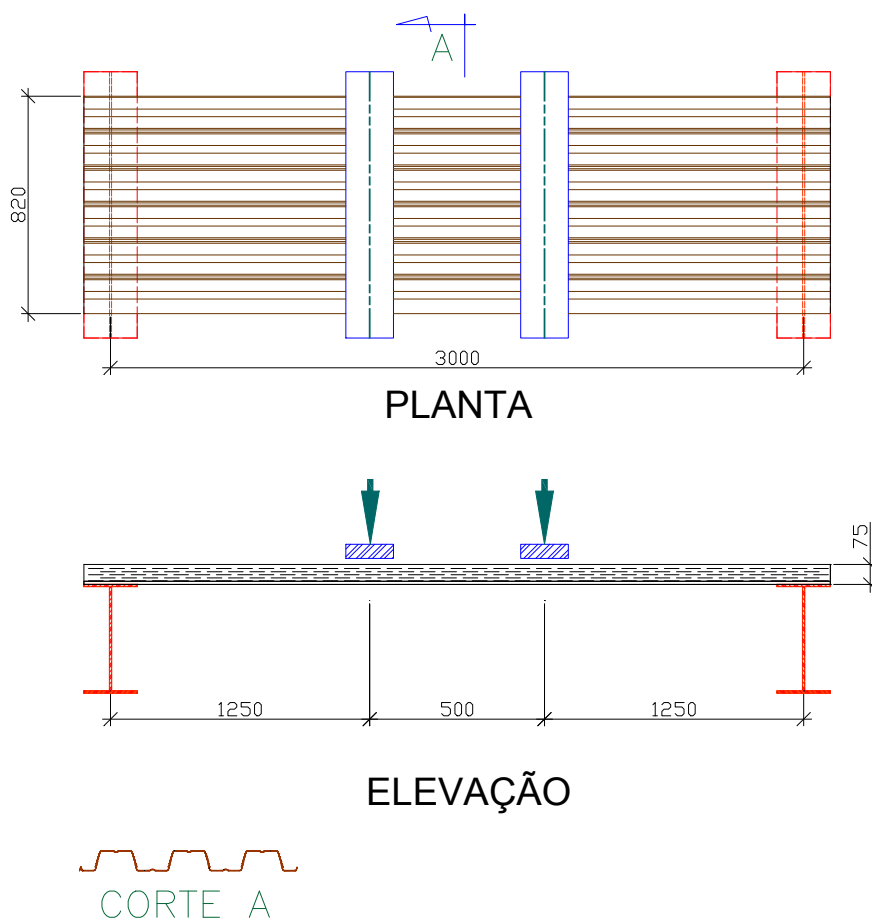


FIGURA 2.29 - Esquema de ensaio da fôrma metálica

O tipo de aço empregado nas fôrmas foi o ZAR 280, com limite de escoamento nominal de 280MPa e limite de ruptura de 380MPa.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 2.6.

TABELA 2.6 - Dados de ensaios experimentais de flexão da fôrma

$t_n=0,80\text{mm}$			
Ensaio	P_{usd} (kN)	V_{usd}(kN/m)	M_{usd} (kN.m/m)
# 01	7,56	4,61	5,76
# 02	8,00	4,88	6,10
# 03	8,18	4,99	6,23
Valor Médio =			6,03
$t_n=1,25\text{mm}$			
Ensaio	P_{usd} (kN)	V_{usd}(kN/m)	M_{usd} (kN.m/m)
# 01	16,72	10,20	12,74
# 02	16,19	9,87	12,34
# 03	16,01	9,76	12,20
Valor Médio =			12,43

Onde P_{usd} , V_{usd} e M_{usd} são a carga última total, carga última de reação de apoio e momento fletor último sob a linha de carga, respectivamente.

Foram também realizados ensaios de caracterização da chapa de aço da fôrma para avaliar a tensão limite de escoamento e o módulo de elasticidade longitudinal, conforme a norma brasileira NBR 6152 (1960), cujos resultados são mostrados na Tabela 2.7.

TABELA 2.7 - Propriedades mecânicas da chapa utilizada na fabricação do *Steel Deck* MF-75

Propriedades mecânicas	$t_n = 0,80\text{mm}$	$t_n = 1,25\text{mm}$
Limite de escoamento (MPa)	351	345
Limite de resistência (MPa)	385	396
Módulo de elasticidade (MPa)	220.889	221.129

A Tabela 2.8 a seguir apresenta os valores de resistência nominal, M_n , utilizando o programa STEEL DECK com os dados da chapa de aço ensaiada, juntamente com as resistências de ensaio da fôrma, M_{usd} .

TABELA 2.8 - Valores de ensaio e de cálculo da resistência do *Steel Deck* MF-75

Espessura da fôrma	M_n (kN.m/m)	M_{usd} (kN.m/m)	M_n/M_{usd}
0,80	7,33	6,03	1,22
1,25	13,11	12,43	1,05

O propósito de analisar o ensaio da fôrma é comprovar a resistência à flexão ao admitir a presença das mossas e das tensões residuais ao longo da seção da fôrma. Na fôrma de espessura de 0,80mm o momento resistente de ensaio é menor do que o momento nominal calculado. Isto significa que o efeito das mossas é bem mais acentuado para esta espessura de fôrma, enquanto que para a espessura de 1,25mm os valores dos ensaios e dos cálculos tornam-se mais próximos.

3. PROGRAMA DE ENSAIOS E RESULTADOS

3.1. Considerações Gerais

Segundo 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.

Atualmente, o dimensionamento ao cisalhamento longitudinal de lajes mistas aço-concreto depende de ensaios em protótipos simplesmente apoiados, denominados ensaios de *shear-bond*, porque a resistência ao cisalhamento longitudinal é difícil de prever teoricamente: pequenas mudanças no tamanho e na geometria das mossas e da fôrma afetam sensivelmente o comportamento e a resistência da laje.

O propósito dos ensaios é obter dados para o dimensionamento de lajes mistas ao cisalhamento longitudinal, pelo método *m-k* e/ou pelo método da interação parcial, sendo que por meio deste último é possível se fazer uma análise da contribuição da ancoragem de extremidade na resistência e no comportamento do sistema misto que é o objetivo principal deste trabalho.

Os ensaios de protótipos de lajes mistas sem ancoragem de extremidade utilizando-se a fôrma metálica *Steel Deck* MF-75 foram analisados por MELO (1999), seguindo os critérios do EUROCODE 4 (1993) e de SCHUSTER (1984).

O método da interação parcial a ser utilizado na análise da contribuição da ancoragem de extremidade só pode ser aplicado às lajes de comportamento dúctil. O EUROCODE 4 (1993) define uma laje dúctil como sendo aquela em que a carga última excede mais de 10% a carga que causa 0,50mm de

deslizamento relativo na extremidade de lajes mistas sem ancoragem de extremidade. Todas as lajes estudadas por MELO (1999) tinham esta característica.

Para se determinar a contribuição da ancoragem de extremidade na resistência da laje mista, foram realizados 7 ensaios adicionais baseando-se nos critérios do EUROCODE 4 (1993).

Foram realizados também 7 ensaios de lajes mistas ancoradas com fôrma sem mossas para auxiliar na distinção dos principais aspectos do comportamento e no estudo da influência da ancoragem na resistência ao cisalhamento longitudinal.

Deve-se considerar neste momento que todos os ensaios analisados neste trabalho foram realizados por MELO (1999), que naquela oportunidade analisou o comportamento e a resistência das lajes mistas sem ancoragem de extremidade. Ficou definido o modo de colapso por cisalhamento longitudinal, caracterizando o comportamento dúctil do sistema, e determinando os parâmetros m e k , e τ_{u-Rd} , utilizados para a verificação da resistência do sistema misto pelos métodos $m-k$ e da interação parcial, respectivamente.

3.2. Caracterização dos Protótipos

A investigação experimental consistiu de 26 ensaios de protótipos de lajes mistas classificadas em 3 séries. A Série M, estudada por MELO (1999), era composta de 12 protótipos utilizando somente fôrmas com mossas, cuja nomenclatura neste trabalho terá o número do protótipo de 1 a 12 com o sufixo M.

As Séries MS e S eram compostas de 7 protótipos cada. A Série MS tinha lajes construídas com mossas e dois *stud bolts* em cada extremidade das lajes, enquanto que os da Série S tinham dois *studs* nas extremidades utilizando fôrma sem mossas. A nomenclatura é dada pelo número correspondente àquele do protótipo de mesmas dimensões da Série M, porém com o sufixo MS para a Série MS e S para a Série S.

As espessuras nominais de 0,80mm e 1,25mm foram utilizadas nos ensaios. Para cada espessura da fôrma, diferentes combinações de altura da laje, h_t , do vão total, L , e do vão de cisalhamento, L_s (vão entre a carga aplicada e o apoio) foram adotados para cobrir adequadamente o conjunto de parâmetros que têm maior influência no comportamento estrutural e na resistência do sistema misto.

As características geométricas nominais de cada protótipo das séries são apresentadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Dimensões nominais dos protótipos das séries M, MS e S

Protótipo	Espessura nominal fôrma t_n (mm)	Largura da laje b (mm)	Altura da laje h_t (mm)	Vão de cisalhamento L_s (mm)	Vão total L (mm)
1M	0,80	820	130	450	1.800
2M/MS/S	0,80	820	140	600	1.800
3M/MS/S	0,80	820	150	300	1.800
4M/MS/S	0,80	820	170	300	1.800
5M/MS/S	0,80	820	180	900	3.600
6M	0,80	820	190	1.500	3.600
7M	1,25	820	130	450	1.800
8M/MS/S	1,25	820	140	600	1.800
9M/MS/S	1,25	820	150	300	1.800
10M/MS/S	1,25	820	170	300	1.800
11M	1,25	820	180	900	3.600
12M	1,25	820	190	1.500	3.600

3.3. Materiais Utilizados

3.3.1. Fôrma de Aço *Steel Deck* MF-75

Empregou-se o painel típico da fôrma metálica *Steel Deck* MF-75 para todos os protótipos, fabricado pela Metform S.A., como mostra a Figura 3.1 e apresentada no Capítulo 2.

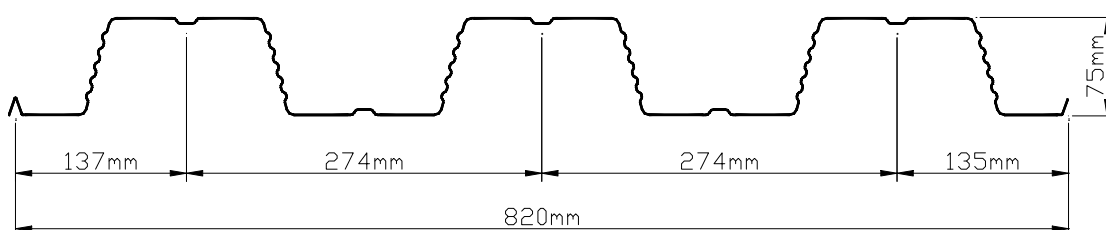


FIGURA 3.1 - Seção transversal do *Steel Deck* MF-75

As dimensões e as propriedades geométricas dos painéis empregados na fabricação dos protótipos são mostradas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Propriedades do *Steel Deck* MF-75 para 1,00m de largura

t_n (mm)	t (mm)	h_f (mm)	A_g (mm ²)	y_{cg} (mm)	I (mm ⁴)	w_f (kN/m ²)
0,80	0,76	74,98	1.082	37,49	1.069.500	0,083
1,25	1,21	75,43	1.722	37,72	1.703.330	0,133

A fôrmas metálicas tinham uma camada de galvanização de zinco nas faces e apresentavam-se umedecidas de óleo lubrificante utilizado no processo de conformação do perfil.

As dimensões e geometrias das mossas, ilustradas na Figura 3.2, eram típicas para ambas as espessuras e tinham uma profundidade de 2,40mm.

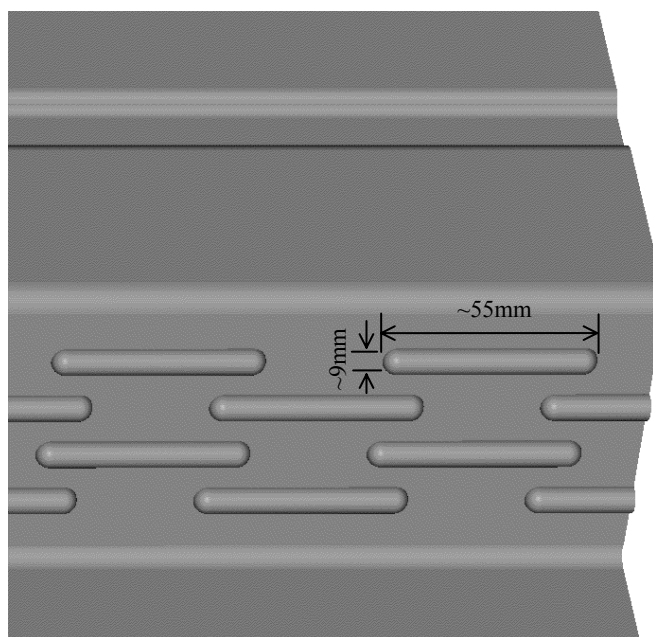


FIGURA 3.2 - Dimensões e detalhes da geometria das mossas

Para a fabricação das fôrmas empregou-se o aço ZAR 280, com tensão limite de escoamento, f_y , de 280MPa e limite de ruptura, f_u , de 380MPa. A tensão limite de escoamento e o módulo de elasticidade longitudinal avaliados na chapa de aço pelos ensaios de caracterização, conforme a norma brasileira NBR 6152 (1960), e mostrados na Tabela 3.3, forneceram valores maiores com relação aos valores nominais da ordem de 24% e 8%, respectivamente. Os ensaios foram efetuados no Laboratório de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG por MELO (1999).

TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas da chapa utilizada na fabricação do *Steel Deck* MF-75

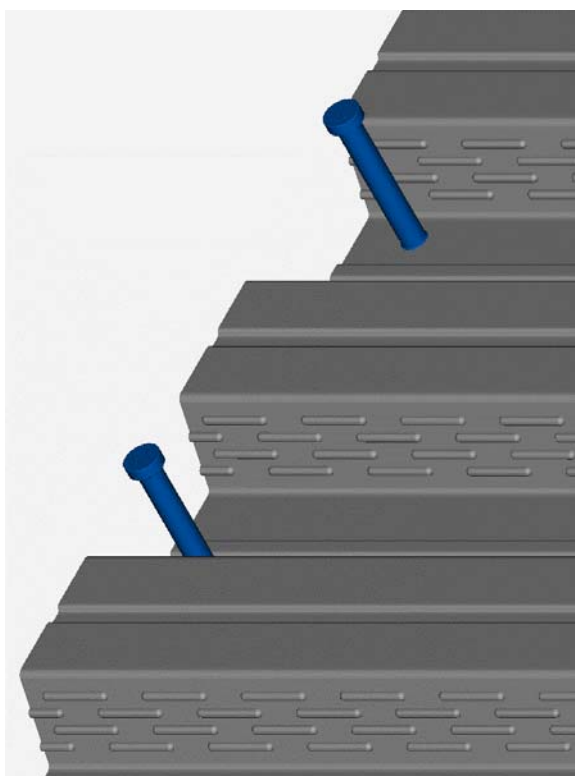
Propriedades mecânicas	$t_n = 0,80\text{mm}$	$t_n = 1,25\text{mm}$
Limite de escoamento (MPa)	351	345
Limite de resistência (MPa)	385	396
Módulo de elasticidade (MPa)	220.889	221.129
Porcentagem de Alongamento (%)	31,20	35,30

Segundo MELO (1999), os ensaios indicaram a grande ductilidade do aço utilizado.

Os valores apresentados correspondem às médias de três corpos de prova para cada espessura de fôrma de aço.

3.3.2. Conector de Cisalhamento *Stud Bolt*

Dois conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça - *stud bolt* - foram soldados em cada extremidade dos protótipos ancorados, distantes 50mm das extremidades, como mostram as Figuras 3.3.



(a)

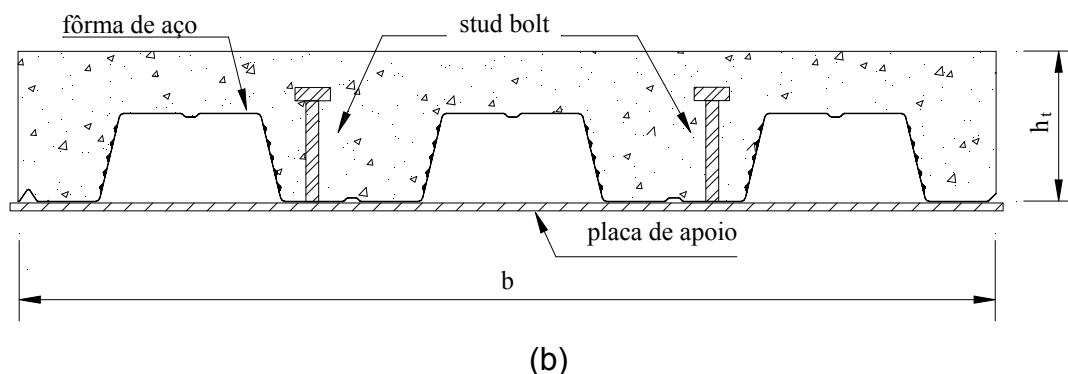


FIGURA 3.3 - Extremidade dos protótipos com *stud bolts*

Os *stud bolts* tinham diâmetro de 19mm e altura de aproximadamente 127mm após a soldagem na placa de apoio. O aço ASTM A108, com limite de escoamento de 345MPa e limite de ruptura de 415MPa, foi utilizado na fabricação dos conectores.

3.3.3. Concreto

O concreto utilizado na confecção de todos os protótipos foi feito em uma usina central, tendo sido especificada uma resistência característica à compressão, f_{ck} , igual a 20MPa.

Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto, f_{cj} (resistência do concreto à compressão) e E_c (módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto) foram feitos de acordo com as normas brasileiras NBR 5739 (1960) e NBR 8522 (1984), respectivamente, em idades superiores a 28 dias, juntamente com os ensaios das lajes.

Os resultados dos ensaios de caracterização do concreto são mostrados na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 - Propriedades mecânicas do concreto de cada protótipo

Protótipo	Idade do concreto (dias)	f_{cj} (MPa)	E_c (MPa)
1M	47	29,0	27.653
2M	66	27,2	30.786
3M	63	32,3	29.247
4M	58	30,4	27.033
5M	69	29,7	27.856
6M	67	30,0	21.709
7M	40	28,2	28.354
8M	40	29,7	32.150
9M	46	30,3	29.108
10M	46	29,9	30.023
11M	32	26,2	29.810
12M	37	27,6	25.067
2MS	34	22,0	28.049
3MS	62	24,8	24.232
4MS	66	24,2	30.072
5MS	-	23,5	28.795*
8MS	60	29,9	26.180
9MS	76	29,0	23.930
10MS	88	28,7	31.822*
2S	51	24,5	29.402*
3S	44	23,6	28.856*
4S	41	24,3	29.281*
5S	28	24,3	29.281*
8S	49	26,2	30.404*
9S	35	24,2	29.221*
10S	41	23,8	28.978*

* - Módulo de elasticidade longitudinal calculado pela Equação 3.1 da NBR 6118 (1978):

$$E_c = 0,90 \cdot 6600 \sqrt{f_{cj}} \quad (3.1)$$

Onde E_c e f_{cj} são em MPa.

De acordo com a NBR 6118 (1978), as resistências características à compressão estimadas são de 24,8MPa, 21,3MPa e 20,8MPa para as Séries

M, MS e S, respectivamente. Estes valores satisfazem a resistência característica especificada.

O módulo de elasticidade secante foi calculado para uma tensão correspondente a 40% da resistência última do concreto. O valor médio obtido para os protótipos são de 28.233MPa, 27.583MPa e 29.346MPa para as Séries M, MS e S, respectivamente. Empregando-se a Equação 3.1, utilizando-se o valor da resistência característica especificada (20MPa), obtém-se o valor de 28.798MPa.

3.3.4. Tela Soldada

Colocou-se telas soldadas a uma distância de aproximadamente 20mm do topo da laje mista. A tela era composta de barras trefiladas com aço CA-60.

A área de aço em ambos os sentidos da laje era a mesma. Para as lajes com altura de 130mm, 140mm e 150mm a malha era de 150mmx150mm com barras de diâmetro de 3,8mm ($0,76\text{cm}^2/\text{m}$) e para as lajes com 170mm, 180mm e 190mm a malha era de 100mmx100mm com barras de 3,8mm de diâmetro ($1,13\text{cm}^2/\text{m}$).

3.4. Preparação dos Protótipos

Os protótipos foram moldados totalmente apoiados como recomenda a pré-norma europeia EUROCODE 4 (1993), por ser considerada a situação mais desfavorável - a espessura da laje praticamente uniforme leva a valores de resistência ligeiramente conservadores em relação à prática, principalmente com relação ao cisalhamento longitudinal.

Era realizado um teste de *slump* para verificar a consistência do concreto antes de seu lançamento. O concreto foi adensado com vibrador do tipo agulha e corpos de prova cilíndricos com dimensões de 15x30cm foram moldados.

Para os ensaios de caracterização do concreto seguiu-se a NBR 5739 (1960). Em cada concretagem, quatro corpos foram moldados para a verificação da resistência à compressão nas idades de 7 e 14 dias, além de quatro corpos de prova para cada protótipo para a verificação da resistência e determinação do módulo de elasticidade secante.

Para impedir a fissuração do concreto proveniente da retração e variação térmica, foi colocada a tela soldada. A área da tela nas duas direções corresponde no mínimo a 0,10% da área de concreto acima da fôrma de aço.

Placas de aço com seção de 19mm x 100mm foram soldadas nas extremidades de cada protótipo, representando a mesa da viga de aço na qual ela se apoia.

Os protótipos foram desformados após 3 dias da concretagem e permanecidos úmidos e cobertos com sacos de aniagem até completar os 7 dias de cura. Em seguida, os protótipos eram curados ao ar livre até serem ensaiados nas idades constantes na Tabela 3.4. Os corpos de prova cilíndricos foram curados ao ar livre e ensaiados após 7 e 14 dias para a verificação da resistência.

Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto foram feitos em idades superiores a 28 dias, juntamente com os ensaios das lajes, de acordo com as normas NBR 5739 (1960) e NBR 8522 (1984).

3.5. Equipamentos de Ensaio e Instrumentação

Para a aplicação da carga nos protótipos, foi utilizado um atuador hidráulico fixado em um pórtico de reação. O acionamento do atuador para a aplicação da carga era feito manualmente.

Os valores correspondentes à atuação da carga no protótipo foram medidos através de um anel dinamométrico acoplado ao atuador hidráulico com capacidade para 300kN e 500kN.

Um sistema de vigas metálicas foi utilizado para transmitir a carga ao protótipo, conforme ilustram as Figuras 3.4 a 3.6. O peso desse sistema de vigas foi calculado em 3,67kN. Os protótipos ensaiados ficavam apoiados em blocos de concreto.

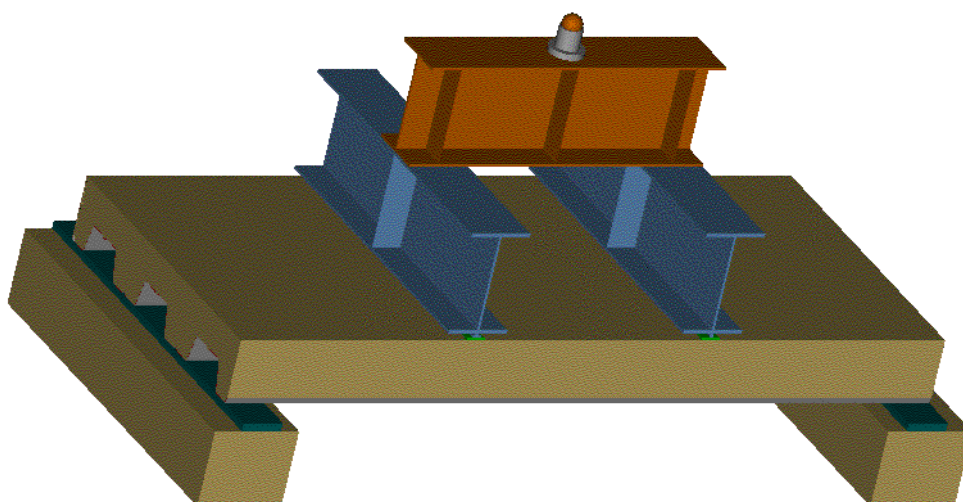


FIGURA 3.4 - Esquema de aplicação de carga usado nos protótipos

O deslizamento relativo longitudinal na interface aço-concreto foi registrado através de dois relógios comparadores posicionados nas extremidades do protótipo, conforme mostra a Figura 3.5. Cada relógio foi fixado em uma cantoneira presa ao concreto da laje e o deslocamento medido com relação a uma chapa soldada na placa de apoio de aço.

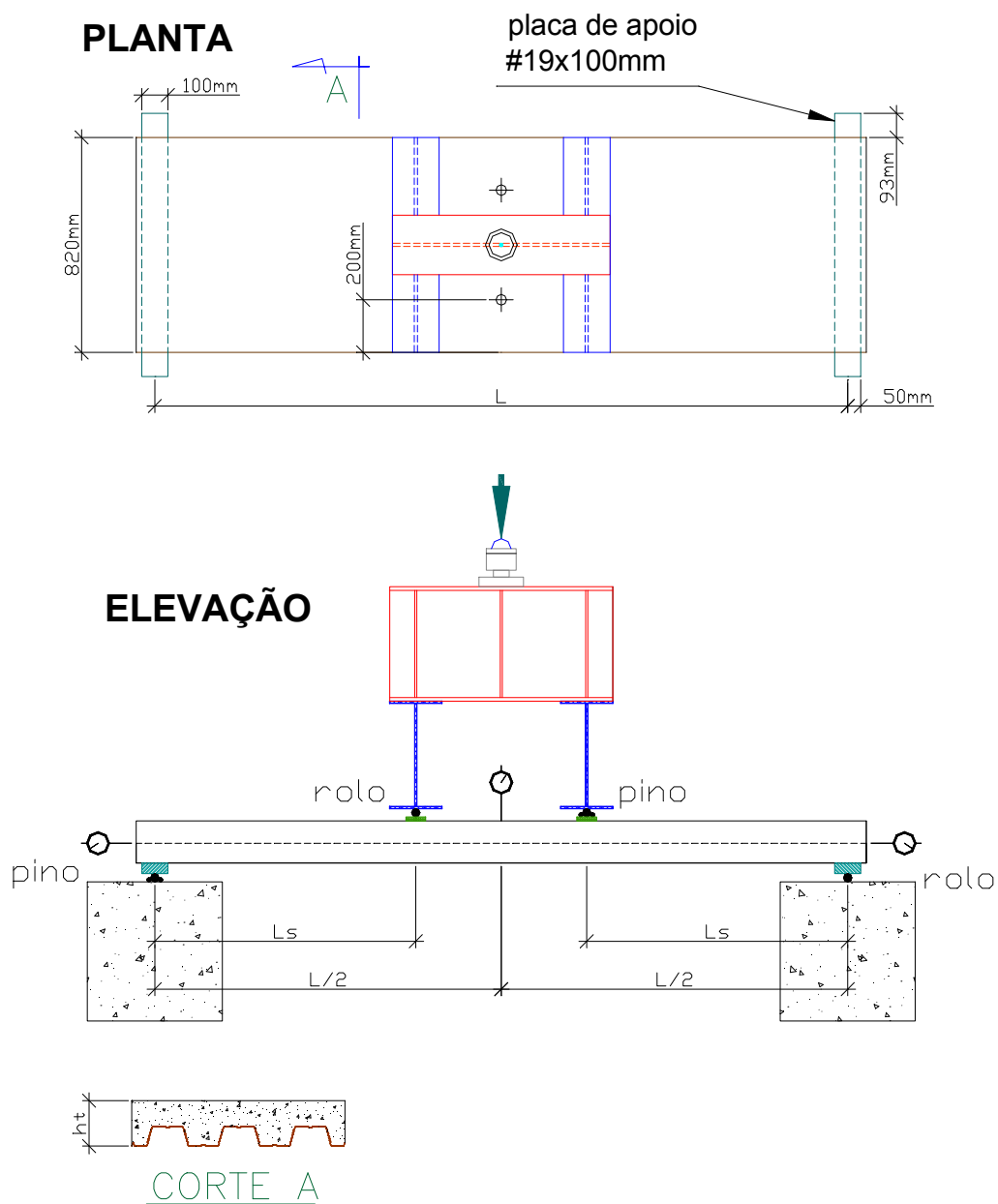


FIGURA 3.5 - Esquema de aplicação de carga

A flecha no meio do vão foi registrada por meio de dois relógios comparadores, conforme a Figura 3.5, com precisão de 0,01mm localizados a 20cm das bordas longitudinais da laje.

O registro do comportamento da deformação do aço no meio do vão foi feito por extensômetros elétricos fixados na face externa das mesas superior e inferior da fôrma de aço dos protótipos.

Uma tira de borracha foi colocada na interface concreto e viga metálica para distribuir a carga de maneira uniforme. Com o propósito de eliminar qualquer restrição longitudinal, foi utilizado um sistema de apoios de rolo e pino, ilustrado na Figura 3.6.

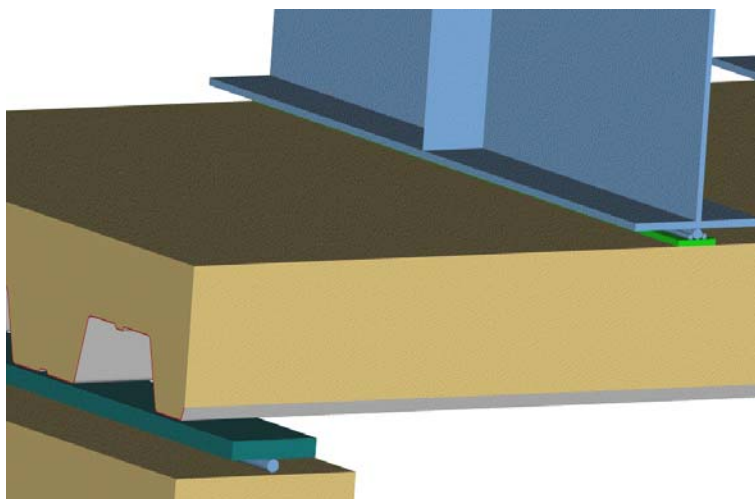


FIGURA 3.6 - Sistema de apoio nas vigas de reação

3.6. Procedimentos de Ensaio

As dimensões dos protótipos relevantes ao estudo do comportamento da laje mista foram registrados.

Após a retirada da pré-carga para 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 até ser atingida a carga última, ou seja, até a impossibilidade de acréscimo de carga pelo atuador hidráulico, com presença de grandes deslocamentos.

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.

3.7. Resultados

Nas Tabelas 3.5 a 3.8 a seguir, apresentam-se os resultados dos ensaios para todas as séries analisadas. As dimensões reais medidas e o peso próprio, w_p , das lajes e a carga última aplicada pelo atuador hidráulico, P , são apresentados na Tabela 3.5. Os resultados dos ensaios das séries são apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8.

O esforço V corresponde à reação de apoio total última calculado considerando a carga P do atuador hidráulico, o peso próprio da laje e o peso do sistema de vigas de 3,67kN. M_{ensaio} é o momento fletor último calculado no ponto de aplicação de carga e M_R é o momento resistente da laje com interação total ao cisalhamento longitudinal, calculado considerando a plastificação total da seção mista. P_{des} e P_s são as cargas correspondentes ao deslizamento de extremidade inicial (0,50mm) e à flecha de serviço ($L/250$ de acordo com o EUROCODE 4) aplicadas pelo atuador hidráulico, respectivamente.

Os valores de P_{des} para os demais casos não são necessários, pois a verificação da ductilidade somente se aplica às lajes sem ancoragem de extremidade.

TABELA 3.5 - Características particulares dos protótipos e carga última

Protótipo	b (mm)	h_t (mm)	w_p (kN/m)	P (kN)
1M	851	133	1,98	44,48
2M	852	143	2,18	37,36
3M	843	155	2,39	89,84
4M	849	172	2,75	104,07
5M	820	182	2,85	22,84
6M	845	192	3,14	15,53
7M	834	129	1,90	79,17
8M	828	140	2,10	67,60
9M	823	151	2,30	127,20
10M	827	171	2,70	168,12
11M	832	180	2,89	43,40
12M	834	191	3,11	31,06
2MS	823	141	2,07	71,16
3MS	822	152	2,28	167,23
4MS	825	171	2,66	204,59
5MS	823	182	2,86	69,87
8MS	829	141	2,12	101,40
9MS	830	152	2,33	219,71
10MS	826	172	2,71	284,64
2S	833	142	2,11	68,52
3S	833	152	2,31	155,31
4S	834	171	2,68	196,42
5S	836	181	2,89	47,96
8S	817	142	2,11	97,76
9S	825	151	2,30	191,86
10S	828	172	2,72	214,70

TABELA 3.6 - Resultados dos ensaios da Série M

Protótipo	V (kN/m)	M_{ensaio} (kNm/m)	M_R (kNm/m)	M_{ensaio}/M_R	P_s (kN/m)	P_{des} (kN/m)
1M	30,38	13,43	33,05	0,406	37,6	33,5
2M	26,38	15,37	36,58	0,420	32,6	26,3
3M	58,02	17,28	41,93	0,412	91,2	68,6
4M	66,36	19,76	47,96	0,412	98,9	73,4
5M	22,43	18,78	53,33	0,352	26,0	22,3
6M	18,04	22,88	55,65	0,411	17,3	10,8
7M	51,71	23,04	47,15	0,489	60,3	46,9
8M	45,32	26,74	54,50	0,491	49,8	39,7
9M	82,03	24,48	61,62	0,397	106,2	70,2
10M	106,80	31,89	73,37	0,435	139,5	104,4
11M	34,54	29,68	77,37	0,384	28,4	32,5
12M	27,56	37,14	84,23	0,441	21,0	17,5

TABELA 3.7 - Resultados dos ensaios da Série MS

Protótipo	V (kN/m)	M_{ensaio} (kNm/m)	M_R (kNm/m)	M_{ensaio}/M_R	P_s (kN/m)
2MS	47,74	28,19	36,21	0,779	52,3
3MS	106,43	31,81	40,99	0,776	145,4
4MS	129,11	38,59	48,13	0,802	186,6
5MS	50,92	44,42	52,41	0,848	37,7
8MS	65,68	38,95	55,22	0,705	80,7
9MS	137,08	41,00	61,59	0,666	179,2
10MS	177,47	53,09	73,91	0,718	216,0

TABELA 3.8 - Resultados dos ensaios da Série S

Protótipo	V (kN/m)	M_{ensaio} (kNm/m)	M_R (kNm/m)	M_{ensaio}/M_R	P_s (kN/m)
2S	45,61	26,91	36,61	0,735	47,87
3S	97,90	29,25	40,33	0,725	122,01
4S	122,85	36,71	47,67	0,770	164,70
5S	37,67	32,51	51,39	0,632	34,56
8S	64,39	38,17	55,51	0,688	56,58
9S	121,01	36,18	59,83	0,605	144,35
10S	134,82	40,30	72,20	0,558	197,92

M_{ensaio} foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$M_{\text{ensaio}} = V \cdot L_s - \frac{w_p \cdot L_s^2}{2} \quad (3.2)$$

Os valores de M_R foram calculados a partir das dimensões reais dos protótipos medidas nos ensaios, dos valores dos materiais obtidos nos ensaios de caracterização e da área bruta da seção transversal da fôrma metálica, ao invés de uma área efetiva (área menor por causa da influência das mossas nas almas). A linha neutra plástica se localiza acima da fôrma metálica em todos os protótipos.

Os dados experimentais apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8 indicam um aumentam significativo, tanto na rigidez quanto na capacidade portante das lajes mistas com ancoragem de extremidade, ao se comparar com os respectivos protótipos sem ancoragem da Tabela 3.6.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE LAJES MISTAS COM ANCORAGEM DE EXTREMIDADE

4.1. Considerações Gerais

O comportamento do sistema de lajes mistas com ancoragem de extremidade (Série MS) será analisado através dos resultados e das características das curvas carga x flecha no meio do vão, carga x deslizamento relativo de extremidade na interface aço-concreto e carga x deformação no aço. Estas curvas apresentam o comportamento dos protótipos durante toda a fase de carregamento até o colapso.

Comparações serão feitas com os resultados de ensaios das lajes mistas sem ancoragem de extremidade - Série M - realizados por MELO (1999) e das lajes da Série S.

O Anexo A inclui todas as curvas referentes aos ensaios da Séries MS e S. As curvas referentes aos ensaios da Série M podem ser encontradas em MELO (1999) e, quando for necessário, serão mostradas neste trabalho. A carga é aquela aplicada pelo atuador hidráulico.

Os gráficos das curvas carga x deslizamento relativo de extremidade referem-se aos apoios fixo (af) e móvel (am) e os valores dos deslizamentos correspondem à média das medidas lidas nos relógios comparadores em cada extremidade fixa ou móvel, respectivamente.

Para os gráficos das curvas carga x flecha no meio do vão, os valores das flechas correspondem à média das medidas lidas nos dois relógios comparadores utilizados para medir os deslocamentos verticais.

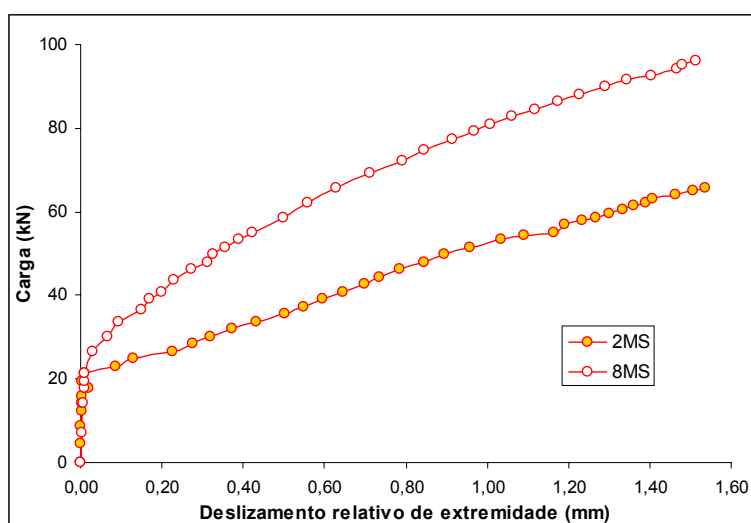
4.2. Série MS

4.2.1. Comportamento Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade

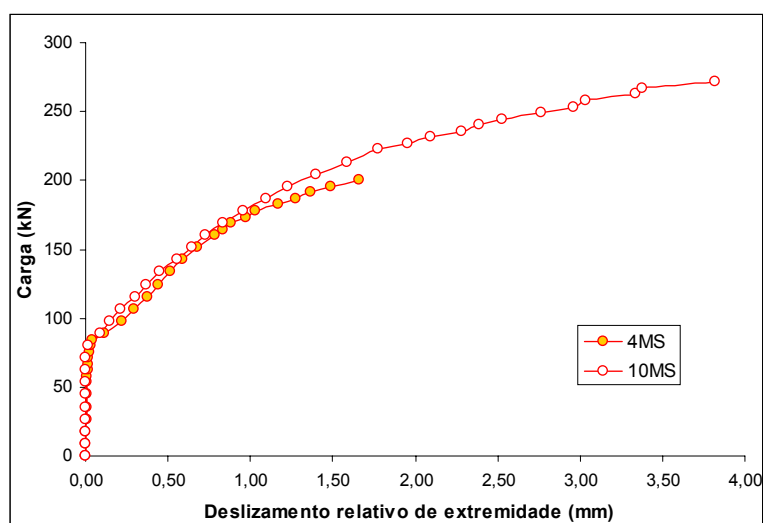
A Figura 4.1 mostra as curvas carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos equivalentes 2MS x 8MS e 4MS x 10MS, representativas de todos os ensaios da Série MS.

No início do carregamento, o deslizamento relativo, ilustrado graficamente na Figura 4.1, é praticamente inexistente, ocorrendo uma interação completa ao cisalhamento longitudinal. A aderência química entre o aço e o concreto é o principal fator responsável por esta situação.

À medida que se aumenta a carga, as primeiras fissuras no concreto aparecem. Quando a aderência química é quebrada, inicia-se o deslizamento de extremidade e a interação ao cisalhamento longitudinal passa a ser parcial. Então, a ligação mecânica (mossas e ancoragem) e o atrito nos apoios são os responsáveis pela resistência ao deslizamento relativo.



(a)



(b)

FIGURA 4.1 - Curvas de carga x deslizamento relativo de extremidade

VELJKOVIC' (1996) relata que a primeira fissura aparece na fase inicial do carregamento na região de momento máximo. Nesta região a aderência química é quebrada. O concreto entre a fissura e a extremidade da laje começa a deslizar sobre a fôrma; esta parte da laje é mobilizada para a transferência de cisalhamento longitudinal. O deslizamento relativo é maior na posição da primeira fissura e reduz em direção à extremidade da laje. Depois que a aderência química é quebrada no apoio, o deslizamento relativo existe em toda a parte mobilizada da laje.

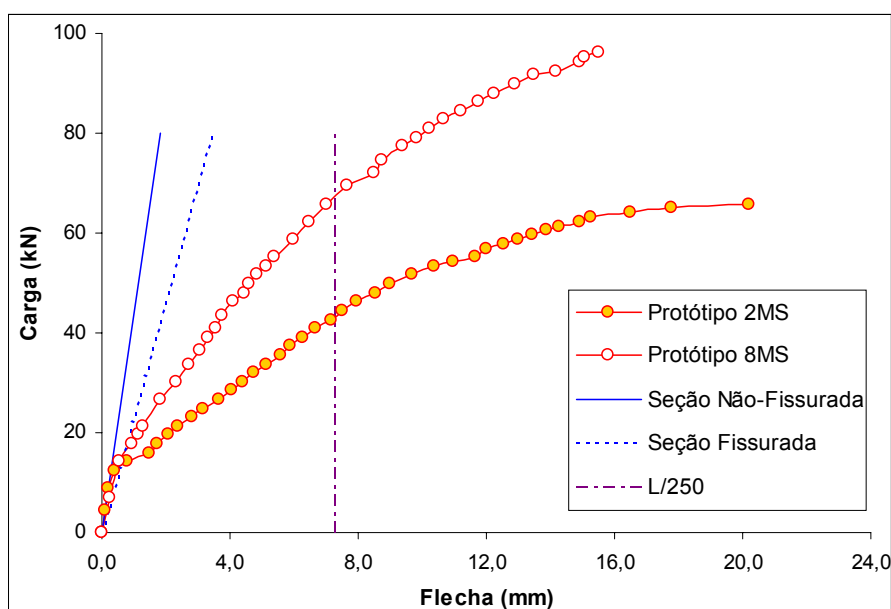
4.2.2. Comportamento Carga x Flecha no Meio do Vão

As curvas carga x flecha no meio do vão, ilustradas na Figura 4.2 para os protótipos equivalentes 2MS x 8MS e 4MS x 10MS, são representativas para todos os protótipos. É indicada a flecha admissível em serviço ($L/250$), conforme o EUROCODE 4 (1993) e as flechas teóricas da seção fissurada e não-fissurada. As cargas medidas correspondentes às flechas de serviço, P_s , são apresentadas na Tabela 3.7 (página 76).

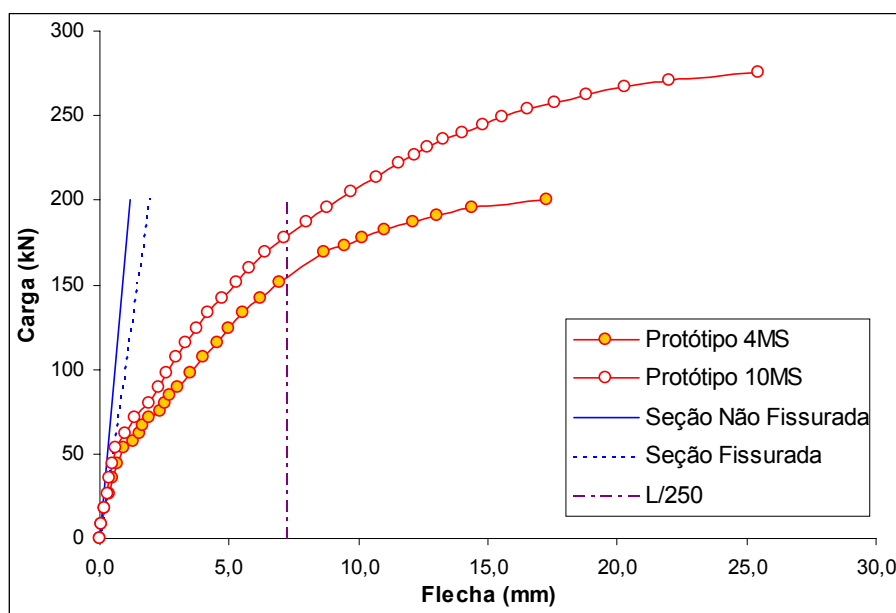
Assim como nas lajes não-ancoradas, pode-se destacar também a existência de dois estágios de comportamento das lajes ancoradas: estágio não-fissurado e fissurado. No primeiro, a seção permanece totalmente composta - interação total - até a fissura inicial no concreto. Neste estágio, não ocorreram fissuras iniciais em qualquer região do protótipo, até a formação da fissura inicial e os resultados teóricos e experimentais têm uma boa correlação.

O estágio fissurado é identificado pela mudança de rigidez do protótipo, causado primeiramente pelo fissuramento do concreto - aparecimento da fissura inicial - e pela interação parcial.

Observa-se um comportamento não-linear da curva, crescente e contínua, indicando que a presença dos mecanismos de transferência de cisalhamento (mossas, atrito e ancoragem de extremidade) é responsável pelo aumento considerável nas cargas além do estágio da fissura inicial até o colapso dos protótipos.



(a)



(b)

FIGURA 4.2 - Curvas de carga x flecha no meio do vão

Diversos autores, como SCHUSTER (1984) e JOHNSON (1994), determinam a flecha teórica de uma laje mista a partir da inércia efetiva da seção mista, calculada pela média das inércias das seções fissurada, I_{cc} , e não fissurada, I_{uc} . Segundo TENHOVUORI (1996), o uso deste critério implica em valores de rigidezes bastante altos como mostram os gráficos da Figura 4.2.

TENHOVUORI (1996) sugere empregar a Equação 4.1 de D. E. Branson para estruturas de concreto armado no cálculo da inércia efetiva da seção da laje mista.

$$I_{eff} = I_{uc} \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 + I_{cc} \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] \quad (4.1)$$

Onde,

I_{eff} - momento de inércia efetivo de cálculo da laje mista;

M_{cr} - momento que representa o início da fissuração do concreto;

M - momento atuante para o cálculo da flecha.

Entretanto, mesmo com o uso da fórmula de Branson, os valores da rigidez, I_{eff} , permanecem altos em comparação com os valores reais da rigidez obtidos nos ensaios dos protótipos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a fórmula de Branson admite uma interação total entre o aço e o concreto, enquanto que os ensaios mostraram que ocorre a interação parcial nesse sistema de lajes mistas.

Para corrigir os valores de I_{eff} , a fórmula de Branson foi ajustada para os protótipos das Séries M e MS. As novas equações usadas para o cálculo da inércia efetiva, I_{eff} , do sistema de lajes mistas com o *Steel Deck* MF-75, são:

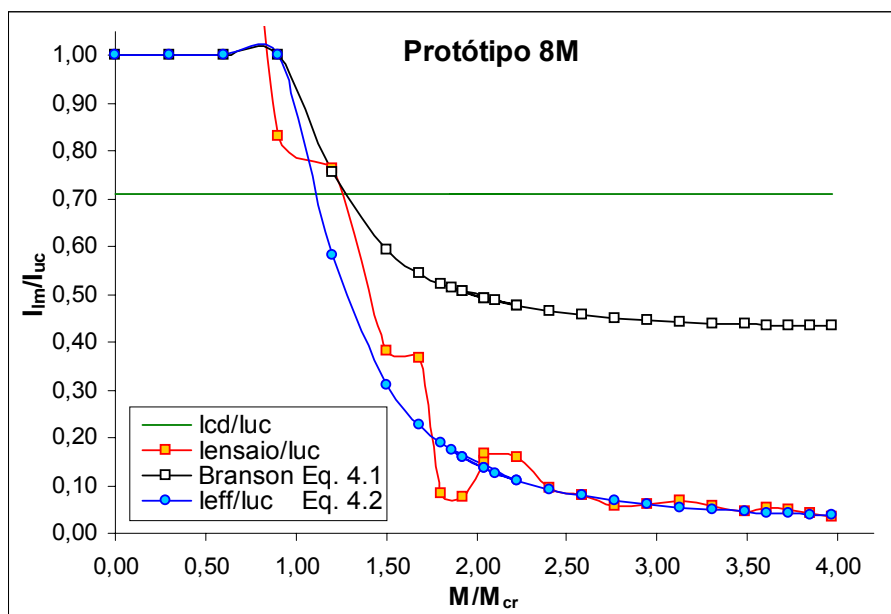
Para as lajes sem ancoragem de extremidade:

$$I_{eff} = I_{uc} \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 + \frac{I_{cc}}{20} \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] \quad (4.2)$$

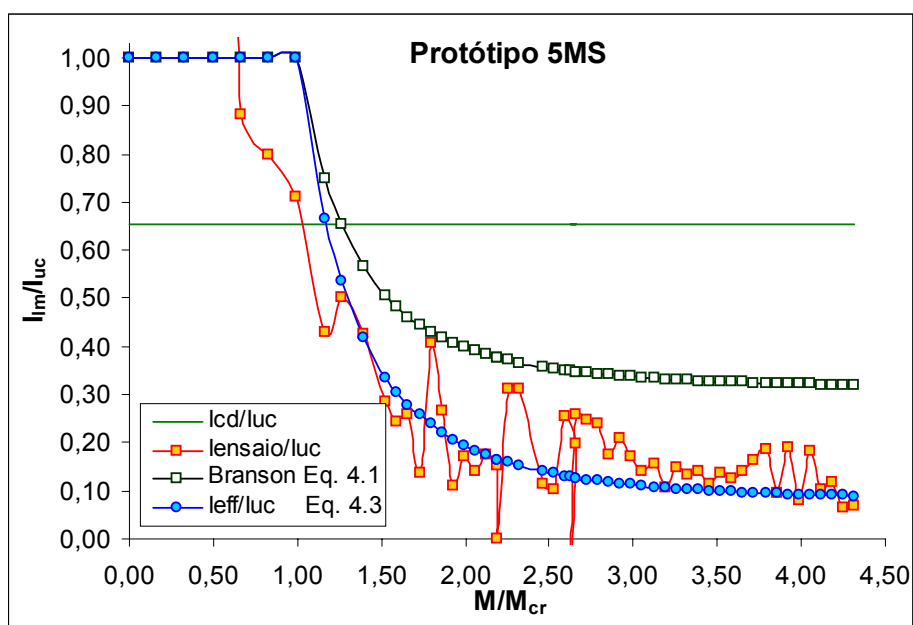
Para as lajes com ancoragem de extremidade:

$$I_{eff} = I_{uc} \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 + \frac{I_{cc}}{4} \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] \quad (4.3)$$

A Figura 4.3 apresenta a variação do momento de inércia (I_{lm}/I_{uc}) em função do momento atuante (M/M_{cr}) nos ensaios dos protótipos 8M e 5MS, onde I_{lm} é o momento de inércia do protótipo da laje mista ao longo do carregamento para os diversos casos considerados, e I_{ensaio} é o momento de inércia efetivo real dos protótipos.



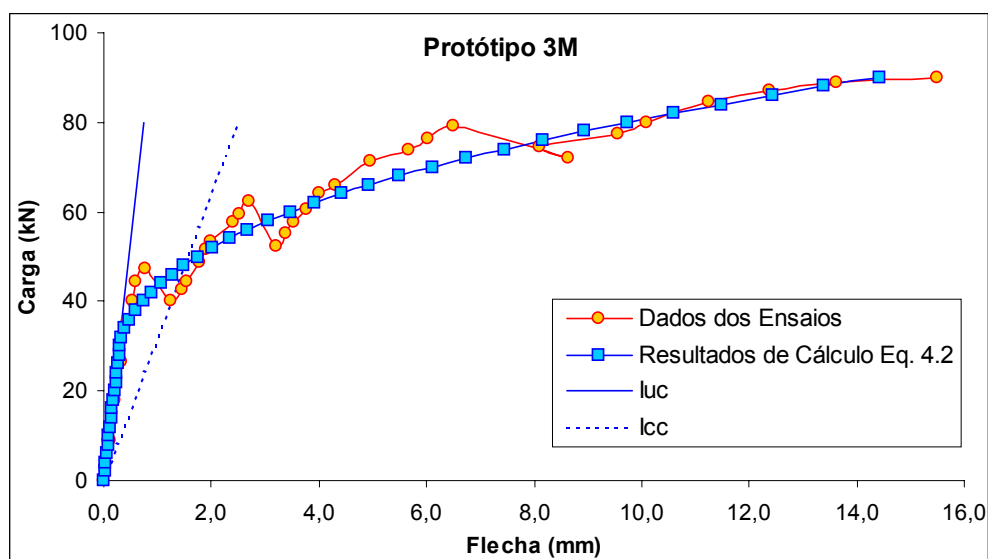
(a)



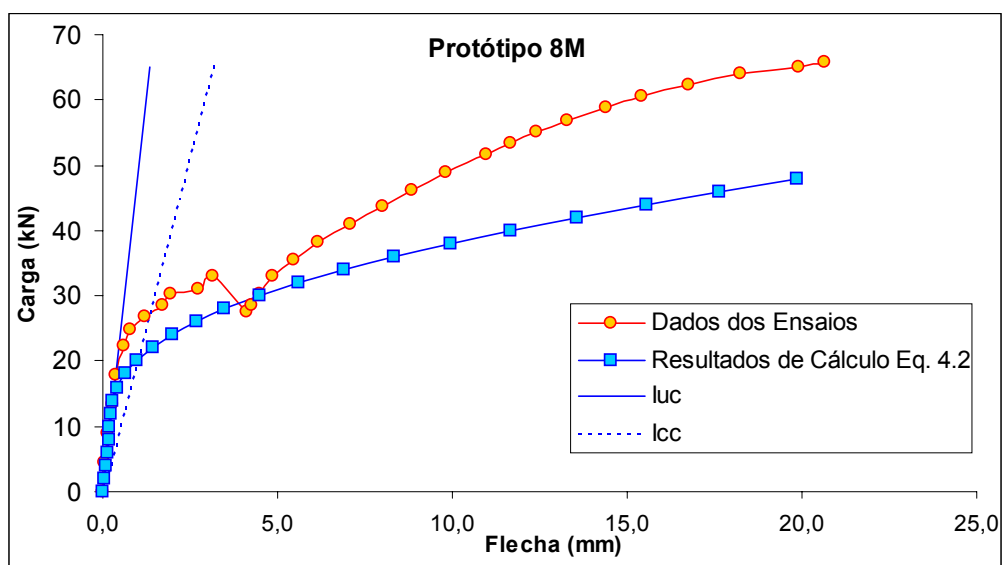
(b)

FIGURA 4.3 - Variação da inércia da laje mista

Os valores dos dados dos ensaios e dos resultados de cálculo utilizando a fórmula de Branson modificada (Equação 4.2) são mostrados na Figura 4.4 a seguir, para os protótipos 3M e 8M da Série M.



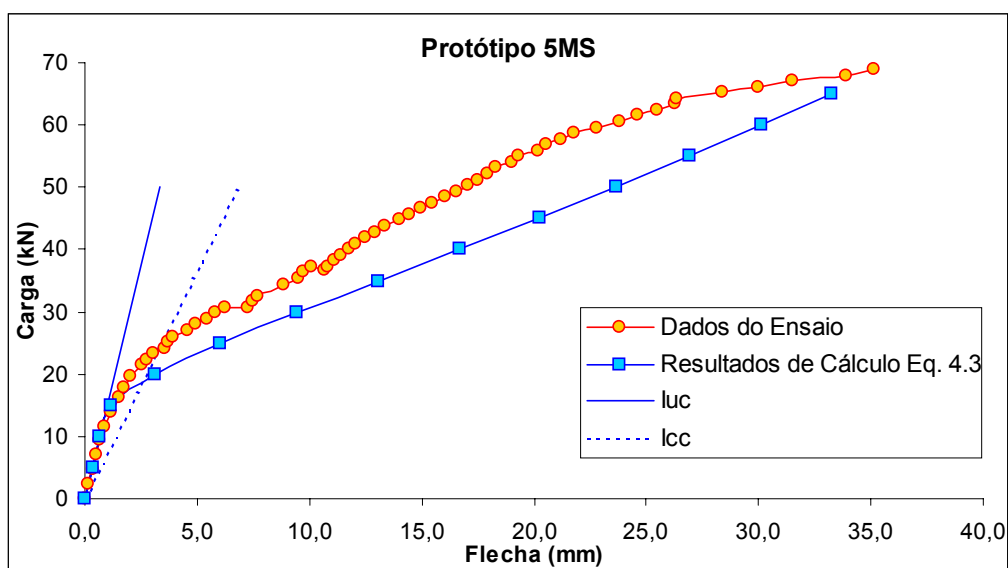
(a)



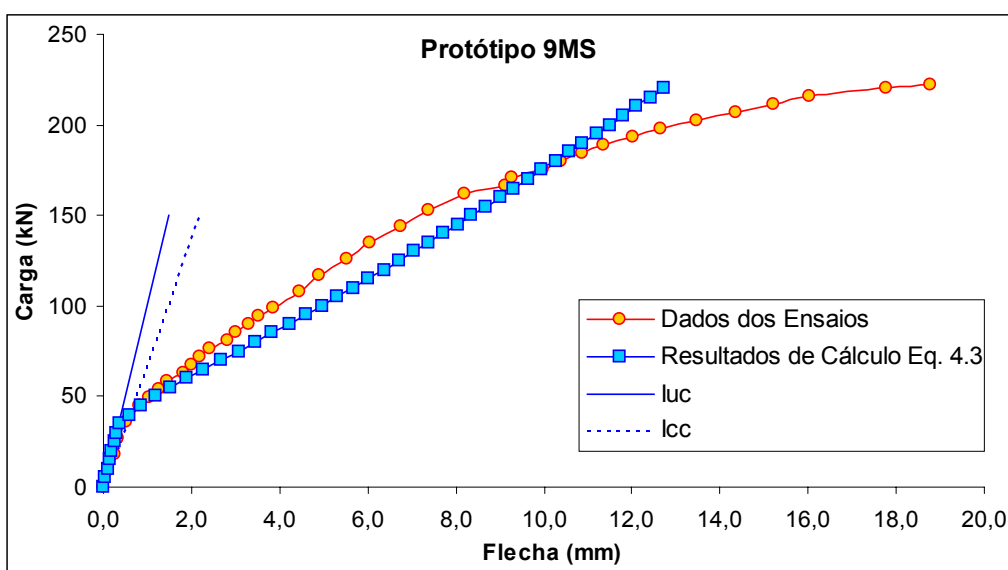
(b)

FIGURA 4.4 - Curvas de carga x flecha no meio do vão - Série M

Para a Série MS, os valores dos dados dos ensaios e dos resultados de cálculo utilizando a fórmula de Branson modificada (Equação 4.3) são mostrados na Figura 4.5 a seguir para os protótipos 5MS e 9MS.



(a)

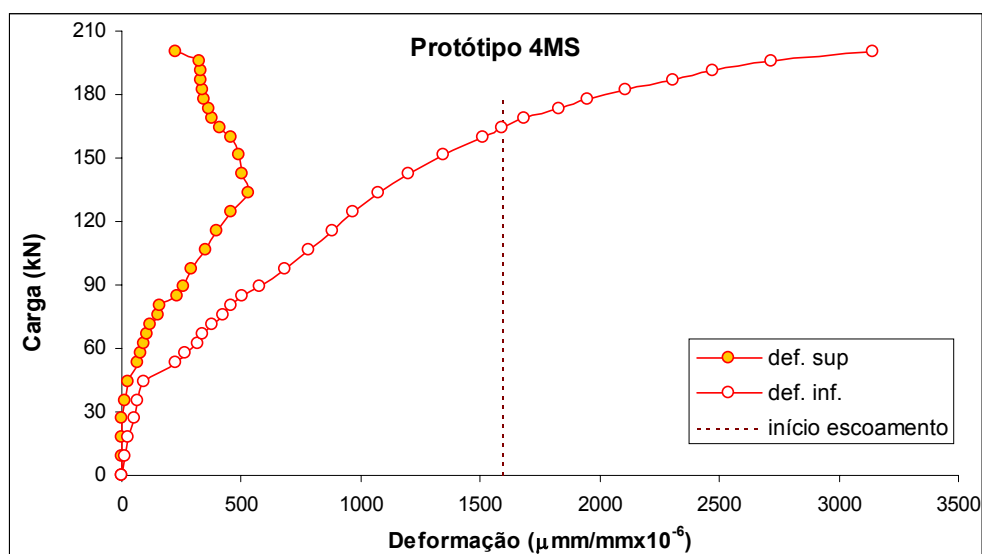


(b)

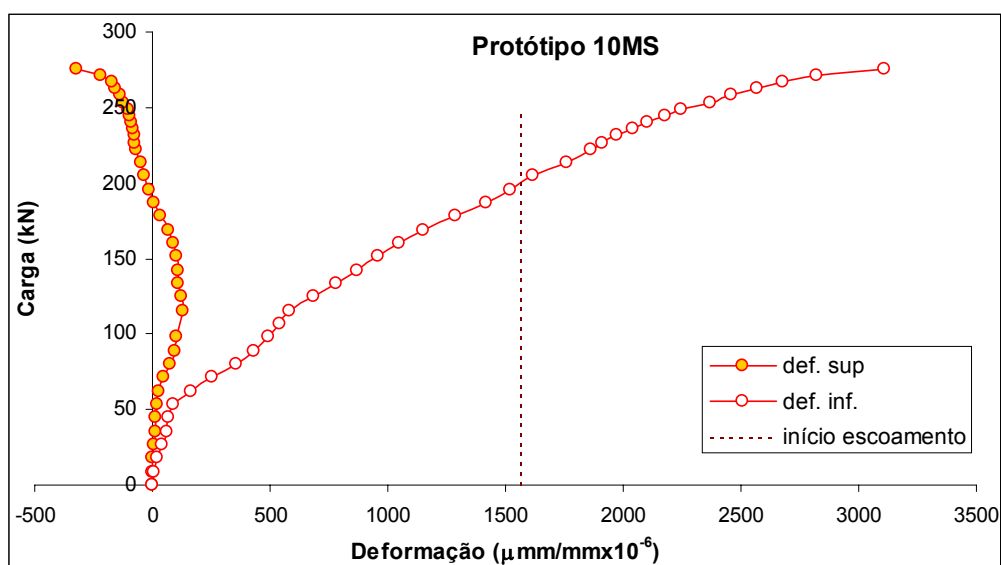
FIGURA 4.5 - Curvas de carga x flecha no meio do vão - Série MS

4.2.3. Comportamento Carga x Deformação no Aço

As curvas dos protótipos equivalentes 4MS e 10MS, representativas do comportamento carga x deformação no aço, são mostradas na Figura 4.6. O valor negativo de deformação significa compressão e o valor positivo tração.



(a)



(b)

FIGURA 4.6 - Curvas de carga x deformação no aço

Durante o estágio não-fissurado, a fôrma de aço estava completamente tracionada, tanto na mesa superior quanto na mesa inferior, correspondendo à uma interação completa entre a fôrma e o concreto e indicando a existência de uma única linha neutra, acima da fôrma de aço, passando pela mesa de concreto. No estágio fissurado, a parte superior da fôrma tende a

se tornar comprimida: formam-se duas linhas neutras na seção mista, caracterizando um comportamento de interação parcial entre a fôrma e o concreto. A deformação ε_o , correspondente ao início de escoamento, para cada espessura de fôrma, foi calculada utilizando-se os dados da Tabela 3.3 (página 65) e a expressão $\sigma_e = E_a \cdot \varepsilon_e$.

Em todos os protótipos ancorados as fibras inferiores das fôrmas alcançaram o limite de escoamento, situação esta não verificada na parte superior da fôrma. Dessa forma, pode-se supor que o colapso desse sistema misto com ancoragem de extremidade será precedido pelo escoamento das fibras inferiores da fôrma de aço. O escoamento total da fôrma não foi observado em nenhum dos protótipos ensaiados.

4.2.4. Modo de Colapso

Segundo JOHNSON (1994), os modos de falha da laje mista podem ser plotados em um diagrama com eixos $V/b \cdot d_p$ e $1/L_s$, conforme ilustra a Figura 4.7, onde d_p é a distância do centro de gravidade da fôrma metálica até o topo da laje (altura efetiva).

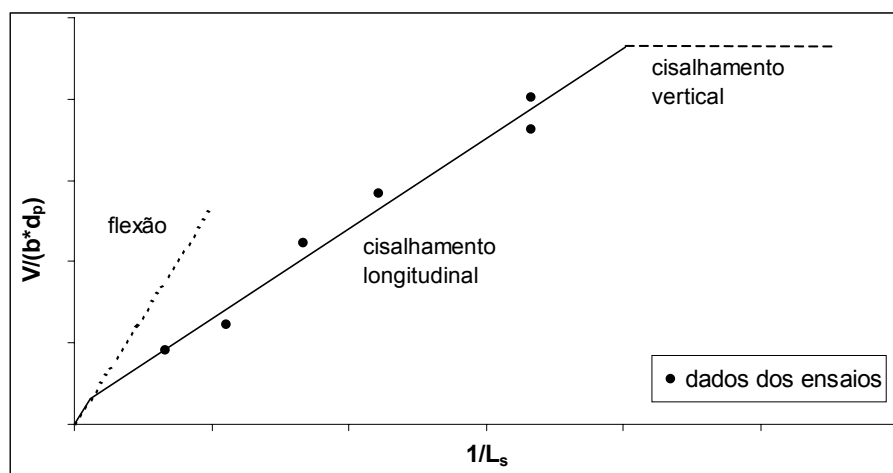
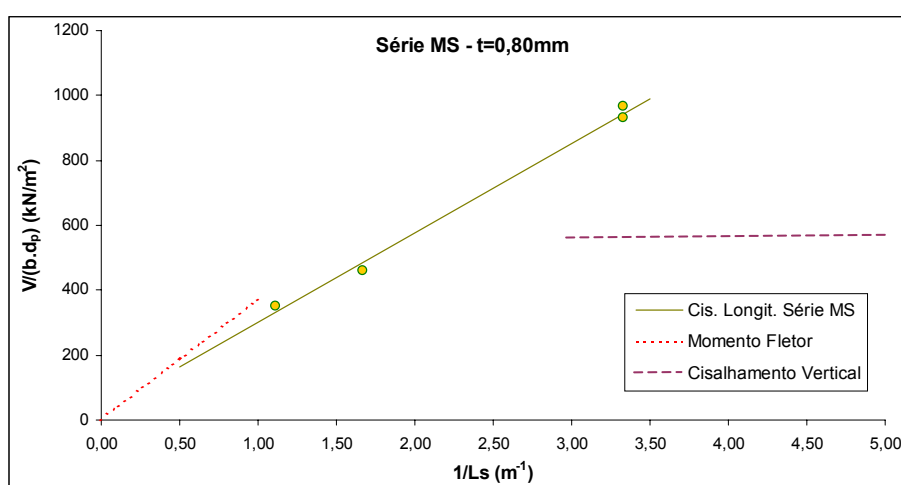
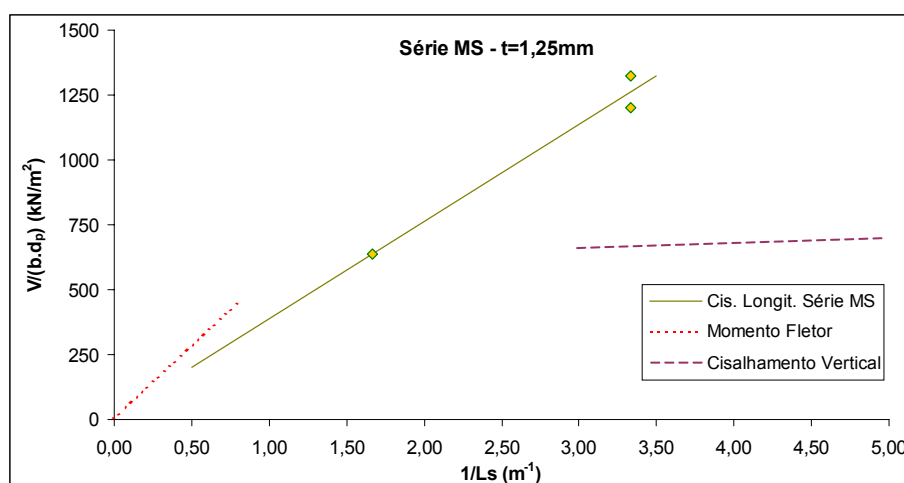


FIGURA 4.7 - Ilustração gráfica dos principais modos de falha da laje mista

Observando-se a Figura 4.7, pode-se representar os três modos principais de colapso da laje mista: flexão, cisalhamento longitudinal e cisalhamento vertical. Com os resultados dos ensaios da Série MS, pode-se mostrar na Figura 4.8 as condições dos protótipos com relação aos modos de colapso. A reta correspondente ao cisalhamento longitudinal representa a regressão linear dos valores nominais do colapso do sistema misto, obtidos nos ensaios. As equações de resistência à flexão e ao cisalhamento vertical são provenientes do EUROCODE 4 (1993) adotando-se f_{ck} de 20MPa.



(a)



(b)

FIGURA 4.8 - Representação gráfica dos modos de colapso dos protótipo da Série MS

Com base nos valores da razão M_{ensaio}/M_R da Tabela 3.7 (página 76) - todos os valores abaixo de 1,00 - concluiu-se que os protótipos tiveram falha por cisalhamento longitudinal.

Observação: Apesar de todos os protótipos falharem por cisalhamento longitudinal, alguns pontos dos dados dos ensaios ficaram acima da reta de resistência ao cisalhamento vertical. Isto se deve ao fato de que a equação da resistência do EUROCODE 4 (1993) ao cisalhamento vertical é muito conservadora, conforme ressalta VELJKOVIC' (1996) e outros pesquisadores.

O colapso por cisalhamento longitudinal, considerando-se o esquema de aplicação de cargas adotado para os ensaios, é caracterizado por um deslizamento relativo de extremidade elevado (acima de 1,50mm) fazendo com que o concreto da região do vão de cisalhamento, L_s , perca sua ação composta com a fôrma de aço.

No final dos ensaios observou-se que esse modo de colapso apresentava uma intensa fissuração do concreto 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 de carga, embora fossem menores quando comparadas com os ensaios da Série M, como ilustra a Figura 4.9.

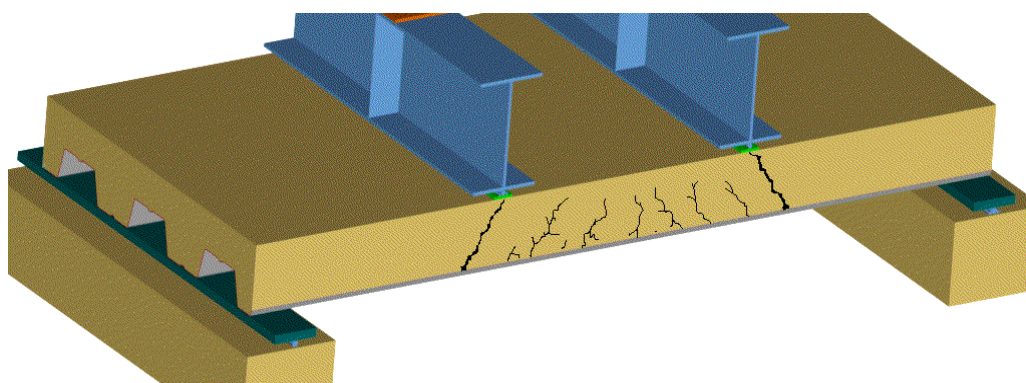


FIGURA 4.9 - Ilustração gráfica do modo de colapso nos ensaios

Verificou-se também, no instante do colapso dos protótipos, a ocorrência de uma grande fissura diagonal sob ou próxima às linhas de carga e um deslizamento relativo de extremidade acentuado, sendo possível observar, a olho nu, o deslocamento horizontal relativo entre a fôrma de aço e o concreto.

Apesar do concreto na região do vão de cisalhamento, L_s , perder sua ação composta com a fôrma de aço, em nenhum instante o concreto dessa região separou-se completamente da fôrma, ou seja, os mecanismos de transferência de cisalhamento, mesmo depois da carga última ser alcançada, evitou que o sistema fosse desfeito.

Segundo VELKOVIC' (1996), a principal característica do colapso por cisalhamento longitudinal é que o concreto desliza sobre a fôrma com uma carga menor do que aquela necessária para o colapso por flexão. Se a resistência ao cisalhamento longitudinal é suficiente para haver interação completa o colapso se dá por flexão.

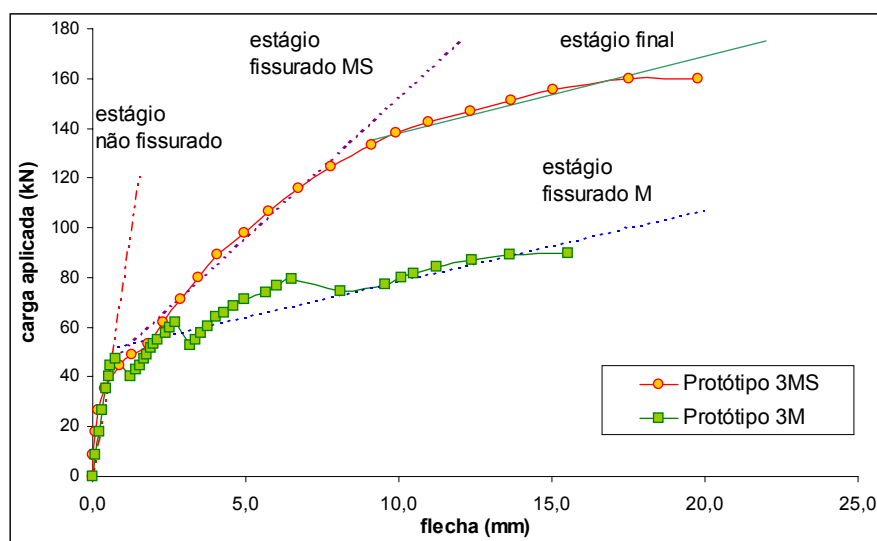
Nos trabalhos de YU & SENNE (1984) e JOLLY & LAWSON (1990), alguns protótipos de laje mista com *stud bolts* apresentaram flambagem e rasgamento da chapa na região do *stud*. Nos protótipos estudados neste trabalho, esses tipos de colapso não ocorreram.

4.3. Série M x Série MS

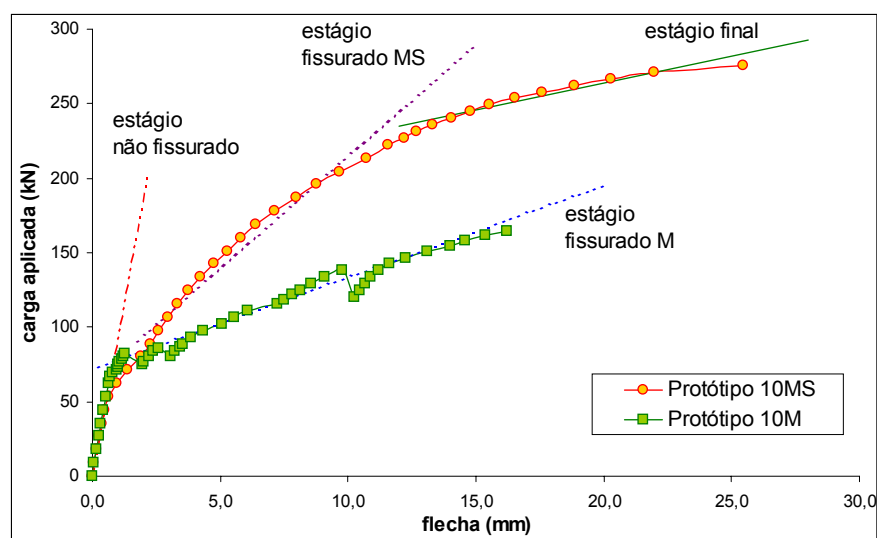
Através das curvas carga x flecha no meio do vão, carga x deslizamento relativo de extremidade e carga x deformação do aço, pode-se distinguir aspectos do comportamento entre os protótipos com e sem ancoragem, praticamente com as mesmas dimensões e propriedades mecânicas.

Carga x Flecha no Meio do Vão

A Figura 4.10 mostra curvas do comportamento carga x flecha no meio do vão para os protótipos 3 e 10 das duas séries, representativas das demais. Observa-se em ambas a existência de dois estágios no comportamento à flexão, o fissurado e o não-fissurado. No estágio não-fissurado nota-se um comportamento semelhante para as duas séries, indicando que os protótipos possuíam praticamente a mesma rigidez.



(a)



(b)

FIGURA 4.10 - Curvas carga x flecha no meio do vão dos protótipos 3 e 10

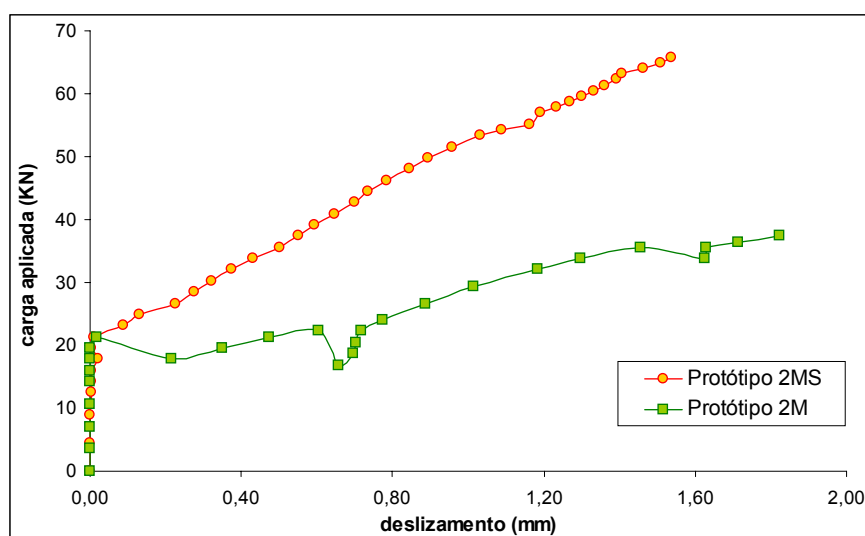
Para os protótipos sem ancoragem o estágio fissurado é caracterizado por uma redução elevada na rigidez e um comportamento descontínuo da curva, com quedas bruscas de carga e acomodações acentuadas.

Para os protótipos com ancoragem, a redução da rigidez é menor do que aquelas apresentadas pelos protótipos da Série M, e o comportamento da curva é contínuo, sem quedas bruscas de carga. Além disso, os protótipos ancorados apresentam maior ductilidade, além de maior resistência.

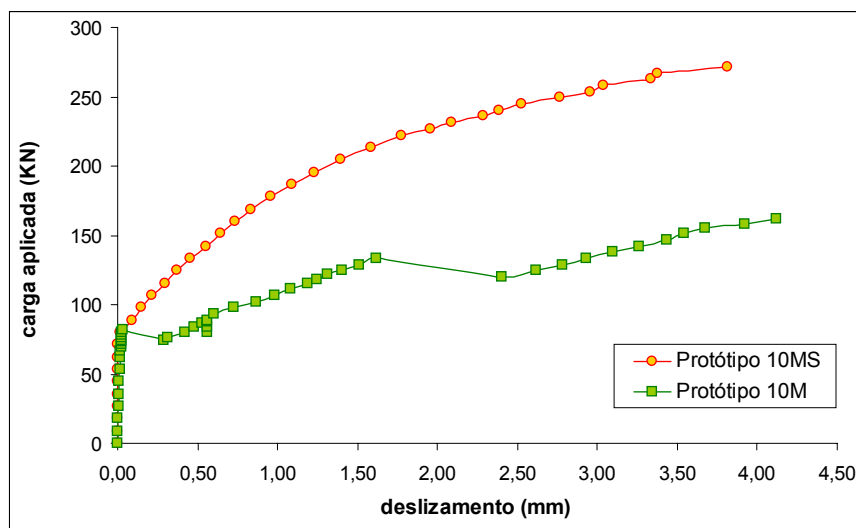
Verifica-se ainda uma mudança da rigidez no final do estágio fissurado das lajes ancoradas, observada por YU & SENNE (1984), devido à restrição ao deslizamento na extremidade causada pela ancoragem.

Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade

Ao se comparar as curvas carga x deslizamento relativo de extremidade entre os protótipos 2 e 10 das duas séries, como mostra a Figura 4.11, nota-se que a existência da ancoragem não afeta o valor da carga que destrói a aderência química na interface aço-concreto. Tal carga, portanto, só depende da resistência fornecida pela aderência química e pelo atrito nos apoios.



(a)



(b)

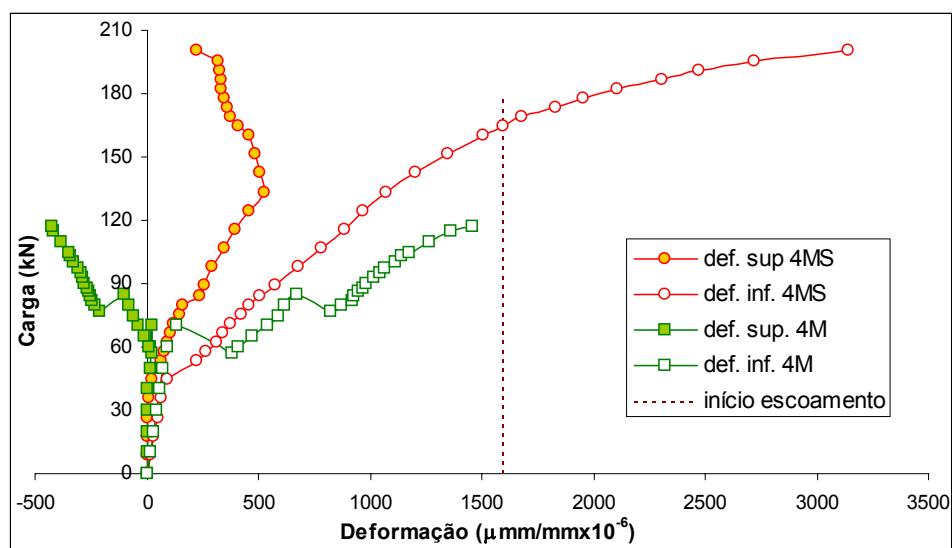
FIGURA 4.11 - Curvas carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 2 e 10

Após os primeiros deslocamentos de extremidade, os protótipos ancorados apresentavam maior restrição ao deslocamento horizontal, com conseqüente aumento da capacidade de carga em relação aos protótipos sem ancoragem.

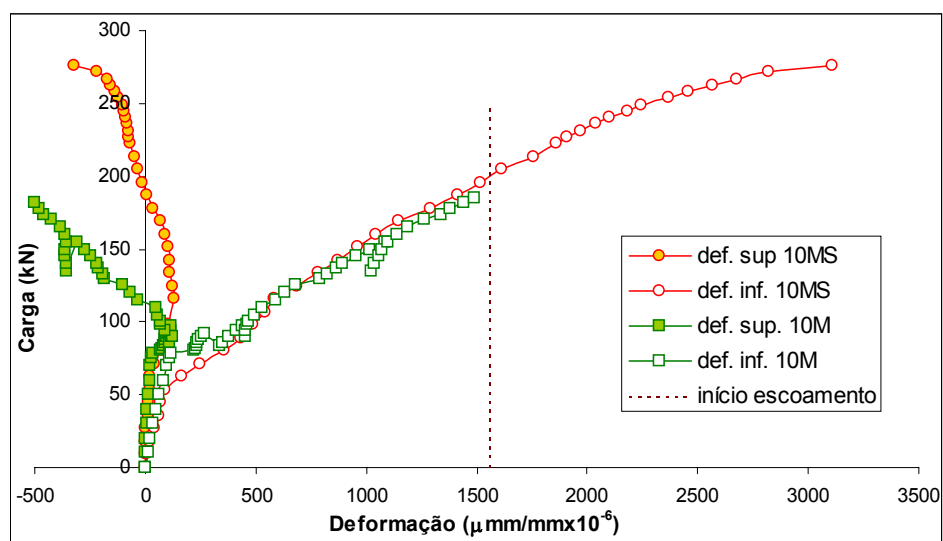
Observa-se também o comportamento contínuo, sem quedas bruscas de carga, dos protótipos da Série MS em relação aos protótipos da Série M.

Carga x Deformação do Aço

A partir dos gráficos carga x deformação no aço, apresentados na Figura 4.12 referentes aos protótipos 4 e 10, observa-se que o aço dos protótipos ancorados é mais solicitado do que o aço dos não ancorados, considerando a face inferior da fôrma.



(a)



(b)

FIGURA 4.12 - Curvas carga x deformação no aço dos protótipos 4 e 10

A deformação da face inferior da fôrma dos protótipos com ancoragem é maior do que a dos protótipos não ancorados, mostrando que a ancoragem de extremidade eleva a interação aço-concreto.

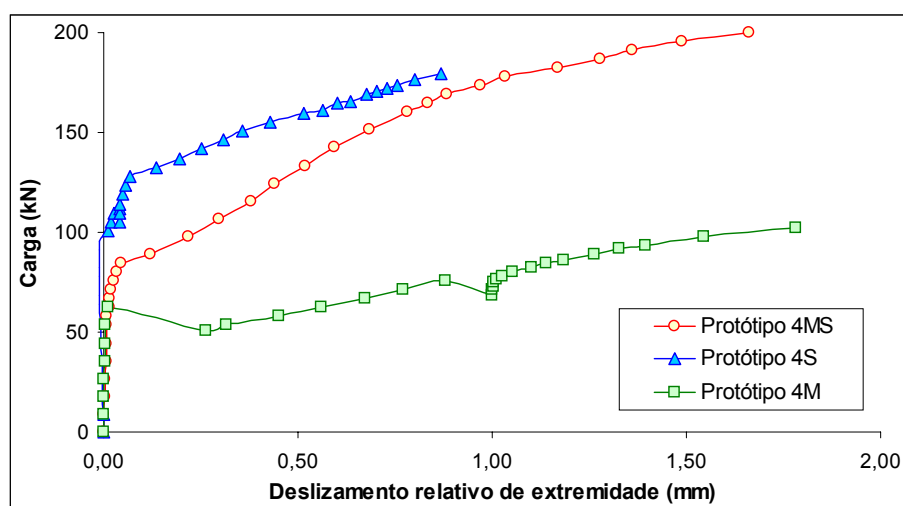
As curvas dos protótipos ancorados indicam que a parte superior da fôrma das lajes ancoradas torna-se menos comprimidas do que as lajes não ancoradas devido ao aumento de interação.

Mesmo com o uso da ancoragem de extremidade, as fôrmas dos protótipos estudadas neste trabalho não se plastificaram totalmente.

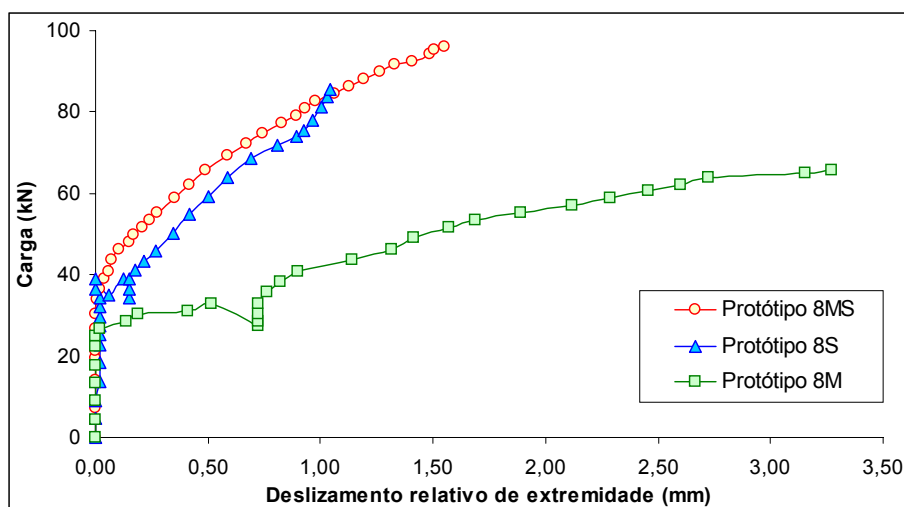
4.4. Série S x Série M x Série MS

Os gráficos representativos do comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade das Séries M, S e MS são apresentados na Figura 4.13 para os protótipos 4 e 8.

Nos protótipos da Série S, os deslizamentos só acontecem após uma carga maior do que aquelas das outras séries além de possuir pouca capacidade de deslizamento no instante do colapso. Isto provavelmente acontece por causa da formação de bielas nos protótipos da Série S.



(a)



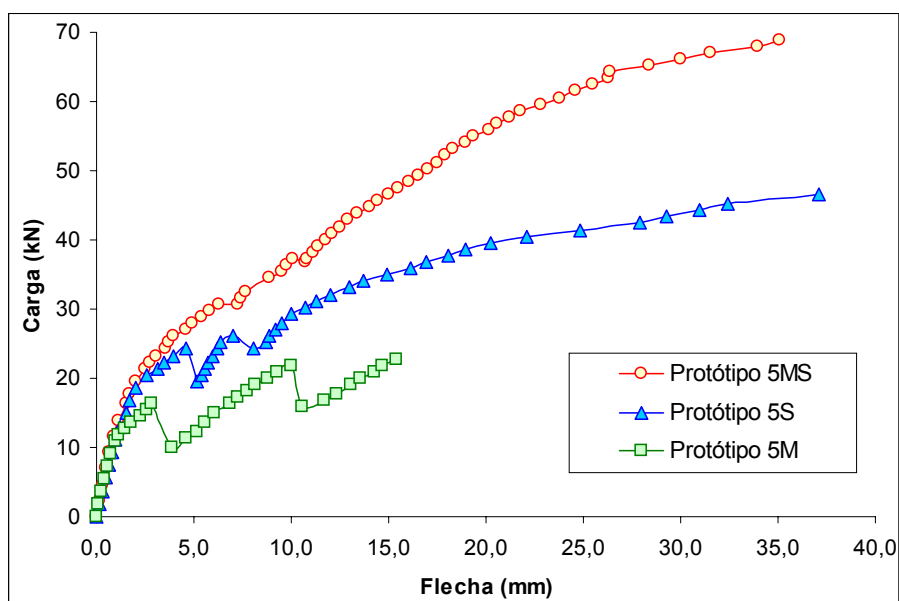
(b)

FIGURA 4.13 - Gráfico do comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade das Séries M, S e MS

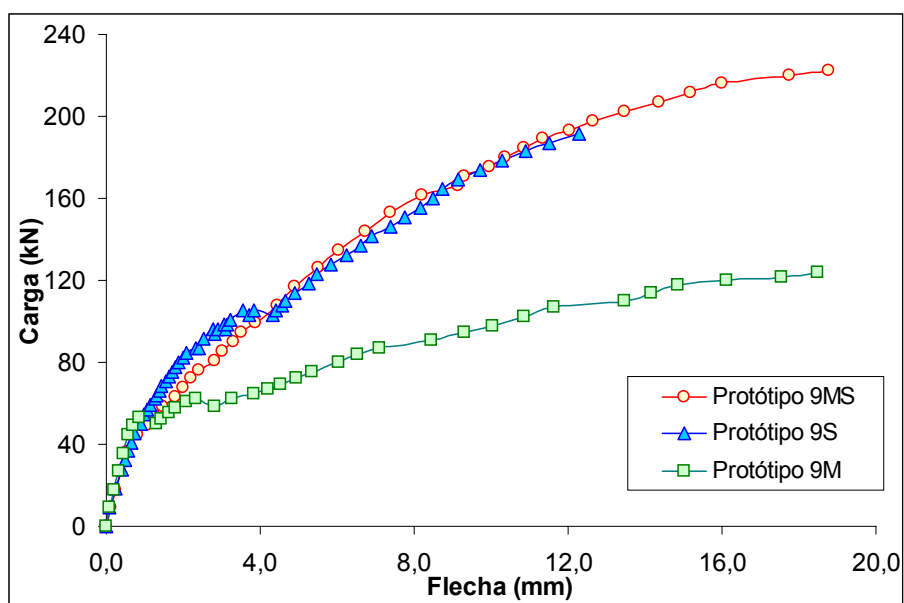
Existe uma maior capacidade de deslizamento de extremidade nos protótipos da Série M, com relação aos protótipos ancorados. Esta capacidade apresenta-se ainda mais reduzida nos protótipos da Série S, quando comparados com os protótipos da Série MS, apontando para um comportamento menos dúctil do sistema.

Gráficos do comportamento carga x flecha no meio do vão para os protótipos 5 e 9 são mostrados na Figura 4.14, que são representativos de todas as séries.

Os resultados mostraram que as lajes com ancoragem de extremidade têm uma melhor eficiência com relação à rigidez e resistência. Os protótipos ancorados possuem um mesmo comportamento: maior ductilidade e maior rigidez do que os protótipos não ancorados. Não há quedas bruscas de carga durante o carregamento nos protótipos da Série MS. Estas quedas apresentam-se reduzidas nos protótipos da Série S e são bastante acentuadas na Série M.



(a)



(b)

FIGURA 4.14 - Gráfico do comportamento carga x flecha no meio do vão das Séries M, S e MS

5. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SISTEMA DE LAJES MISTAS COM ANCORAGEM DE EXTREMIDADE

5.1. Considerações Iniciais

Conforme já mencionado anteriormente, o EUROCODE 4 (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.

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

Ainda de acordo com o EUROCODE 4 (1993), 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 avalie teoricamente a contribuição da ancoragem de extremidade na 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 com ancoragem de extremidade, simplesmente apoiadas, após a cura do concreto, conforme o Anexo E do EUROCODE 4 (1993).

Os resultados das expressões analíticas de dimensionamento de lajes ancoradas e não ancoradas serão comparados para análises e os valores da capacidade portante das lajes mistas serão determinados em função da quantidade de *stud bolts* adotada.

Tabelas de resistência de lajes mistas ancoradas e não ancoradas se encontram no Anexo B.

5.2. Método da Interação Parcial

5.2.1. Modelo Analítico da Interação Parcial

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 para o método da interação parcial pode ser melhor compreendido estudando-se uma nervura típica da laje mista totalmente plastificada.

A Figura 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.

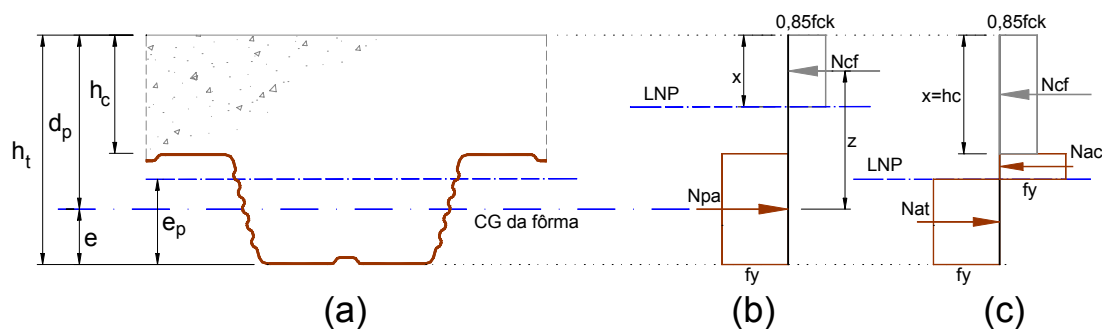


FIGURA 5.1 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação total: LNP no concreto (b) e LNP na fôrma (c)

Onde,

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

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;

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

A primeira hipótese considera a interação completa entre os elementos da laje mista e se caracteriza pela existência de uma única linha neutra plástica na seção.

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 haver equilíbrio é necessário que a força de compressão no concreto, N_{cf} , seja igual à força de escoamento à tração da fôrma, 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. O subíndice f em N_{cf} provém da palavra inglesa *full*, significando interação total. Este efeito provocado pelas estampas foi apresentado no Capítulo 2, item 2.4.4.

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:

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

Em todas as lajes de espessuras comerciais executadas com o *Steel Deck* MF-75, com h_t variando de 130mm a 200mm de altura, a linha neutra plástica se localiza acima da fôrma.

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 Figura 5.2(b). Neste caso, N_{cf} é menor que N_{pa} e é calculado por:

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

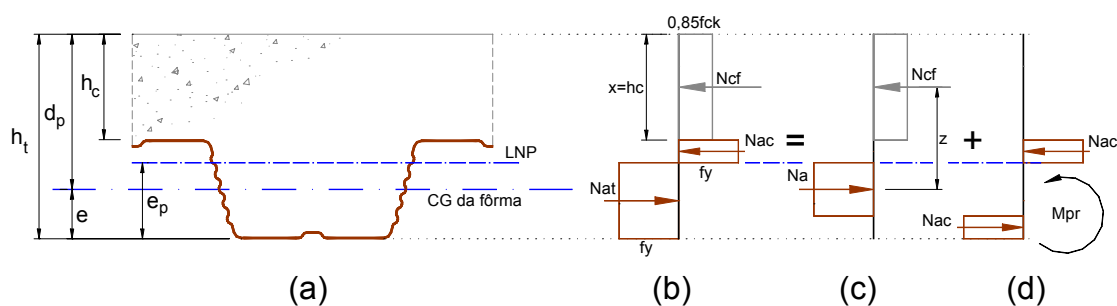


FIGURA 5.2 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista com interação total e linha neutra plástica na fôrma metálica

O diagrama das forças atuantes na laje, ilustrado na Figura 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 Figura 5.3. Esta curva é aproximada no EUROCODE 4 (1993) pela Equação 5.7, linha tracejada ADC, na Figura 5.3.

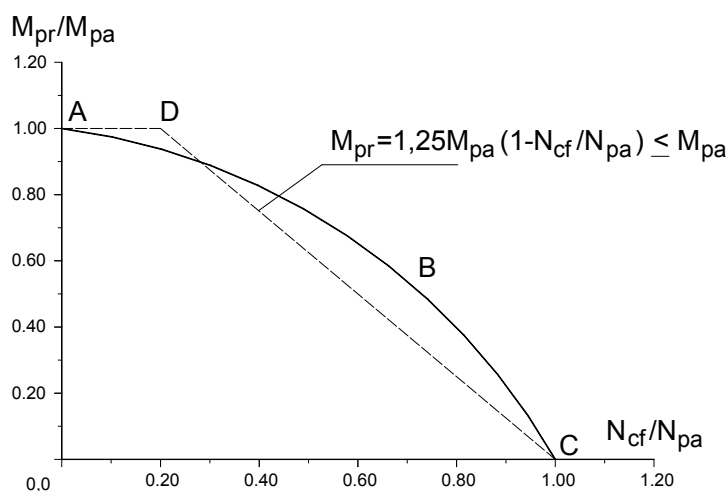


FIGURA 5.3 - Diagrama de interação entre a força axial e o momento na fôrma de aço

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

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 Equações 5.8 e 5.9 validadas por ensaios, ilustradas graficamente na Figura 5.4.

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

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

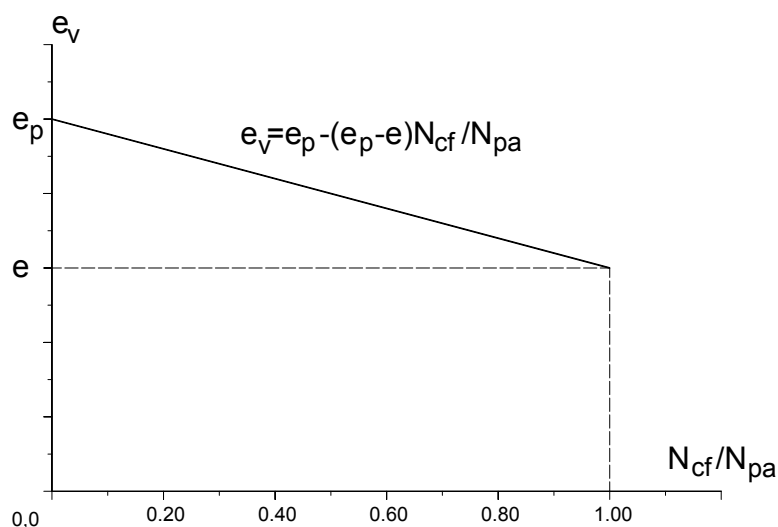


FIGURA 5.4 - Variação da posição do centro de gravidade da fôrma em função da relação N_{cf}/N_{pa}

Interação Parcial

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

A altura x do bloco de tensão é dada por:

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

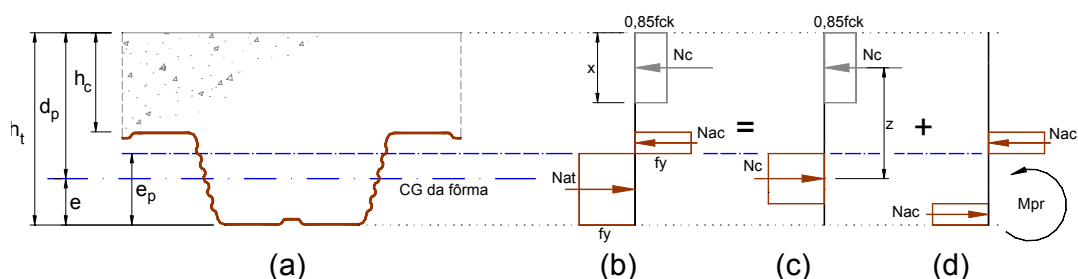


FIGURA 5.5 - Distribuição de tensões normais na seção transversal da nervura típica da laje mista - interação parcial

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 Equações 5.5 a 5.10, 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 contribuição da ancoragem de extremidade na resistência ao cisalhamento longitudinal, é necessário calcular a resistência ao cisalhamento fornecido somente pelas mossas, pois esta será utilizada posteriormente para fornecer a resistência da ancoragem de extremidade.

Com os dados de ensaios dos materiais e dos protótipos das lajes mistas ancoradas e não ancoradas é possível determinar os parâmetros para verificação da resistência da laje ao cisalhamento longitudinal com e sem a ancoragem de extremidade.

No trabalho de MELO (1999) é apresentado o método da interação parcial para os protótipos da Série M, conforme a seguir.

Através dos resultados de cada ensaio realizado é possível determinar o grau de interação parcial ao cisalhamento, η , para cada protótipo 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_s :

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

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 Equação 5.16:

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

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

O diagrama de interação parcial para cada protótipo, ilustrado na Figura 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 protótipo, dado pela Equação 5.13.

O momento fletor último de ensaio, M_{ensaio} , calculado pela Equação 3.2 (página 77), é dividido pelo momento fletor resistente nominal da laje, M_R , que considera a interação total e é calculada pela Equação 5.3 (página 102).

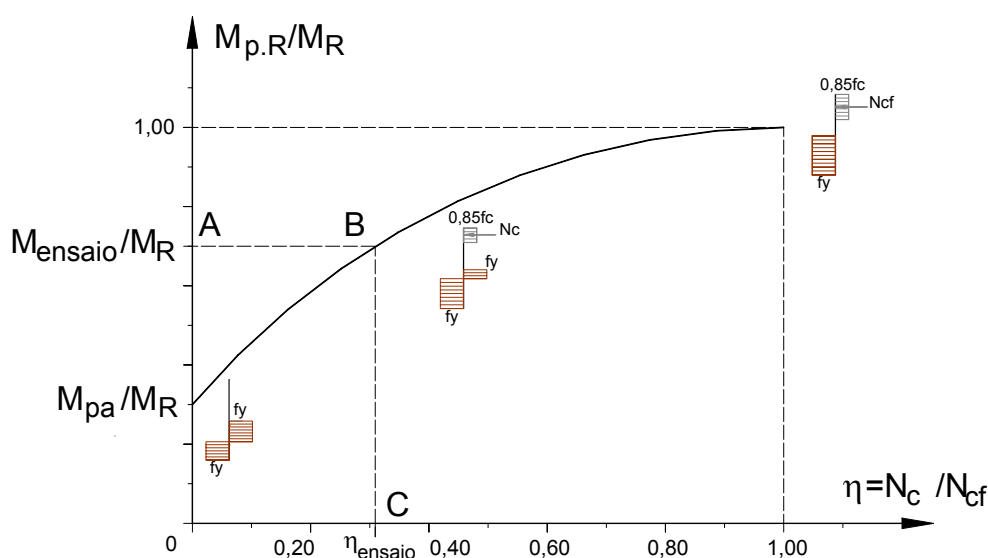


FIGURA 5.6 - Diagrama de interação parcial para a determinação do grau de interação

Seguindo o caminho $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ do diagrama de interação parcial, o grau de interação ao cisalhamento longitudinal de um protótipo específico, η_{ensaio} , é determinado.

Quando uma chapa de aço comprimida está em contato com o concreto, este previne uma flambagem maior da chapa. Segundo o EUROCODE 4 (1993), o efeito do contato da parte comprimida da chapa metálica da fôrma com o concreto é levado em conta ao se usar larguras efetivas menores do

que duas vezes o limite dado para almas Classe 1 das vigas metálicas, ou seja:

Quando $\alpha > 0,50$,

$$b_e \leq 2(396 \cdot \varepsilon \cdot t)/(13\alpha - 1) \quad (5.17)$$

Quando $\alpha \leq 0,50$,

$$b_e \leq 2(36 \cdot \varepsilon \cdot t)/\alpha \quad (5.18)$$

Onde,

α - razão região comprimida/largura total da placa;

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ em MPa}).$$

Para simplificar a determinação do momento resistente plástico da fôrma metálica, M_{pa} , foi adotado o valor do momento resistente elástico calculado de acordo com a norma americana de dimensionamento de perfis formados a frio, o AISI (1996), pois considerou-se que a fôrma não alcançaria a sua plastificação por causa das elevadas esbeltezes das almas e das mesas, e da influência das mossas.

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 protótipo ensaiado, é dada por:

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

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

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

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

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

Onde γ_v é o coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal (Eurocode 4: $\gamma_v = 1,25$).

Os graus de interação e as resistências ao cisalhamento longitudinal dos protótipos da Série M são apresentados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - Dados dos ensaios da Série M - Método da Interação Parcial

Protótipo	Série M				
	N_c (kN)	η	τ_u (MPa)	$\tau_{u,min}$ (MPa)	$\tau_{u,Rd}$ (MPa)
1M	54,47	0,170	0,128	0,068	0,049
2M	66,30	0,207	0,120		
3M	73,36	0,229	0,249		
4M	82,18	0,257	0,277		
5M	63,28	0,198	0,081		
6M	89,28	0,279	0,068		
7M	90,47	0,181	0,217	0,109	0,078
8M	116,38	0,232	0,216		
9M	81,30	0,162	0,282		
10M	122,55	0,245	0,423		
11M	96,46	0,193	0,122		
12M	140,54	0,281	0,109		

Os valores de N_{cf} foram calculados através da Equação 5.1 (página 102), adotando-se a área bruta da fôrma metálica com os valores obtidos no ensaio do aço. A Tabela 3.6 (página 76) contém os valores de M_{ensaio} e M_R .

O EUROCODE 4 (1993) permite que A_p seja determinado ao excluir as áreas da fôrma onde se localizam as mossas ou identações, 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.

5.2.3. Verificação da Resistência ao Cisalhamento Longitudinal

De posse da resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal para cada 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 (Equações 5.10 a 5.13), determina-se o diagrama de interação parcial de cálculo, $M_{Rd} \times L_x$, ilustrado na Figura 5.7, utilizado para o

dimensionamento, onde $M_{f,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo à flexão da laje mista.

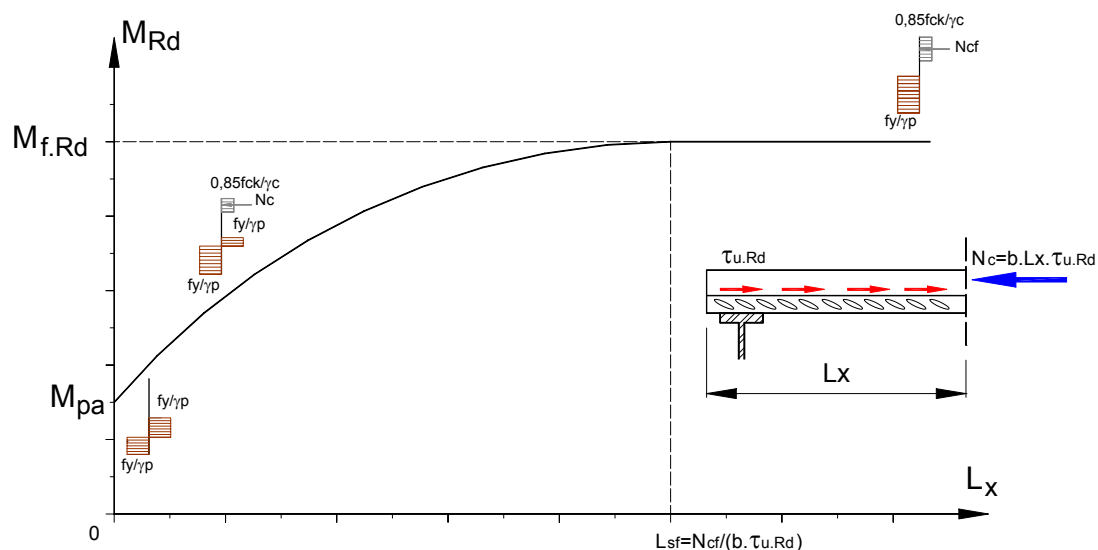


FIGURA 5.7 - Diagrama de Interação Parcial de Cálculo - Lajes mistas sem ancoragem de extremidade

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.

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 Figura 5.8.

Diferentes modos de carregamento podem ser utilizados na verificação pelo diagrama. Na Figura 5.8, uma laje mista simplesmente apoiada é verificada para os casos de carregamento uniformemente distribuído (q) e de uma carga concentrada (P).

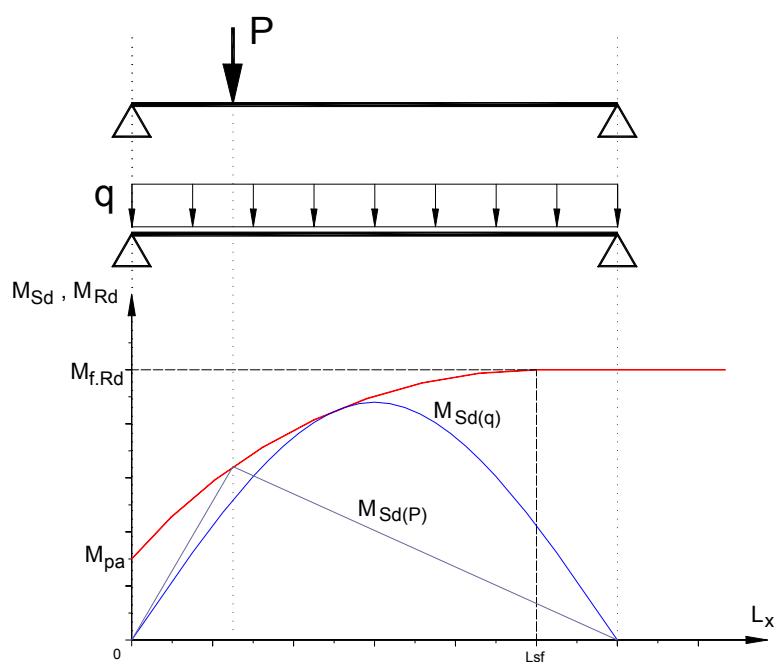


FIGURA 5.8 - Verificação da laje mista não ancorada - cisalhamento longitudinal

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. Determinação da Resistência da Ancoragem de Extremidade

O procedimento para a determinação da resistência da ancoragem de extremidade é dado no anexo E, item E.4 do EUROCODE 4 (1993). O grau de interação de cada protótipo ancorado deve ser calculado de maneira análoga ao de protótipos sem ancoragem, conforme ilustra a Figura 5.6.

De posse dos resultados dos ensaios das lajes mistas ancoradas, determina-se o momento fletor último de ensaio, M_{ensaio} , com o auxílio da Equação 3.2 (página 77), o qual é dividido pelo momento fletor resistente

nominal, M_R , já calculado com o auxílio da Equação 5.3 (página 102). Seguindo o caminho $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ do diagrama de interação, conforme mostrado na Figura 5.6 (página 108), determina-se o grau de interação ao cisalhamento longitudinal, η , para cada protótipo. A resistência do protótipo ancorado, Série MS, é obviamente, maior do que a resistência do protótipo similar não ancorado, Série M.

A resistência da ancoragem de cada laje, V_ℓ , é dada pela diferença de resistência longitudinal entre as lajes ancoradas e não ancoradas, através de:

$$V_\ell = \eta \cdot N_{cf} - \tau_{um} \cdot b(L_s + L_o) \quad (5.25)$$

Onde,

η - grau de interação do protótipo com ancoragem de extremidade;

$\tau_{u.m}$ - tensão de cisalhamento média dos protótipos não ancorados.

O valor nominal $V_{\ell k}$ e de cálculo $V_{\ell d}$ da resistência da ancoragem de extremidade são determinados conforme as seguintes equações:

$$V_{\ell k} = 0,90V_{\ell.min} \quad (5.26)$$

$$V_{\ell d} = \frac{V_{\ell k}}{\gamma_v} = \frac{0,90V_{\ell.min}}{\gamma_v} \quad (5.27)$$

Onde $V_{\ell.min}$ é o menor valor de resistência das ancoragens e γ_v é o coeficiente de resistência da ancoragem de extremidade (Eurocode 4: $\gamma_v = 1,25$).

Os resultados da contribuição dos *stud bolts* na resistência ao cisalhamento longitudinal de cada protótipo são apresentados na Tabela 5.2, a seguir.

TABELA 5.2 - Dados dos ensaios da Série MS - Método da Interação Parcial

Protótipo	Série MS					
	η	$\tau_{u.m}$ (MPa)	V_{ℓ} (kN)	$V_{\ell.min}$ (kN)	$V_{\ell.k}/stud$ (kN)	$V_{\ell.d}/stud$ (kN)
2MS	0,655	0,154	127,28	127,28	57,28	45,82
3MS	0,674		171,51			
4MS	0,727		188,42			
5MS	0,794		133,96			
8MS	0,526	0,228	140,71	140,71	63,32	50,65
9MS	0,497		182,51			
10MS	0,601		234,90			

Comparando-se os valores de η das Tabelas 5.1 e 5.2, observa-se que os valores da Série MS são bem maiores do que os valores da Série M, demonstrando um maior grau de interação dos protótipos da Série MS devido à ancoragem de extremidade.

Com a determinação das resistências das mossas, $\tau_{u.Rd}$, e da ancoragem de extremidade, $V_{\ell.d}$, pode-se proceder à verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista ancorada.

A força transferida para o concreto, N_c , pode ser determinada através da Equação 5.28:

$$N_c = \tau_{u.Rd} \cdot b \cdot L_x + V_{\ell.d} \quad (5.28)$$

O comprimento mínimo do vão da laje necessário para alcançar a interação total entre a fôrma de aço e o concreto, L_{sf} , considerando as lajes ancoradas torna-se:

$$L_{sf} = \frac{N_{cf} - V_d}{b \cdot \tau_{u,Rd}} \quad (5.29)$$

Tomando-se o valor da força N_c , conforme a Equação 5.28, e levando nas equações do método da interação parcial (equações 5.10 a 5.13), determina-se o diagrama de interação parcial de cálculo, $M_{Rd} \times L_x$, ilustrado na Figura 5.9, utilizado para o dimensionamento de lajes mistas com ancoragem de extremidade.

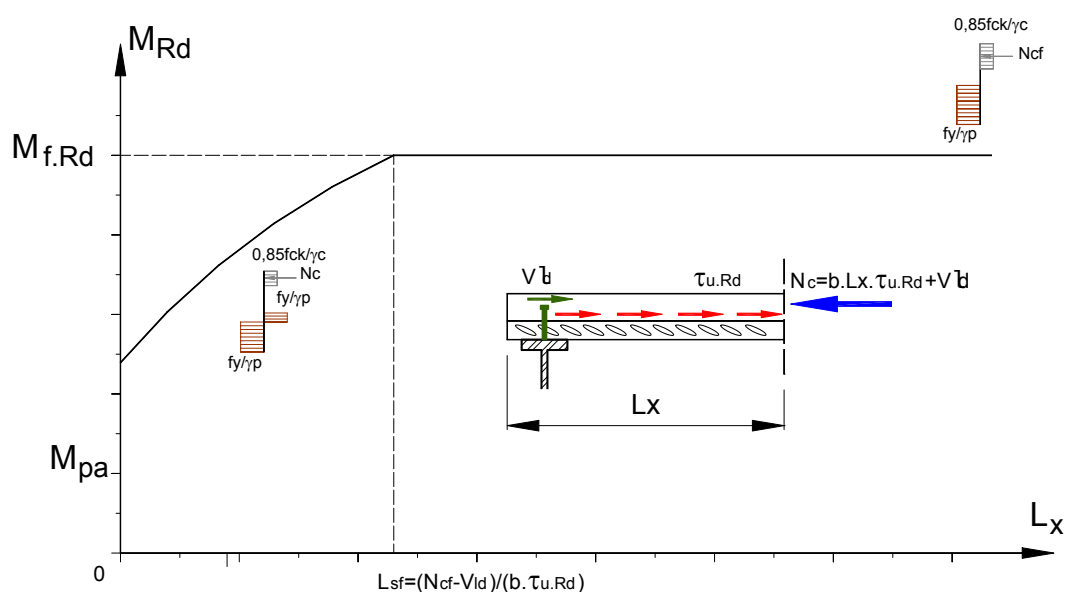


FIGURA 5.9 - Diagrama de Interação Parcial de Cálculo - Lajes mistas com ancoragem de extremidade

Lajes mistas que apresentam somente as mossas como meio de resistência têm um momento resistente no apoio igual ao momento resistente da fôrma metálica, conforme mostra a Figura 5.7.

Na presença da ancoragem de extremidade, o momento resistente inicial torna-se maior, conforme ilustra a Figura 5.9: a ancoragem de extremidade transfere uma força ao concreto que corresponde a um aumento de interação.

Na Figura 5.10 a seguir, uma laje mista simplesmente apoiada, com ancoragem de extremidade, é verificada para os casos de uma carga uniformemente distribuída (q) e de uma carga concentrada (P).

Observa-se que em qualquer seção transversal da laje mista, o momento fletor de cálculo, M_{Sd} , não deve ultrapassar o momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} .

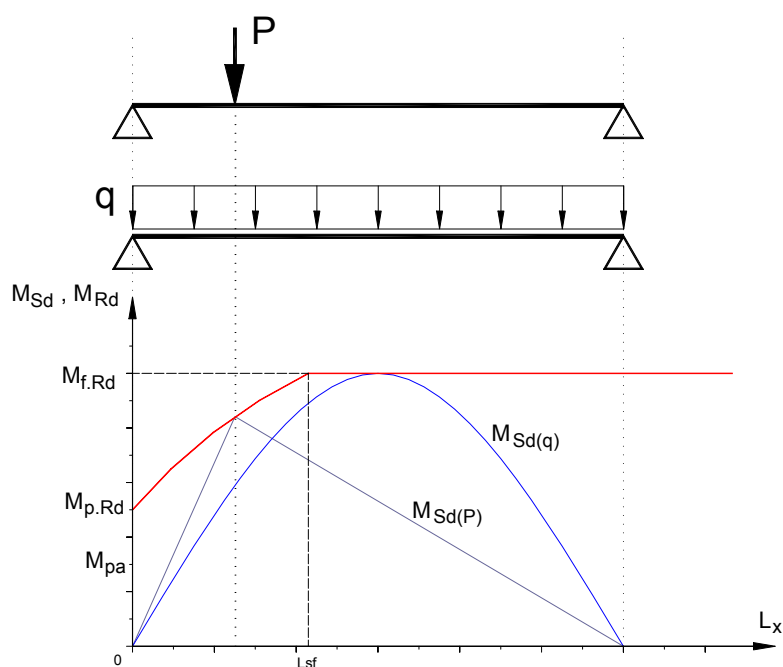


FIGURA 5.10 - Verificação da laje mista ancorada - cisalhamento longitudinal

Se a seção transversal crítica, definida pelo ponto no qual a curva de M_{Sd} transfere a curva de M_{Rd} , 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.

5.4. Análise da Resistência da Ancoragem de Extremidade

5.4.1. Comparação de Resistência entre Lajes Acoradas e Não Acoradas

Para analisar a influência da ancoragem de extremidade na resistência das lajes mistas pode-se estabelecer uma comparação entre lajes ancoradas e não ancoradas. Para isto será utilizado o gráfico $q \times L$, relacionando a carga máxima uniformemente distribuída, q , e o vão de uma laje simplesmente apoiada, L .

A Figura 5.11 ilustra as resistências de lajes ancoradas com várias quantidades de *stud bolts* e lajes não ancoradas. Os valores de resistência de cálculo ao cisalhamento longitudinal, $\tau_{u,Rd}$, e da ancoragem de extremidade, V_{ld} , são aqueles resultados dos ensaios da fôrma de espessura nominal de 0,80mm e aço com limite de escoamento de 280MPa, utilizando concreto com f_{ck} de 20MPa, altura de laje de 180mm e largura de 1,00m.

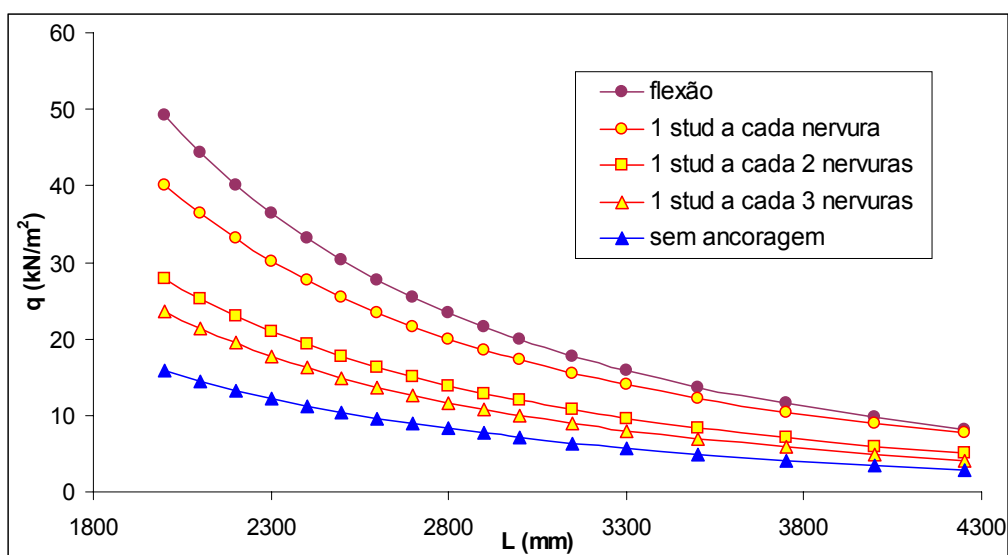


FIGURA 5.11 - Resistências de lajes ancoradas e não ancoradas
($h_t=180\text{mm}$, $t_n=0,80\text{m}$)

A laje sem ancoragem apresenta a menor resistência ao cisalhamento longitudinal. Com a adição da ancoragem à laje mista, tem-se um ganho na resistência ao cisalhamento uma vez que a interação aço-concreto aumenta, com conseqüente aumento da capacidade de carregamento. Aumentando-se a quantidade de *studs* a laje alcança sua resistência à flexão com interação completa.

5.4.2. Influência da Ancoragem de Extremidade na Resistência dos Conectores da Viga Mista

Quando os mesmos *stud bolts* são utilizados na resistência de uma viga mista e na resistência da ancoragem de extremidade de uma laje mista, as forças dos conectores de cisalhamento desenvolvidas na direção da viga mista, F_t , são combinadas vetorialmente com as forças da ancoragem desenvolvidas na direção da laje mista, F_ℓ .

A Figura 5.12 ilustra essas forças F_t e F_ℓ agindo no *stud bolt*.

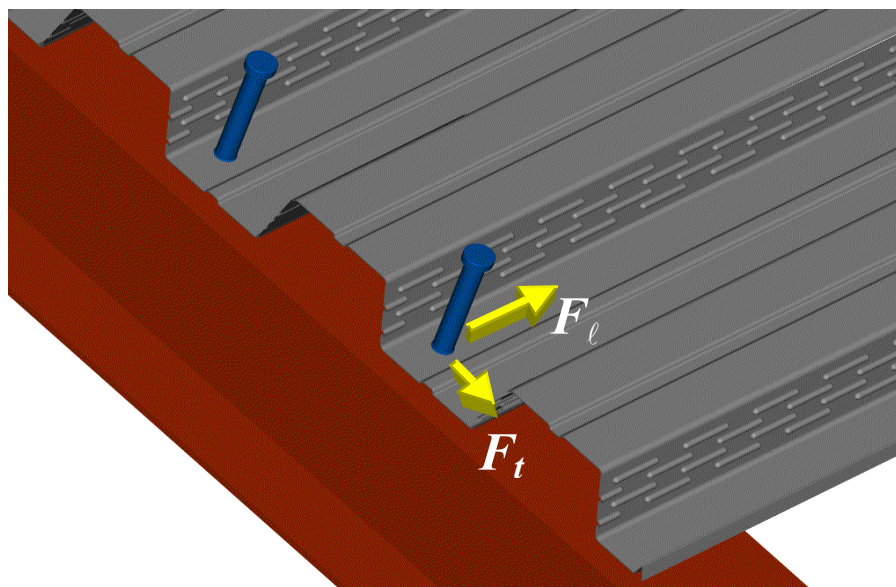


FIGURA 5.12 - Combinação das forças F_t e F_ℓ no *stud bolt*

Segundo o EUROCODE 4 (1993), para este caso, a combinação das forças que agem no *stud* deve satisfazer a seguinte equação de interação entre as forças no conector:

$$\frac{F_t^2}{(C_{red.t} \cdot q_n)^2} + \frac{F_\ell^2}{(C_{red.\ell} \cdot q_n)^2} \leq 1,00 \quad (5.29)$$

Onde,

F_t - força nominal no *stud* desenvolvida na direção da viga mista;

F_ℓ - força nominal no *stud* desenvolvida na direção da laje mista,

sendo que $F_\ell \leq V_{\ell k}$;

q_n - resistência de cálculo dos *studs* em lajes maciças conforme a NBR 8800 (1986);

$C_{red.t}$, $C_{red.\ell}$ - fatores de redução da resistência dos *studs* usados com fôrmas de aço nervuradas, de acordo com a NBR 8800 (1986), referente à direção da viga mista e referente à direção da laje mista, respectivamente.

Os fatores de redução da NBR 8800 (1986) para as fôrmas *Steel Deck* MF-75 são $C_{red.t} = 1,00$ e $C_{red.\ell} = 1,00$.

Ao observar o diagrama da Figura 5.13, conclui-se que a utilização de F_ℓ em uma porcentagem de até 30% da resistência da ancoragem, $C_{red.\ell} \cdot q_n$, não implica numa redução significativa no máximo esforço para o conector da viga mista, F_t .

Como foi observado nos ensaios da Série MS a ancoragem de extremidade não representa um estado limite último para o sistema misto, ou seja, não houve esmagamento do concreto, ruptura à tração do *stud* e rasgamento da fôrma no local da ancoragem.

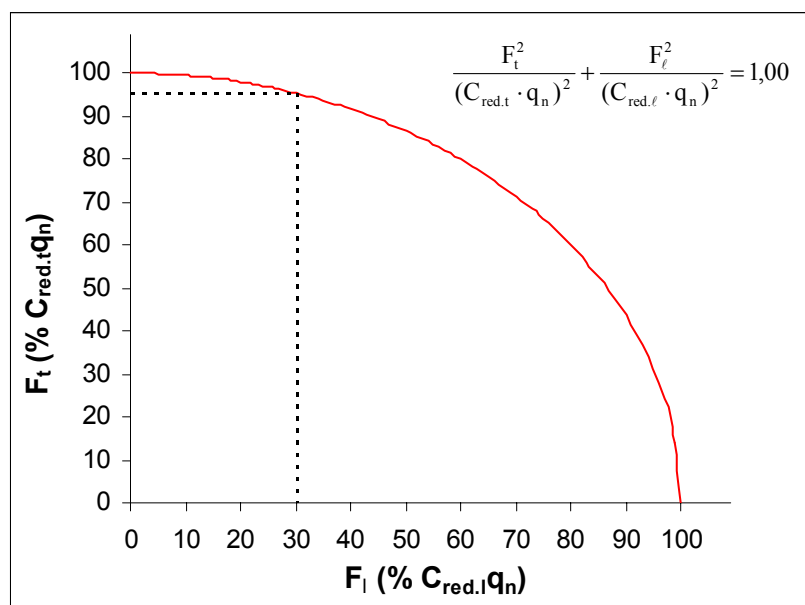


FIGURA 5.13 - Relação entre as forças no *stud bolt* devido à viga mista e à laje mista

Os valores dados pela Tabela 5.2 (página 115) para a resistência nominal da ancoragem são $V_{lk} = 57,15\text{kN}$ para $t_n=080\text{mm}$ e $V_{lk} = 63,32\text{kN}$ para $t_n=1,25\text{mm}$, que correspondem a 62% e 68% da resistência nominal do *stud bolt* ($q_n=92,8\text{kN}$), respectivamente. Portanto, este sistema de laje mista não consegue mobilizar toda a resistência dos conectores *stud bolts*, pois antes disso ocorre a falha por cisalhamento longitudinal.

Neste trabalho os valores de cálculo da ancoragem de extremidade, V_{ld} , serão adotados conforme o EUROCODE 4 (1993), ou seja, $V_{ld} = \frac{V_{lk}}{1,25}$. Logo, os valores adotados são $V_{ld} = 45,82\text{kN}$ para $t_n=0,80\text{mm}$ e $V_{ld} = 50,65\text{kN}$ para $t_n=1,25\text{mm}$.

No Anexo B são apresentadas tabelas de resistência do sistema de lajes mistas com ancoragem de extremidade, avaliando todos os estados limites últimos envolvidos, ou seja, flexão, cisalhamento longitudinal e cisalhamento

vertical. Estas tabelas são elaboradas considerando as resistências nominais $V_{\ell k}$ com 20%, 30% e 40% de $C_{red.\ell} \cdot q_n$ que são menores que os valores de $V_{\ell k}$ dos ensaios. Para cada porcentagem de $V_{\ell k}$ são considerados um *stud bolt* a cada três nervuras, dois *stud bolts* a cada duas nervuras e um *stud bolt* em cada nervura.

Seria desnecessário adotar percentuais maiores porque os valores das Tabelas B.3 a B.11 mostram que o cisalhamento vertical da laje mista será o estado limite último. Além do mais, valores de até 30% não implica numa redução significativa da resistência do conector da viga mista.

5.5. Exemplo

Considerando-se uma laje mista, a qual utiliza a fôrma metálica do exemplo do Capítulo 2, pede-se determinar a máxima carga uniformemente distribuída da laje mista, através dos métodos *m-k* e da interação parcial sem ancoragem de extremidade e adotando-se um *stud bolt* a cada três nervuras, um *stud bolt* a cada duas nervuras e um *stud bolt* em cada nervura com 40% da capacidade de $V_{\ell d}$ do ensaio.

Os coeficientes de ponderação das ações estão de acordo com a NBR8800 (1996). Os dados necessários para o exemplo são apresentados a seguir.

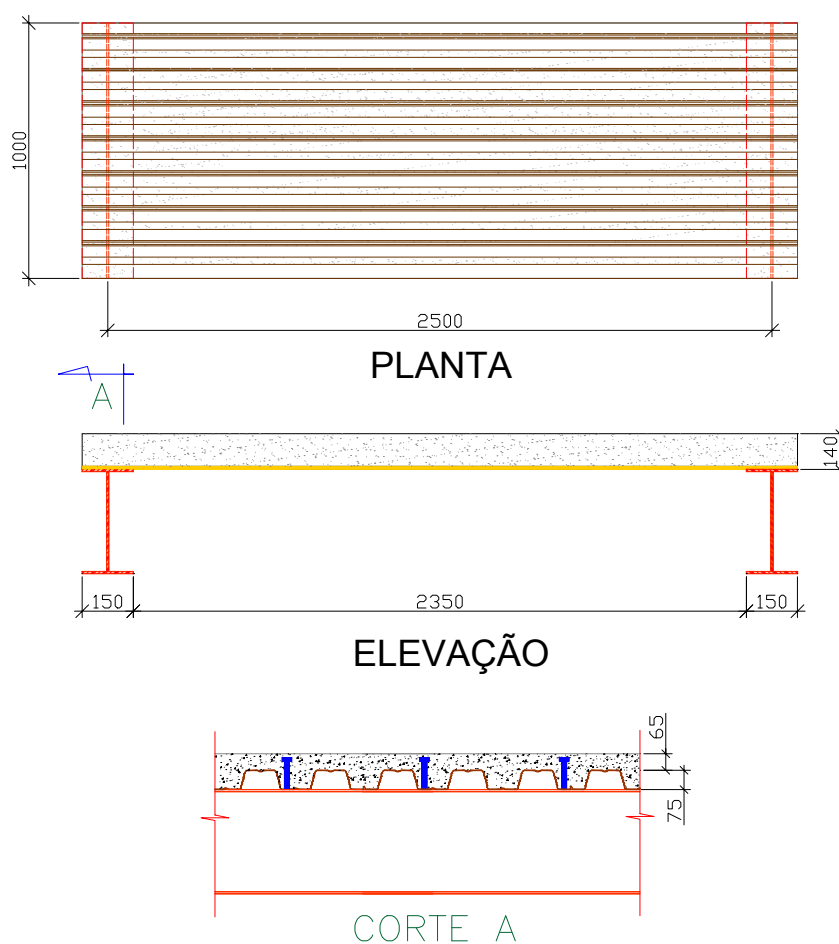


FIGURA 5.14 - Exemplo para laje mista com ancoragem de extremidade (um *stud bolt* a cada duas nervuras)

Dados:

Fôrma Metálica *Steel Deck* MF-75:

$$t_n = 0,80 \text{ mm}$$

$$f_y = 28 \text{ kN/cm}^2 \text{ (ZAR 280)}$$

$$E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$$

$$w_f = 0,083 \text{ kN/m}^2$$

$$L = 2500 \text{ mm}$$

$$A_p = 10,82 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$h_f = 75 \text{ mm}$$

$$b_o = 137 \text{ mm}$$

$$e = 37,5 \text{ mm}$$

Laje mista:

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

$$w_c = 2,46 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}
 f_{ck} &= 2 \text{ kN/cm}^2 & L &= 2500 \text{ mm} \\
 E_c &= 2.208 \text{ kN/cm}^2 & b &= 1000 \text{ mm} \\
 I_{uc} &= 20.387 \text{ cm}^4/\text{m} & I_{cc} &= 11.618 \text{ cm}^4/\text{m} \\
 I_{cd} &= 16.003 \text{ cm}^4/\text{m} & d_p &= h_t - e = 102,5 \text{ mm} \\
 M_{cr} &= 515 \text{ kN.cm/m} \\
 \tau_{u,Rd} &= 0,049 \text{ MPa} = 0,0049 \text{ kN/cm}^2 \quad (t_n = 0,80 \text{ mm}) \\
 V_{/d} &= 45,82 \text{ kN/stud} \\
 m &= 152,14 \text{ kN/m} \\
 k &= 1,697 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Stud bolt:

$$\begin{aligned}
 \phi_{sb} &= 3/4'' \\
 h_{sb} &= 127 \text{ mm} \\
 f_u &= 41,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{ASTM A108})
 \end{aligned}$$

Onde,

- A_p - área efetiva da fôrma à tração;
- b - largura unitária da laje;
- b_o - largura efetiva da nervura ao esforço cortante ($b_o = 137 \text{ mm}$);
- 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_u - limite de ruptura do aço do *stud bolt*;
- f_y - limite de escoamento do aço da fôrma;
- h_f - altura total do da fôrma metálica;
- h_{sb} - altura total do *stud bolt* após instalado;
- h_t - altura total da laje mista;

L - vão total da laje;
 t_n - espessura nominal da fôrma de aço;
 I_{uc} - momento de inércia da laje mista não-fissurada;
 I_{cc} - momento de inércia da laje mista fissurada;
 I_{cd} - média dos momentos de inércia da laje mista não-fissurada e fissurada;
 M_{cr} - momento crítico que corresponde ao início de fissuração da laje
 $V_{\ell d}$ - resistência da ancoragem de extremidade;
 w_f - peso próprio da fôrma metálica ($\gamma_a=77,0\text{kN/m}^3$);
 w_c - peso próprio do concreto para $h_t=140\text{mm}$ ($\gamma_c=24,0\text{kN/m}^3$);
 ϕ_{sb} - diâmetro do *stud bolt*;
 $\tau_{u,Rd}$ - resistência ao cisalhamento longitudinal da laje mista;
 γ_g, γ_q - coeficiente de ponderação da carga permanente e da sobrecarga, respectivamente, na fase de utilização.

Solução:

Verificação da laje mista quanto aos estados limites últimos

- Verificação ao Cisalhamento Longitudinal

Método m-k

A resistência ao cisalhamento longitudinal pelo método *m-k* é obtida pela equação a seguir, apresentada por MELO (1999):

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

Onde,

V_{usd} - reação de apoio de cálculo;
 ϕ_v - coeficiente de resistência ao cisalhamento longitudinal ($\phi_v=0,70$);
 L_s - vão de cisalhamento (para carga uniformemente distribuída $L_s=L/4$).

Logo,

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

$$\frac{(1,4 \cdot 2,46 + 1,3 \cdot 0,083 + 1,5 \cdot q)2,5}{2} = 0,70 \cdot 1 \cdot 0,103 \left(152,14 \cdot \frac{4}{2,5} + 1,697 \right)$$

$$\therefore q = 7,05 \text{ kN/m}^2$$

Método da Interação Parcial

A partir do programa STEEL DECK, com aço $f_y=28\text{kN/cm}^2$, $E_a=20500\text{kN/cm}^2$ e $t_n=0,80\text{mm}$, determina-se:

$$M_{pa}=5,841\text{kN.m/m}$$

$$e_p=33,9\text{mm}$$

A posição 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.

$$N_{cf} = \text{menor} \begin{cases} A_p \cdot f_y / \gamma_{ap} = 10,82 \cdot 28 / 1,10 = 275,41 \text{ kN/m} \\ h_c \cdot b \cdot 0,85 f_{ck} / \gamma_c = 6,5 \cdot 100 \cdot 0,85 \cdot 2 / 1,5 = 736,66 \text{ kN/m} \end{cases}$$

Sendo γ_{ap} e γ_c fatores de resistência do aço e do concreto - EUROCODE 4 (1993).

$\therefore N_{cf} = 275,41 \text{ kN/m}$ - A linha neutra plástica se localiza acima da fôrma metálica.

Para as lajes ancoradas, as parcelas de resistência da ancoragem de extremidade serão:

$$V_{\ell d} = 0,40 \cdot C_{\text{red},\ell} \cdot q_n \cdot \frac{1}{\gamma_v} = 0,40 \cdot 1,0 \cdot 92,8\text{kN} \cdot \frac{1}{1,25} = 29,70\text{kN} \leq 45,82\text{kN}$$

Para um *stud* a cada três nervuras:

$$V_{\ell d,1/3} = \frac{29,70\text{kN}}{3 \cdot 0,274\text{m}} = 36,13\text{kN/m}$$

Para um *stud* a cada duas nervuras:

$$V_{\ell d,1/2} = \frac{29,70\text{kN}}{2 \cdot 0,274\text{m}} = 54,19\text{kN/m}$$

Para um *stud* em cada nervura:

$$V_{\ell d,1/1} = \frac{29,70\text{kN}}{1 \cdot 0,274\text{m}} = 108,39\text{kN/m}$$

A seção crítica, onde ocorrerá o colapso, estará entre o apoio ($L_x=0\text{mm}$) e a seção de momento máximo, ou seja, $L_x=1250\text{mm}$.

Como a carga máxima é função do ponto onde a curva de momento de cálculo, M_{Sd} , tangencia a curva de resistência, M_{Rd} , (ver as Figuras 5.8 – página 113 e 5.10 – página 117) 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 ao igualar o momento de cálculo, M_{Sd} , com o de resistência, M_{Rd} , em várias seções no intervalo $0 < L_x \leq 1.250$, extraíndo-se a menor carga encontrada.

As Tabelas 5.3 a 5.6 a seguir, resumem este procedimento para o cálculo da carga máxima uniformemente distribuída deste exemplo. Nas tabelas, L_x é a seção considerada, N_c é a força de compressão no concreto (Equação 5.27), x é a altura do bloco de tensão do concreto (Equação 5.10), M_{pr} é momento plástico reduzido da fôrma metálica (Equação 5.12), z é o braço de alavanca (Equação 5.11) e $M_{\text{p,Rd}}$ é momento resistente de cálculo da laje mista.

TABELA 5.3 - Método da Interação Parcial - laje sem ancoragem de extremidade: $V_{\ell d} = 0$

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	x (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	z (mm)	$M_{p.Rd}$ (kN.m/m)	q (kN/m ²)
1	125	6,14	0,5	5,84	105,8	6,49	26,82
2	250	12,28	1,1	5,84	105,4	7,14	14,58
3	375	18,41	1,6	5,84	105,1	7,78	10,68
4	500	24,55	2,2	5,84	104,7	8,41	8,88
5	625	30,69	2,7	5,84	104,4	9,04	7,96
6	750	36,83	3,2	5,84	104,0	9,67	7,49
7	875	42,96	3,8	5,84	103,7	10,30	7,32
8	1.000	49,10	4,3	5,84	103,3	10,91	7,37
9	1.125	55,24	4,9	5,84	103,0	11,52	7,60
10	1.250	61,38	5,4	5,67	102,6	11,97	7,88

TABELA 5.4 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um *stud* a cada três nervuras: $V_{\ell d} = 36,13\text{kN/m}$

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	x (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	z (mm)	$M_{p.Rd}$ (kN.m/m)	q (kN/m ²)
1	125	42,27	3,7	5,84	103,7	10,22	43,59
2	250	48,41	4,3	5,84	103,4	10,84	23,37
3	375	54,54	4,8	5,84	103,0	11,46	16,84
4	500	60,68	5,4	5,69	102,6	11,92	13,56
5	625	66,82	5,9	5,53	102,3	12,37	11,74
6	750	72,96	6,4	5,37	101,9	12,81	10,67
7	875	79,09	7,0	5,20	101,6	13,24	10,08
8	1.000	85,23	7,5	5,04	101,2	13,67	9,82
9	1.125	91,37	8,1	4,88	100,9	14,10	9,82
10	1.250	97,51	8,6	4,72	100,5	14,52	10,06

TABELA 5.5 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um *stud* a cada duas nervuras: $V_{\ell d} = 54,19\text{kN/m}$

Seção	L_x (mm)	N_c (Kn/m)	x (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	z (mm)	$M_{p.Rd}$ (kN.m/m)	q (kN/m ²)
1	125	60,33	5,3	5,70	102,7	11,90	51,09
2	250	66,47	5,9	5,54	102,3	12,34	26,92
3	375	72,60	6,4	5,38	102,0	12,78	19,05
4	500	78,74	6,9	5,21	101,6	13,22	15,29
5	625	84,88	7,5	5,05	101,3	13,65	13,19
6	750	91,02	8,0	4,89	100,9	14,07	11,96
7	875	97,15	8,6	4,73	100,6	14,50	11,26
8	1.000	103,29	9,1	4,56	100,2	14,91	10,92
9	1.125	109,43	9,7	4,40	99,9	15,33	10,88
10	1.250	115,57	10,2	4,24	99,5	15,74	11,10

TABELA 5.6 - Método da Interação Parcial - laje ancorada com um *stud* em cada nervura: $V_{\ell d} = 108,39\text{kN/m}$

Seção	L_x (mm)	N_c (kN/m)	x (mm)	M_{pr} (kN.m/m)	z (mm)	$M_{p.Rd}$ (kN.m/m)	q (kN/m ²)
1	125	114,53	10,1	4,27	99,6	15,67	68,04
2	250	120,67	10,6	4,10	99,2	16,07	35,77
3	375	126,80	11,2	3,94	98,9	16,48	25,23
4	500	132,94	11,7	3,78	98,5	16,87	20,16
5	625	139,08	12,3	3,61	98,2	17,27	17,31
6	750	145,22	12,8	3,45	97,8	17,66	15,60
7	875	151,35	13,4	3,29	97,5	18,04	14,58
8	1.000	157,49	13,9	3,13	97,1	18,42	14,04
9	1.125	163,63	14,4	2,96	96,8	18,80	13,87
10	1.250	169,77	15,0	2,80	96,4	19,17	14,02

- *Verificação ao Esforço Cortante*

De acordo com o EUROCODE 4 (1993), a resistência ao esforço cortante unitária é:

$$V_{v,Rd} = \frac{b_o}{b_n} \cdot d_p \cdot \tau_{Rd} \cdot k_v \cdot (1,2 + 40\rho)$$

Onde,

b_n - largura da nervura ($b_n=137\text{mm}$);

τ_{Rd} - resistência do concreto ao cisalhamento ($\tau_{Rd}=0,25\text{MPa}$);

$k_v = (1,6 - d_p) \geq 1,00$, com d_p em metro;

$$\rho = \frac{A_{po}}{b_o \cdot d_p} < 0,02 ;$$

A_{po} - área efetiva da fôrma em b_o ($A_{po}=148\text{mm}^2$).

Logo,

$$k_v = (1,6 - 0,103) = 1,497$$

$$\rho = \frac{1,48}{13,7 \cdot 10,25} = 0,0105$$

$$V_{v,Rd} = \frac{137}{273} \cdot 103 \cdot 0,25 \cdot 1,497 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,0105)$$

$$V_{v,Rd} = 31,33\text{kN/m}$$

$$\frac{[\sum(\gamma_g \cdot q_g) + \sum(\gamma_q \cdot q_q)]L}{2} = V_{v,Rd}$$

$$\frac{(1,4 \cdot 2,46 + 1,3 \cdot 0,083 + 1,5 \cdot q)2,5}{2} = 31,33$$

$$\therefore q = 14,40\text{kN/m}^2$$

As sobrecargas máximas calculadas segundo os Estados Limites Últimos estão apresentadas na Tabela 5.7 a seguir:

TABELA 5.7 - Sobrecargas máximas referentes ao cisalhamento longitudinal, para lajes com e sem ancoragem de extremidade, à flexão e ao cisalhamento vertical

Estados Limites Últimos	Cisalhamento Longitudinal					Flexão	Cisalh. Vertical
	$m-k$	Int. Parc. sem anc.	Int. Parc. 1stud/3	Int. Parc. 1stud/2	Int. Parc. 1stud/1		
q (kN/m ²)	7,05	7,32	9,82	10,88	13,87	18,90	14,40

Verificação da laje mista ao estado limite de utilização - flecha

De acordo com o EUROCODE 4 (1993) existem duas condições para os vãos das lajes mistas: lajes mistas de vão externo e de vão interno. De acordo com a laje mista contínua mostrada na Figura 5.15, os vãos BC e CD são vãos internos e os vãos AB e DE são vãos externos. Uma laje mista simplesmente apoiada é considerada como uma laje de vão externo.

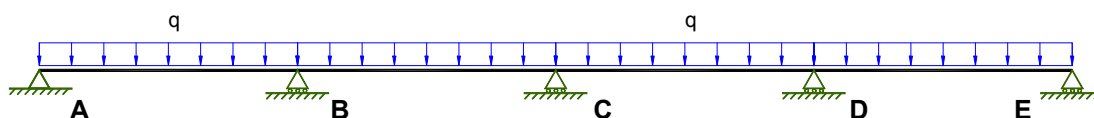


FIGURA 5.15 - Laje mista contínua

Para o caso das lajes de vão interno, a flecha pode ser determinada usando a média das inércias das seções não fissurada e fissurada, I_{cd} , ou seja, $I_{cd} = (I_{uc} + I_{cc})/2$.

Para o caso das lajes mistas de vão externo, o deslizamento relativo de extremidade pode ter um efeito significativo na flecha. Geralmente, se a carga de deslizamento de extremidade for maior que 1,2 vezes a carga nominal, nenhuma consideração do deslizamento relativo precisa ser feita, e

não é necessário calcular a flecha. De outro modo, a ancoragem de extremidade deve ser utilizada para omitir o cálculo da flecha, ou a flecha deve ser calculada incluindo o efeito do deslizamento relativo de extremidade.

A inclusão do efeito do deslizamento relativo no cálculo da flecha pode ser feita com base nos resultados dos ensaios dos protótipos das lajes mistas, como por exemplo, utilizando-se a fórmula de Branson modificada - ver item 4.2.2 - página 80.

No método *m-k*, adotou-se o valor de 0,70 para o coeficiente de resistência, isto é, $\phi_v=0,70$, para que o deslizamento relativo inicial ocorresse em uma carga maior que 1,2 vezes a carga nominal considerada. No método da interação parcial, observou-se que a carga de deslizamento inicial de extremidade sempre foi maior que 1,2 vezes a carga nominal.

Neste exemplo, a flecha admissível para a laje mista é $L/250=1,0\text{cm}$. Considerando-se a média das inércias das seções não fissurada e fissurada, ou seja, I_{cd} , para a verificação da flecha, tem-se:

$$q = \frac{384 \cdot E_c \cdot I_{cd}}{250L^3 \cdot 5} - w_c = \frac{384 \cdot 2.208 \cdot 16.003}{250 \cdot 250^3 \cdot 5} \cdot 100 - 2,46$$

$$\therefore q = 67,01\text{kN/m}^2$$

Através deste resultado, pode-se concluir que o uso de I_{cd} para o cálculo da flecha resulta em uma rigidez muito alta para as lajes mistas que utilizam a fôrma *Steel Deck* MF-75. Então, as fórmulas de Branson modificadas (Equações 4.2 e 4.3) são usadas para admitir o efeito do deslizamento relativo no cálculo da flecha. É necessário um processo iterativo para a verificação, cujos resultados para as lajes sem e com ancoragem de extremidade são dados a seguir:

- Laje mista sem ancoragem de extremidade:

$$M/M_{cr}=1,90$$

$$I_{eff}=3.456\text{cm}^4/\text{m}$$

$$\therefore q = 12,54\text{kN/m}^2$$

- Laje mista com ancoragem de extremidade

$$M/M_{cr}=2,23$$

$$I_{eff}=3.952\text{cm}^4/\text{m}$$

$$\therefore q = 14,70\text{kN/m}^2$$

As sobrecargas máximas calculadas para o Estado Limite de Utilização (flecha) estão apresentadas na Tabela 5.8 a seguir:

TABELA 5.8 - Sobrecargas máximas referentes à flecha

Estado Limite de Utilização	Flecha		
	I_{cd}	I_{eff} laje sem ancoragem	I_{eff} laje com ancoragem
$q \text{ (kN/m}^2\text{)}$	67,01	12,54	14,70

6. INFLUÊNCIA DO ATRITO NA REGIÃO DOS APOIOS

6.1. Considerações Iniciais

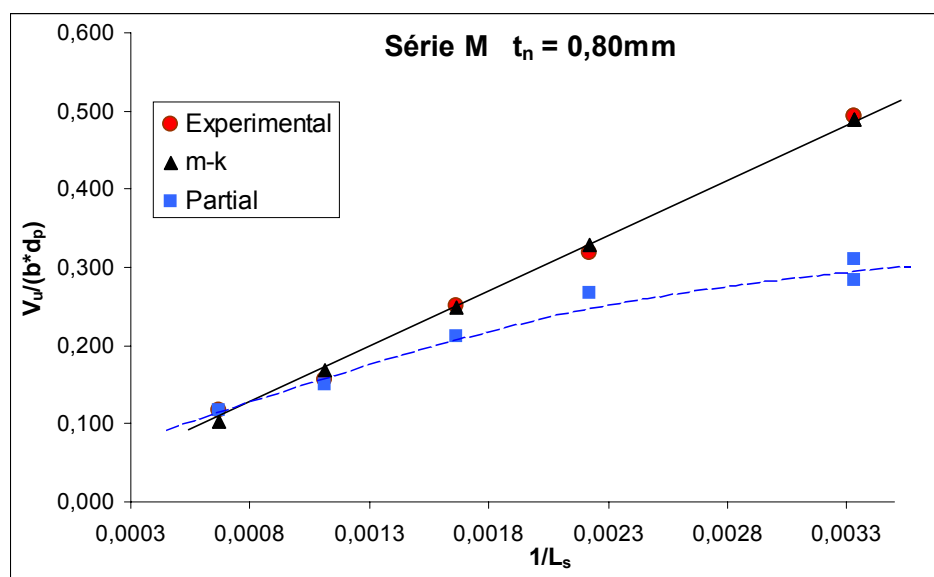
Observa-se que os valores de τ_u obtidos da Série M na Tabela 5.1 (página 110) são maiores para lajes com vãos de cisalhamento L_s curtos e menores em lajes com vãos L_s grandes. Isto ocorre porque lajes com pequenos valores de L_s têm maior reação de apoio do que lajes com elevados valores de L_s (ver Tabela 3.6 – página 76), e conseqüentemente, apresentam maior resistência ao cisalhamento longitudinal devido ao atrito.

Portanto, quando no método da interação parcial se adota o valor mínimo de τ_u como base para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal, $\tau_{u.Rd}$, significa que, neste método, a resistência ao cisalhamento longitudinal é função principalmente da resistência mecânica fornecida pelas mossas e depende menos da resistência por atrito nos apoios da laje.

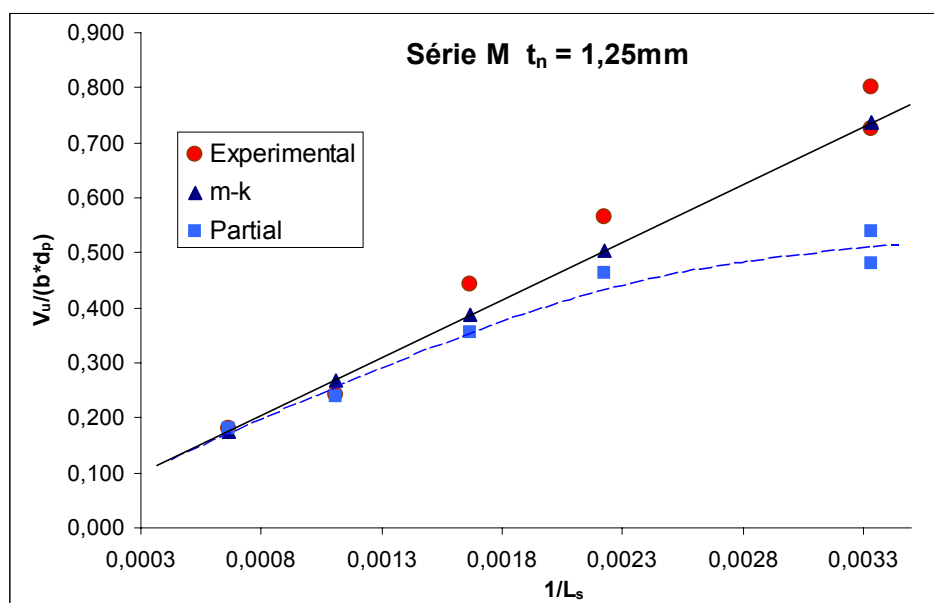
Isto representa uma *falha* do método: assim como leva a projetos adequados para lajes com grandes vãos, leva também a projetos mais conservadores, portanto, menos econômicos para as lajes curtas, nas quais o efeito do atrito nos apoios sobre a resistência ao cisalhamento longitudinal não pode ser menosprezado.

Os gráficos da Figura 6.1, a seguir, que mostram os resultados dos ensaios dos protótipos e os resultados obtidos dos métodos de cálculo *m-k* e interação parcial, ilustram claramente o efeito do atrito ao se comparar as resistências entre ambos os métodos com os dados de ensaio.

Ao se adotar o menor valor de τ_u pelo método da interação parcial, a participação do atrito torna-se insignificante.



(a)



(b)

FIGURA 6.1 - Relação de resistência entre os métodos *m-k* e da interação parcial

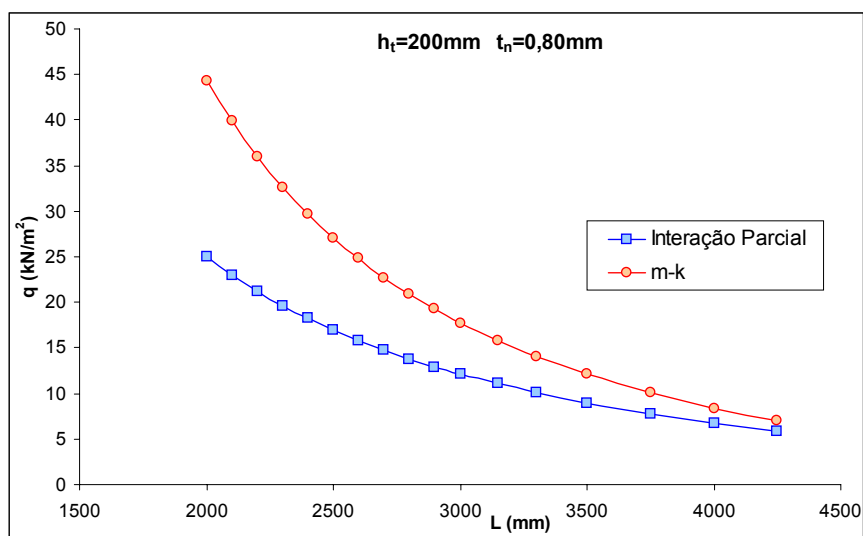
τ_u passa a ser função basicamente da resistência mecânica fornecida pelas mossas, e a resistência dos protótipos calculada pelo método da interação parcial fica praticamente menor em relação à resistência pelo método *m-k*.

Observa-se nos gráficos da Figura 6.1 que em vãos maiores os resultados são próximos, mas para vãos menores o método da interação parcial se mostra conservador em relação ao $m-k$.

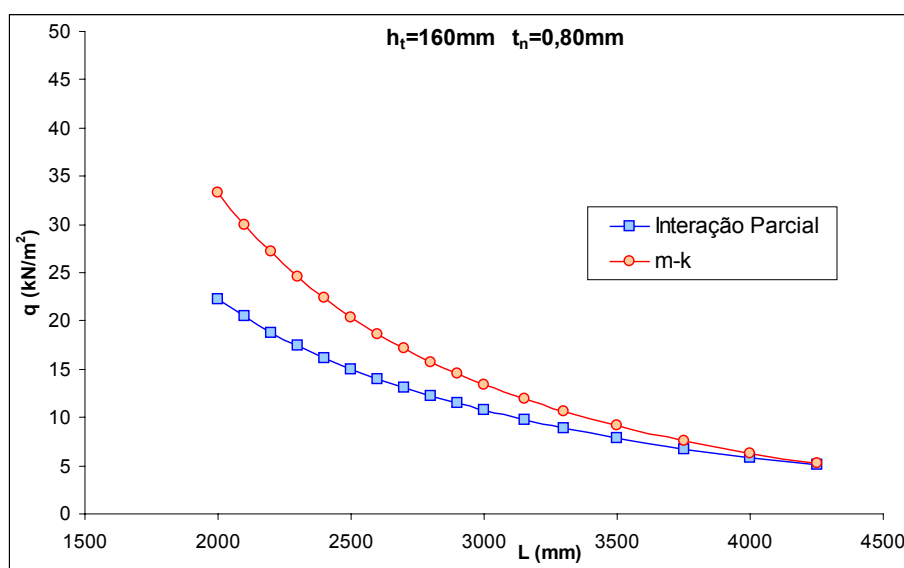
Entretanto, ao se aplicar o valor de $\tau_{u,Rd}$ do método da interação parcial no dimensionamento de lajes com diversas alturas, verifica-se que nas lajes com pequena altura a resistência obtida a partir do método da interação parcial, em alguns casos, pode ultrapassar a resistência determinada pelo método $m-k$.

Na Figura 6.2 são mostrados gráficos relacionando as resistências nominais ao cisalhamento longitudinal de lajes não ancoradas pelos métodos da interação parcial e $m-k$, com várias alturas de laje h_t . Para o método $m-k$ utilizou-se os valores obtidos por MELO (1999), e para o método da interação parcial adotou-se $\tau_{u,Rk}$ obtido neste trabalho. Considerou-se a fôrma com $t_n=0,80\text{mm}$, aço ZAR 280 e concreto com $f_{ck}=20\text{MPa}$.

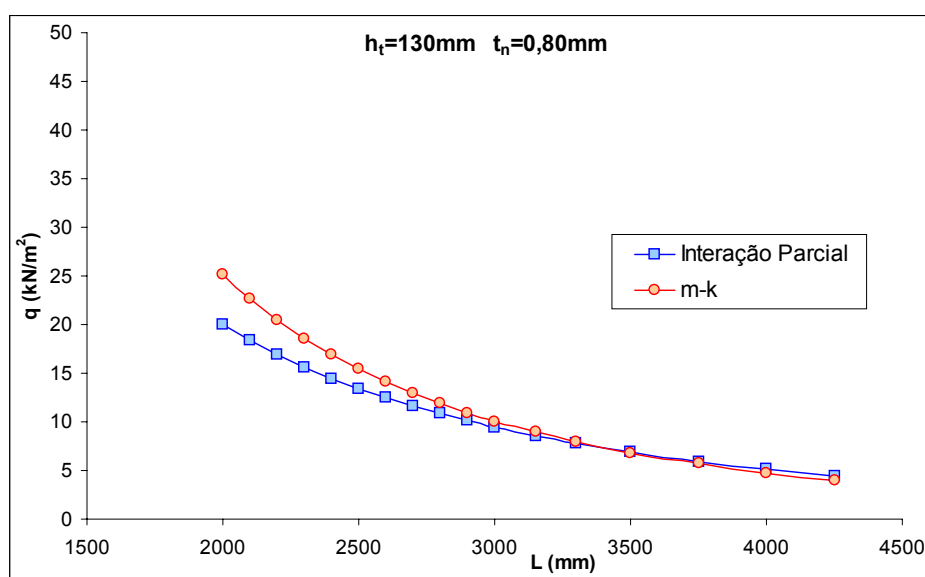
Observa-se no gráfico 6.2(a), laje com $h_t=200\text{mm}$, que o método da interação parcial é conservador para vãos pequenos, em relação ao método $m-k$, como foi previsto.



(a)



(b)



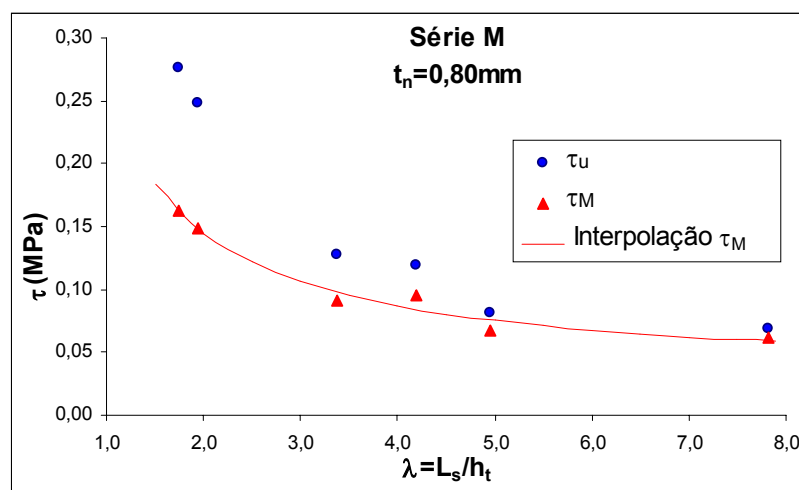
(c)

FIGURA 6.2 - Relação de resistência nominal das lajes mistas não ancoradas pelo método da interação parcial e *m-k*

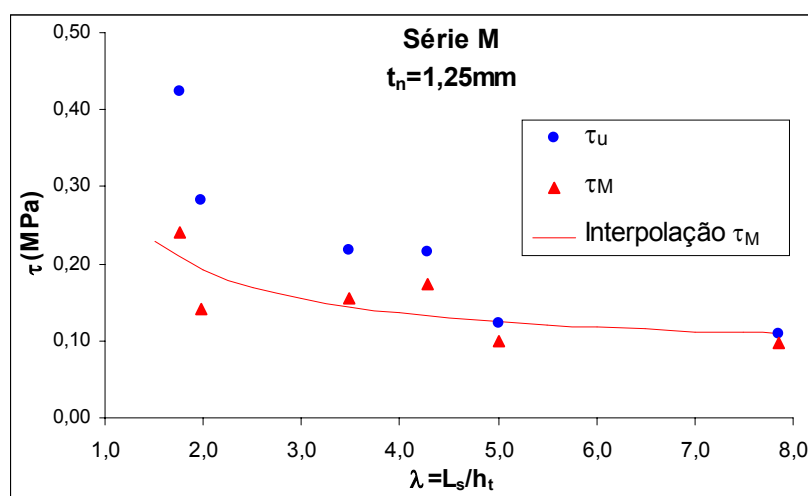
Entretanto, quando a altura da laje diminui, os valores de resistência do método da interação parcial tendem a se aproximar dos valores do método *m-k* para as lajes de vãos curtos - ver Figuras 6.2(b) e 6.2(c), contrariando a expectativa de que os valores obtidos pelo método da interação parcial

seriam sempre mais conservadores. Essa inconsistência pode ser explicada por Porter, Daniels e outros pesquisadores *apud* TENHOVUORI (1996), através de evidências experimentais e analíticas.

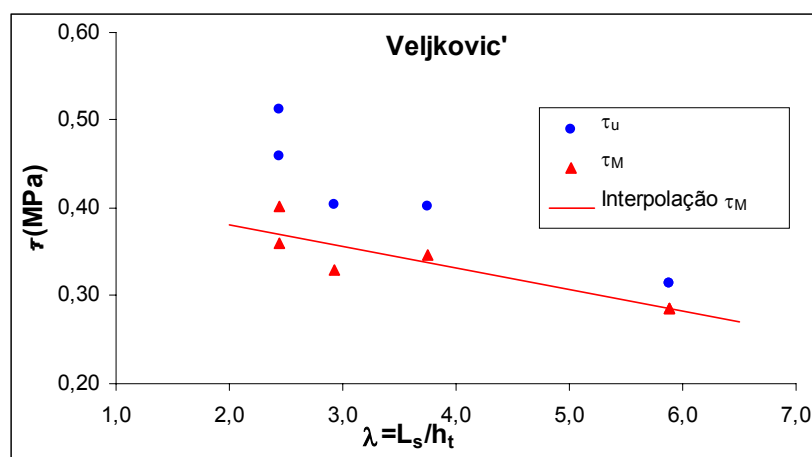
Considere-se os gráficos da Figura 6.3, onde são apresentados os resultados dos ensaios da Série M de MELO (1999): (a) e (b) - para as espessuras da fôrma de 0,80mm e 1,25mm, respectivamente e dos ensaios de VELJKOVIC' (1993) - (c). Os gráficos relacionam a variação da tensão de cisalhamento longitudinal, τ , com o parâmetro de esbeltez da laje $\lambda=L_s/h_t$, onde L_s é o vão de cisalhamento e h_t é a altura da laje mista.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 6.3 - Relação de $\tau \times \lambda$ de lajes sem ancoragem de extremidade

Nestes gráficos, τ_u é a resistência última ao cisalhamento longitudinal calculada pelo método da interação parcial do EUROCODE 4 (1993), ou seja:

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf}}{b(L_s + L_o)} \quad (6.1)$$

τ_M é a tensão de cisalhamento fornecida somente pelas mossas calculada sem a contribuição da força de atrito, F_{at} , causada pela reação vertical nos apoios, ou seja:

$$\tau_M = \frac{\eta \cdot N_{cf} - F_{at}}{b(L_s + L_o)} = \frac{\eta \cdot N_{cf} - \mu \cdot V}{b(L_s + L_o)} \quad (6.2)$$

Onde,

F_{at} - força de atrito;

μ - coeficiente de atrito, $\mu=0,60$ conforme sugere VELJKOVIC' (1996);

V - reação de apoio total última.

Observa-se nos gráficos da Figura 6.3 que a resistência das mossas, τ_M , não é constante, mas varia com o parâmetro de esbeltez da laje, $\lambda = L_s/h_t$. Ou seja, mantendo-se L_s constante e fazendo-se h_t variar, observa-se que quando h_t cresce, τ_M também cresce e quando h_t diminui, τ_M também diminui. De outro modo, mantendo-se h_t constante e fazendo-se L_s variar, nota-se que quando L_s cresce, τ_M diminui e quando L_s diminui, τ_M cresce.

Dessa forma, para evitar a inconsistência observada ao se analisar os gráficos da Figura 6.2, TENHOVUORI (1996) sugere que para o método da interação parcial, os ensaios devem ser feitos com pequenas alturas da laje e grandes vãos de cisalhamento.

6.2. Considerações sobre o Atrito

Nos resultados de ensaios das lajes mistas, ficou evidente que nos protótipos com vãos de cisalhamento relativamente curtos a influência do atrito nos apoios é relevante no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal, e em vãos maiores este efeito fica reduzido. Deste modo, o método da interação parcial do EUROCODE 4 (1993) subestima o efeito do atrito nos apoios, levando a resultados conservadores de resistência ao cisalhamento longitudinal, principalmente nas lajes mistas com vãos de cisalhamento menores.

A força de atrito, F_{at} , é causada pela reação vertical concentrada nos apoios e aparece na interface da fôrma com o concreto, como ilustra a Figura 6.4, podendo ser considerada de acordo com BODE & MINAS (1996) e outros pesquisadores, proporcional à reação de apoio, V :

$$F_{at} = \mu \cdot V \quad (6.3)$$

Onde,

μ - coeficiente de atrito na interface fôrma metálica e concreto;

V - reação de apoio da laje mista.

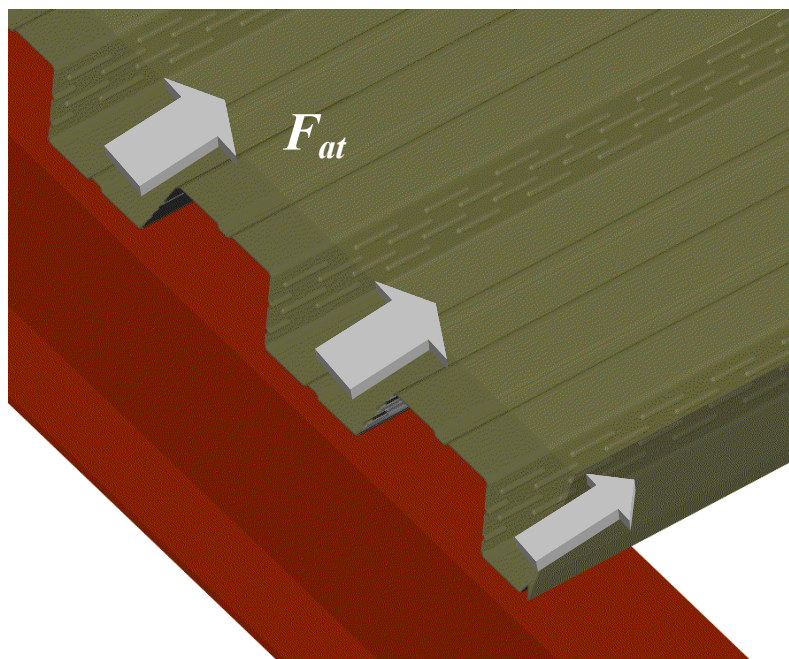


FIGURA 6.4 - Forças de atrito na região do apoio na interface da laje mista

Para se levar em conta o efeito deste atrito na resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas, estão sendo avaliados métodos de análise que utilizam ensaios em pequena escala, conforme CRISINEL & DANIELS (1993), VELJKOVIC' (1993), BODE & MINAS (1996) e RONDAL & MOUTAFIDOU (1996). Nestes ensaios o deslizamento relativo é induzido em um pequeno elemento de laje mista que simula as condições que ocorrem em um apoio.

A Figura 6.5 mostra um corpo de prova típico para ensaios da laje mista em pequena escala.

Os ensaios em pequena escala fornecem as propriedades relativas ao cisalhamento longitudinal da fôrma através da curva carga horizontal x

deslizamento relativo aço-concreto e permitem estimar o coeficiente de atrito.

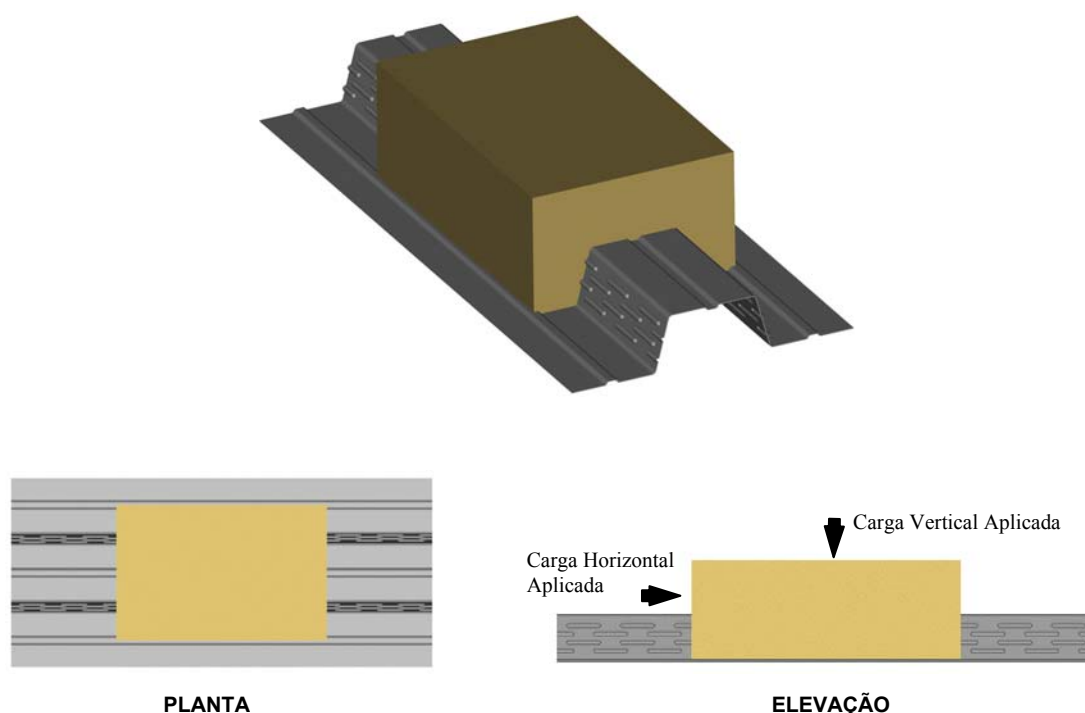


FIGURA 6.5 - Corpo de prova típico da laje mista em pequena escala

Neste tipo de ensaio, primeiramente determina-se a curva apenas com a aplicação da carga horizontal - *push test* - e posteriormente, faz-se outro ensaio aplicando-se as cargas horizontais e verticais - *friction test* - para determinação do coeficiente de atrito. Os resultados são muito úteis para o desenvolvimento de fôrmas metálicas para lajes mistas e são utilizados para o estudo da laje mista como parâmetros na simulação numérica, pelo Método dos Elementos Finitos, por exemplo.

Segundo RONDAL & MOUTAFIDOU (1996), as resistências mecânica e de atrito advêm do mesmo fenômeno, diferindo apenas em escala: a resistência mecânica é relacionada às variações geométricas macroscópicas (mossas e indentações) e a resistência por atrito está relacionada às variações microscópicas na geometria da superfície (rugosidade).

VELJKOVIC' (1993) relata que o atrito entre o concreto e a fôrma pode depender de vários fatores como o fator água-cimento do concreto, o tratamento da superfície da fôrma e outros que estão relacionados às propriedades dos materiais. Do ponto de vista estrutural, através da simulação numérica da laje mista, pequenas mudanças no valor do coeficiente de atrito não interferem na resistência da laje. No seu trabalho, VELJKOVIC' (1993) avaliou o coeficiente de atrito, μ , em 0,60.

Neste capítulo, serão apresentados alguns métodos de cálculo ao cisalhamento longitudinal considerando a influência do atrito, propostos por diversos pesquisadores e pelo projeto do EUROCODE 4 (2000). Comparações dos cálculos utilizando alguns dos procedimentos apresentados considerando o atrito serão feitas para demonstrar a adequação dos métodos.

6.3. Métodos de Cálculo para a Consideração do Atrito

São abordados quatro métodos de cálculo de laje mista ao cisalhamento longitudinal considerando a força de atrito nos apoios.

Os três primeiros foram propostos e apresentados em artigos por: PATRICK *apud* VELJKOVIC' (1996), VELJKOVIC' (1996) e CALIXTO & LAVALL *et al* (Método do Atrito Aparente). (1998). O quarto faz parte de um projeto de revisão do EUROCODE 4 (1993).

6.3.1. Patrick

O método elaborado por PATRICK *apud* VELJKOVIC' (1996) está sendo proposto para ser incorporado à norma australiana. De acordo com VELJKOVIC' (1996), o método se baseia na tensão média de cisalhamento

longitudinal e atrito nos apoios. A resistência ao cisalhamento longitudinal, τ_u , e o coeficiente de atrito, μ , são avaliados a partir dos ensaios da laje mista em pequena escala. Obtém-se τ_u da curva tensão de cisalhamento x deslizamento horizontal: seu valor é definido por uma certa quantidade de deslizamento horizontal, de 2mm a 3mm, como mostra a Figura 6.6.

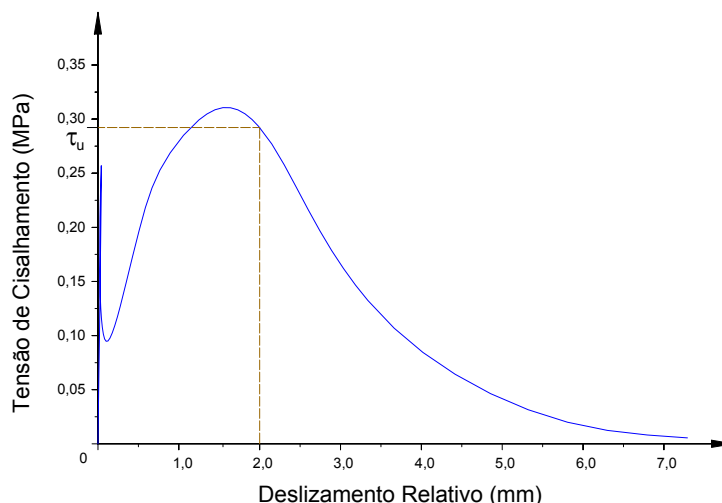


FIGURA 6.6 - Curva Tensão de Cisalhamento x Deslizamento Horizontal

O modelo mecânico para o cálculo considerando duas cargas lineares, é mostrado na Figura 6.7. O diagrama de corpo livre proposto por Patrick ilustra o estado limite último da laje mista com interação parcial.

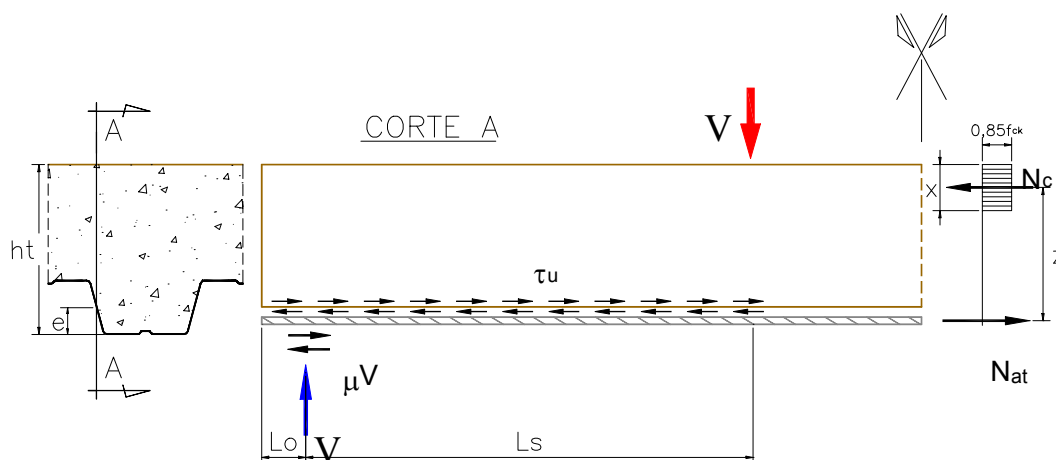


FIGURA 6.7 - Diagrama de corpo livre para duas cargas lineares

A fôrma é considerada como uma armadura externa e é assumida uma distribuição uniforme das tensões normais na seção transversal da fôrma. Neste caso as expressões oriundas do equilíbrio são:

$$N_{at} = \tau_u \cdot b(L_s + L_o) + \mu \cdot V \quad (6.4)$$

$$x = \frac{N_{at}}{0,85f_{ck} \cdot b} \quad (6.5)$$

$$z = h_t - x/2 - e \quad (6.6)$$

$$M = N_{at} \cdot z \quad (6.7)$$

O modelo mecânico apresentado é aplicável principalmente às fôrmas baixas e segundo VELJKOVIC' (1996), existe uma deficiência do método devido à hipótese de distribuição uniforme de tensão longitudinal quando ocorre um certo nível de deslizamento e o método só é válido para lajes dúcteis.

6.3.2. Veljkovic'

O método apresentado por VELJKOVIC' (1996) é válido para as lajes dúcteis e não dúcteis, considera os vários tipos de carregamento de uma maneira adequada e foi desenvolvido para fôrmas baixas com resistência à flexão desprezível.

O método tem o mesmo modelo mecânico apresentado por Patrick, conforme a Figura 6.8, e depende de três tipos de ensaios em pequena escala e da análise não-linear que, neste caso, foi realizado através do Método dos Elementos Finitos.

Através do *push test* e do *friction test*, conforme apresentado no item 6.2, avalia-se a resistência da ligação mecânica e do atrito, respectivamente.

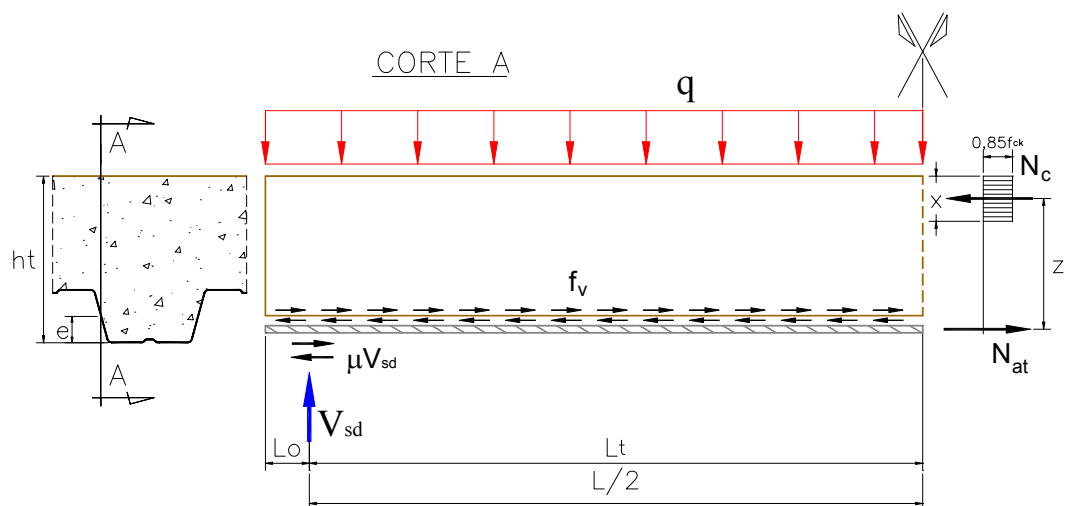


FIGURA 6.8 - Diagrama de corpo livre para carga distribuída

Um novo ensaio é adotado - o *tension-push test* - para analisar a redução da resistência da ligação mecânica devida às altas deformações na fôrma como mostra a Figura 6.9.



FIGURA 6.9 - Ensaio em pequena escala da laje mista com tração na fôrma - *tension-push test*

Através da análise por Elementos Finitos, o fissuramento do concreto, a distribuição não uniforme das tensões de cisalhamento longitudinal e das tensões normais na seção transversal da laje mista são examinados.

Coeficientes de correção são empregados na formulação para transformar os resultados dos cálculos por Elementos Finitos em um modelo de cálculo simples.

Um novo termo é introduzido para indicar a região da laje mista mobilizada para a transferência do cisalhamento longitudinal, o comprimento de transferência - L_t , que é definido como a distância da extremidade da laje até o ponto de momento máximo.

A resistência à flexão da laje mista fica sendo:

$$M_{Rd} = c_d \cdot \mu \cdot V_{Sd} \cdot z + c_d \cdot c_m \cdot f_v \cdot L_x \cdot z \cdot \varepsilon_n \cdot \frac{1}{\gamma_v} \quad (6.8)$$

Onde,

c_d - coeficiente de correção relacionado à diferença entre a distribuição real de tensões normais na seção transversal da laje mista e a adotada no modelo mecânico;

c_m - coeficiente de correção relativo à não uniformidade das tensões de cisalhamento longitudinal entre o aço e o concreto e corrige a hipótese de distribuição uniforme usada no modelo;

ε_n - coeficiente de veracidade que considera a discrepância sistemática dos resultados dos ensaios e das análises por Elementos Finitos;

f_v - tensão última de cisalhamento longitudinal dos ensaios em pequena escala;

V_{Sd} - reação de apoio de cálculo da carga atuante;

z - braço de alavanca;

γ_v - coeficiente de resistência do cisalhamento longitudinal;

μ - coeficiente de atrito: $\mu=0,60$ (sugestão de VELJKOVIC' (1996) se não houver ensaio).

Os coeficientes dependem do parâmetro de esbeltez da laje mista, λ , definida como:

$$\lambda = \frac{L_t}{h_t} \quad (6.9)$$

O diagrama de resistência da laje mista ao cisalhamento longitudinal é mostrado na Figura 6.10.

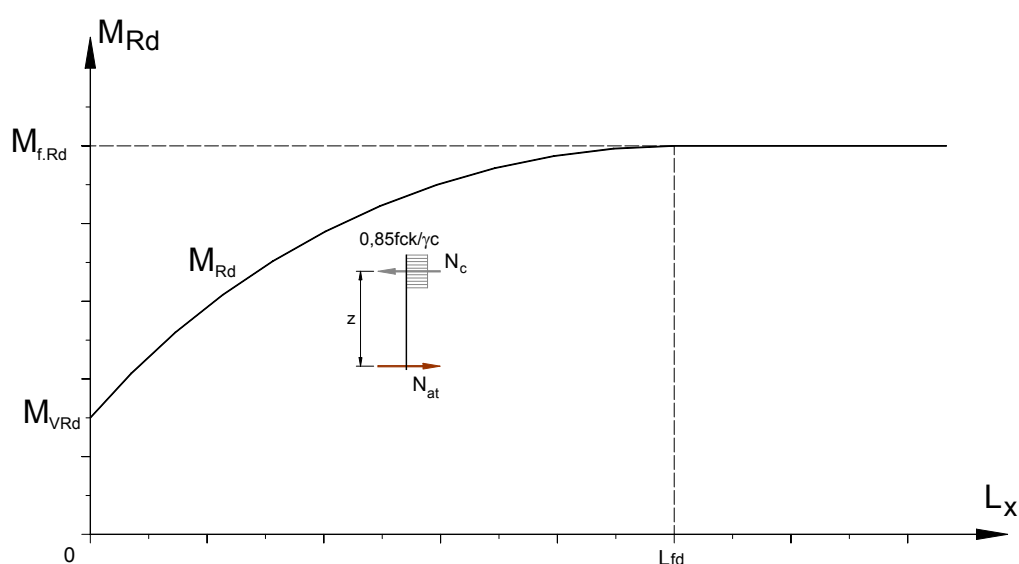


FIGURA 6.10 - Diagrama de resistência ao cisalhamento longitudinal

Onde,

$$M_{VRd} = c_d \cdot \mu \cdot V_{Sd} \cdot z \quad (6.10)$$

$$M_{f,Rd} = \left(\frac{A_p \cdot f_y}{\gamma_{ap}} \right) z \quad (6.11)$$

L_{fd} - comprimento da laje necessário para haver escoamento total à tração da fôrma metálica, determinado ao se igualar as equações (6.8) e (6.11).

6.3.3. Método do Atrito Aparente

Tirando proveito dos ensaios dos protótipos da Série M, CALIXTO & LAVALL *et al.* (1998) propuseram uma melhoria no método da interação parcial do EUROCODE 4 (1993) ao supor que o valor de τ_u calculado conforme esta norma possui um valor mínimo sem a influência do atrito.

A idéia fundamental do método é que os efeitos da influência do atrito no apoio e da resistência das mossas na resistência ao cisalhamento longitudinal, sejam considerados separadamente.

Do método da interação parcial, sabe-se que:

$$\tau_u = \frac{N_c}{b(L_s + L_o)} \quad (6.12)$$

Admitindo-se que o esforço N_c seja devido às contribuições do atrito no apoio, F_{at} , e das mossas, F_M , tem-se:

$$\tau_u = \frac{F_{at} + F_M}{b(L_s + L_o)} = \frac{F_{at}}{b(L_s + L_o)} + \frac{F_M}{b(L_s + L_o)} \quad (6.13)$$

Sendo,

$$F_{at} = \mu \cdot V \quad (6.14)$$

$$F_M = \tau_M \cdot b(L_s + L_o) \quad (6.15)$$

Onde,

μ - coeficiente de atrito;

V - reação de apoio;

τ_M - resistência última ao cisalhamento fornecida pelas mossas.

A Equação 6.13 torna-se:

$$\tau_u = \mu \cdot \frac{V}{b(L_s + L_o)} + \frac{\tau_M \cdot b(L_s + L_o)}{b(L_s + L_o)} = \mu \cdot \frac{V}{b(L_s + L_o)} + \tau_M \quad (6.16)$$

Os efeitos do atrito, μ , e das mossas, τ_M , são avaliados de forma aproximada por meio da regressão multilinear de todos os valores de τ_u das lajes mistas sem ancoragem de extremidade, calculados segundo o EUROCODE 4 (1993), conforme mostra a Figura 6.11.

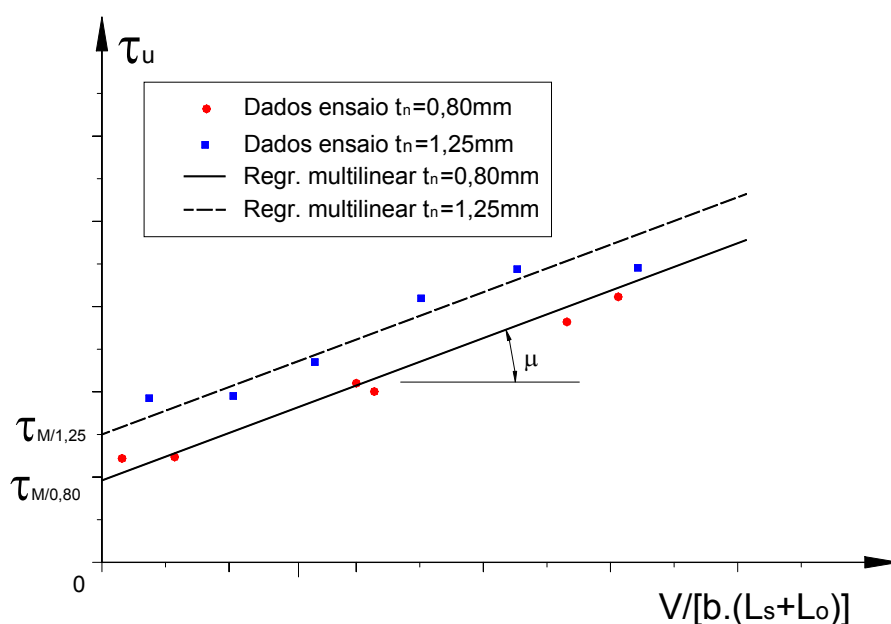


FIGURA 6.11 - Análise de regressão multilinear para determinação de τ_M e μ

Nesta figura os eixos das abscissas e das ordenadas são $\frac{V}{b(L_s + L_o)}$ e τ_u , respectivamente. As resistências mecânicas dispostas somente pelas mossas, $\tau_{M/0,80}$ para a fôrma com $t_n=0,80\text{mm}$ e $\tau_{M/1,25}$ para $t_n=1,25\text{mm}$, são dadas pela interseção das retas com o eixo das ordenadas. O coeficiente de atrito, μ , corresponde à inclinação das retas da regressão multilinear.

Neste procedimento, a hipótese de se determinar uma tensão de cisalhamento de mossas constante para qualquer parâmetro de esbeltez da laje mista é incorreta, conforme TENHOVUORI (1996) - item 6.1. Além disso, o coeficiente μ é determinado supondo que a força de atrito no apoio, F_{at} , é distribuída em toda a área do vão de cisalhamento, $b(L_s+L_o)$, e não apenas na área real de contato do apoio. Desse modo, como essas hipóteses podem distorcer os valores reais de μ , este será denominado de *coeficiente de atrito aparente*, μ_{ap} . A Equação 6.16 é, então, dada por:

$$\tau_u = \mu_{ap} \cdot \frac{V}{b(L_s + L_o)} + \tau_M \quad (6.17)$$

A verificação das lajes mistas por este método segue os mesmos critérios do EUROCODE 4 (1993). Na determinação do diagrama de interação parcial, o valor da força de compressão transferida para o concreto, N_c , é calculado com as contribuições separadas das mossas, do atrito nos poios e da ancoragem de extremidade (se houver), respectivamente, conforme a Equação 6.18 a seguir, onde V é a reação de apoio nominal da laje mista.

$$N_c = \tau_M \cdot b \cdot L_x + \mu_{ap} \cdot V + V_\ell \quad (6.18)$$

6.3.4. Projeto para o EUROCODE 4 (1993)

O Projeto do EUROCODE 4 (2000) para a revisão da norma europeia EUROCODE 4 (1993) apresenta uma modificação no método da interação parcial, que consiste numa nova maneira de se calcular o valor de τ_u , o qual é determinado sem a parcela do atrito, conforme a Equação 6.19, utilizando-se os mesmos procedimentos de ensaios dos protótipos das lajes mistas.

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf} - \mu \cdot V}{b(L_s + L_o)} \quad (6.19)$$

Onde μ é o valor de cálculo do coeficiente de atrito: $\mu=0,50$. O valor de cálculo da força N_c com a resistência da ancoragem de extremidade é:

$$N_c = \tau_{u,Rd} \cdot b \cdot L_x + \mu \cdot V_{Sd} + V_{\ell d} \quad (6.20)$$

6.4. Comparações e Análises

Os resultados dos ensaios dos protótipos realizados por MELO (1999), SCHUSTER (1984) e VELJKOVIC' (1993) serão utilizados para a avaliação dos métodos propostos, sendo que os dois primeiros métodos apresentados, Patrick e Veljkovic', dependem de ensaios em pequena escala e, portanto, não serão utilizados para as comparações.

Nos ensaios de SCHUSTER (1984), as fôrmas empregadas tinham duas nervuras trapezoidais com mossas de mesma configuração do *Steel Deck* MF-75, 75mm de altura, 610mm de largura, e $f_y = 230\text{MPa}$. As características dos protótipos ensaiados são apresentadas na Tabela 6.1.

TABELA 6.1 - Dimensões nominais dos protótipos - SCHUSTER (1984)

Protótipo	Espessura nominal fôrma t_n (mm)	Altura da laje h_t (mm)	Vão de cisalhamento L_s (mm)	Vão total L (mm)
1	0,813	127	457	1.800
2	0,813	140	610	1.800
3	0,813	152	305	1.800
4	0,813	172	305	1.800
5	0,813	178	914	3.600
6	0,813	190	1.524	3.600
7	1,227	127	457	1.800
8	1,227	140	610	1.800
9	1,227	152	305	1.800
10	1,227	172	305	1.800
11	1,227	178	914	3.600
12	1,227	190	1.524	3.600

As fôrmas utilizadas por VELJKOVIC' (1993) tinham 4 nervuras trapezoidais com mossas em forma de “V”, 45mm de altura, 600mm de largura, espessura nominal de 0,75mm e $f_y = 350\text{MPa}$. As características dos protótipos ensaiados são apresentadas na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 - Dimensões nominais dos protótipos - VELJKOVIC' (1993)

Protótipo	Altura da laje h_t (mm)	Vão de cisalhamento L_s (mm)	Vão total L (mm)
11	200	750	3.000
12	200	600	2.000
13	170	1.000	4.000
15	200	500	2.000
16	200	500	2.000
17	170	1.000	3.000

O concreto é de peso normal e $f_{ck} = 20\text{MPa}$.

Os estudos realizados por estes pesquisadores mostram que o grau de interação parcial dos protótipos sem ancoragem de extremidade variam entre:

- MELO (1999): 0,162 e 0,281
- SCHUSTER (1984): 0,162 e 0,566
- VELJKOVIC' (1993): 0,800 e 1,000

As Tabelas 6.3 a 6.5 a seguir, mostram os resultados dos ensaios e os resultados teóricos calculados pelos métodos *m-k*, Atrito Aparente, EUROCODE 4 (2000) e pelo EUROCODE 4 (1993), onde são tratadas apenas as lajes sem ancoragem de extremidade.

TABELA 6.3 - Resultados de ensaios de MELO (1999) e teóricos

Protótipo	Ensaio	Resultados Teóricos												
	V (kN/m)	<i>m-k</i>		Atrito Aparente				Eurocode 4 - 2000				Eurocode 4 - 1993		
		V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ _{ap}	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	V _{calc} (kN/m)	% diferença
1M	30,38	31,39	-3,2	0,0707	1,013	30,08	1,0	0,062	0,50	25,35	16,5	0,068	23,23	23,5
2M	26,38	26,18	0,8			24,51	7,1			21,01	20,4		19,81	24,9
3M	58,02	57,55	0,8			55,88	3,7			40,83	29,6		33,46	42,3
4M	66,36	65,88	0,7			62,88	5,2			43,71	34,1		34,64	47,8
5M	22,43	24,22	-7,9			22,49	-0,3			19,43	13,4		18,75	16,4
6M	18,04	15,94	13,1			17,10	5,2			15,15	16,0		15,28	15,3
7M	51,71	45,96	11,5	0,0989		48,82	5,6	0,100		43,35	16,2	0,109	39,86	22,9
8M	45,32	39,50	14,7			39,50	12,8			35,90	20,8		33,84	25,3
9M	82,03	83,60	-1,9			90,97	-10,9			70,32	14,3		58,17	29,1
10M	106,80	98,37	8,6			103,52	3,1			76,04	28,8		60,50	43,4
11M	34,54	38,26	-9,7			34,42	0,3			31,88	7,7		30,72	11,1
12M	27,56	26,83	2,6			25,69	6,8			24,71	10,4		24,82	9,9

TABELA 6.4 - Resultados de ensaios de SCHUSTER (1984) e teóricos

Protótipo	Ensaio	Resultados Teóricos												
	V (kN/m)	<i>m-k</i>		Atrito Aparente				Projeto Eurocode 4 - 2000				Eurocode 4 - 1993		
		V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ _{ap}	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	V _{calc} (kN/m)	% diferença
1	28,87	31,66	-9,7	0,1080	0,789	31,76	-10,0	0,073	0,50	26,20	9,2	0,079	24,21	16,1
2	26,28	27,18	-3,4			27,08	-3,0			22,21	15,5		21,01	20,0
3	59,48	60,70	-2,0			54,74	8,0			42,26	29,0		35,00	41,2
4	75,04	70,78	5,7			61,83	17,6			46,04	38,7		36,75	51,0
5	25,34	25,07	1,1			25,87	-2,1			20,36	19,7		19,82	21,8
6	19,21	16,62	13,5			21,61	-12,5			16,39	14,7		16,50	14,1
7	51,94	45,27	12,8	0,1686		48,57	6,5	0,163		46,15	11,1	0,191	44,52	14,3
8	44,24	42,89	3,0			41,34	6,6			39,37	11,0		39,28	11,2
9	79,23	77,77	1,8			83,65	-5,6			73,94	6,7		63,95	19,3
10	82,76	90,70	-9,6			94,18	-13,8			81,35	1,7		68,08	17,7
11	45,30	46,88	-3,5			39,20	13,4			37,09	18,1		38,15	15,8
12	36,06	40,61	-12,6			32,76	9,1			31,28	13,2		33,49	7,1

TABELA 6.5 - Resultados de ensaios de VELJKOVIC' (1993) e teóricos

Protótipo	Ensaio	Resultados Teóricos												
	V (kN/m)	<i>m-k</i>		Atrito Aparente				Projeto Eurocode 4 - 2000				Eurocode 4 - 1993		
		V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ _{ap}	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	μ	V _{calc} (kN/m)	% diferença	τ (MPa)	V _{calc} (kN/m)	% diferença
11	78,92	74,85	5,16	0,257	1,305	73,24	7,2	0,342	0,50	76,04	3,6	0,402	78,43	0,6
12	86,45	90,84	-5,08			90,12	-4,2			86,45	0,0		86,08	0,4
13*	51,20	51,10	0,19			49,00	4,3			49,00	4,3		49,00	4,3
15	100,68	104,76	-4,05			107,23	-6,5			94,79	5,9		91,27	9,3
16	110,37	104,76	5,08			107,28	2,8			94,82	14,1		91,29	17,3
17*	49,93	51,10	-2,34			49,06	1,8			49,06	1,8		49,06	1,8

* - Protótipo com colapso por flexão

Os resultados teóricos do método do EUROCODE 4 (1993) e do EUROCODE 4 (2000) variaram muito com relação aos resultados dos ensaios de Melo e Schuster.

Apesar da consideração do atrito nas equações do EUROCODE 4 (2000), os resultados obtidos foram ainda conservadores. Isto pode ter acontecido devido aos baixos níveis dos graus de interação dos protótipos, entre 0,162 e 0,566, uma vez que o EUROCODE 4 (1993) estabelece que quando os ensaios são para a determinação de τ_u , pelo menos três protótipos dos seis ensaiados devem ter o valor de η entre 0,70 e 1,00.

Para os protótipos de VELJKOVIC' (1993), os graus de interação foram atendidos. Ambos os métodos do Eurocode 4 levaram a bons resultados. No entanto, o método do EUROCODE 4 (2000) apresentou resultados ligeiramente melhores.

O método do Atrito Aparente, proposto por CALIXTO & LAVALL *et al.* (1998), mostrou-se satisfatório em todos os casos, e observou-se que o coeficiente de atrito μ_{ap} não possui um valor único, apresentando grandes variações devido à própria concepção do método, onde se determina um valor aparente, e não o valor real do coeficiente de atrito.

As resistências determinadas pelo método *m-k* mostraram bons resultados em todos os ensaios, mesmo para lajes com grande vão de cisalhamento, embora nas lajes com alto grau de interação os resultados pelo método da interação parcial tenham valores ligeiramente melhores.

A Tabela 6.6 a seguir apresenta os resultados dos ensaios e os resultados teóricos calculados pelos métodos propostos por CALIXTO & LAVALL *et al.* (1998), pelo EUROCODE 4 (2000) e pelo EUROCODE 4 (1993) das lajes mistas da Série MS.

TABELA 6.6 - Resultados de ensaios da Série MS e teóricos

Protótipo	Ensaio	Resultados Teóricos													
	V (kN/m)	Atrito Aparente					Projeto Eurocode 4 - 2000					Eurocode 4 - 1993			
		τ (MPa)	μ_{ap}	V_{ℓ} (kN)	V_{calc} (kN/m)	% difer.	τ (MPa)	μ	V_{ℓ} (kN)	V_{calc} (kN/m)	% difer.	τ (MPa)	V_{ℓ} (kN)	V_{calc} (kN/m)	% difer.
2MS	47,74	0,0707	1,013	104,54	43,10	9,7	0,062	0,50	154,05	47,04	1,5	0,068	127,28	41,03	14,1
3MS	106,43				105,99	0,4				106,90	-0,4			84,09	21,0
4MS	129,11				129,83	-0,6				126,21	2,3			95,04	26,4
5MS	50,92				41,02	19,4				45,04	11,6			39,02	23,4
8MS	65,68	0,0989		104,89	57,71	12,1	0,100		162,93	62,62	4,7	0,109	140,71	56,70	13,7
9MS	137,08				137,75	-0,5				137,65	-0,4			113,25	17,4
10MS	177,47				168,04	5,3				162,12	8,6			127,61	28,1

O método do EUROCODE 4 (1993) é muito conservador quando trata das lajes mistas ancoradas. O novo método proposto pelo EUROCODE 4 (2000), ao considerar o atrito, é adequado no tratamento das lajes mistas ancoradas.

O método do Atrito Aparente também é satisfatório para o caso das lajes com ancoragem de extremidade no que diz respeito à resistência ao cisalhamento longitudinal. Entretanto, quando se trata dos valores de V_ℓ , os resultados diferem bastante daqueles apresentados pelos métodos do EUROCODE 4.

A Tabela 6.7 a seguir, mostra os diferentes valores encontrados de V_ℓ para cada *stud bolt*, ao utilizar os métodos do EUROCODE 4 e do Atrito Aparente.

As resistências dos conectores, $C_{red.\ell} \cdot q_n$, foram calculadas pela NBR 8800 (1996), utilizando os valores de resistência, f_{cj} , e do módulo de elasticidade, E_c , dos ensaios dos corpos de prova do concreto, e são também mostradas na Tabela 6.7.

TABELA 6.7 - Resistência da ancoragem de extremidade e do conector dos protótipos da Série MS - valores nominais

Protótipo	V_ℓ (kN)			$C_{red.\ell} \cdot q_n$ (kN)
	Atrito Aparente	Eurocode 4 (2000)	Eurocode 4 (1993)	
2MS	59,36	70,43	57,28	111,36
3MS	48,06	69,32	77,18	109,90
4MS	47,04	72,70	84,79	117,66
5MS	70,40	83,00	60,28	116,62
8MS	69,89	82,21	63,32	117,66
9MS	47,20	73,32	82,13	117,66
10MS	55,75	89,43	105,70	117,66

Para todos os métodos utilizados, os valores das forças V_{ℓ} estão abaixo da resistência nominal do *stud bolt* empregado. Portanto, a capacidade última do conector não foi alcançada nos ensaios.

JOLLY & LAWSON (1990) explicam que a resistência de um *stud bolt* usado como ancoragem de extremidade, em geral, não é totalmente mobilizada porque a carga máxima alcançada em uma laje mista ancorada ocorre com um deslizamento de extremidade da ordem de 2 a 4 mm, dependendo da geometria da fôrma e das mossas, enquanto que um *stud* alcança sua capacidade máxima com deslizamento da ordem de 3 a 5 mm.

Somente o protótipo 10MS apresentou um deslizamento de extremidade de 4,0mm, e os outros protótipos da mesma série apresentaram deslizamentos menores do que 1,6mm.

7. CONCLUSÕES

Com o objetivo de abranger os fatores que contribuem no comportamento e na resistência da laje mista com ancoragem de extremidade, foi importante tratar da fôrma metálica isolada e da laje mista sem ancoragem de extremidade. A força de atrito também foi abordada no sentido de adquirir uma melhor compreensão a respeito da resistência das lajes mistas.

A fôrma metálica para construção da laje mista é feita com chapa fina por razões econômicas. Suas almas e mesas são propensas à flambagem local e o cálculo da resistência é feito por meio de normas de dimensionamento de perfis de chapa fina formadas a frio.

As variações das dimensões e da geometria da fôrma dependem da funcionalidade do sistema da laje mista: atendimento das necessidades dos clientes, obtenção de uma maior capacidade de carregamento durante a fase construtiva e da capacidade portante da laje.

Foi mostrado que as mossas reduzem a rigidez axial das almas com chapas muito finas e seu efeito é melhor visto em ensaios experimentais das fôrmas metálicas e de chapas com mossas.

Os resultados dos ensaios das lajes mistas com ancoragem de extremidade demonstraram um aumento significativo, tanto na rigidez quanto na resistência ao cisalhamento longitudinal, com relação às lajes não ancoradas.

O aumento da capacidade de carregamento da seção dos protótipos da série MS foi ocasionado pela ancoragem que restringe o deslizamento de extremidade e, portanto, aumenta a interação de cisalhamento entre o fôrma e o concreto desenvolvida no vão de cisalhamento.

A inclusão de *stud bolts* nos protótipos resultou em acréscimo de 45% a 125% na capacidade de carga dependendo das dimensões das lajes. No entanto, o modo de colapso permaneceu sendo o cisalhamento longitudinal.

Não há necessidade de se usar toda a resistência da ancoragem de extremidade para aumentar a resistência ao cisalhamento longitudinal pois, como foi demonstrado, o cisalhamento vertical passa a ser o estado limite último.

Os métodos propostos para a inclusão da força do atrito na resistência ao cisalhamento longitudinal apresentaram bons resultados, comprovando que o atual método da interação parcial do EUROCODE 4 (1993), que não leva em conta o efeito do atrito, é conservador.

O método do Atrito Aparente é satisfatório para todos os casos, mesmo quando a laje mista possui baixos níveis de interação, mas o valor encontrado de μ_{ap} não corresponde ao valor real do coeficiente de atrito e sim a um valor aparente.

O método do projeto do EUROCODE 4 (2000) leva a resultados satisfatórios de resistência, desde que os protótipos utilizados nos ensaios tenham alto grau de interação.

O método de VELJKOVIC' (1996) é o que mais se aproxima do comportamento real das lajes mistas, inclui vários fatores e pode ser aplicado às lajes mistas dúcteis e não dúcteis, mas é somente válido com a utilização de fôrmas baixas.

Os métodos do Atrito Aparente e do EUROCODE 4 (2000) também levam a bons resultados no cálculo das resistências das lajes mistas com ancoragem de extremidade. Entretanto, mais estudos devem ser feitos para a avaliação

da resistência do conector como ancoragem de extremidade devido à dispersão dos valores encontrados.

Segundo VELJKOVIC' (1996), os fatores que influenciam na resistência e no comportamento da laje mista são: comportamento da curva tensão de cisalhamento longitudinal x deslizamento relativo, atrito no apoio, redução da resistência ao cisalhamento longitudinal devida às altas deformações na fôrma, flambagem local da fôrma, fissuração do concreto e o tipo de carregamento.

Outro fator importante para aumentar a resistência da laje mista é a presença de pequenas nervuras reentrantes nas mesas das fôrmas. Ele evita o afastamento do concreto com a fôrma metálica, melhorando o contato das mossas com o concreto no instante do deslizamento e aumentando a ductilidade da laje.

Por causa da complexidade do comportamento das lajes mistas, são necessárias ainda muitas pesquisas. Por isso, a análise por elementos finitos torna-se uma ferramenta fundamental ao utilizar os ensaios em pequena escala para a verificação das variáveis mencionadas anteriormente e para um dimensionamento otimizado da laje mista.

Outra vantagem ao se utilizar os ensaios em pequena escala é a redução dos custos no desenvolvimento de uma laje mista: verificação de diversos tipos de mossas e fôrmas despendendo pouco esforço e pequena quantidade de materiais.

Após as considerações contidas neste trabalho sobre a influência do atrito, concluiu-se que, um método mais adequado para levar em conta esta influência deve utilizar os ensaios em pequena escala para a determinação do coeficiente de atrito μ e admitir a resistência das mossas τ_M variável em função do parâmetro de esbeltez da laje $\lambda = L_s/h_t$.

BIBLIOGRAFIA

AISI - American Iron and Steel Institute, Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Member (1996) - Cold-Formed Steel Design Manual - Part V, Washington, DC, USA.

AS/NZS 4600 - Australian/New Zealand Standard (1996) - Cold-Formed Steel Structures, Standards New Zealand.

BODE, H. & MINAS, F. (1996) - Composite Slabs with and without End Anchorage under Static and Loading, p. 265-270.

CALIXTO, J. M., LAVALL, A. C., MELO, C. B., PIMENTA, R. J. and MONTEIRO, R.C. (1998), Behaviour and Strength of Composite Slabs with Ribbed Decking, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, Ed. Elsevier, England.

CSSBI 12M-84 - STANDARD FOR COMPOSITE STEEL DECK (1988) Canadian Sheet Steel Building Institute, Willodale, Ontario, Canada.

DANIELS, B. J. & CRISINEL, M. (1993) - Composite Slab Behaviour and Strength Analysis. Part I: Calculation Procedure, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 119, no. 1, p. 16-35.

DANIELS, B. J. & CRISINEL, M. (1993) - Composite Slab Behaviour and Strength Analysis. Part II: Comparisons with Test Results and Parametric Analysis, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 119, no. 1, p. 36-49.

DESIGN MANUAL FOR COMPOSITE SLABS - ECCS 1995 - European Convention for Constructional Steelwork, no. 87, 1ª edição.

EASTERLING, W. S. & YOUNG, C. S. (1992) - Strength of Composite Slabs, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 118, no. 9.

ENV 1993-1-3. EUROCODE 3 (1996): General Rules - Supplementary Rules for Cold Formed Thin Gauge Members and Sheeting, European Committee for Standardisation, Brussels.

EN 1994-1-1:2001 - EUROCODE 4 (2000) *DRAFT No. 2*, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1, General rules and rules for building, CEN - European Committee for Standardization.

ENV 1994-1-1:1992. EUROCODE 4 (1993), Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1, General rules and rules for building, CEN - European Committee for Standardization.

FERREIRA, H. J. (1999) - Análise do Sistema de Laje Mista com Fôrma de Aço Incorporada (Steel Deck) Aplicado a Estruturas Prediais de Concreto Armado, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

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.

JOLLY, C. K. & LAWSON, R. M. (1990) - End Anchorage in Composite Slabs: an Increased Load Carrying Capacity, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction - AISC, pp. 202-205.

MALITE M. & SÁLES, J. J. (1993) - Estruturas de Aço Constituídas por Perfis de Chapa Dobrada: Dimensionamento de Barras, Universidade de São

Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Estruturas, Publicação 015/93, São Carlos - Brasil.

MELO, C. B. (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.

NBR 5739 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1960) - Ensaio de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto, ABNT.

NBR 6118 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1978), Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado, ABNT.

NBR 6152 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1960) - Materiais Metálicos - Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração - Método de Ensaio, ABNT.

NBR 8522 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1984) - Concreto - determinação do Módulo de Deformação Estático e Diagrama Tensão-Deformação, ABNT.

NBR 8800 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1986) - Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios - Métodos dos Estados Limites, ABNT.

PORTER, M. & EKBERG, F. J., (1976) - Design Recommendations for Steel Deck Floor Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 102, no. ST11.

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

SCHUSTER, R. M. (1976) - Composite Steel Deck Concrete Floor Systems, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 102, no. ST5, United States of America.

SCHUSTER, R. M. (1984) - Strength and Behaviour of the P-2430 - 12HB, Composite Slab System (normal weight concrete), Report no. WRI 110-12-02, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Canada.

SDI - STEEL DECK INSTITUTE (1995) - Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks, SDI - Steel Deck Institute, Canton, Ohio, no. 29.

TENHOVUORI, A. & LESKELÄ, M. V. (1996) - Various Tests for Defining the Behaviour of Composite Slabs, pg. 543-548.

TENHOVUORI, A. (1996) - Parameters and Definitions for Classifying the Behaviour of Composite Slabs, Composite Construction in Steel and Concrete III - Proceedings of an Engineering Foundation Conference, Ed. ASCE - American Society of Civil Engineers, New York.

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, Luleå - Swedish.

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

YU, W. & SENNE, J. H. (1984) - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel, 7th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri: 285-326.

YU, Wei-Wen (2000) - Cold-Formed Steel Design, John Wiley & Sons Publication, 3^a ed., United States of America.

ANEXO A

A.1 - Gráficos de Carga x Deslizamento Relativo de Extremidade

Série MS

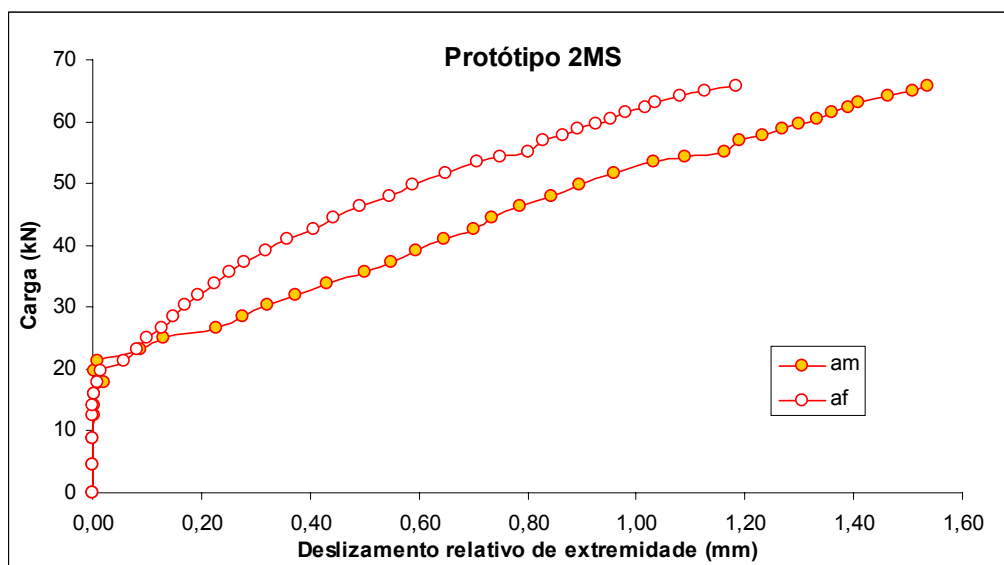


FIGURA A.1 – Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

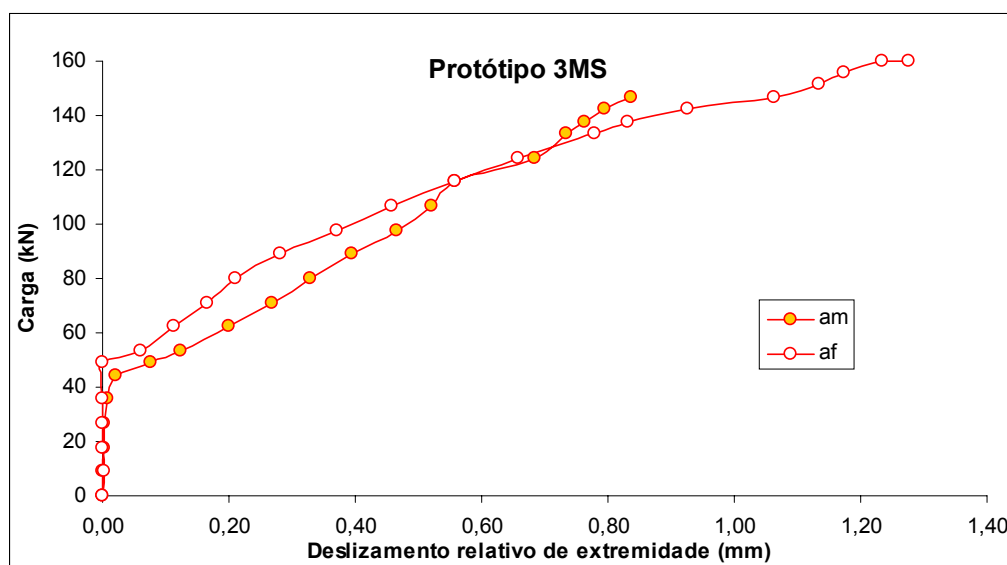
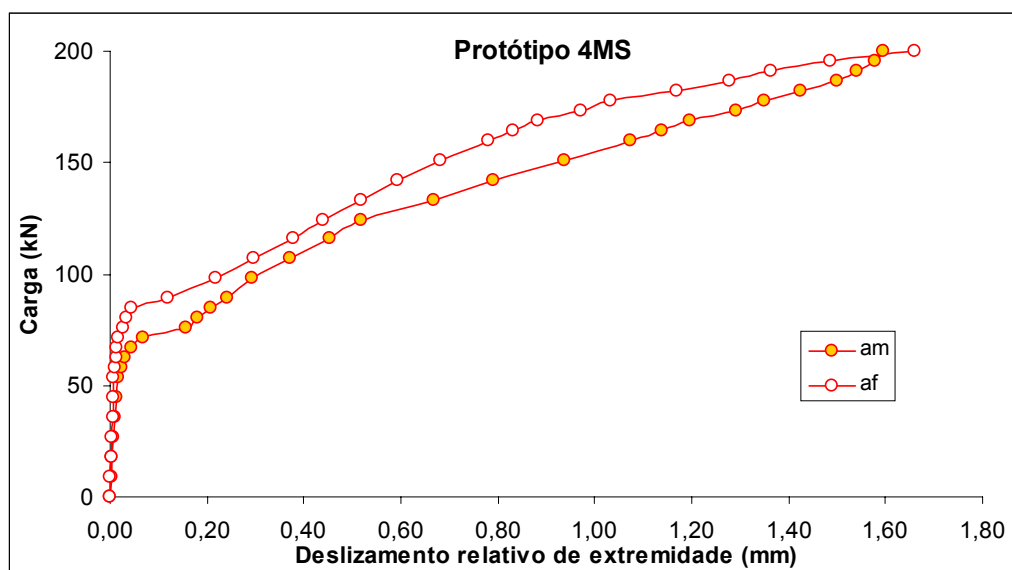
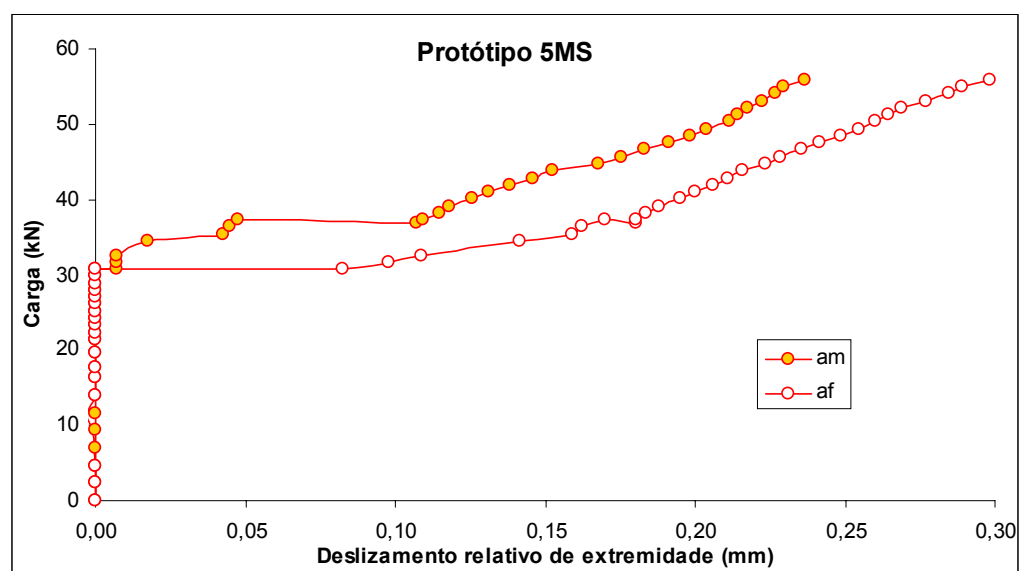
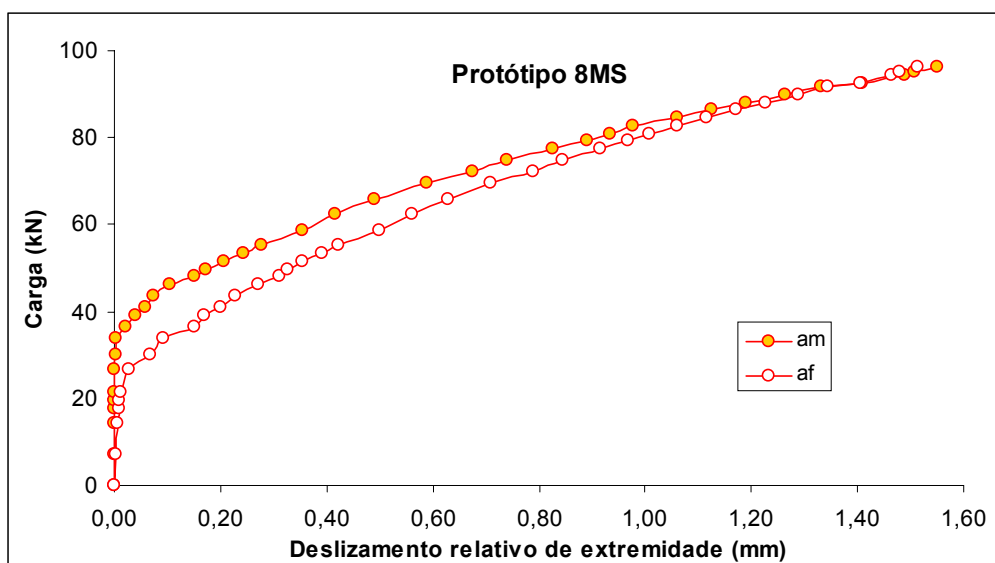
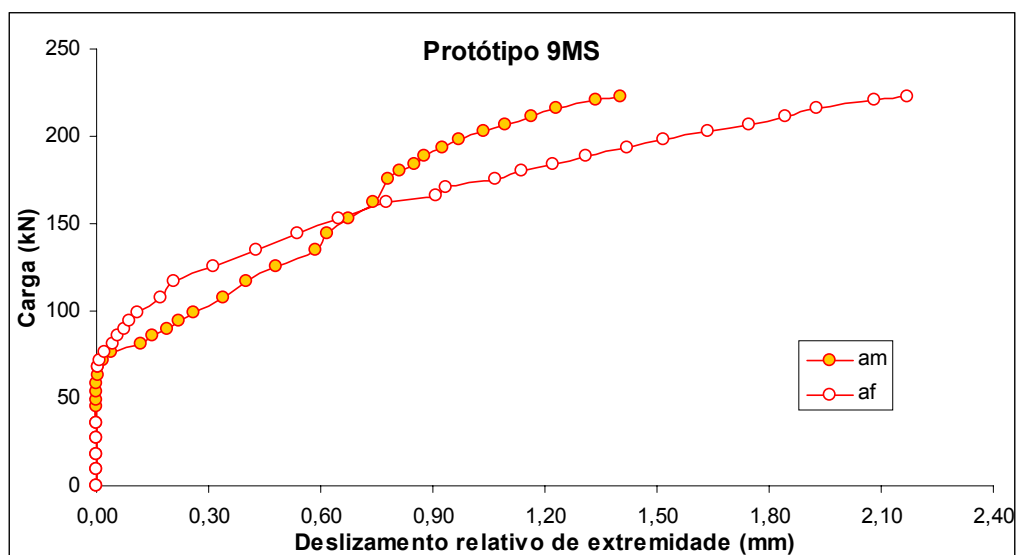


FIGURA A.2 – Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.3 – Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.4 – Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.5 – Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)FIGURA A.6 – Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

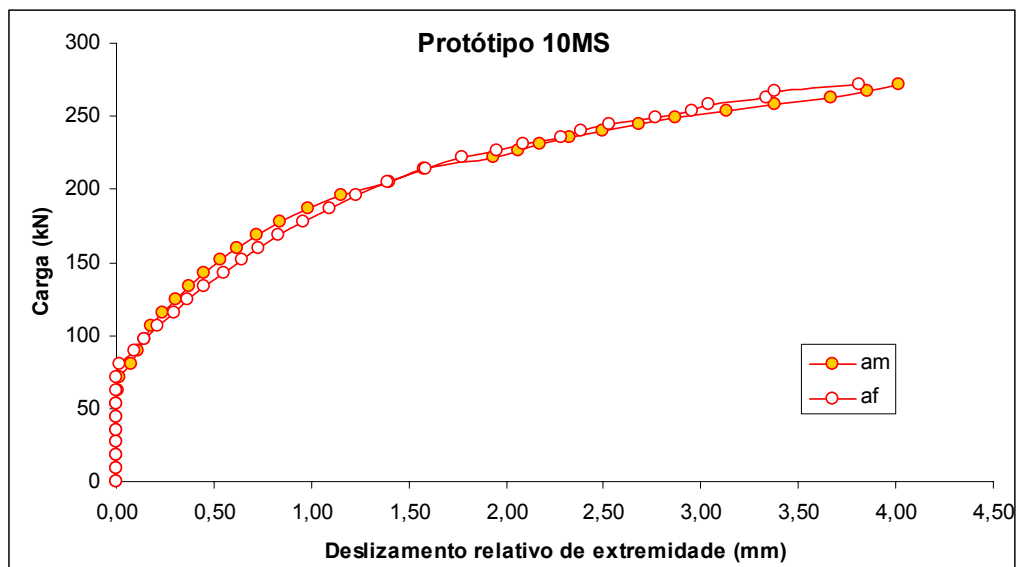


FIGURA A.7 – Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

Série S

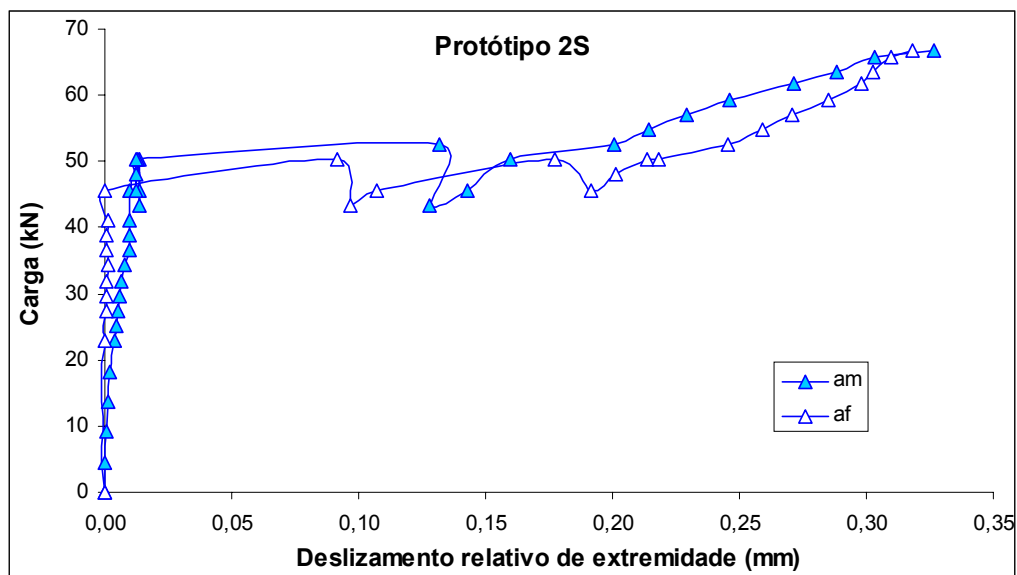
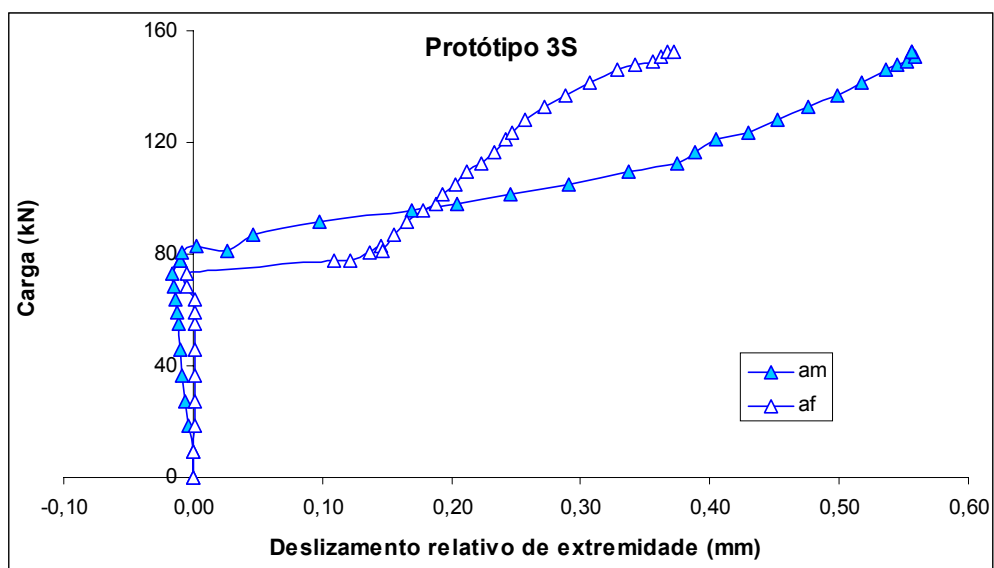
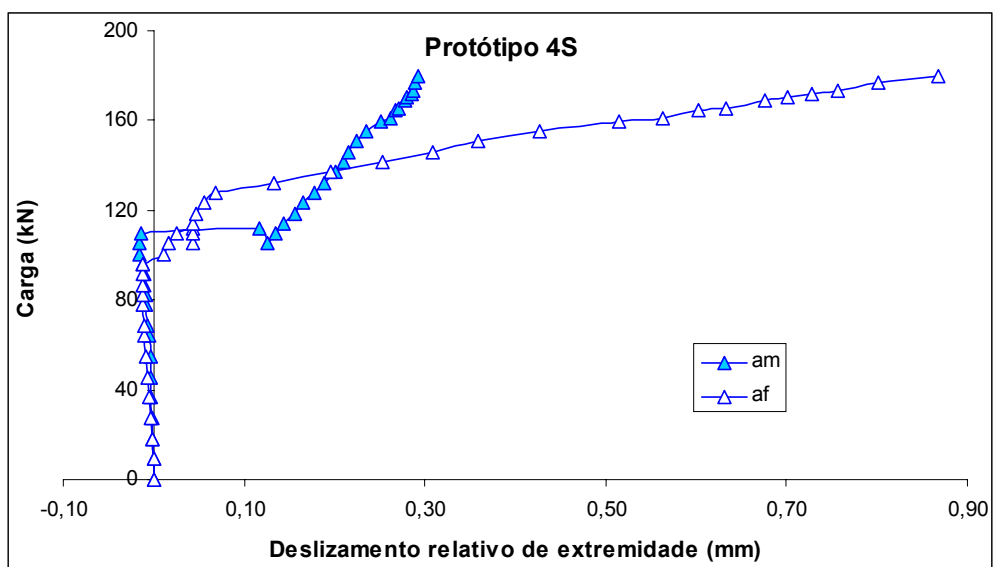
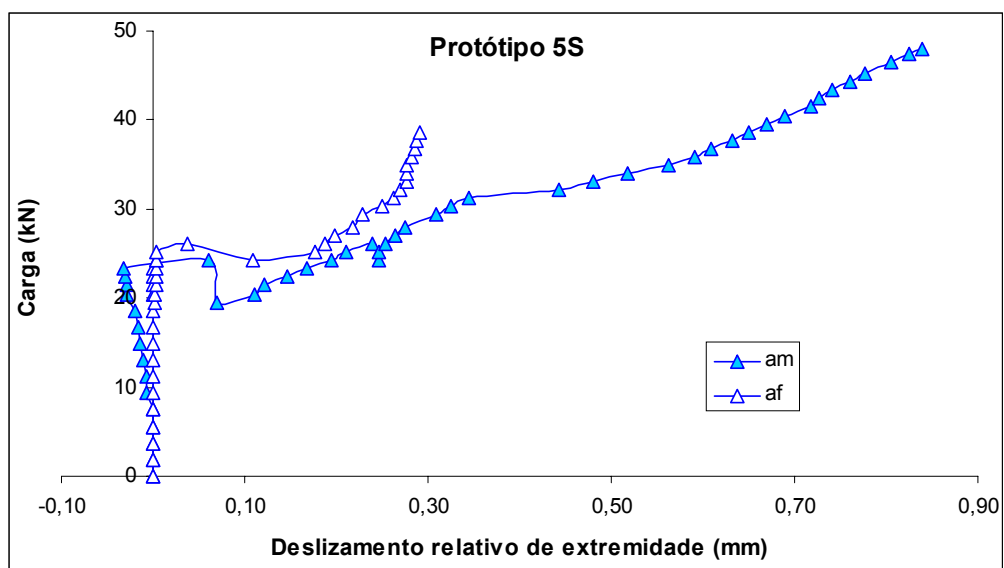
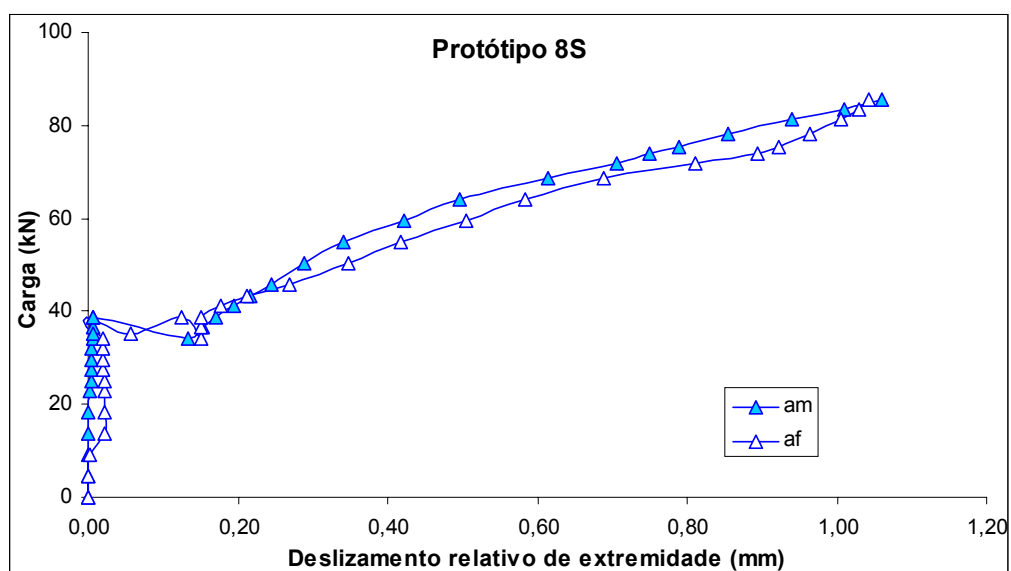
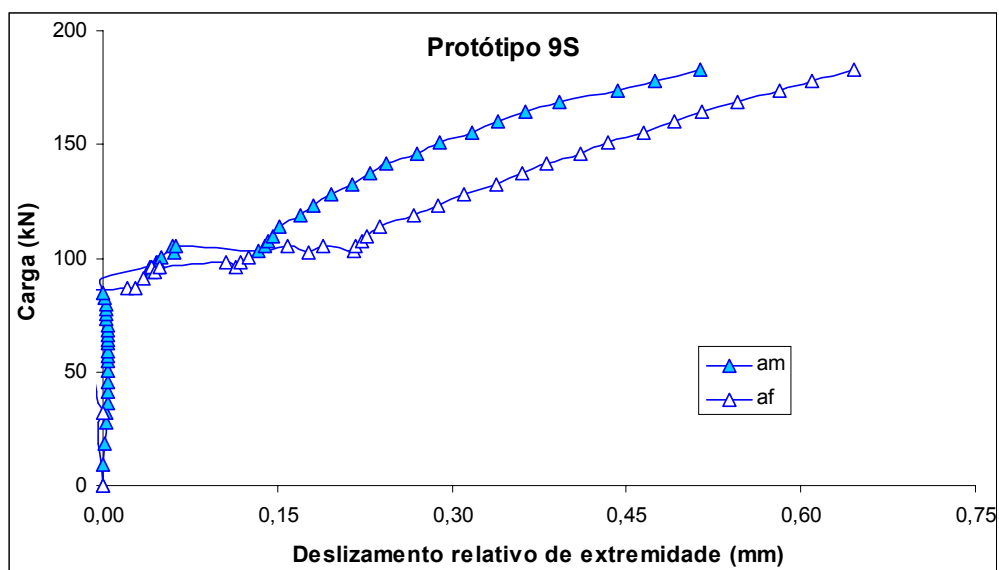
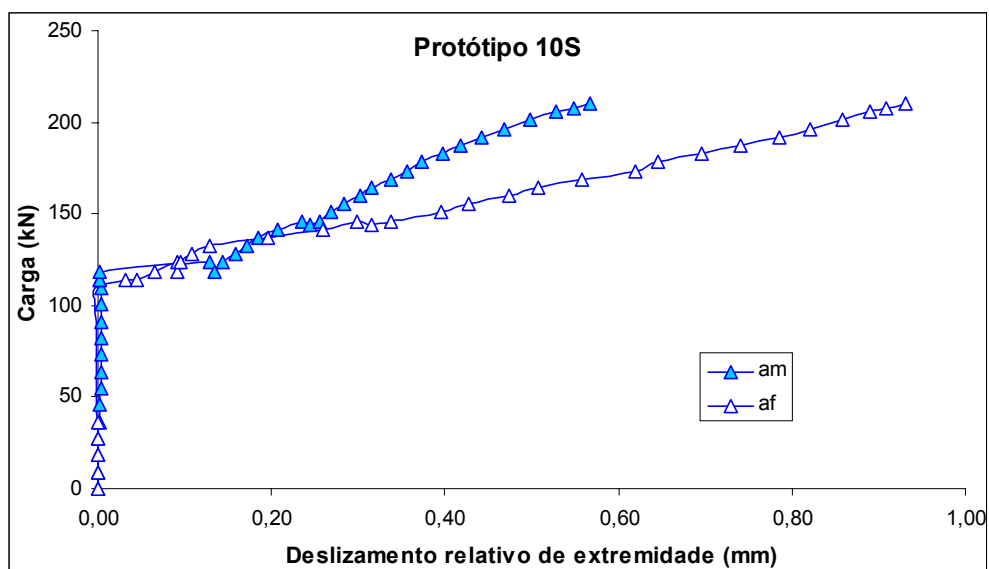


FIGURA A.8 – Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.9 – Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.10 – Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.11 – Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.12 – Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

FIGURA A.13 – Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)FIGURA A.14 – Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

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

Série MS

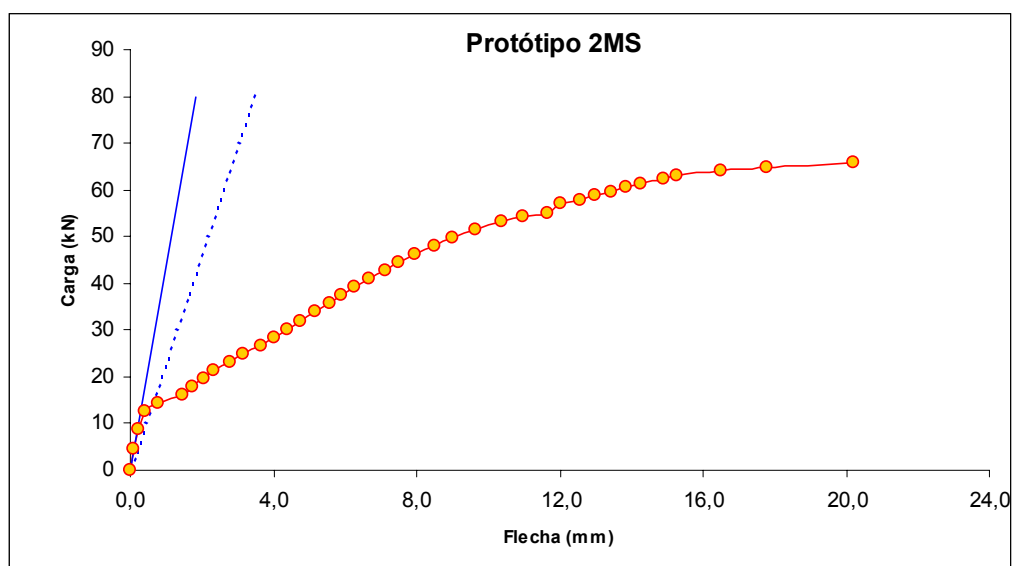


FIGURA A.15 – Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

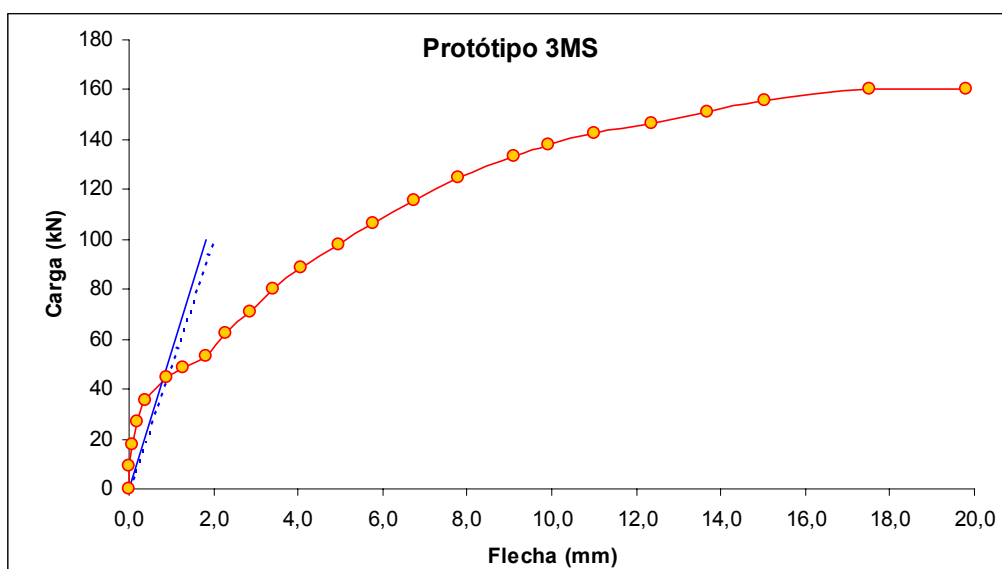
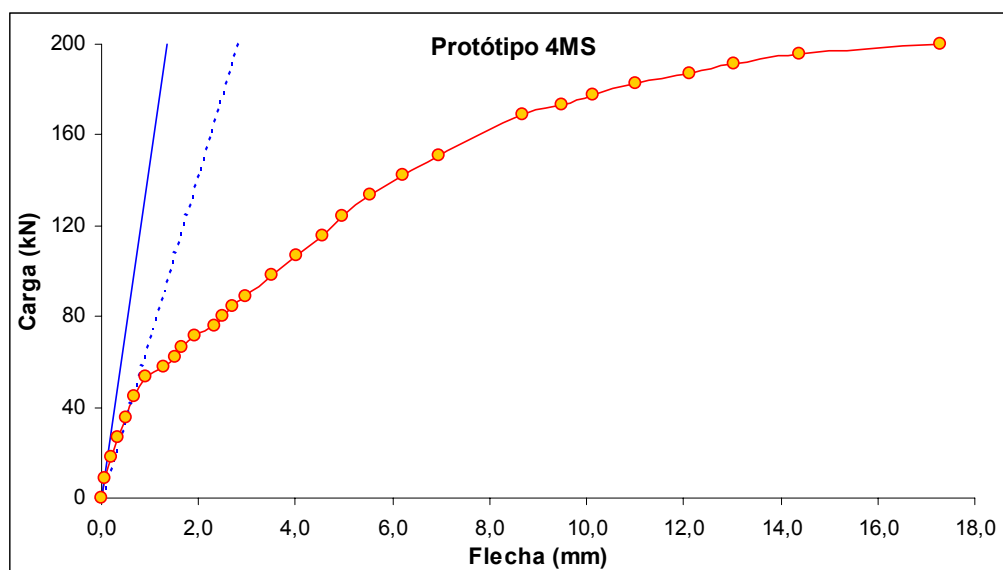
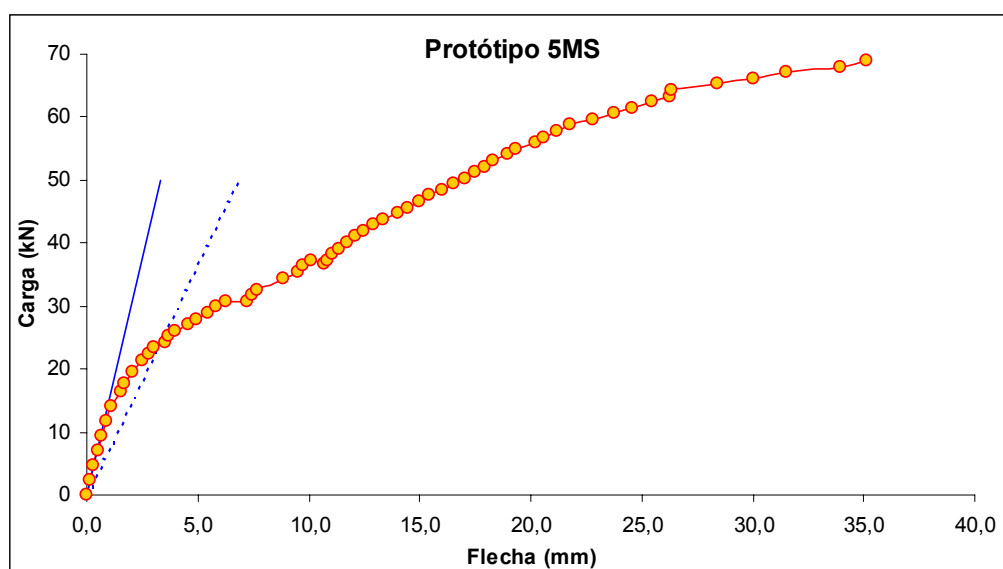


FIGURA A.16 – Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.17 – Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.18 – Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

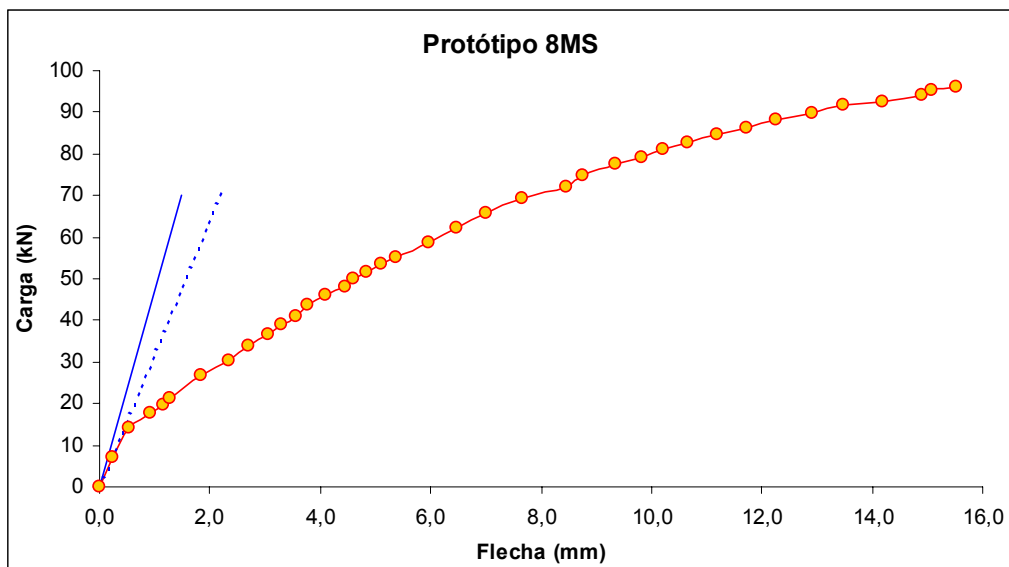


FIGURA A.19 – Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

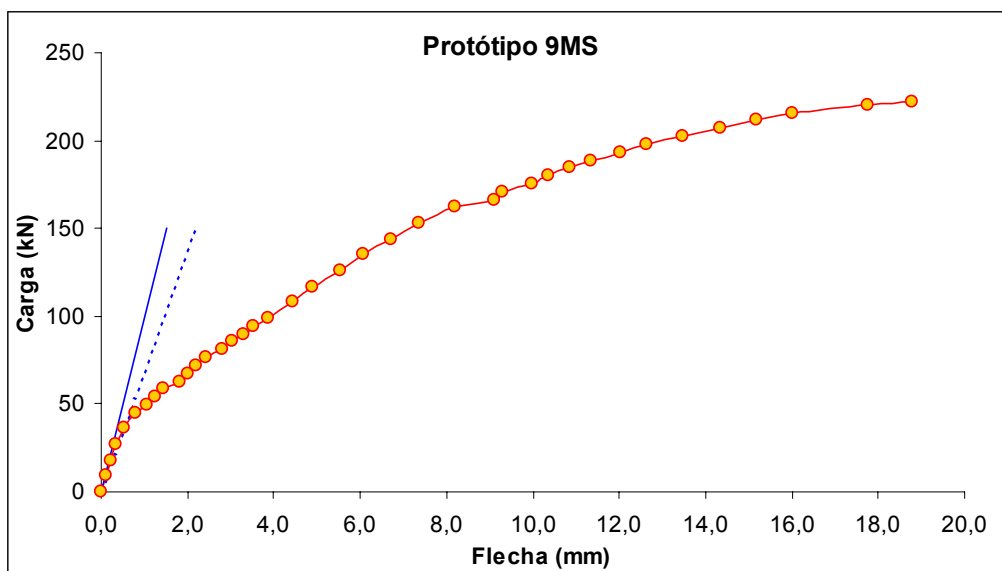


FIGURA A.20 – Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

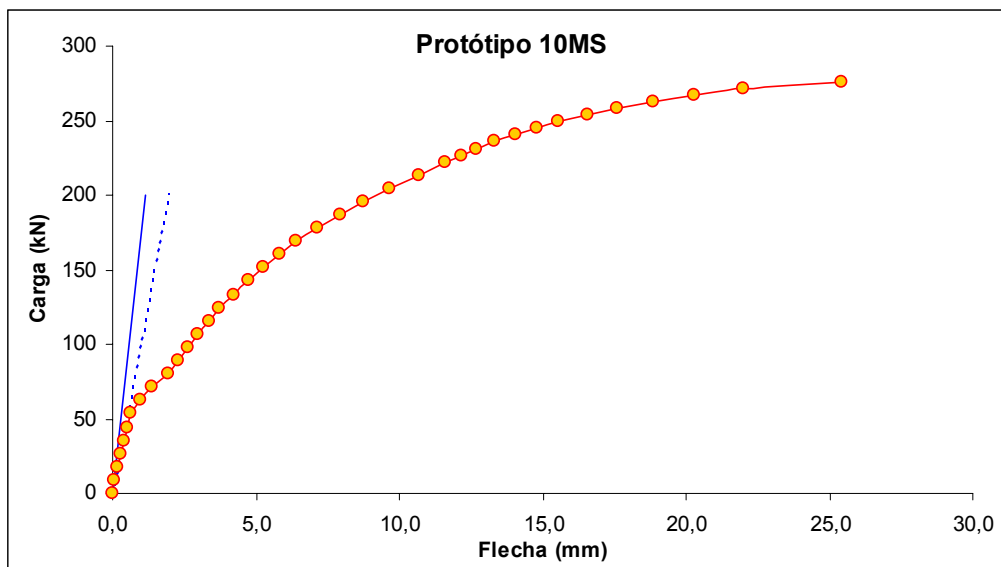


FIGURA A.21 – Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

Série S

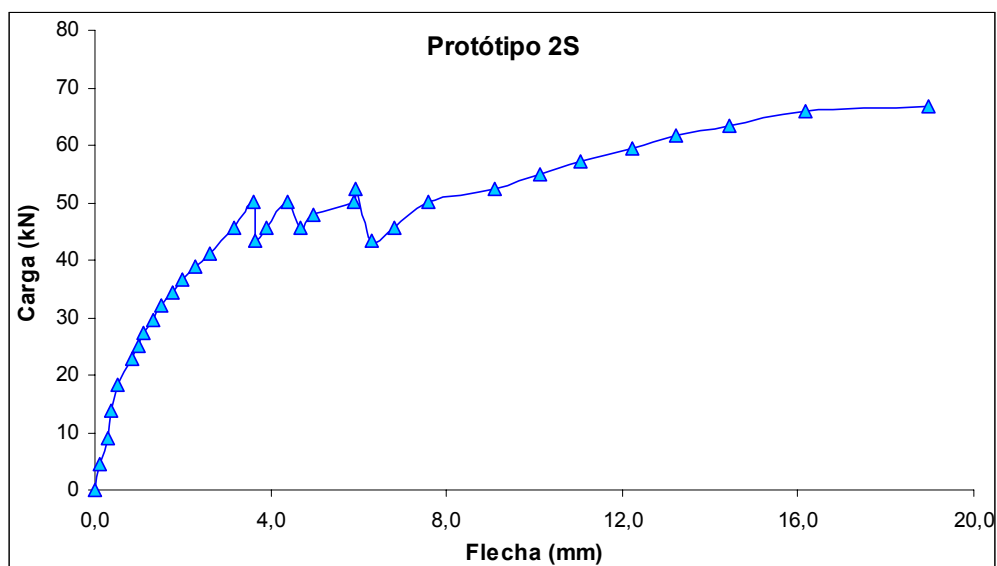
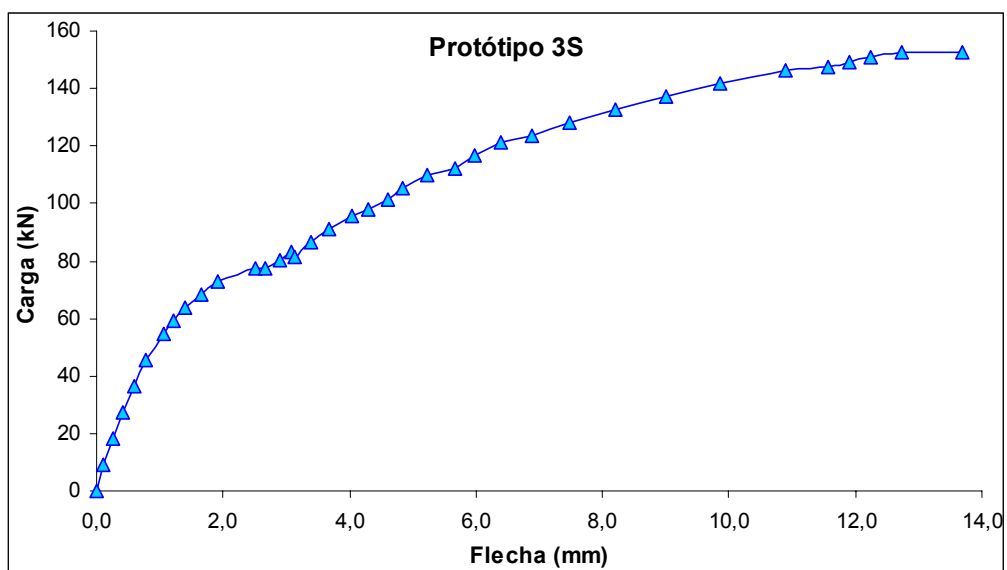
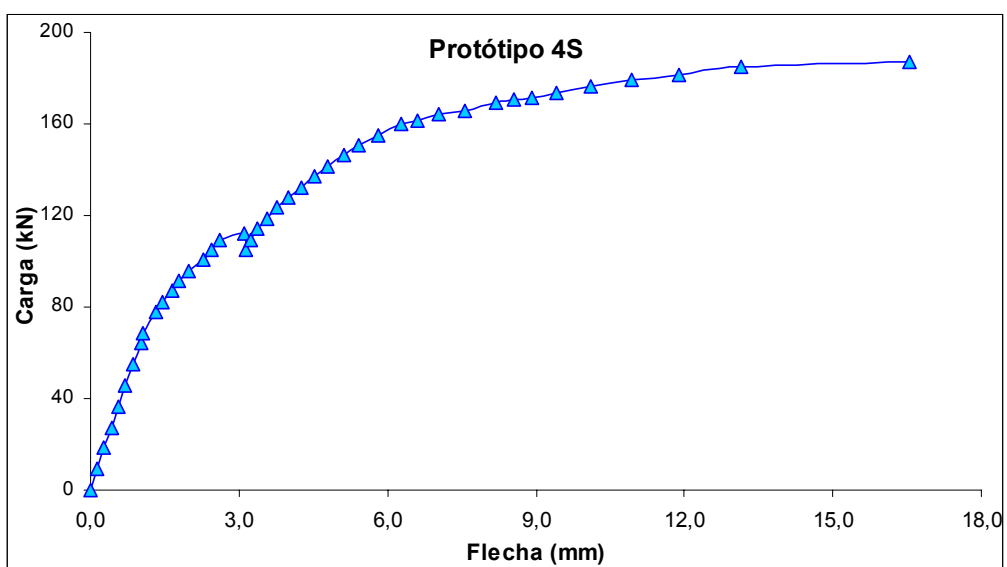
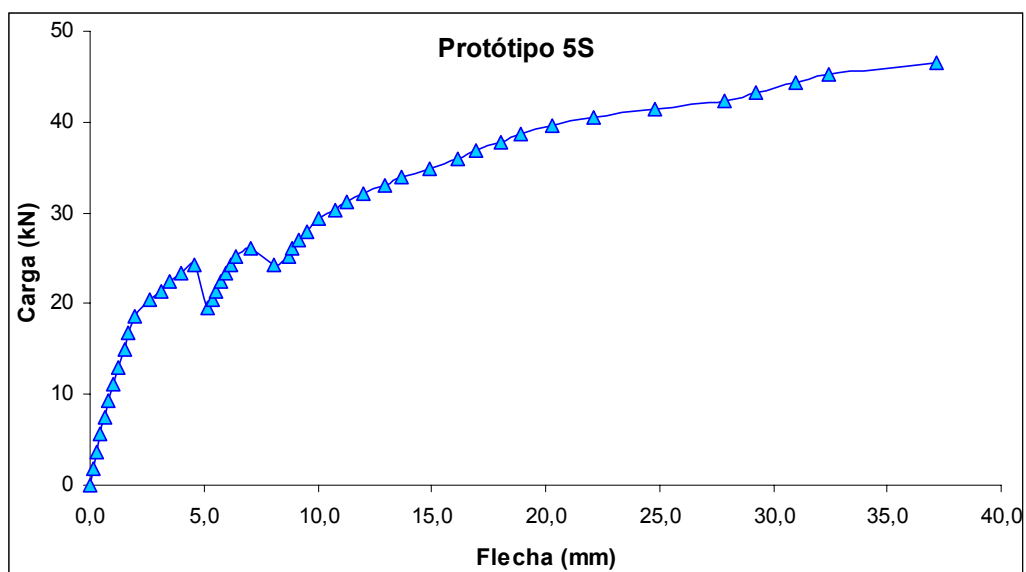
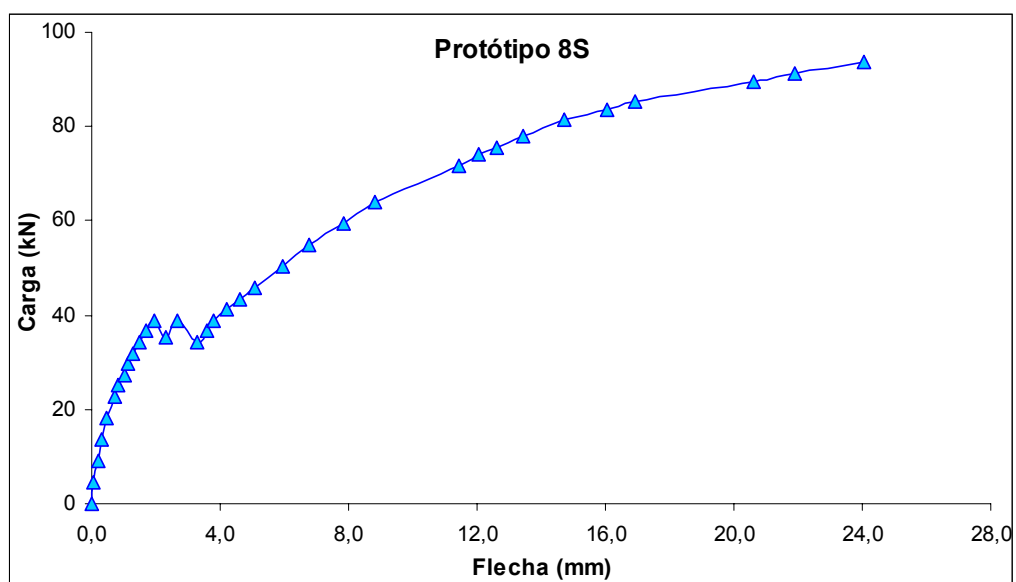
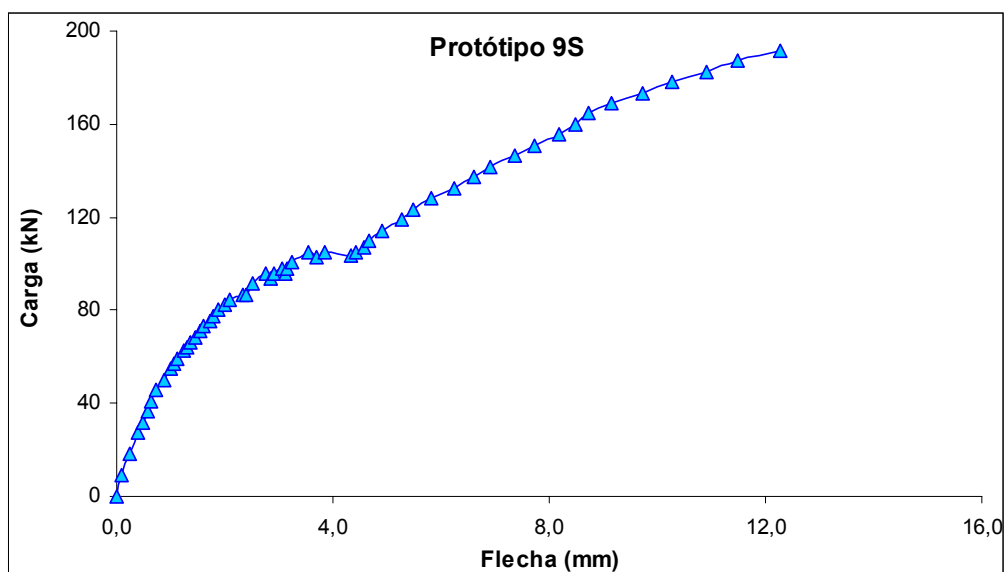
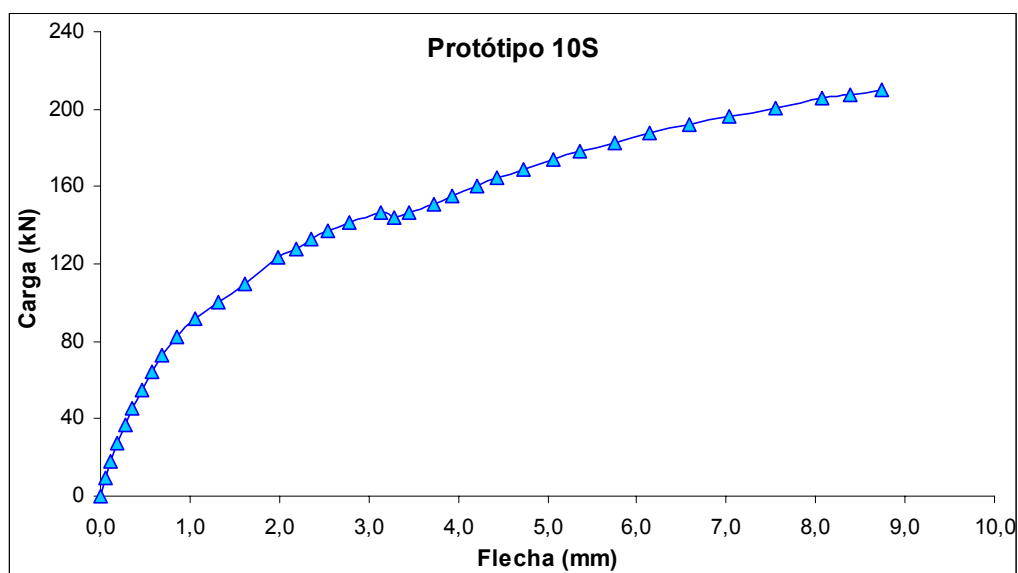


FIGURA A.22 – Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.23 – Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.24 – Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.25 – Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.26 – Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

FIGURA A.27 – Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)FIGURA A.28 – Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

A.3 - Gráficos de Carga x Deformação no Aço

Série MS

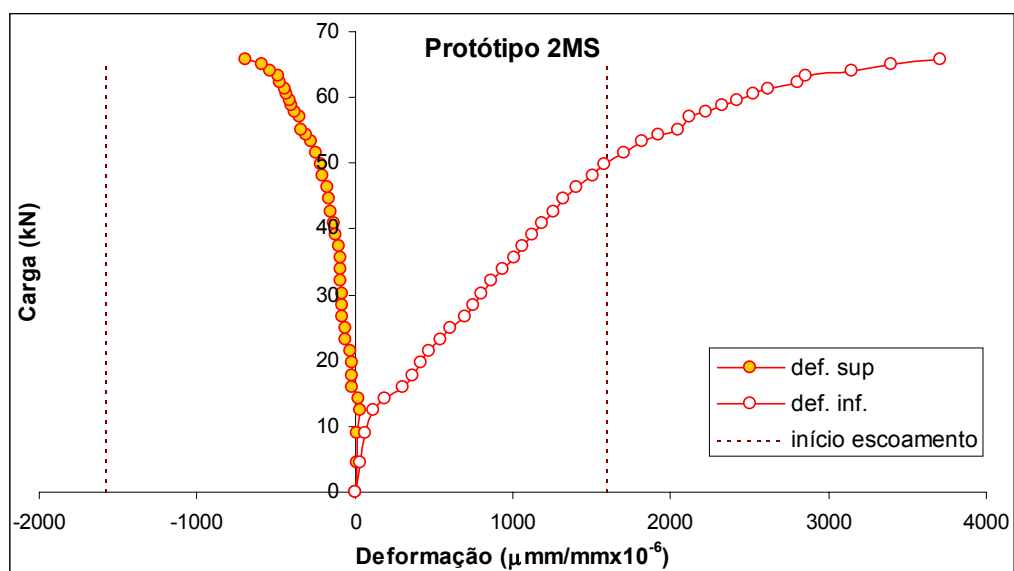


FIGURA A.29 – Protótipo 2MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

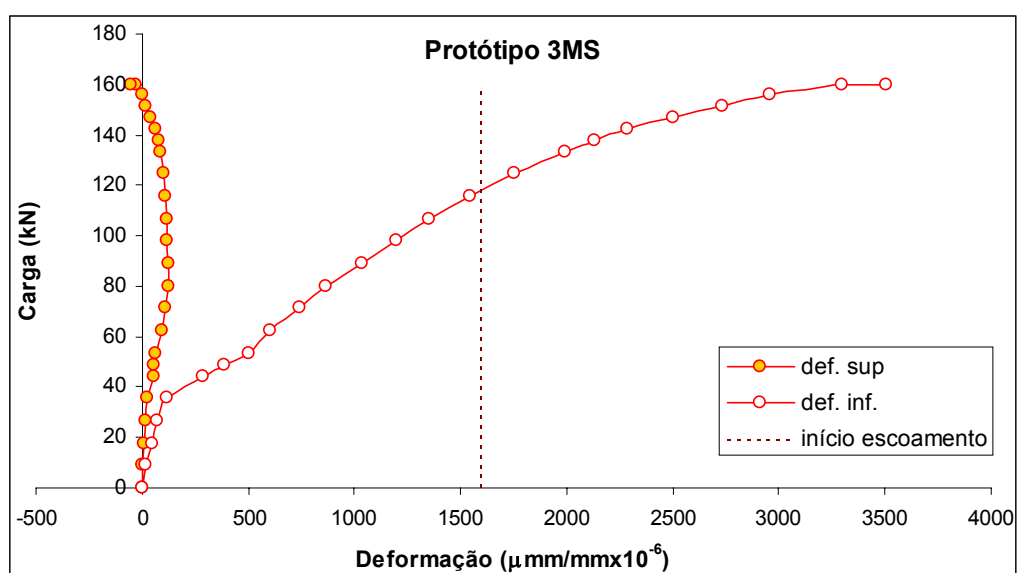


FIGURA A.30 – Protótipo 3MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

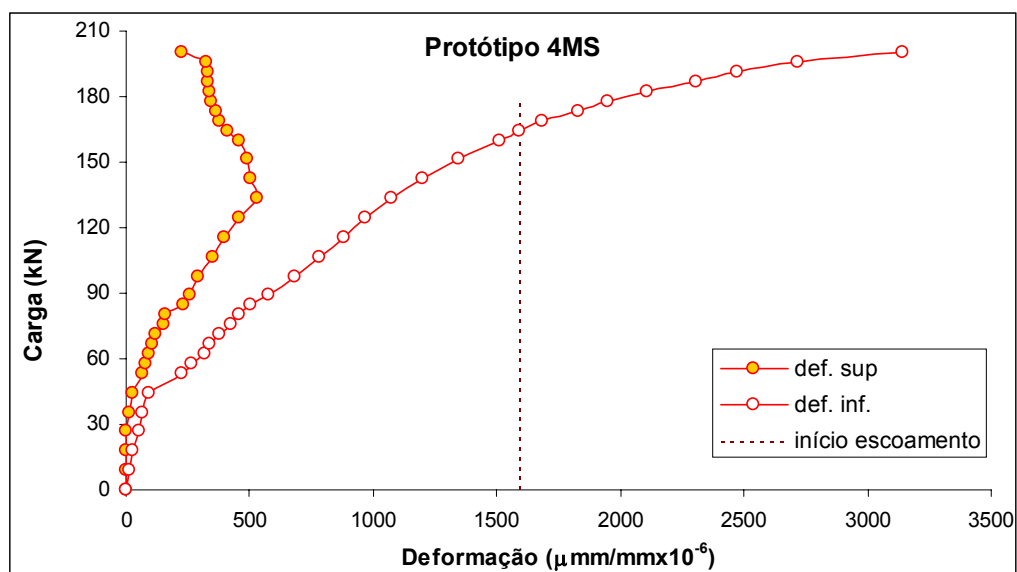


FIGURA A.31 – Protótipo 4MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

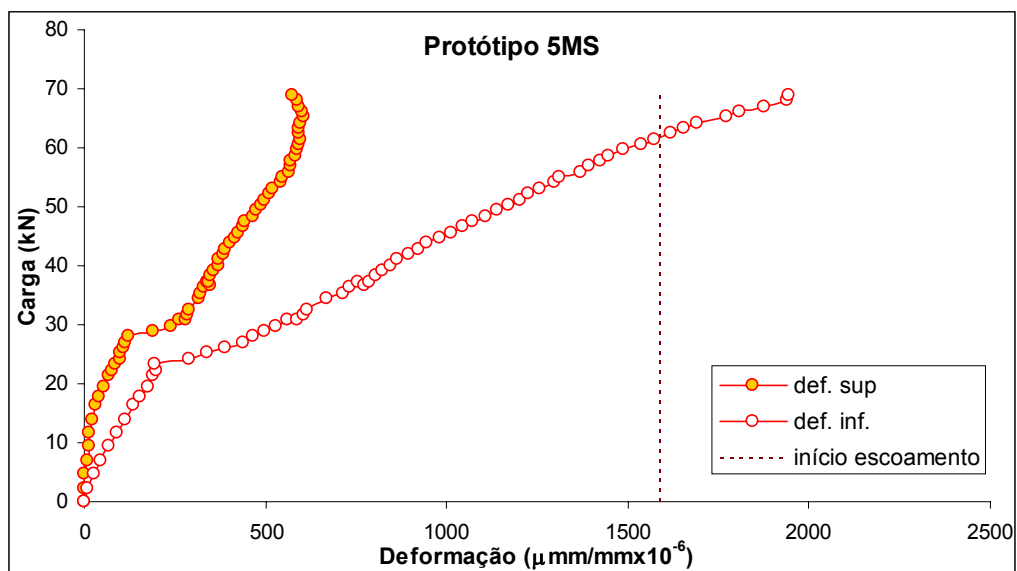


FIGURA A.32 – Protótipo 5MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

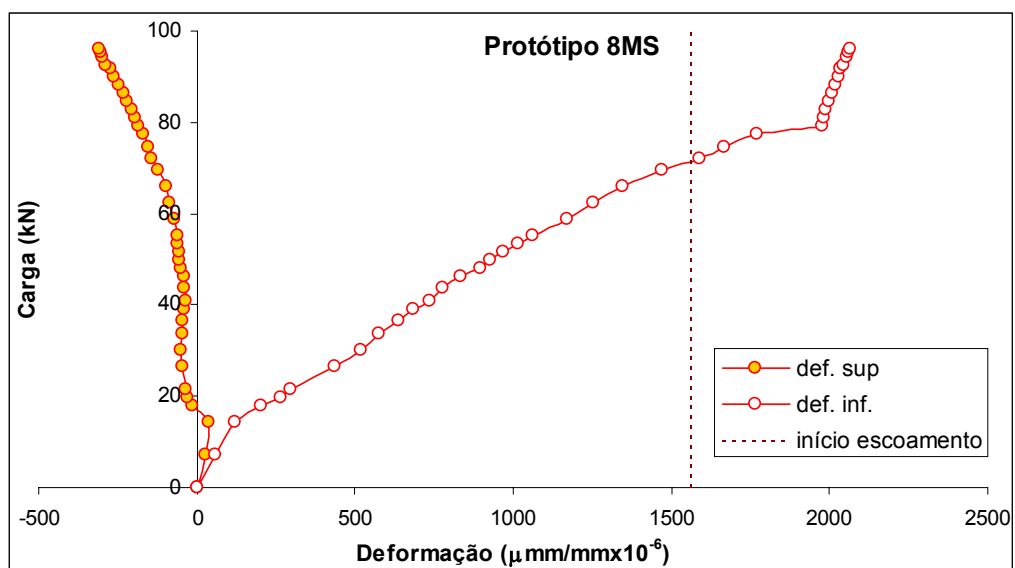


FIGURA A.33 – Protótipo 8MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

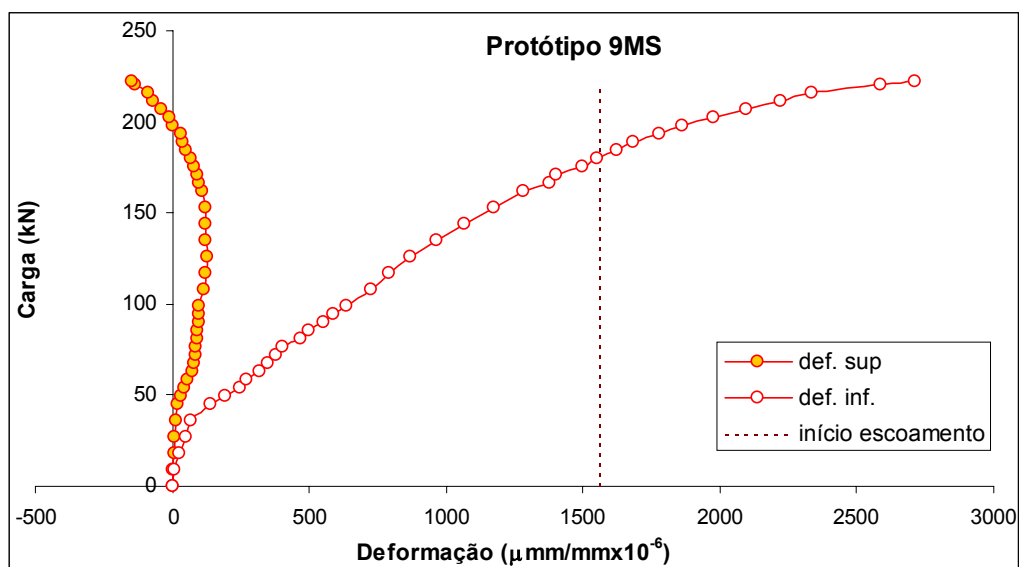
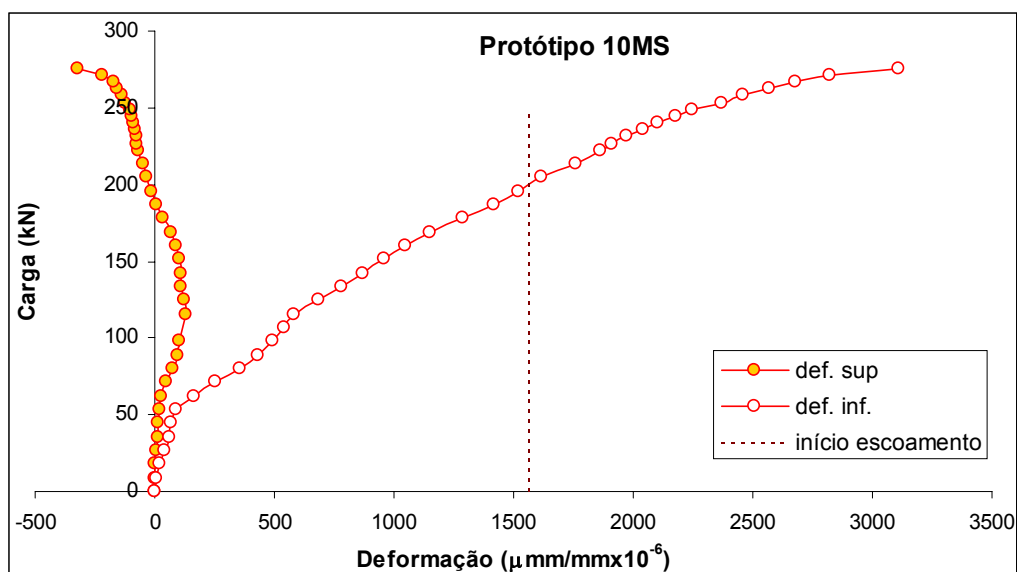
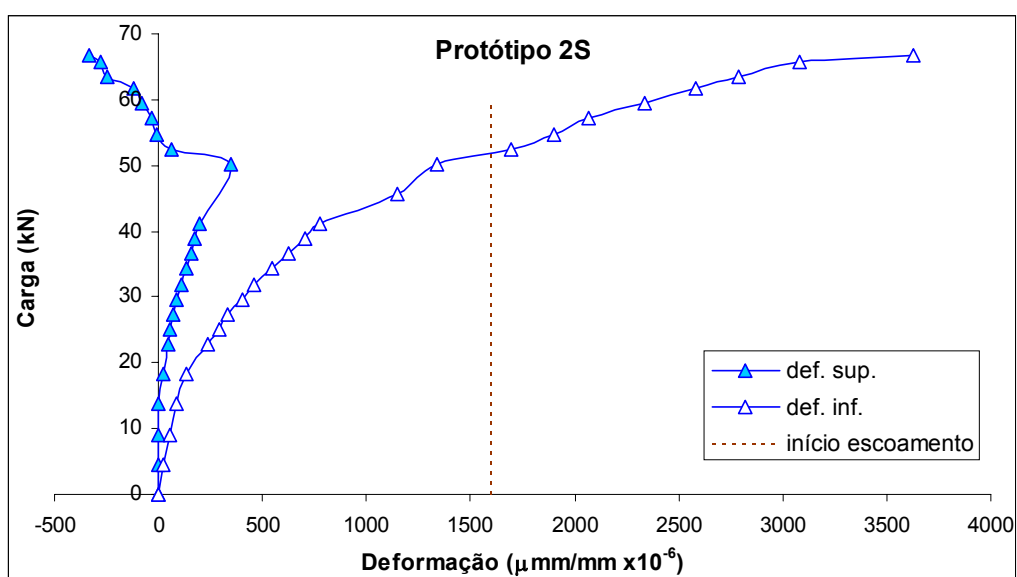
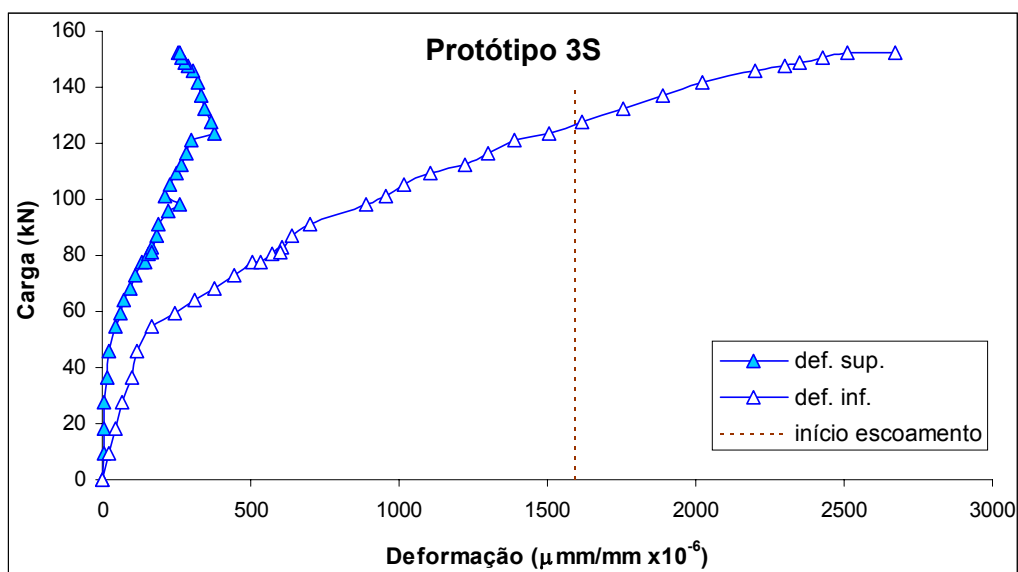
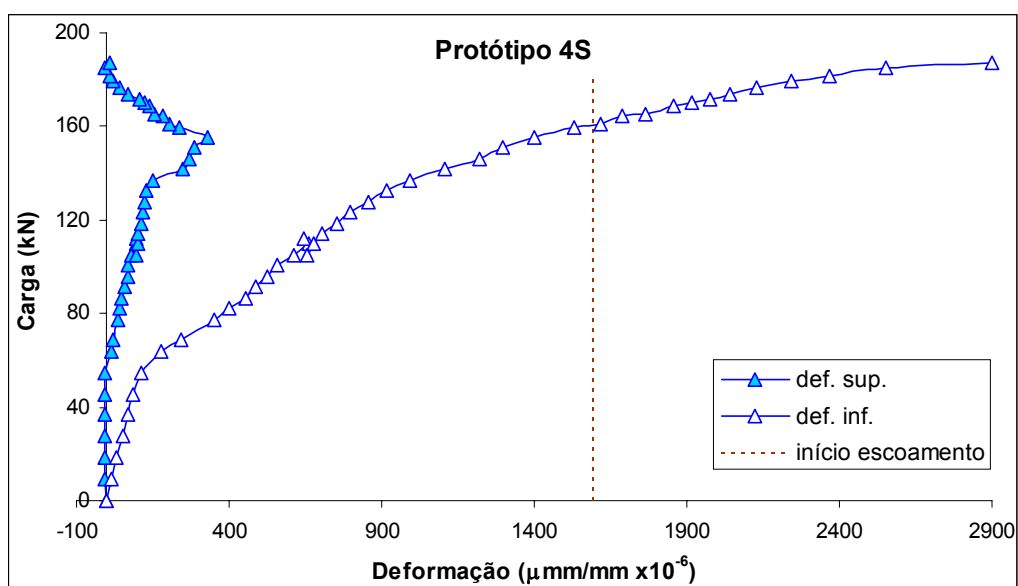


FIGURA A.34 – Protótipo 9MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

FIGURA A.35 – Protótipo 10MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)**Série S**FIGURA A.36 – Protótipo 2S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

FIGURA A.37 – Protótipo 3S ($t_n = 0,80\text{mm}$)FIGURA A.38 – Protótipo 4S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

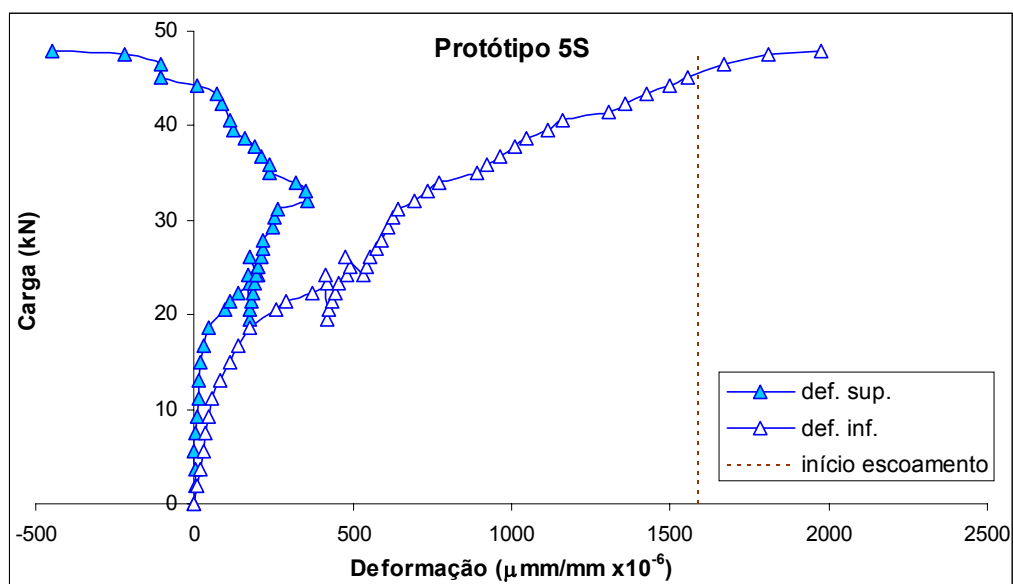


FIGURA A.39 – Protótipo 5S ($t_n = 0,80\text{mm}$)

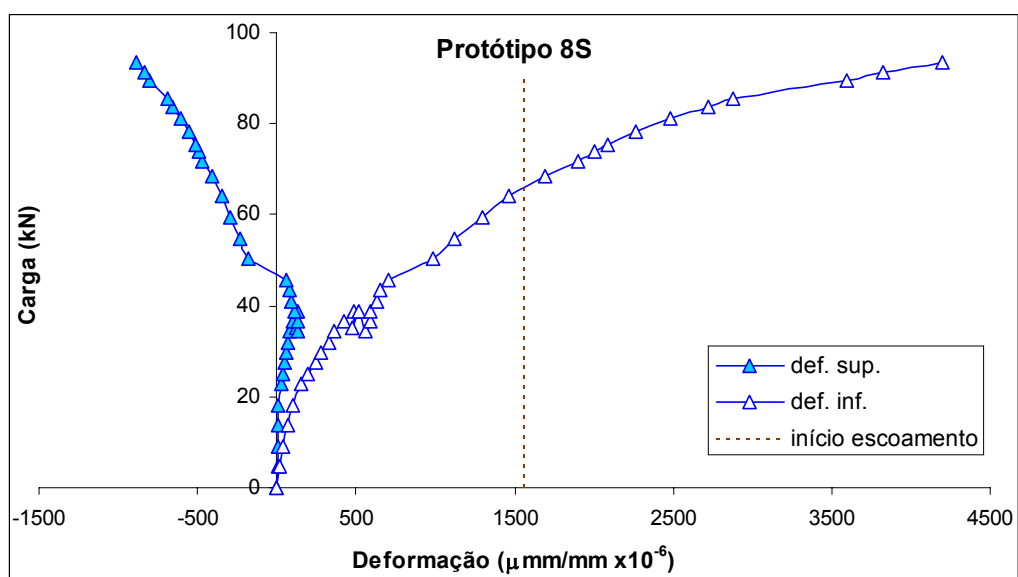
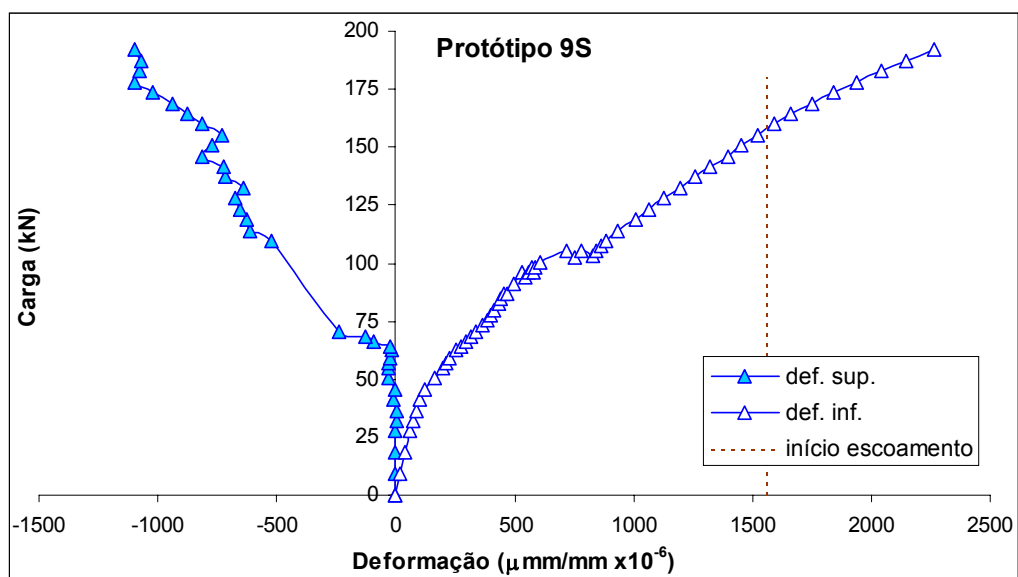
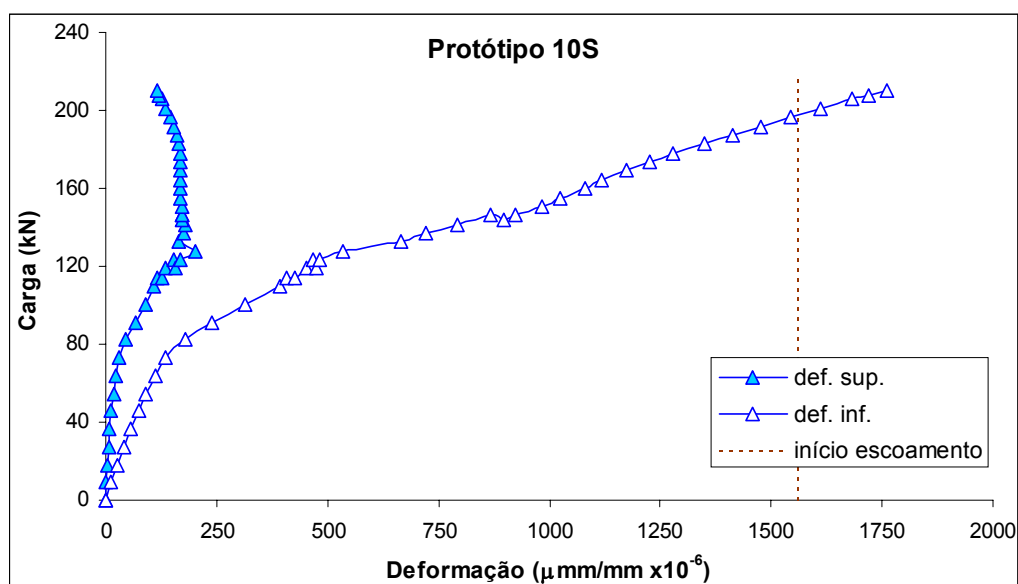


FIGURA A.40 – Protótipo 8S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

FIGURA A.41 – Protótipo 9S ($t_n = 1,25\text{mm}$)FIGURA A.42 – Protótipo 10S ($t_n = 1,25\text{mm}$)

A.4 - Modos de Colapso

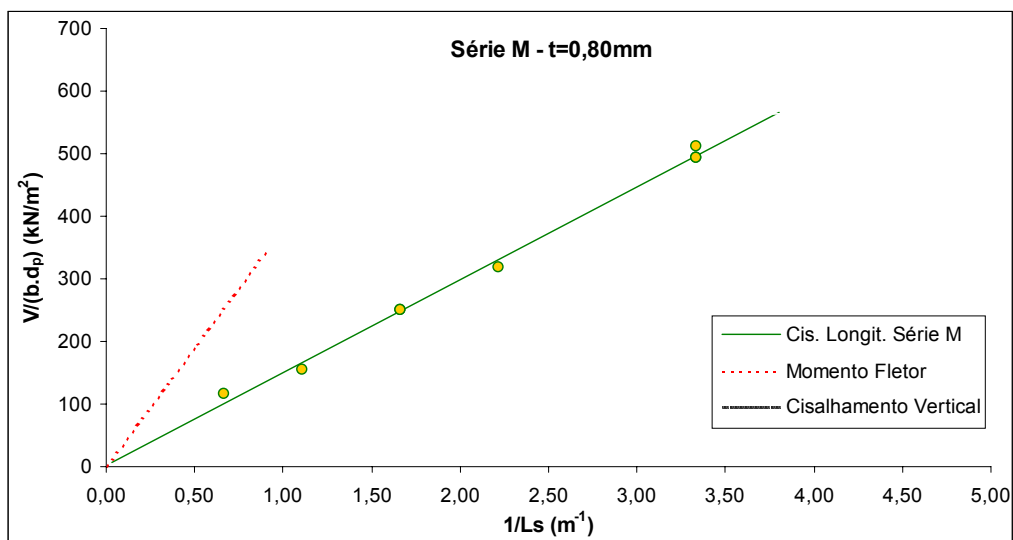


FIGURA A.43 – Modos de colapso dos protótipos da Série M ($t_n = 0,80\text{mm}$)

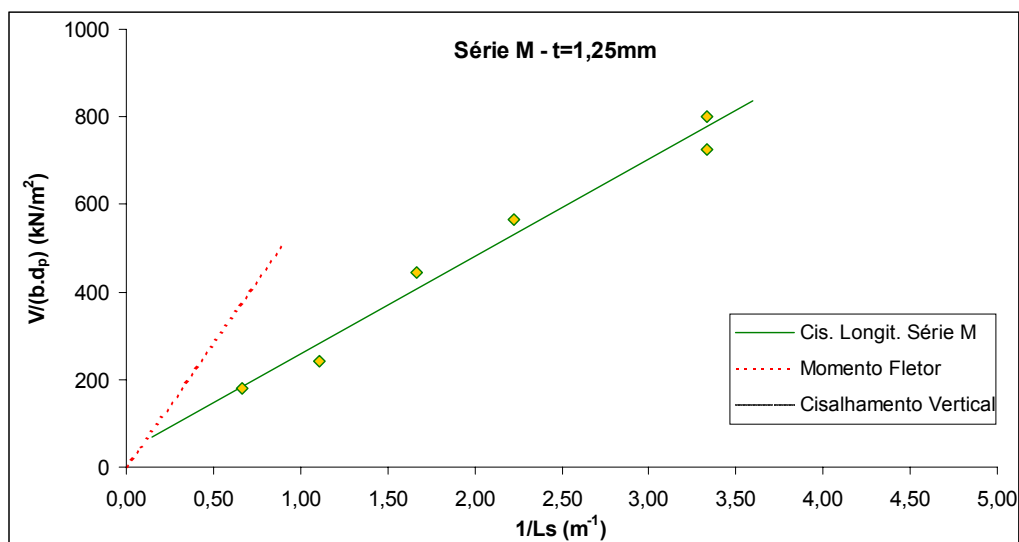


FIGURA A.44 – Modos de colapso dos protótipos da Série M ($t_n = 1,25\text{mm}$)

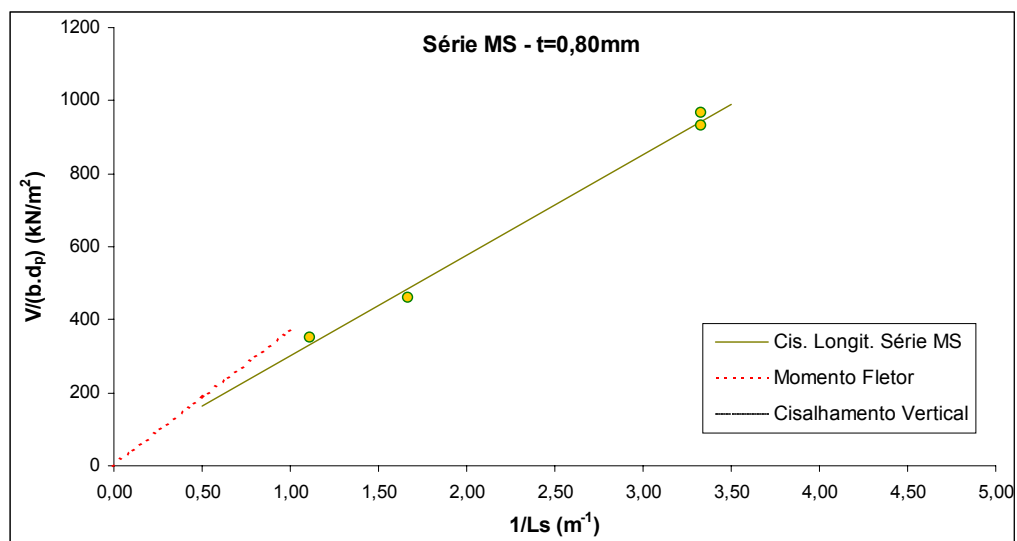


FIGURA A.45 – Modos de colapso dos protótipos da Série MS ($t_n = 0,80\text{mm}$)

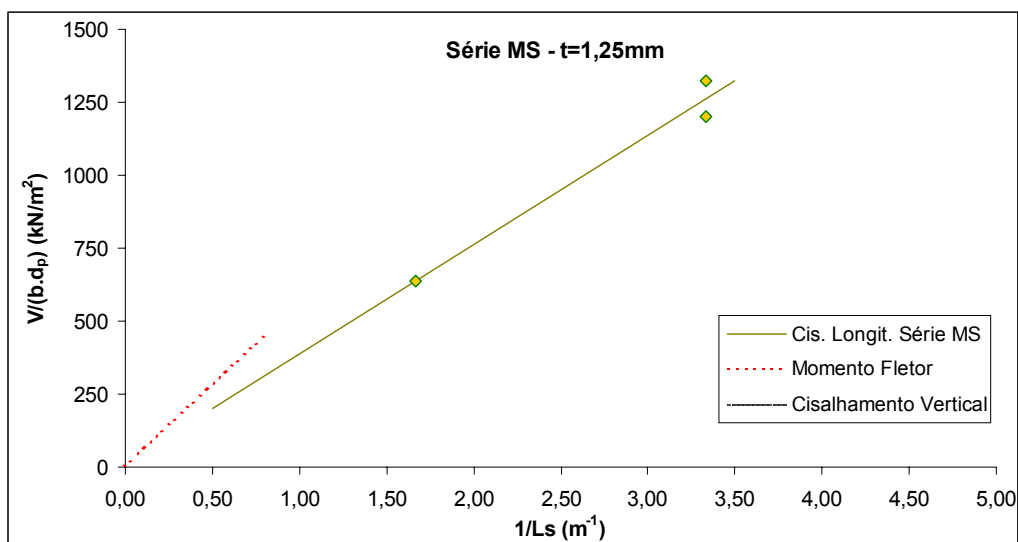


FIGURA A.46 – Modos de colapso dos protótipos da Série MS ($t_n = 1,25\text{mm}$)

A.5 - Série S x Série M x Série MS

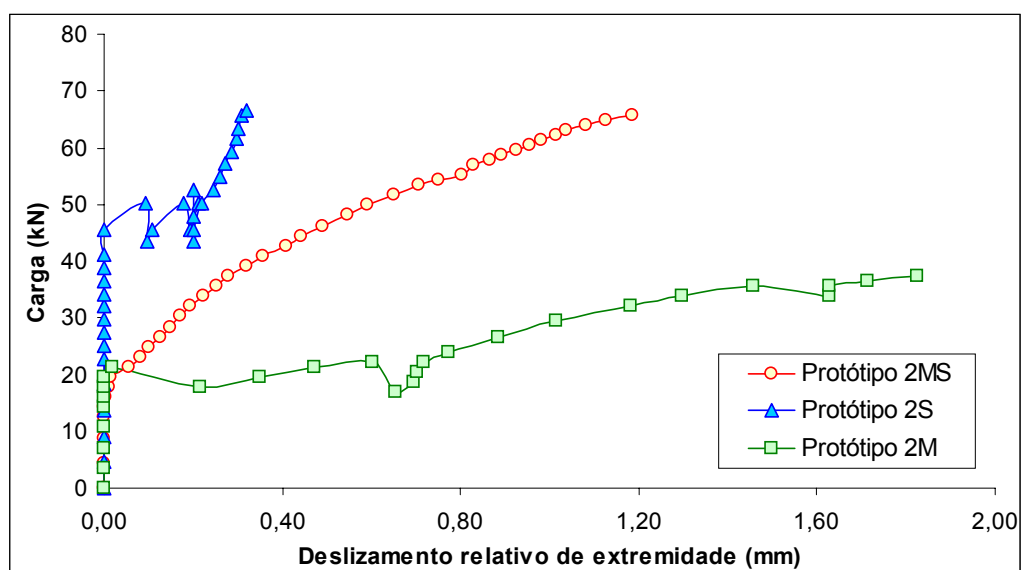


FIGURA A.47 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 2

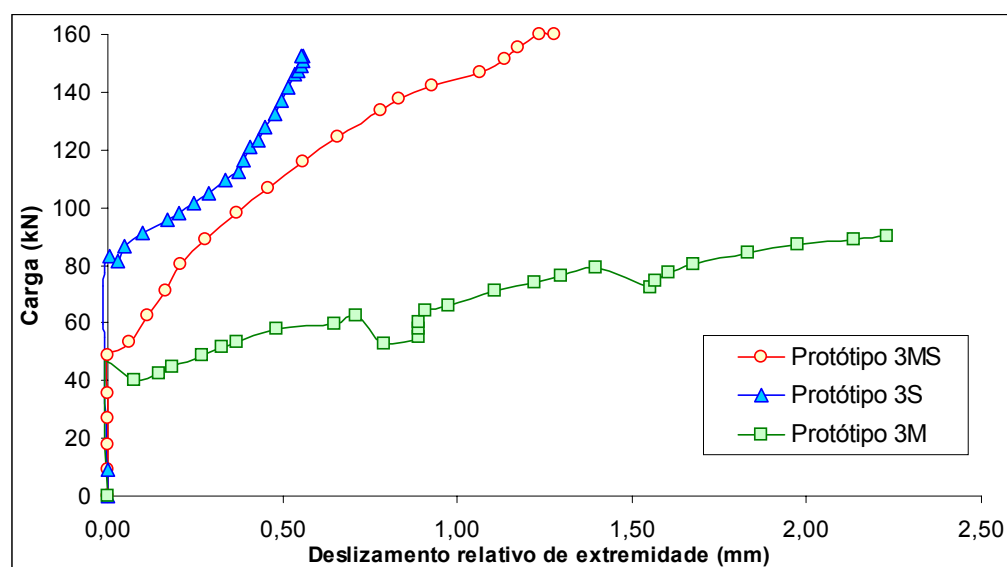


FIGURA A.48 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 3

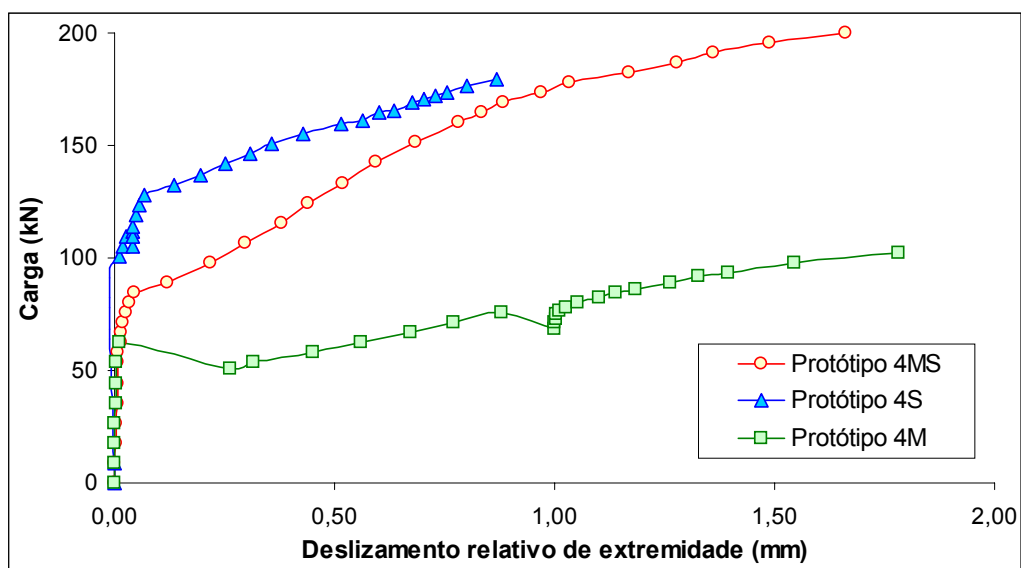


FIGURA A.49 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 4

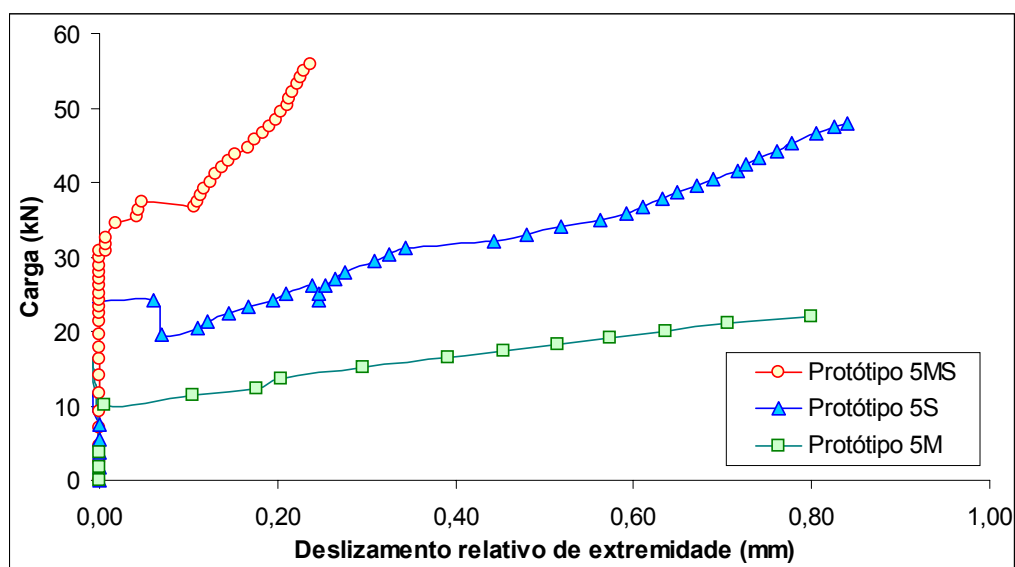


FIGURA A.50 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 5

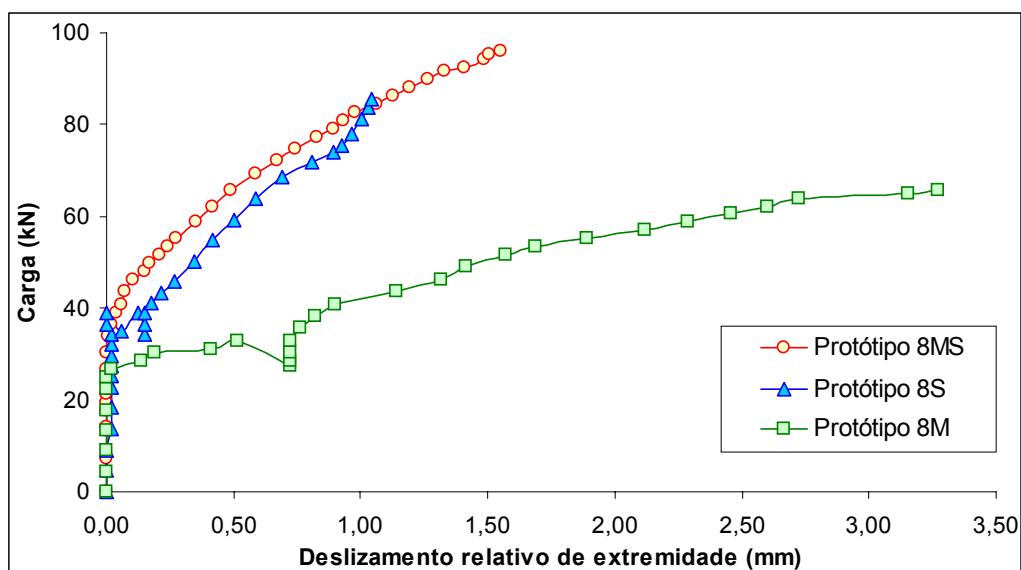


FIGURA A.51 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 8

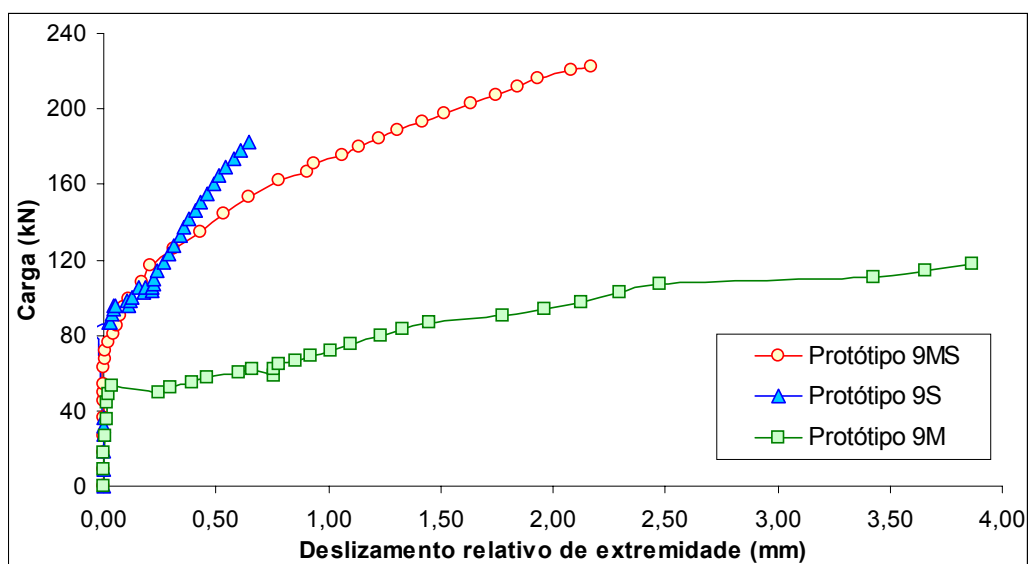


FIGURA A.52 – Comportamento carga x deslocamento relativo de extremidade dos protótipos 9

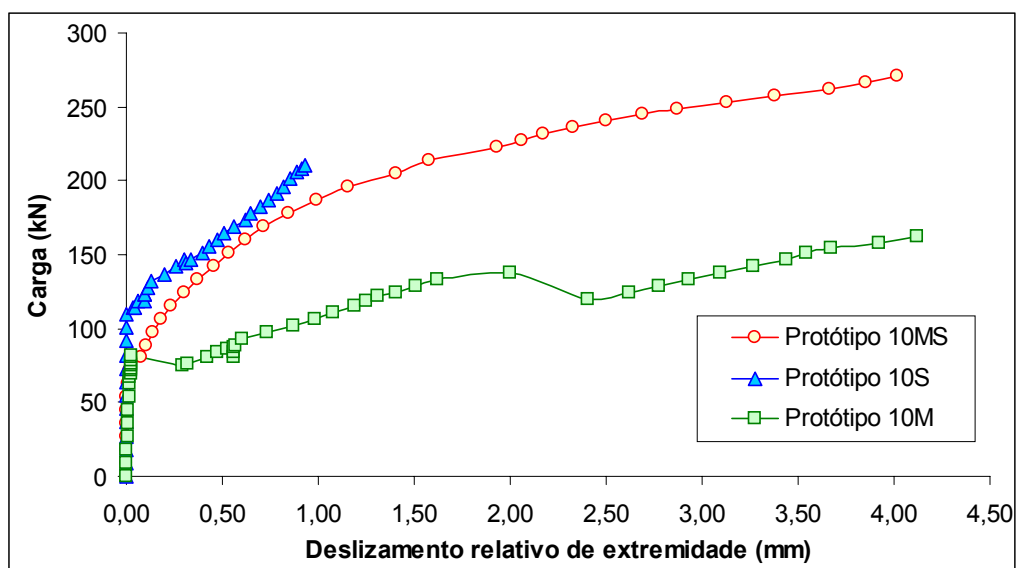


FIGURA A.53 – Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 10

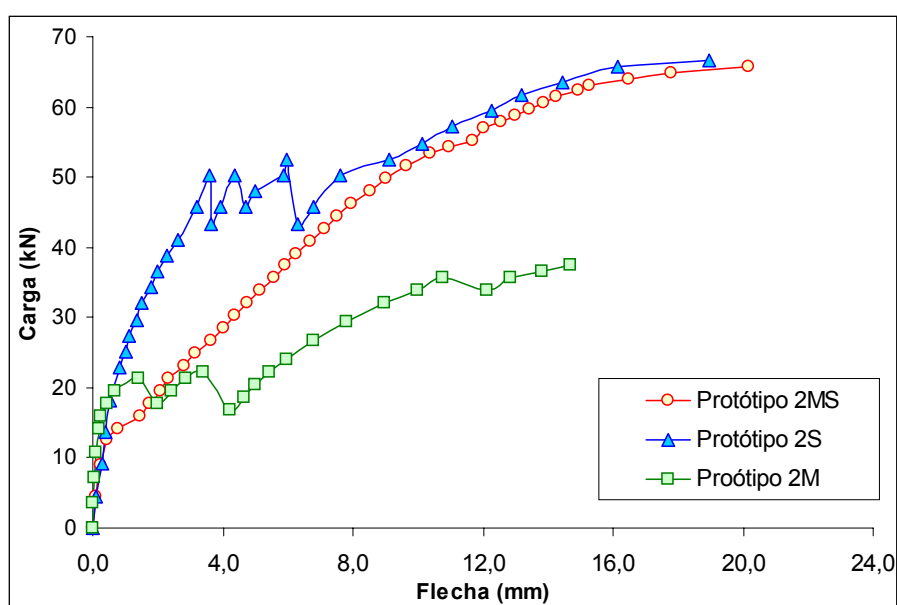


FIGURA A.54 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 2

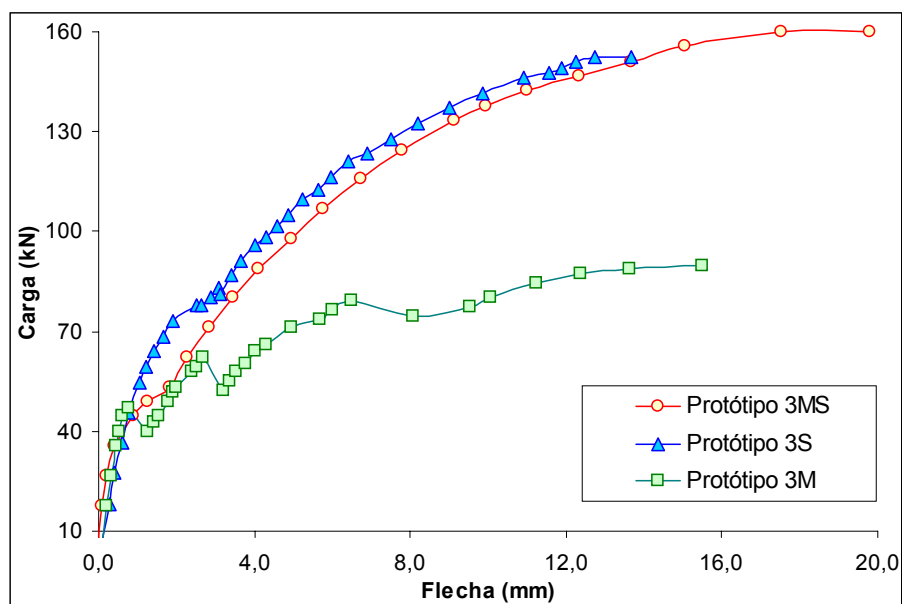


FIGURA A.55 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 3

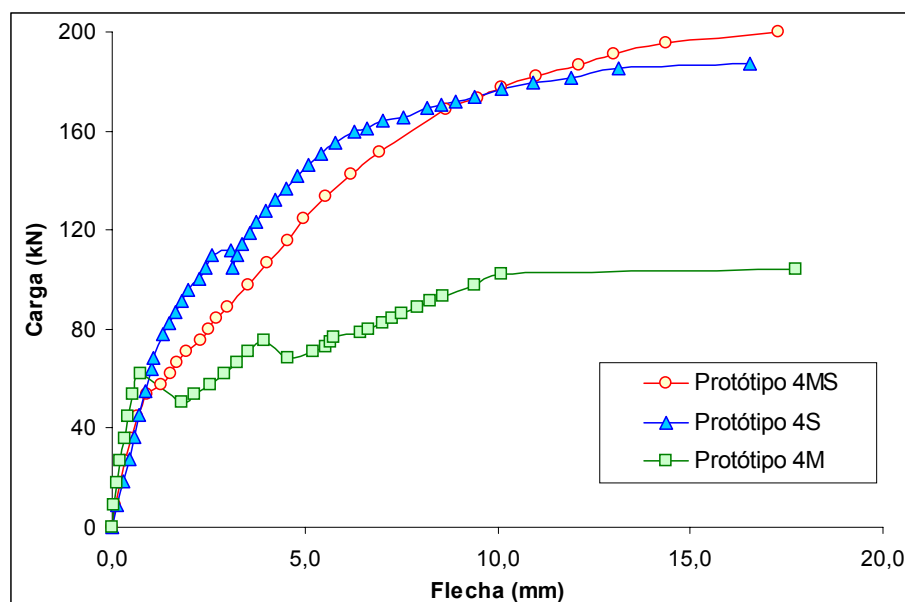


FIGURA A.56 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 4

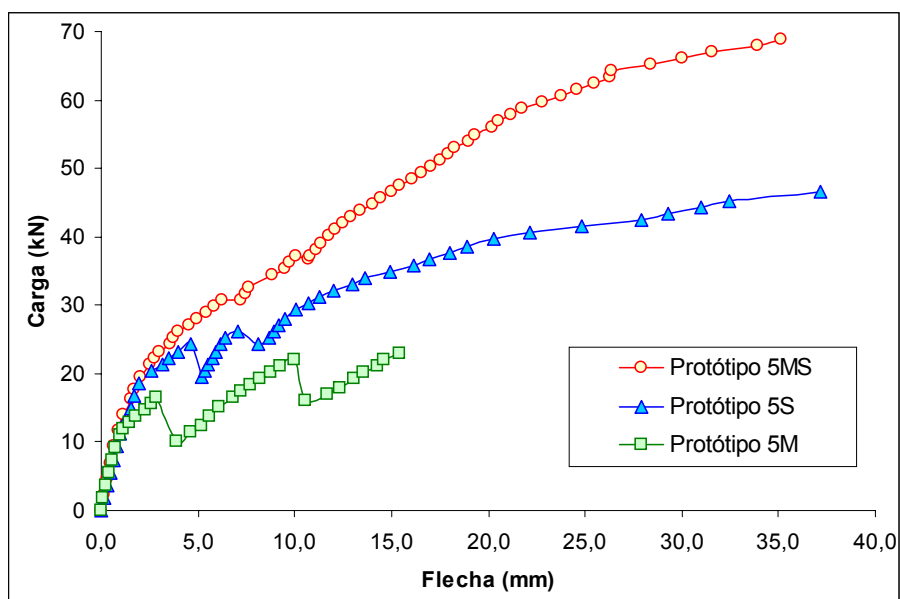


FIGURA A.57 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 5

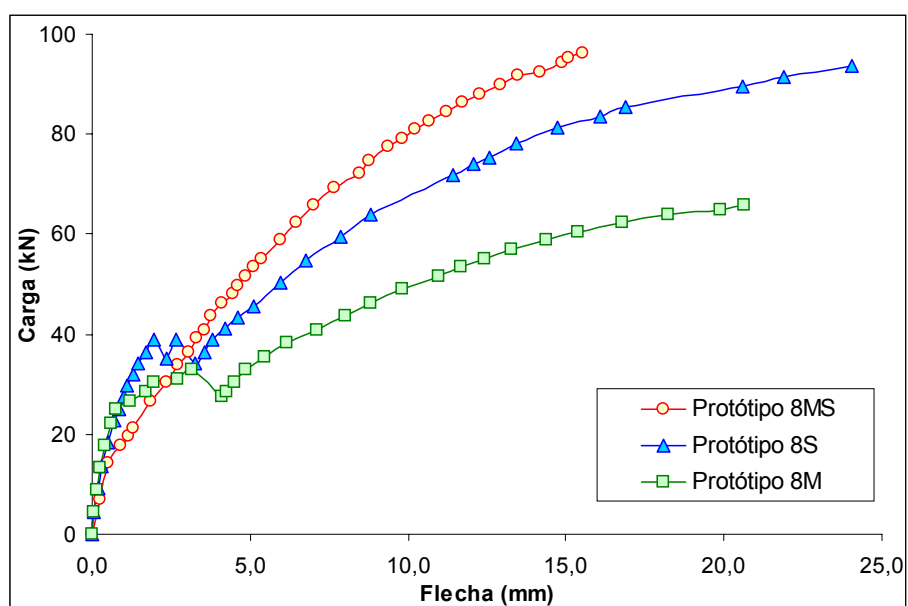


FIGURA A.58 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 8

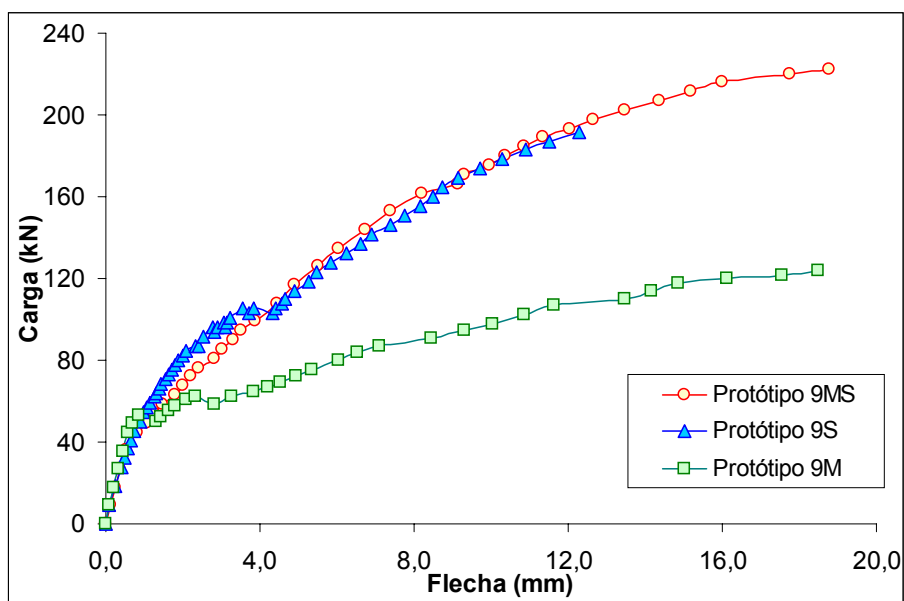


FIGURA A.59 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 9

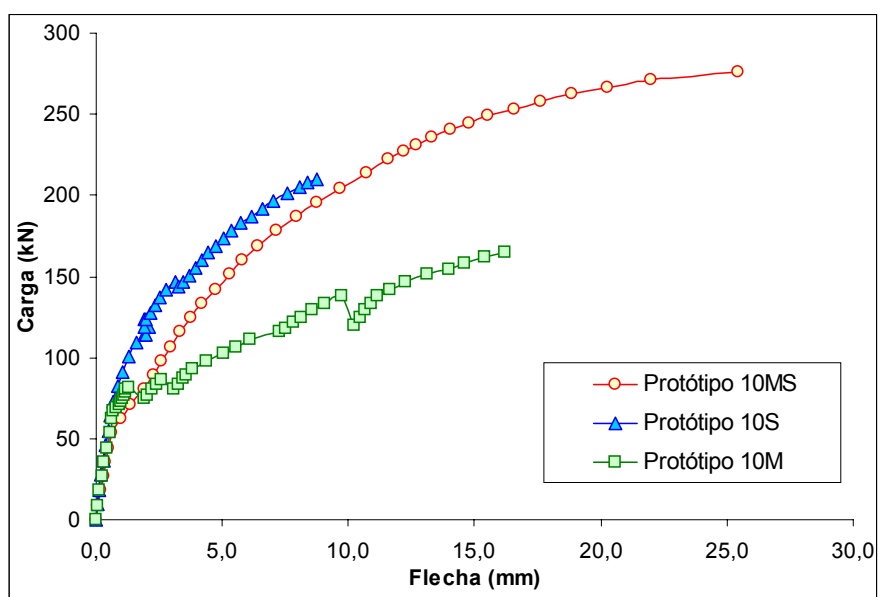


FIGURA A.60 – Comportamento carga x flecha no meio do vão dos protótipos 10

ANEXO B

B.1 - Tabelas de Resistência de Laje Mista sem Ancoragem de Extremidade (*sobrecarga nominal máxima*)

t (mm)	m (N/mm)	k (N/mm ²)	φ _s	M _{ps} (Nmm/m)	N _c (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	A _{ps} (mm ²)	b _s (mm)	τ _{sd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ _c
0,80	152,14	0,0017	0,70	5.841.500	275.418	20	37,5	33,9	148	137	0,25	22.084	1,50
0,95	170,97	0,0142		7.462.800	334.727		37,6	34,8	177				
1,25	208,63	0,0392		10.493.200	438.327		37,7	35,9	236				

Laje Mista sem STUD BOLT

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{cs} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _G (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	11,09	9,87	8,80	7,88	7,06	6,35	5,71	5,14	4,64	4,18	3,77	3,22	2,75	2,21	1,66	1,20	0,82
	0,95	2,28	141.574.000	13,23	11,83	10,62	9,56	8,62	7,80	7,07	6,42	5,83	5,31	4,84	4,21	3,66	3,04	2,39	1,87	1,43
	1,25	2,32	159.948.000	17,49	15,74	14,22	12,89	11,72	10,69	9,77	8,94	8,21	7,55	6,95	6,15	5,46	4,67	3,85	3,17	2,61
140	0,80	2,50	160.025.000	12,30	10,95	9,77	8,74	7,84	7,05	6,34	5,71	5,15	4,65	4,19	3,59	3,06	2,47	1,85	1,35	0,93
	0,95	2,52	173.742.000	14,67	13,12	11,77	10,60	9,56	8,65	7,84	7,12	6,47	5,89	5,36	4,67	4,06	3,37	2,66	2,07	1,59
	1,25	2,55	195.703.000	19,41	17,47	15,78	14,31	13,01	11,86	10,84	9,93	9,12	8,38	7,72	6,84	6,07	5,19	4,28	3,53	2,91
150	0,80	2,74	194.301.000	13,51	12,02	10,73	9,60	8,61	7,74	6,96	6,27	5,66	5,10	4,60	3,94	3,36	2,71	2,03	1,48	1,02
	0,95	2,75	210.723.000	16,12	14,42	12,94	11,65	10,51	9,51	8,62	7,83	7,12	6,48	5,90	5,14	4,47	3,72	2,93	2,29	1,76
	1,25	2,79	236.825.000	21,31	19,18	17,33	15,71	14,29	13,03	11,91	10,91	10,02	9,21	8,48	7,51	6,67	5,71	4,71	3,89	3,20
160	0,80	2,97	233.284.000	14,72	13,10	11,69	10,47	9,39	8,44	7,60	6,85	6,17	5,57	5,02	4,30	3,68	2,96	2,23	1,63	1,13
	0,95	2,99	252.801.000	17,56	15,70	14,09	12,69	11,45	10,36	9,39	8,53	7,76	7,06	6,43	5,60	4,88	4,05	3,20	2,50	1,92
	1,25	3,02	283.610.000	23,23	20,91	18,89	17,13	15,58	14,21	12,99	11,90	10,93	10,05	9,25	8,20	7,28	6,23	5,15	4,25	3,51
170	0,80	3,21	277.248.000	15,93	14,17	12,65	11,32	10,16	9,13	8,22	7,41	6,68	6,03	5,44	4,66	3,98	3,21	2,41	1,76	1,22
	0,95	3,23	300.255.000	18,99	16,99	15,25	13,73	12,39	11,21	10,16	9,23	8,39	7,64	6,96	6,06	5,28	4,39	3,46	2,71	2,08
	1,25	3,26	336.349.000	24,80	22,62	20,44	18,54	16,86	15,38	14,06	12,88	11,83	10,88	10,02	8,88	7,88	6,75	5,57	4,61	3,80
180	0,80	3,44	326.463.000	17,14	15,25	13,62	12,19	10,94	9,83	8,85	7,98	7,19	6,49	5,86	5,02	4,29	3,46	2,61	1,90	1,32
	0,95	3,46	353.362.000	20,44	18,28	16,41	14,78	13,34	12,07	10,94	9,94	9,04	8,23	7,50	6,53	5,69	4,73	3,74	2,92	2,25
	1,25	3,50	395.328.000	25,84	24,34	22,00	19,95	18,14	16,55	15,13	13,86	12,73	11,71	10,78	9,55	8,49	7,27	6,00	4,96	4,09
190	0,80	3,68	381.197.000	18,34	16,32	14,57	13,05	11,70	10,52	9,47	8,54	7,70	6,95	6,27	5,37	4,59	3,71	2,79	2,04	1,42
	0,95	3,70	412.395.000	21,88	19,57	17,57	15,82	14,28	12,92	11,72	10,64	9,68	8,81	8,03	6,99	6,09	5,07	4,00	3,13	2,41
	1,25	3,73	460.832.000	26,88	25,43	23,56	21,36	19,43	17,72	16,21	14,85	13,64	12,54	11,55	10,24	9,10	7,79	6,44	5,32	4,40
200	0,80	3,91	441.716.000	19,56	17,40	15,54	13,91	12,48	11,22	10,10	9,11	8,22	7,41	6,69	5,73	4,90	3,96	2,98	2,18	1,52
	0,95	3,93	477.627.000	23,33	20,87	18,73	16,87	15,23	13,78	12,50	11,35	10,32	9,40	8,57	7,46	6,50	5,41	4,28	3,35	2,58
	1,25	3,97	533.139.000	27,88	26,38	25,01	22,77	20,71	18,89	17,28	15,83	14,54	13,37	12,32	10,92	9,70	8,31	6,87	5,68	4,69

TABELA B.1 – Resistência da laje mista sem ancoragem de extremidade - Método *m-k*

t (mm)	$\tau_{\text{ad}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$M_{\text{ad}} \text{ (Nmm/m)}$	$N_{\text{c}} \text{ (N/m)}$	$f_{\text{ck}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	e (mm)	$e_o \text{ (mm)}$	$V_{\text{id}} \text{ (N/m)}$	$A_{\text{so}} \text{ (mm}^2\text{)}$	$b_o \text{ (mm)}$	$\tau_{\text{ad}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$E_c \text{ (N/mm}^2\text{)}$	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,5	33,9	0	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,6	34,8	0	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,7	35,9	0	236				

Laje Mista sem STUD BOLT

h_t (mm)	t_f (mm)	$w_G \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$I_{c_0} \text{ (mm}^4\text{/m)}$	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				$w_Q \text{ (kN/m}^2\text{)}$																
130	0,80	2,27	130.180.000	11,11	10,10	9,21	8,43	7,74	7,11	6,56	6,06	5,60	5,19	4,80	4,26	3,78	3,24	2,67	2,19	1,79
	0,95	2,28	141.574.000	14,29	13,03	11,92	10,94	10,07	9,30	8,60	7,97	7,41	6,89	6,40	5,73	5,14	4,46	3,74	3,15	2,65
	1,25	2,32	159.948.000	20,33	18,59	17,05	15,70	14,50	13,43	12,47	11,61	10,83	10,07	9,38	8,45	7,64	6,71	5,73	4,92	4,23
140	0,80	2,50	160.025.000	11,42	10,39	9,47	8,67	7,95	7,31	6,74	6,22	5,75	5,32	4,93	4,39	3,90	3,33	2,73	2,24	1,82
	0,95	2,52	173.742.000	14,71	13,41	12,27	11,27	10,37	9,57	8,86	8,21	7,62	7,09	6,61	5,92	5,31	4,60	3,86	3,24	2,72
	1,25	2,55	195.703.000	20,98	19,19	17,62	16,23	14,99	13,89	12,90	12,01	11,21	10,47	9,75	8,80	7,96	6,99	5,98	5,14	4,43
150	0,80	2,74	194.301.000	11,72	10,66	9,72	8,89	8,16	7,50	6,91	6,37	5,89	5,45	5,04	4,50	3,99	3,40	2,79	2,27	1,84
	0,95	2,75	210.723.000	15,13	13,80	12,63	11,59	10,67	9,85	9,11	8,45	7,84	7,30	6,79	6,11	5,48	4,75	3,98	3,34	2,80
	1,25	2,79	236.825.000	21,61	19,77	18,16	16,73	15,46	14,33	13,31	12,40	11,57	10,81	10,11	9,13	8,26	7,26	6,21	5,34	4,60
160	0,80	2,97	233.284.000	12,02	10,93	9,97	9,12	8,37	7,69	7,08	6,53	6,03	5,57	5,16	4,60	4,09	3,49	2,85	2,31	1,86
	0,95	2,99	252.801.000	15,53	14,17	12,97	11,91	10,96	10,12	9,36	8,67	8,05	7,49	6,97	6,27	5,64	4,88	4,09	3,43	2,87
	1,25	3,02	283.610.000	22,23	20,35	18,70	17,24	15,94	14,77	13,73	12,79	11,93	11,16	10,45	9,45	8,56	7,53	6,45	5,54	4,78
170	0,80	3,21	277.248.000	12,31	11,20	10,21	9,34	8,56	7,86	7,24	6,67	6,16	5,69	5,26	4,68	4,18	3,55	2,89	2,34	1,87
	0,95	3,23	300.255.000	15,93	14,53	13,30	12,21	11,24	10,38	9,60	8,89	8,25	7,67	7,14	6,42	5,79	5,01	4,19	3,51	2,93
	1,25	3,26	336.349.000	22,84	20,92	19,23	17,73	16,39	15,20	14,13	13,16	12,28	11,48	10,75	9,77	8,85	7,78	6,66	5,73	4,94
180	0,80	3,44	326.463.000	12,61	11,46	10,45	9,56	8,76	8,04	7,40	6,82	6,29	5,81	5,37	4,78	4,25	3,63	2,94	2,37	1,89
	0,95	3,46	353.362.000	16,33	14,90	13,64	12,52	11,53	10,64	9,84	9,12	8,46	7,86	7,32	6,58	5,93	5,15	4,30	3,59	2,99
	1,25	3,50	395.328.000	23,44	21,48	19,74	18,21	16,84	15,62	14,52	13,53	12,62	11,80	11,05	10,05	9,12	8,03	6,88	5,91	5,09
190	0,80	3,68	381.197.000	12,89	11,71	10,68	9,76	8,95	8,21	7,55	6,95	6,41	5,92	5,46	4,85	4,31	3,69	2,98	2,39	1,89
	0,95	3,70	412.395.000	16,71	15,25	13,96	12,82	11,80	10,89	10,07	9,33	8,65	8,04	7,48	6,72	6,05	5,27	4,40	3,67	3,05
	1,25	3,73	460.832.000	24,05	22,04	20,26	18,69	17,29	16,04	14,91	13,90	12,97	12,13	11,36	10,32	9,41	8,28	7,09	6,10	5,25
200	0,80	3,91	441.716.000	13,17	11,97	10,92	9,98	9,14	8,39	7,71	7,10	6,54	6,03	5,57	4,94	4,39	3,74	3,03	2,42	1,90
	0,95	3,93	477.627.000	17,10	15,61	14,29	13,12	12,08	11,15	10,30	9,54	8,85	8,22	7,65	6,87	6,18	5,38	4,50	3,75	3,11
	1,25	3,97	533.139.000	24,64	22,58	20,77	19,16	17,73	16,45	15,30	14,25	13,30	12,44	11,65	10,59	9,65	8,52	7,29	6,27	5,40

TABELA B.2 – Resistência da laje mista sem ancoragem de extremidade - Método da Interação Parcial

**B.2 - Tabelas de Resistência de Laje Mista com Ancoragem de
Extremidade (*sobrecarga nominal máxima*)**

(o número à esquerda representa a porcentagem de resistência ao
cisalhamento vertical acima da resistência ao cisalhamento longitudinal)

t (mm)	$\tau_{u,red}$ (N/mm ²)	M _{pl,R} (Nmm/m)	N _{c,R} (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{Ed} (N/m)	A _{sc} (mm ²)	b _c (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	54.189	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	54.189	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	54.189	236				

Laje Mista com um STUD BOLT em cada nervura

h _t (mm)	t _n (mm)	w _c (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 16.19	0 14.64	0 13.29	0 12.11	0 11.07	0 10.14	0 9.31	0 8.57	0 7.91	0 7.3	0 6.76	0 6.03	0 5.39	0 4.66	0 3.9	0 3.26	0 2.73
	0,95	2,28	141.574.000	5 18.31	0 17.34	0 15.94	0 14.55	0 13.32	0 12.23	0 11.26	0 10.39	0 9.61	0 8.9	0 8.26	0 7.41	0 6.66	0 5.8	0 4.91	0 4.16	0 3.54
	1,25	2,32	159.948.000	21 20.4	16 19.32	12 18.35	8 17.45	4 16.64	1 15.88	0 14.92	0 13.8	0 12.8	0 11.9	0 11.07	0 9.98	0 9.02	0 7.92	0 6.78	0 5.82	0 5.03
140	0,80	2,50	160.025.000	0 17.29	0 15.65	0 14.22	0 12.96	0 11.85	0 10.86	0 9.98	0 9.19	0 8.48	0 7.83	0 7.25	0 6.47	0 5.79	0 5.01	0 4.19	0 3.51	0 2.94
	0,95	2,52	173.742.000	5 19.45	1 18.41	0 16.96	0 15.49	0 14.19	0 13.03	0 12.01	0 11.08	0 10.25	0 9.5	0 8.82	0 7.91	0 7.12	0 6.21	0 5.25	0 4.46	0 3.79
	1,25	2,55	195.703.000	21 21.53	17 20.39	12 19.36	8 18.41	5 17.55	2 16.75	0 15.85	0 14.68	0 13.62	0 12.67	0 11.8	0 10.64	0 9.63	0 8.47	0 7.25	0 6.25	0 5.4
150	0,80	2,74	194.301.000	0 18.39	0 16.65	0 15.13	0 13.79	0 12.61	0 11.57	0 10.63	0 9.79	0 9.04	0 8.35	0 7.73	0 6.91	0 6.18	0 5.35	0 4.48	0 3.75	0 3.14
	0,95	2,75	210.723.000	5 20.58	1 19.47	0 17.98	0 16.43	0 15.06	0 13.84	0 12.76	0 11.78	0 10.9	0 10.11	0 9.39	0 8.43	0 7.59	0 6.62	0 5.6	0 4.76	0 4.06
	1,25	2,79	236.825.000	21 22.64	17 21.43	13 20.34	9 19.34	5 18.43	2 17.59	0 16.77	0 15.53	0 14.42	0 13.42	0 12.51	0 11.29	0 10.23	0 9	0 7.72	0 6.65	0 5.75
160	0,80	2,97	233.284.000	0 19.49	0 17.65	0 16.05	0 14.64	0 13.39	0 12.28	0 11.29	0 10.4	0 9.6	0 8.88	0 8.22	0 7.35	0 6.58	0 5.69	0 4.77	0 4	0 3.35
	0,95	2,99	252.801.000	5 21.67	1 20.51	0 18.99	0 17.36	0 15.92	0 14.64	0 13.49	0 12.47	0 11.54	0 10.7	0 9.94	0 8.93	0 8.04	0 7.02	0 5.95	0 5.05	0 4.3
	1,25	3,02	283.610.000	22 23.73	17 22.46	13 21.32	9 20.27	6 19.3	3 18.42	0 17.6	0 16.39	0 15.23	0 14.18	0 13.22	0 11.94	0 10.82	0 9.53	0 8.18	0 7.06	0 6.11
170	0,80	3,21	277.248.000	0 20.58	0 18.64	0 16.95	0 15.47	0 14.15	0 12.98	0 11.94	0 11	0 10.16	0 9.4	0 8.7	0 7.78	0 6.96	0 6.03	0 5.05	0 4.24	0 3.55
	0,95	3,23	300.255.000	5 22.75	1 21.52	0 20	0 18.29	0 16.78	0 15.43	0 14.23	0 13.15	0 12.18	0 11.3	0 10.5	0 9.43	0 8.49	0 7.41	0 6.28	0 5.34	0 4.55
	1,25	3,26	336.349.000	22 24.79	18 23.47	14 22.26	10 21.16	7 20.15	3 19.23	1 18.37	0 17.24	0 16.02	0 14.92	0 13.92	0 12.58	0 11.41	0 10.05	0 8.64	0 7.46	0 6.46
180	0,80	3,44	326.463.000	0 21.67	0 19.64	0 17.87	0 16.3	0 14.92	0 13.69	0 12.6	0 11.61	0 10.72	0 9.92	0 9.19	0 8.21	0 7.36	0 6.37	0 5.34	0 4.48	0 3.75
	0,95	3,46	353.362.000	5 23.82	2 22.53	0 21.02	0 19.22	0 17.64	0 16.23	0 14.97	0 13.84	0 12.82	0 11.89	0 11.05	0 9.93	0 8.95	0 7.82	0 6.63	0 5.64	0 4.81
	1,25	3,50	395.328.000	22 25.84	18 24.45	14 23.19	10 22.04	7 20.99	4 20.02	1 19.12	0 18.08	0 16.81	0 15.66	0 14.61	0 13.21	0 11.99	0 10.57	0 9.09	0 7.85	0 6.81
190	0,80	3,68	381.197.000	0 22.76	0 20.63	0 18.77	0 17.13	0 15.68	0 14.39	0 13.24	0 12.21	0 11.28	0 10.43	0 9.66	0 8.64	0 7.74	0 6.7	0 5.62	0 4.71	0 3.95
	0,95	3,70	412.395.000	6 24.86	2 23.51	0 22.02	0 20.15	0 18.49	0 17.02	0 15.7	0 14.51	0 13.45	0 12.48	0 11.6	0 10.43	0 9.4	0 8.21	0 6.96	0 5.92	0 5.05
	1,25	3,73	460.832.000	23 26.87	18 25.43	14 24.11	11 22.91	8 21.81	5 20.8	2 19.87	0 18.93	0 17.61	0 16.4	0 15.31	0 13.85	0 12.57	0 11.09	0 9.54	0 8.25	0 7.16
200	0,80	3,91	441.716.000	0 23.85	0 21.63	0 19.68	0 17.97	0 16.45	0 15.1	0 13.9	0 12.81	0 11.84	0 10.95	0 10.15	0 9.07	0 8.13	0 7.04	0 5.9	0 4.95	0 4.15
	0,95	3,93	477.627.000	6 25.88	2 24.48	0 23.03	0 21.08	0 19.35	0 17.81	0 16.44	0 15.2	0 14.08	0 13.07	0 12.16	0 10.93	0 9.85	0 8.61	0 7.31	0 6.22	0 5.3
	1,25	3,97	533.139.000	23 27.87	19 26.37	15 25	11 23.75	8 22.61	5 21.56	2 20.59	0 19.69	0 18.39	0 17.14	0 16	0 14.48	0 13.15	0 11.6	0 9.99	0 8.64	0 7.5

TABELA B.3 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt em cada nervura)

t (mm)	$\tau_{u,rd}$ (N/mm ²)	M _{sd} (Nmm/m)	N _{ed} (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{ed} (N/m)	A _{po} (mm ²)	b _o (mm)	τ_{rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	27.094	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	27.094	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	27.094	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 2 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{ed} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 13.99	0 12.66	0 11.49	0 10.46	0 9.56	0 8.75	0 8.03	0 7.39	0 6.81	0 6.28	0 5.81	0 5.17	0 4.61	0 3.97	0 3.3	0 2.74	0 2.27
	0,95	2,28	141.574.000	0 17.23	0 15.61	0 14.21	0 12.97	0 11.88	0 10.91	0 10.04	0 9.26	0 8.56	0 7.93	0 7.36	0 6.59	0 5.92	0 5.15	0 4.34	0 3.67	0 3.11
	1,25	2,32	159.948.000	12 20.4	8 19.32	4 18.35	1 17.45	0 16.22	0 14.94	0 13.8	0 12.77	0 11.84	0 11.01	0 10.25	0 9.24	0 8.35	0 7.33	0 6.27	0 5.38	0 4.64
140	0,80	2,50	160.025.000	0 14.72	0 13.32	0 12.1	0 11.03	0 10.07	0 9.23	0 8.47	0 7.8	0 7.19	0 6.63	0 6.13	0 5.46	0 4.87	0 4.19	0 3.49	0 2.89	0 2.4
	0,95	2,52	173.742.000	0 18.07	0 16.38	0 14.91	0 13.62	0 12.48	0 11.47	0 10.56	0 9.75	0 9.01	0 8.35	0 7.75	0 6.94	0 6.24	0 5.43	0 4.58	0 3.87	0 3.27
	1,25	2,55	195.703.000	11 21.53	7 20.39	4 19.36	0 18.41	0 17.03	0 15.7	0 14.5	0 13.43	0 12.47	0 11.59	0 10.8	0 9.74	0 8.82	0 7.75	0 6.63	0 5.7	0 4.92
150	0,80	2,74	194.301.000	0 15.44	0 13.98	0 12.7	0 11.57	0 10.58	0 9.69	0 8.9	0 8.19	0 7.55	0 6.97	0 6.44	0 5.74	0 5.12	0 4.4	0 3.66	0 3.03	0 2.51
	0,95	2,75	210.723.000	0 18.91	0 17.16	0 15.63	0 14.28	0 13.09	0 12.03	0 11.08	0 10.23	0 9.47	0 8.77	0 8.14	0 7.3	0 6.56	0 5.71	0 4.81	0 4.07	0 3.45
	1,25	2,79	236.825.000	11 22.64	7 21.43	3 20.34	0 19.34	0 17.82	0 16.43	0 15.19	0 14.08	0 13.07	0 12.16	0 11.34	0 10.23	0 9.27	0 8.15	0 6.98	0 6.01	0 5.19
160	0,80	2,97	233.284.000	0 16.16	0 14.64	0 13.3	0 12.13	0 11.09	0 10.16	0 9.33	0 8.59	0 7.92	0 7.31	0 6.76	0 6.02	0 5.37	0 4.62	0 3.84	0 3.18	0 2.63
	0,95	2,99	252.801.000	0 19.74	0 17.92	0 16.32	0 14.92	0 13.68	0 12.58	0 11.59	0 10.7	0 9.9	0 9.18	0 8.52	0 7.64	0 6.87	0 5.98	0 5.04	0 4.26	0 3.6
	1,25	3,02	283.610.000	10 23.73	6 22.46	3 21.32	0 20.23	0 18.61	0 17.17	0 15.88	0 14.72	0 13.68	0 12.73	0 11.87	0 10.72	0 9.72	0 8.55	0 7.33	0 6.32	0 5.46
170	0,80	3,21	277.248.000	0 16.87	0 15.28	0 13.89	0 12.67	0 11.58	0 10.62	0 9.75	0 8.98	0 8.27	0 7.64	0 7.06	0 6.29	0 5.61	0 4.83	0 4	0 3.31	0 2.73
	0,95	3,23	300.255.000	0 20.56	0 18.67	0 17.02	0 15.56	0 14.27	0 13.12	0 12.1	0 11.17	0 10.34	0 9.58	0 8.9	0 7.98	0 7.17	0 6.24	0 5.26	0 4.45	0 3.76
	1,25	3,26	336.349.000	9 24.79	6 23.47	2 22.26	0 21.06	0 19.39	0 17.89	0 16.56	0 15.36	0 14.27	0 13.29	0 12.4	0 11.2	0 10.15	0 8.94	0 7.67	0 6.61	0 5.72
180	0,80	3,44	326.463.000	0 17.59	0 15.94	0 14.49	0 13.22	0 12.09	0 11.08	0 10.18	0 9.37	0 8.64	0 7.98	0 7.37	0 6.57	0 5.86	0 5.04	0 4.18	0 3.46	0 2.85
	0,95	3,46	353.362.000	0 21.39	0 19.43	0 17.71	0 16.2	0 14.86	0 13.67	0 12.61	0 11.65	0 10.78	0 10	0 9.28	0 8.32	0 7.48	0 6.51	0 5.49	0 4.64	0 3.92
	1,25	3,50	395.328.000	9 25.84	5 24.45	2 23.19	0 21.89	0 20.15	0 18.61	0 17.23	0 15.98	0 14.86	0 13.84	0 12.91	0 11.67	0 10.58	0 9.33	0 8	0 6.9	0 5.97
190	0,80	3,68	381.197.000	0 18.29	0 16.58	0 15.08	0 13.75	0 12.58	0 11.53	0 10.59	0 9.75	0 8.99	0 8.3	0 7.67	0 6.83	0 6.09	0 5.24	0 4.34	0 3.59	0 2.95
	0,95	3,70	412.395.000	0 22.2	0 20.17	0 18.4	0 16.83	0 15.45	0 14.21	0 13.1	0 12.11	0 11.21	0 10.39	0 9.65	0 8.66	0 7.78	0 6.77	0 5.71	0 4.83	0 4.08
	1,25	3,73	460.832.000	9 26.87	5 25.43	2 24.11	0 22.72	0 20.93	0 19.33	0 17.9	0 16.61	0 15.45	0 14.4	0 13.44	0 12.15	0 11.02	0 9.72	0 8.34	0 7.2	0 6.23
200	0,80	3,91	441.716.000	0 19	0 17.23	0 15.67	0 14.29	0 13.08	0 11.99	0 11.02	0 10.14	0 9.35	0 8.63	0 7.98	0 7.11	0 6.34	0 5.45	0 4.51	0 3.73	0 3.06
	0,95	3,93	477.627.000	0 23.02	0 20.92	0 19.09	0 17.47	0 16.03	0 14.75	0 13.61	0 12.58	0 11.64	0 10.8	0 10.03	0 9	0 8.09	0 7.04	0 5.94	0 5.02	0 4.24
	1,25	3,97	533.139.000	8 27.87	5 26.37	2 25	0 23.53	0 21.68	0 20.04	0 18.56	0 17.23	0 16.03	0 14.94	0 13.94	0 12.61	0 11.45	0 10.09	0 8.67	0 7.48	0 6.47

TABELA B.4 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 2 nervuras)

t (mm)	$\tau_{u,red}$ (N/mm ²)	M _{pl} (Nmm/m)	N _c (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{td} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _o (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	18.063	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	18.063	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	18.063	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 3 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 13.23	0 11.97	0 10.86	0 9.89	0 9.03	0 8.27	0 7.59	0 6.98	0 6.43	0 5.93	0 5.48	0 4.87	0 4.34	0 3.73	0 3.09	0 2.56	0 2.11
	0,95	2,28	141.574.000	0 16.5	0 14.96	0 13.61	0 12.42	0 11.38	0 10.45	0 9.62	0 8.87	0 8.2	0 7.59	0 7.04	0 6.31	0 5.66	0 4.92	0 4.14	0 3.5	0 2.96
	1,25	2,32	159.948.000	9 20.4	5 19.32	1 18.35	0 17.17	0 15.76	0 14.52	0 13.41	0 12.41	0 11.51	0 10.7	0 9.96	0 8.98	0 8.12	0 7.13	0 6.09	0 5.23	0 4.51
140	0,80	2,50	160.025.000	0 13.84	0 12.52	0 11.37	0 10.36	0 9.46	0 8.67	0 7.95	0 7.31	0 6.74	0 6.22	0 5.74	0 5.11	0 4.55	0 3.91	0 3.24	0 2.68	0 2.21
	0,95	2,52	173.742.000	0 17.21	0 15.61	0 14.21	0 12.98	0 11.89	0 10.92	0 10.06	0 9.28	0 8.58	0 7.95	0 7.37	0 6.61	0 5.93	0 5.15	0 4.34	0 3.66	0 3.09
	1,25	2,55	195.703.000	7 21.53	4 20.39	1 19.36	0 17.94	0 16.48	0 15.19	0 14.04	0 13	0 12.07	0 11.22	0 10.46	0 9.43	0 8.53	0 7.5	0 6.42	0 5.52	0 4.76
150	0,80	2,74	194.301.000	0 14.43	0 13.06	0 11.86	0 10.81	0 9.88	0 9.05	0 8.3	0 7.64	0 7.03	0 6.49	0 5.99	0 5.33	0 4.75	0 4.08	0 3.37	0 2.78	0 2.29
	0,95	2,75	210.723.000	0 17.9	0 16.27	0 14.82	0 13.54	0 12.41	0 11.4	0 10.51	0 9.7	0 8.97	0 8.31	0 7.71	0 6.91	0 6.2	0 5.39	0 4.54	0 3.83	0 3.23
	1,25	2,79	236.825.000	6 22.64	3 21.43	0 20.34	0 18.69	0 17.18	0 15.84	0 14.65	0 13.58	0 12.61	0 11.73	0 10.93	0 9.87	0 8.93	0 7.86	0 6.73	0 5.79	0 5
160	0,80	2,97	233.284.000	0 15.02	0 13.6	0 12.36	0 11.26	0 10.29	0 9.43	0 8.66	0 7.96	0 7.34	0 6.77	0 6.25	0 5.56	0 4.95	0 4.25	0 3.51	0 2.9	0 2.38
	0,95	2,99	252.801.000	0 18.57	0 16.91	0 15.41	0 14.08	0 12.91	0 11.87	0 10.94	0 10.1	0 9.34	0 8.66	0 8.03	0 7.2	0 6.46	0 5.62	0 4.73	0 3.99	0 3.36
	1,25	3,02	283.610.000	5 23.73	2 22.46	0 21.17	0 19.44	0 17.88	0 16.5	0 15.26	0 14.15	0 13.15	0 12.24	0 11.41	0 10.31	0 9.34	0 8.22	0 7.04	0 6.06	0 5.23
170	0,80	3,21	277.248.000	0 15.6	0 14.13	0 12.84	0 11.71	0 10.7	0 9.8	0 9	0 8.28	0 7.63	0 7.03	0 6.5	0 5.77	0 5.14	0 4.41	0 3.64	0 3	0 2.45
	0,95	3,23	300.255.000	0 19.25	0 17.55	0 15.99	0 14.62	0 13.41	0 12.33	0 11.36	0 10.49	0 9.71	0 9	0 8.35	0 7.48	0 6.72	0 5.84	0 4.91	0 4.14	0 3.49
	1,25	3,26	336.349.000	4 24.79	1 23.47	0 21.93	0 20.17	0 18.57	0 17.14	0 15.86	0 14.71	0 13.67	0 12.73	0 11.87	0 10.73	0 9.72	0 8.56	0 7.34	0 6.32	0 5.46
180	0,80	3,44	326.463.000	0 16.19	0 14.67	0 13.33	0 12.15	0 11.11	0 10.18	0 9.35	0 8.6	0 7.92	0 7.31	0 6.75	0 6	0 5.34	0 4.58	0 3.77	0 3.1	0 2.53
	0,95	3,46	353.362.000	0 19.92	0 18.17	0 16.58	0 15.17	0 13.91	0 12.8	0 11.79	0 10.89	0 10.08	0 9.34	0 8.67	0 7.77	0 6.98	0 6.07	0 5.1	0 4.3	0 3.62
	1,25	3,50	395.328.000	3 25.84	0 24.45	0 22.68	0 20.9	0 19.24	0 17.77	0 16.45	0 15.26	0 14.19	0 13.22	0 12.33	0 11.15	0 10.1	0 8.9	0 7.63	0 6.58	0 5.68
190	0,80	3,68	381.197.000	0 16.76	0 15.19	0 13.81	0 12.59	0 11.51	0 10.55	0 9.68	0 8.91	0 8.2	0 7.57	0 6.99	0 6.21	0 5.52	0 4.73	0 3.9	0 3.2	0 2.61
	0,95	3,70	412.395.000	0 20.59	0 18.78	0 17.16	0 15.7	0 14.4	0 13.25	0 12.21	0 11.28	0 10.44	0 9.68	0 8.98	0 8.05	0 7.23	0 6.28	0 5.28	0 4.45	0 3.74
	1,25	3,73	460.832.000	3 26.87	0 25.43	0 23.43	0 21.6	0 19.92	0 18.4	0 17.04	0 15.82	0 14.71	0 13.71	0 12.79	0 11.57	0 10.49	0 9.24	0 7.93	0 6.83	0 5.91
200	0,80	3,91	441.716.000	0 17.34	0 15.72	0 14.29	0 13.03	0 11.92	0 10.92	0 10.03	0 9.22	0 8.5	0 7.83	0 7.23	0 6.43	0 5.72	0 4.89	0 4.03	0 3.3	0 2.69
	0,95	3,93	477.627.000	0 21.26	0 19.39	0 17.74	0 16.23	0 14.9	0 13.71	0 12.64	0 11.68	0 10.81	0 10.02	0 9.3	0 8.33	0 7.48	0 6.5	0 5.47	0 4.6	0 3.87
	1,25	3,97	533.139.000	2 27.87	0 26.31	0 24.17	0 22.29	0 20.59	0 19.02	0 17.62	0 16.36	0 15.22	0 14.18	0 13.24	0 11.98	0 10.86	0 9.57	0 8.22	0 7.08	0 6.12

TABELA B.5 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 20% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 3 nervuras)

t (mm)	$\tau_{u,Red}$ (N/mm ²)	M _{pu} (Nmm/m)	N _c (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{id} (N/m)	A _{po} (mm ²)	b _o (mm)	τ_{Red} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	81,284	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	81,284	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	81,284	236				

Laje Mista com um STUD BOLT em cada nervura

h _t (mm)	t _r (mm)	w _c (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	5 17.26	0 16.33	0 14.99	0 13.66	0 12.48	0 11.44	0 10.51	0 9.68	0 8.93	0 8.26	0 7.65	0 6.83	0 6.12	0 5.3	0 4.45	0 3.75	0 3.16
	0,95	2,28	141.574.000	14 18.31	10 17.34	6 16.45	2 15.64	0 14.68	0 13.48	0 12.41	0 11.46	0 10.59	0 9.82	0 9.11	0 8.17	0 7.35	0 6.41	0 5.43	0 4.62	0 3.94
	1,25	2,32	159.948.000	29 20.4	24 19.32	19 18.35	15 17.45	11 16.64	7 15.88	4 15.19	1 14.55	0 13.7	0 12.73	0 11.85	0 10.68	0 9.65	0 8.48	0 7.25	0 6.24	0 5.39
140	0,80	2,50	160.025.000	6 18.41	2 17.42	0 16.22	0 14.79	0 13.52	0 12.4	0 11.4	0 10.5	0 9.7	0 8.97	0 8.31	0 7.43	0 6.66	0 5.78	0 4.86	0 4.09	0 3.45
	0,95	2,52	173.742.000	15 19.45	11 18.41	7 17.47	3 16.6	0 15.81	0 14.53	0 13.38	0 12.35	0 11.43	0 10.6	0 9.84	0 8.84	0 7.96	0 6.95	0 5.89	0 5.02	0 4.28
	1,25	2,55	195.703.000	30 21.53	25 20.39	21 19.36	16 18.41	13 17.55	9 16.75	6 16.01	2 15.33	0 14.7	0 13.68	0 12.75	0 11.5	0 10.4	0 9.15	0 7.84	0 6.75	0 5.84
150	0,80	2,74	194.301.000	7 19.54	3 18.48	0 17.44	0 15.91	0 14.55	0 13.35	0 12.28	0 11.32	0 10.45	0 9.67	0 8.96	0 8.02	0 7.19	0 6.24	0 5.25	0 4.43	0 3.74
	0,95	2,75	210.723.000	16 20.58	12 19.47	8 18.47	4 17.56	1 16.72	0 15.57	0 14.35	0 13.26	0 12.28	0 11.39	0 10.58	0 9.5	0 8.56	0 7.48	0 6.35	0 5.42	0 4.63
	1,25	2,79	236.825.000	32 22.64	27 21.43	22 20.34	18 19.34	14 18.43	10 17.59	7 16.81	4 16.09	1 15.42	0 14.62	0 13.63	0 12.3	0 11.14	0 9.81	0 8.41	0 7.26	0 6.29
160	0,80	2,97	233.284.000	8 20.65	4 19.54	0 18.52	0 17.03	0 15.59	0 14.3	0 13.16	0 12.13	0 11.21	0 10.38	0 9.62	0 8.61	0 7.73	0 6.71	0 5.65	0 4.77	0 4.04
	0,95	2,99	252.801.000	18 21.67	13 20.51	9 19.45	5 18.48	2 17.6	0 16.61	0 15.32	0 14.15	0 13.11	0 12.16	0 11.3	0 10.16	0 9.16	0 8.01	0 6.8	0 5.81	0 4.97
	1,25	3,02	283.610.000	33 23.73	28 22.46	23 21.32	19 20.27	15 19.3	12 18.42	8 17.6	5 16.85	3 16.14	0 15.49	0 14.51	0 13.11	0 11.88	0 10.47	0 8.99	0 7.77	0 6.74
170	0,80	3,21	277.248.000	9 21.74	5 20.56	1 19.49	0 18.15	0 16.61	0 15.25	0 14.03	0 12.94	0 11.96	0 11.07	0 10.27	0 9.19	0 8.25	0 7.17	0 6.05	0 5.11	0 4.32
	0,95	3,23	300.255.000	19 22.75	14 21.52	10 20.41	6 19.39	3 18.46	0 17.6	0 16.27	0 15.04	0 13.94	0 12.93	0 12.03	0 10.81	0 9.75	0 8.53	0 7.25	0 6.19	0 5.3
	1,25	3,26	336.349.000	34 24.79	29 23.47	24 22.26	20 21.16	16 20.15	13 19.23	10 18.37	7 17.58	4 16.84	1 16.15	0 15.38	0 13.9	0 12.61	0 11.12	0 9.56	0 8.26	0 7.17
180	0,80	3,44	326.463.000	10 22.81	6 21.57	2 20.44	0 19.27	0 17.65	0 16.2	0 14.91	0 13.76	0 12.72	0 11.78	0 10.92	0 9.79	0 8.79	0 7.64	0 6.44	0 5.45	0 4.61
	0,95	3,46	353.362.000	20 23.82	15 22.53	11 21.36	7 20.29	4 19.31	1 18.41	0 17.24	0 15.94	0 14.77	0 13.72	0 12.76	0 11.47	0 10.35	0 9.06	0 7.71	0 6.59	0 5.65
	1,25	3,50	395.328.000	35 25.84	30 24.45	26 23.19	21 22.04	18 20.99	14 20.02	11 19.12	8 18.29	5 17.52	3 16.8	0 16.13	0 14.69	0 13.33	0 11.76	0 10.12	0 8.76	0 7.61
190	0,80	3,68	381.197.000	11 23.86	7 22.56	3 21.37	0 20.3	0 18.67	0 17.14	0 15.78	0 14.56	0 13.47	0 12.47	0 11.57	0 10.37	0 9.31	0 8.1	0 6.83	0 5.78	0 4.9
	0,95	3,70	412.395.000	21 24.86	16 23.51	12 22.28	8 21.16	5 20.14	2 19.19	0 18.2	0 16.83	0 15.6	0 14.49	0 13.48	0 12.12	0 10.94	0 9.58	0 8.16	0 6.97	0 5.98
	1,25	3,73	460.832.000	36 26.87	31 25.43	27 24.11	23 22.91	19 21.81	15 20.8	12 19.87	9 19	6 18.2	4 17.45	1 16.75	0 15.49	0 14.06	0 12.42	0 10.69	0 9.26	0 8.05
200	0,80	3,91	441.716.000	12 24.89	8 23.53	4 22.29	1 21.17	0 19.7	0 18.09	0 16.66	0 15.38	0 14.22	0 13.18	0 12.23	0 10.96	0 9.85	0 8.57	0 7.23	0 6.12	0 5.19
	0,95	3,93	477.627.000	22 25.88	17 24.48	13 23.2	9 22.03	6 20.96	3 19.97	0 19.06	0 17.73	0 16.43	0 15.26	0 14.2	0 12.78	0 11.54	0 10.11	0 8.61	0 7.37	0 6.32
	1,25	3,97	533.139.000	37 27.87	32 26.37	28 25	24 23.75	20 22.61	17 21.56	13 20.59	10 19.69	8 18.85	5 18.07	3 17.35	0 16.28	0 14.78	0 13.06	0 11.25	0 9.75	0 8.48

TABELA B.6 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 30% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt em cada nervura)

t (mm)	$\tau_{u,Rd}$ (N/mm ²)	M _{pl,Rd} (Nmm/m)	N _{t,Rd} (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{td} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _s (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	40.642	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	40.642	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	40.642	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 2 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 15.11	0 13.66	0 12.4	0 11.3	0 10.32	0 9.46	0 8.68	0 7.99	0 7.37	0 6.8	0 6.29	0 5.61	0 5.01	0 4.32	0 3.6	0 3.01	0 2.51
	0,95	2,28	141.574.000	0 18.3	0 16.58	0 15.08	0 13.77	0 12.61	0 11.58	0 10.66	0 9.84	0 9.09	0 8.42	0 7.82	0 7.01	0 6.3	0 5.48	0 4.63	0 3.92	0 3.33
	1,25	2,32	159.948.000	17 20.4	12 19.32	8 18.35	4 17.45	1 16.64	0 15.56	0 14.36	0 13.29	0 12.33	0 11.46	0 10.67	0 9.61	0 8.69	0 7.63	0 6.53	0 5.61	0 4.84
140	0,80	2,50	160.025.000	0 16.03	0 14.5	0 13.17	0 12	0 10.97	0 10.06	0 9.24	0 8.5	0 7.84	0 7.24	0 6.7	0 5.97	0 5.34	0 4.61	0 3.84	0 3.21	0 2.68
	0,95	2,52	173.742.000	0 19.32	0 17.52	0 15.95	0 14.57	0 13.35	0 12.26	0 11.29	0 10.42	0 9.64	0 8.93	0 8.29	0 7.44	0 6.69	0 5.82	0 4.92	0 4.17	0 3.54
	1,25	2,55	195.703.000	16 21.53	12 20.39	8 19.36	4 18.41	1 17.55	0 16.44	0 15.18	0 14.06	0 13.05	0 12.14	0 11.31	0 10.2	0 9.23	0 8.11	0 6.95	0 5.98	0 5.16
150	0,80	2,74	194.301.000	0 16.93	0 15.33	0 13.93	0 12.7	0 11.61	0 10.64	0 9.78	0 9	0 8.3	0 7.67	0 7.1	0 6.33	0 5.66	0 4.88	0 4.07	0 3.4	0 2.83
	0,95	2,75	210.723.000	0 20.35	0 18.47	0 16.82	0 15.37	0 14.09	0 12.95	0 11.93	0 11.02	0 10.19	0 9.45	0 8.77	0 7.87	0 7.08	0 6.17	0 5.22	0 4.42	0 3.75
	1,25	2,79	236.825.000	16 22.64	12 21.43	8 20.34	4 19.34	1 18.43	0 17.3	0 15.99	0 14.81	0 13.76	0 12.8	0 11.93	0 10.77	0 9.75	0 8.58	0 7.35	0 6.33	0 5.48
160	0,80	2,97	233.284.000	0 17.84	0 16.16	0 14.69	0 13.4	0 12.25	0 11.23	0 10.32	0 9.51	0 8.77	0 8.11	0 7.5	0 6.69	0 5.98	0 5.16	0 4.31	0 3.6	0 3
	0,95	2,99	252.801.000	0 21.37	0 19.4	0 17.67	0 16.15	0 14.81	0 13.62	0 12.55	0 11.6	0 10.73	0 9.95	0 9.24	0 8.29	0 7.46	0 6.5	0 5.5	0 4.66	0 3.96
	1,25	3,02	283.610.000	16 23.73	12 22.46	8 21.32	4 20.27	1 19.3	0 18.16	0 16.79	0 15.57	0 14.46	0 13.46	0 12.55	0 11.34	0 10.28	0 9.05	0 7.76	0 6.69	0 5.79
170	0,80	3,21	277.248.000	0 18.75	0 16.98	0 15.44	0 14.08	0 12.88	0 11.81	0 10.86	0 10	0 9.23	0 8.53	0 7.89	0 7.04	0 6.3	0 5.44	0 4.53	0 3.78	0 3.15
	0,95	3,23	300.255.000	0 22.38	0 20.32	0 18.52	0 16.94	0 15.54	0 14.29	0 13.17	0 12.17	0 11.27	0 10.45	0 9.71	0 8.71	0 7.84	0 6.83	0 5.78	0 4.9	0 4.16
	1,25	3,26	336.349.000	16 24.79	12 23.47	8 22.26	5 21.16	1 20.15	0 19.01	0 17.58	0 16.31	0 15.16	0 14.11	0 13.17	0 11.9	0 10.79	0 9.5	0 8.16	0 7.04	0 6.09
180	0,80	3,44	326.463.000	0 19.65	0 17.81	0 16.2	0 14.78	0 13.52	0 12.4	0 11.4	0 10.5	0 9.69	0 8.96	0 8.29	0 7.4	0 6.62	0 5.71	0 4.77	0 3.97	0 3.31
	0,95	3,46	353.362.000	0 23.4	0 21.26	0 19.38	0 17.73	0 16.27	0 14.96	0 13.8	0 12.75	0 11.81	0 10.95	0 10.18	0 9.14	0 8.23	0 7.17	0 6.07	0 5.15	0 4.37
	1,25	3,50	395.328.000	16 25.84	12 24.45	8 23.19	5 22.04	2 20.99	0 19.85	0 18.37	0 17.04	0 15.84	0 14.76	0 13.77	0 12.45	0 11.29	0 9.96	0 8.55	0 7.38	0 6.39
190	0,80	3,68	381.197.000	0 20.55	0 18.62	0 16.94	0 15.46	0 14.15	0 12.98	0 11.93	0 10.99	0 10.15	0 9.38	0 8.68	0 7.75	0 6.93	0 5.98	0 4.99	0 4.16	0 3.46
	0,95	3,70	412.395.000	0 24.41	0 22.18	0 20.23	0 18.51	0 16.98	0 15.63	0 14.41	0 13.32	0 12.34	0 11.45	0 10.64	0 9.55	0 8.6	0 7.5	0 6.35	0 5.38	0 4.57
	1,25	3,73	460.832.000	16 26.87	12 25.43	8 24.11	5 22.91	2 21.81	0 20.7	0 19.16	0 17.78	0 16.54	0 15.41	0 14.38	0 13.01	0 11.8	0 10.41	0 8.95	0 7.73	0 6.7
200	0,80	3,91	441.716.000	0 21.45	0 19.45	0 17.69	0 16.15	0 14.78	0 13.56	0 12.47	0 11.49	0 10.61	0 9.81	0 9.08	0 8.1	0 7.24	0 6.26	0 5.22	0 4.35	0 3.62
	0,95	3,93	477.627.000	0 25.43	0 23.11	0 21.08	0 19.29	0 17.71	0 16.3	0 15.04	0 13.9	0 12.88	0 11.95	0 11.1	0 9.97	0 8.98	0 7.83	0 6.63	0 5.62	0 4.78
	1,25	3,97	533.139.000	16 27.87	12 26.37	8 25	5 23.75	2 22.61	0 21.53	0 19.94	0 18.51	0 17.22	0 16.05	0 14.98	0 13.56	0 12.3	0 10.86	0 9.34	0 8.06	0 6.99

TABELA B.7 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 30% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 2 nervuras)

t (mm)	$\tau_{u,rd}$ (N/mm ²)	M _{pl,R} (Nmm/m)	N _c (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{td} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _o (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	27.094	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	27.094	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	27.094	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 3 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{ed} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w ₀ (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 13.99	0 12.66	0 11.49	0 10.46	0 9.56	0 8.75	0 8.03	0 7.39	0 6.81	0 6.28	0 5.81	0 5.17	0 4.61	0 3.97	0 3.3	0 2.74	0 2.27
	0,95	2,28	141.574.000	0 17.23	0 15.61	0 14.21	0 12.97	0 11.88	0 10.91	0 10.04	0 9.26	0 8.56	0 7.93	0 7.36	0 6.59	0 5.92	0 5.15	0 4.34	0 3.67	0 3.11
	1,25	2,32	159.948.000	12 20.4	8 19.32	4 18.35	1 17.45	0 16.22	0 14.94	0 13.8	0 12.77	0 11.84	0 11.01	0 10.25	0 9.24	0 8.35	0 7.33	0 6.27	0 5.38	0 4.64
140	0,80	2,50	160.025.000	0 14.72	0 13.32	0 12.1	0 11.03	0 10.07	0 9.23	0 8.47	0 7.8	0 7.19	0 6.63	0 6.13	0 5.46	0 4.87	0 4.19	0 3.49	0 2.89	0 2.4
	0,95	2,52	173.742.000	0 18.07	0 16.38	0 14.91	0 13.62	0 12.48	0 11.47	0 10.56	0 9.75	0 9.01	0 8.35	0 7.75	0 6.94	0 6.24	0 5.43	0 4.58	0 3.87	0 3.27
	1,25	2,55	195.703.000	11 21.53	7 20.39	4 19.36	0 18.41	0 17.03	0 15.7	0 14.5	0 13.43	0 12.47	0 11.59	0 10.8	0 9.74	0 8.82	0 7.75	0 6.63	0 5.7	0 4.92
150	0,80	2,74	194.301.000	0 15.44	0 13.98	0 12.7	0 11.57	0 10.58	0 9.69	0 8.9	0 8.19	0 7.55	0 6.97	0 6.44	0 5.74	0 5.12	0 4.4	0 3.66	0 3.03	0 2.51
	0,95	2,75	210.723.000	0 18.91	0 17.16	0 15.63	0 14.28	0 13.09	0 12.03	0 11.08	0 10.23	0 9.47	0 8.77	0 8.14	0 7.3	0 6.56	0 5.71	0 4.81	0 4.07	0 3.45
	1,25	2,79	236.825.000	11 22.64	7 21.43	3 20.34	0 19.34	0 17.82	0 16.43	0 15.19	0 14.08	0 13.07	0 12.16	0 11.34	0 10.23	0 9.27	0 8.15	0 6.98	0 6.01	0 5.19
160	0,80	2,97	233.284.000	0 16.16	0 14.64	0 13.3	0 12.13	0 11.09	0 10.16	0 9.33	0 8.59	0 7.92	0 7.31	0 6.76	0 6.02	0 5.37	0 4.62	0 3.84	0 3.18	0 2.63
	0,95	2,99	252.801.000	0 19.74	0 17.92	0 16.32	0 14.92	0 13.68	0 12.58	0 11.59	0 10.7	0 9.9	0 9.18	0 8.52	0 7.64	0 6.87	0 5.98	0 5.04	0 4.26	0 3.6
	1,25	3,02	283.610.000	10 23.73	6 22.46	3 21.32	0 20.23	0 18.61	0 17.17	0 15.88	0 14.72	0 13.68	0 12.73	0 11.87	0 10.72	0 9.72	0 8.55	0 7.33	0 6.32	0 5.46
170	0,80	3,21	277.248.000	0 16.87	0 15.28	0 13.89	0 12.67	0 11.58	0 10.62	0 9.75	0 8.98	0 8.27	0 7.64	0 7.06	0 6.29	0 5.61	0 4.83	0 4	0 3.31	0 2.73
	0,95	3,23	300.255.000	0 20.56	0 18.67	0 17.02	0 15.56	0 14.27	0 13.12	0 12.1	0 11.17	0 10.34	0 9.58	0 8.9	0 7.98	0 7.17	0 6.24	0 5.26	0 4.45	0 3.76
	1,25	3,26	336.349.000	9 24.79	6 23.47	2 22.26	0 21.06	0 19.39	0 17.89	0 16.56	0 15.36	0 14.27	0 13.29	0 12.4	0 11.2	0 10.15	0 8.94	0 7.67	0 6.61	0 5.72
180	0,80	3,44	326.463.000	0 17.59	0 15.94	0 14.49	0 13.22	0 12.09	0 11.08	0 10.18	0 9.37	0 8.64	0 7.98	0 7.37	0 6.57	0 5.86	0 5.04	0 4.18	0 3.46	0 2.85
	0,95	3,46	353.362.000	0 21.39	0 19.43	0 17.71	0 16.2	0 14.86	0 13.67	0 12.61	0 11.65	0 10.78	0 10	0 9.28	0 8.32	0 7.48	0 6.51	0 5.49	0 4.64	0 3.92
	1,25	3,50	395.328.000	9 25.84	5 24.45	2 23.19	0 21.89	0 20.15	0 18.61	0 17.23	0 15.98	0 14.86	0 13.84	0 12.91	0 11.67	0 10.58	0 9.33	0 8	0 6.9	0 5.97
190	0,80	3,68	381.197.000	0 18.29	0 16.58	0 15.08	0 13.75	0 12.58	0 11.53	0 10.59	0 9.75	0 8.99	0 8.3	0 7.67	0 6.83	0 6.09	0 5.24	0 4.34	0 3.59	0 2.95
	0,95	3,70	412.395.000	0 22.2	0 20.17	0 18.4	0 16.83	0 15.45	0 14.21	0 13.1	0 12.11	0 11.21	0 10.39	0 9.65	0 8.66	0 7.78	0 6.77	0 5.71	0 4.83	0 4.08
	1,25	3,73	460.832.000	9 26.87	5 25.43	2 24.11	0 22.72	0 20.93	0 19.33	0 17.9	0 16.61	0 15.45	0 14.4	0 13.44	0 12.15	0 11.02	0 9.72	0 8.34	0 7.2	0 6.23
200	0,80	3,91	441.716.000	0 19	0 17.23	0 15.67	0 14.29	0 13.08	0 11.99	0 11.02	0 10.14	0 9.35	0 8.63	0 7.98	0 7.11	0 6.34	0 5.45	0 4.51	0 3.73	0 3.06
	0,95	3,93	477.627.000	0 23.02	0 20.92	0 19.09	0 17.47	0 16.03	0 14.75	0 13.61	0 12.58	0 11.64	0 10.8	0 10.03	0 9	0 8.09	0 7.04	0 5.94	0 5.02	0 4.24
	1,25	3,97	533.139.000	8 27.87	5 26.37	2 25	0 23.53	0 21.68	0 20.04	0 18.56	0 17.23	0 16.03	0 14.94	0 13.94	0 12.61	0 11.45	0 10.09	0 8.67	0 7.48	0 6.47

TABELA B.8 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 30% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 3 nervuras)

t (mm)	$\tau_{u,red}$ (N/mm ²)	M _{pl,R} (Nmm/m)	N _{c,R} (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{Ed} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _c (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	108.379	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	108.379	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	108.379	236				

Laje Mista com um STUD BOLT em cada nervura

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	15 17.26	10 16.33	6 15.5	2 14.73	0 13.82	0 12.67	0 11.64	0 10.72	0 9.9	0 9.15	0 8.48	0 7.58	0 6.8	0 5.9	0 4.97	0 4.2	0 3.55
	0,95	2,28	141.574.000	23 18.31	18 17.34	14 16.45	10 15.64	6 14.9	2 14.22	0 13.5	0 12.46	0 11.52	0 10.68	0 9.91	0 8.89	0 8.01	0 6.99	0 5.93	0 5.05	0 4.32
	1,25	2,32	159.948.000	37 20.4	31 19.32	26 18.35	22 17.45	17 16.64	13 15.88	10 15.19	6 14.55	3 13.95	0 13.39	0 12.58	0 11.33	0 10.25	0 9	0 7.7	0 6.62	0 5.72
140	0,80	2,50	160.025.000	17 18.41	12 17.42	8 16.53	4 15.71	0 14.95	0 13.86	0 12.75	0 11.75	0 10.85	0 10.04	0 9.31	0 8.33	0 7.48	0 6.5	0 5.48	0 4.64	0 3.93
	0,95	2,52	173.742.000	26 19.45	21 18.41	16 17.47	12 16.6	8 15.81	4 15.09	1 14.42	0 13.56	0 12.55	0 11.64	0 10.81	0 9.71	0 8.75	0 7.64	0 6.49	0 5.54	0 4.74
	1,25	2,55	195.703.000	39 21.53	34 20.39	29 19.36	24 18.41	20 17.55	16 16.75	12 16.01	9 15.33	6 14.7	3 14.11	0 13.56	0 12.31	0 11.14	0 9.79	0 8.39	0 7.24	0 6.26
150	0,80	2,74	194.301.000	19 19.54	14 18.48	10 17.53	6 16.65	2 15.85	0 15.05	0 13.84	0 12.76	0 11.8	0 10.92	0 10.13	0 9.07	0 8.15	0 7.09	0 5.98	0 5.07	0 4.31
	0,95	2,75	210.723.000	28 20.58	23 19.47	18 18.47	14 17.56	10 16.72	6 15.95	3 15.23	0 14.57	0 13.58	0 12.6	0 11.71	0 10.53	0 9.49	0 8.3	0 7.06	0 6.04	0 5.18
	1,25	2,79	236.825.000	42 22.64	36 21.43	31 20.34	26 19.34	22 18.43	18 17.59	14 16.81	11 16.09	8 15.42	5 14.8	2 14.22	0 13.26	0 12.01	0 10.58	0 9.08	0 7.84	0 6.8
160	0,80	2,97	233.284.000	21 20.65	16 19.54	12 18.52	8 17.6	4 16.75	1 15.97	0 14.95	0 13.79	0 12.75	0 11.81	0 10.95	0 9.82	0 8.82	0 7.68	0 6.5	0 5.51	0 4.69
	0,95	2,99	252.801.000	30 21.67	25 20.51	20 19.45	16 18.48	12 17.6	8 16.78	5 16.03	2 15.33	0 14.61	0 13.55	0 12.61	0 11.34	0 10.23	0 8.95	0 7.63	0 6.52	0 5.6
	1,25	3,02	283.610.000	44 23.73	38 22.46	33 21.32	28 20.27	24 19.3	20 18.42	17 17.6	13 16.85	10 16.14	7 15.49	4 14.88	1 14.04	0 12.89	0 11.36	0 9.77	0 8.44	0 7.33
170	0,80	3,21	277.248.000	23 21.74	18 20.58	14 19.49	10 18.51	6 17.61	3 16.79	0 16.03	0 14.8	0 13.69	0 12.68	0 11.77	0 10.55	0 9.49	0 8.27	0 7	0 5.94	0 5.06
	0,95	3,23	300.255.000	32 22.75	26 21.52	22 20.41	18 19.39	14 18.46	10 17.6	7 16.8	4 16.07	1 15.39	0 14.51	0 13.5	0 12.14	0 10.96	0 9.6	0 8.18	0 7.01	0 6.02
	1,25	3,26	336.349.000	46 24.79	40 23.47	35 22.26	30 21.16	26 20.15	22 19.23	19 18.37	15 17.58	12 16.84	9 16.15	6 15.51	3 14.63	0 13.76	0 12.14	0 10.44	0 9.04	0 7.86
180	0,80	3,44	326.463.000	25 22.81	20 21.57	16 20.44	11 19.42	8 18.47	4 17.61	1 16.8	0 15.82	0 14.64	0 13.56	0 12.59	0 11.3	0 10.16	0 8.86	0 7.5	0 6.38	0 5.43
	0,95	3,46	353.362.000	33 23.82	28 22.53	24 21.36	19 20.29	15 19.31	12 18.41	8 17.58	5 16.81	2 16.09	0 15.42	0 14.39	0 12.96	0 11.7	0 10.26	0 8.75	0 7.5	0 6.45
	1,25	3,50	395.328.000	47 25.84	42 24.45	37 23.19	32 22.04	28 20.99	24 20.02	20 19.12	17 18.29	14 17.52	11 16.8	8 16.13	4 15.21	1 14.37	0 12.91	0 11.12	0 9.63	0 8.38
190	0,80	3,68	381.197.000	27 23.86	22 22.56	17 21.37	13 20.3	9 19.31	6 18.4	3 17.56	0 16.78	0 15.58	0 14.44	0 13.41	0 12.03	0 10.83	0 9.45	0 8	0 6.81	0 5.8
	0,95	3,70	412.395.000	35 24.86	30 23.51	25 22.28	21 21.16	17 20.14	13 19.19	10 18.32	7 17.52	4 16.77	1 16.07	0 15.28	0 13.76	0 12.43	0 10.9	0 9.31	0 7.98	0 6.87
	1,25	3,73	460.832.000	49 26.87	44 25.43	39 24.11	34 22.91	30 21.81	26 20.8	22 19.87	19 19	16 18.2	13 17.45	10 16.75	6 15.79	3 14.91	0 13.69	0 11.8	0 10.23	0 8.91
200	0,80	3,91	441.716.000	28 24.89	23 23.53	19 22.29	15 21.17	11 20.13	7 19.18	4 18.3	1 17.49	0 16.52	0 15.32	0 14.23	0 12.77	0 11.5	0 10.04	0 8.51	0 7.24	0 6.18
	0,95	3,93	477.627.000	37 25.88	32 24.48	27 23.2	22 22.03	19 20.96	15 19.97	12 19.06	8 18.22	5 17.44	3 16.71	0 16.03	0 14.57	0 13.17	0 11.56	0 9.87	0 8.47	0 7.3
	1,25	3,97	533.139.000	51 27.87	45 26.37	40 25	36 23.75	31 22.61	28 21.56	24 20.59	20 19.69	17 18.85	14 18.07	12 17.35	8 16.34	4 15.43	0 14.34	0 12.47	0 10.82	0 9.42

TABELA B.9 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt em cada nervura)

t (mm)	$\tau_{u,rd}$ (N/mm ²)	M _{ps} (Nmm/m)	N _{cs} (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{id} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _c (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	54.189	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	54.189	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	54.189	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 2 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _c (kN/m ²)	I _{cd} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w ₀ (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 16.19	0 14.64	0 13.29	0 12.11	0 11.07	0 10.14	0 9.31	0 8.57	0 7.91	0 7.3	0 6.76	0 6.03	0 5.39	0 4.66	0 3.9	0 3.26	0 2.73
	0,95	2,28	141.574.000	5 18.31	0 17.34	0 15.94	0 14.55	0 13.32	0 12.23	0 11.26	0 10.39	0 9.61	0 8.9	0 8.26	0 7.41	0 6.66	0 5.8	0 4.91	0 4.16	0 3.54
	1,25	2,32	159.948.000	21 20.4	16 19.32	12 18.35	8 17.45	4 16.64	1 15.88	0 14.92	0 13.8	0 12.8	0 11.9	0 11.07	0 9.98	0 9.02	0 7.92	0 6.78	0 5.82	0 5.03
140	0,80	2,50	160.025.000	0 17.29	0 15.65	0 14.22	0 12.96	0 11.85	0 10.86	0 9.98	0 9.19	0 8.48	0 7.83	0 7.25	0 6.47	0 5.79	0 5.01	0 4.19	0 3.51	0 2.94
	0,95	2,52	173.742.000	5 19.45	1 18.41	0 16.96	0 15.49	0 14.19	0 13.03	0 12.01	0 11.08	0 10.25	0 9.5	0 8.82	0 7.91	0 7.12	0 6.21	0 5.25	0 4.46	0 3.79
	1,25	2,55	195.703.000	21 21.53	17 20.39	12 19.36	8 18.41	5 17.55	2 16.75	0 15.85	0 14.68	0 13.62	0 12.67	0 11.8	0 10.64	0 9.63	0 8.47	0 7.25	0 6.25	0 5.4
150	0,80	2,74	194.301.000	0 18.39	0 16.65	0 15.13	0 13.79	0 12.61	0 11.57	0 10.63	0 9.79	0 9.04	0 8.35	0 7.73	0 6.91	0 6.18	0 5.35	0 4.48	0 3.75	0 3.14
	0,95	2,75	210.723.000	5 20.58	1 19.47	0 17.98	0 16.43	0 15.06	0 13.84	0 12.76	0 11.78	0 10.9	0 10.11	0 9.39	0 8.43	0 7.59	0 6.62	0 5.6	0 4.76	0 4.06
	1,25	2,79	236.825.000	21 22.64	17 21.43	13 20.34	9 19.34	5 18.43	2 17.59	0 16.77	0 15.53	0 14.42	0 13.42	0 12.51	0 11.29	0 10.23	0 9	0 7.72	0 6.65	0 5.75
160	0,80	2,97	233.284.000	0 19.49	0 17.65	0 16.05	0 14.64	0 13.39	0 12.28	0 11.29	0 10.4	0 9.6	0 8.88	0 8.22	0 7.35	0 6.58	0 5.69	0 4.77	0 4	0 3.35
	0,95	2,99	252.801.000	5 21.67	1 20.51	0 18.99	0 17.36	0 15.92	0 14.64	0 13.49	0 12.47	0 11.54	0 10.7	0 9.94	0 8.93	0 8.04	0 7.02	0 5.95	0 5.05	0 4.3
	1,25	3,02	283.610.000	22 23.73	17 22.46	13 21.32	9 20.27	6 19.3	3 18.42	0 17.6	0 16.39	0 15.23	0 14.18	0 13.22	0 11.94	0 10.82	0 9.53	0 8.18	0 7.06	0 6.11
170	0,80	3,21	277.248.000	0 20.58	0 18.64	0 16.95	0 15.47	0 14.15	0 12.98	0 11.94	0 11	0 10.16	0 9.4	0 8.7	0 7.78	0 6.96	0 6.03	0 5.05	0 4.24	0 3.55
	0,95	3,23	300.255.000	5 22.75	1 21.52	0 20	0 18.29	0 16.78	0 15.43	0 14.23	0 13.15	0 12.18	0 11.3	0 10.5	0 9.43	0 8.49	0 7.41	0 6.28	0 5.34	0 4.55
	1,25	3,26	336.349.000	22 24.79	18 23.47	14 22.26	10 21.16	7 20.15	3 19.23	1 18.37	0 17.24	0 16.02	0 14.92	0 13.92	0 12.58	0 11.41	0 10.05	0 8.64	0 7.46	0 6.46
180	0,80	3,44	326.463.000	0 21.67	0 19.64	0 17.87	0 16.3	0 14.92	0 13.69	0 12.6	0 11.61	0 10.72	0 9.92	0 9.19	0 8.21	0 7.36	0 6.37	0 5.34	0 4.48	0 3.75
	0,95	3,46	353.362.000	5 23.82	2 22.53	0 21.02	0 19.22	0 17.64	0 16.23	0 14.97	0 13.84	0 12.82	0 11.89	0 11.05	0 9.93	0 8.95	0 7.82	0 6.63	0 5.64	0 4.81
	1,25	3,50	395.328.000	22 25.84	18 24.45	14 23.19	10 22.04	7 20.99	4 20.02	1 19.12	0 18.08	0 16.81	0 15.66	0 14.61	0 13.21	0 11.99	0 10.57	0 9.09	0 7.85	0 6.81
190	0,80	3,68	381.197.000	0 22.76	0 20.63	0 18.77	0 17.13	0 15.68	0 14.39	0 13.24	0 12.21	0 11.28	0 10.43	0 9.66	0 8.64	0 7.74	0 6.7	0 5.62	0 4.71	0 3.95
	0,95	3,70	412.395.000	6 24.86	2 23.51	0 22.02	0 20.15	0 18.49	0 17.02	0 15.7	0 14.51	0 13.45	0 12.48	0 11.6	0 10.43	0 9.4	0 8.21	0 6.96	0 5.92	0 5.05
	1,25	3,73	460.832.000	23 26.87	18 25.43	14 24.11	11 22.91	8 21.81	5 20.8	2 19.87	0 18.93	0 17.61	0 16.4	0 15.31	0 13.85	0 12.57	0 11.09	0 9.54	0 8.25	0 7.16
200	0,80	3,91	441.716.000	0 23.85	0 21.63	0 19.68	0 17.97	0 16.45	0 15.1	0 13.9	0 12.81	0 11.84	0 10.95	0 10.15	0 9.07	0 8.13	0 7.04	0 5.9	0 4.95	0 4.15
	0,95	3,93	477.627.000	6 25.88	2 24.48	0 23.03	0 21.08	0 19.35	0 17.81	0 16.44	0 15.2	0 14.08	0 13.07	0 12.16	0 10.93	0 9.85	0 8.61	0 7.31	0 6.22	0 5.3
	1,25	3,97	533.139.000	23 27.87	19 26.37	15 25	11 23.75	8 22.61	5 21.56	2 20.59	0 19.69	0 18.39	0 17.14	0 16	0 14.48	0 13.15	0 11.6	0 9.99	0 8.64	0 7.5

TABELA B.10 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 2 nervuras)

t (mm)	$\tau_{u,red}$ (N/mm ²)	M _{pl} (Nmm/m)	N _c (N/m)	f _{ck} (N/mm ²)	e (mm)	e _p (mm)	V _{id} (N/m)	A _{ps} (mm ²)	b _o (mm)	τ_{Rd} (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	γ_c
0,80	0,049	5.841.500	275.418	20	37,49	33,88	36.126	148	137	0,25	22.084	1,5
0,95	0,059	7.462.800	334.727		37,57	34,80	36.126	177				
1,25	0,078	10.493.200	438.327		37,72	35,88	36.126	236				

Laje Mista com um STUD BOLT a cada 3 nervuras

h _t (mm)	t _n (mm)	w _G (kN/m ²)	I _{ed} (mm ⁴ /m)	L (mm)																
				2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3150	3300	3500	3750	4000	4250
				w _Q (kN/m ²)																
130	0,80	2,27	130.180.000	0 14.74	0 13.33	0 12.1	0 11.02	0 10.07	0 9.22	0 8.47	0 7.79	0 7.18	0 6.63	0 6.13	0 5.46	0 4.88	0 4.21	0 3.5	0 2.92	0 2.43
	0,95	2,28	141.574.000	0 17.94	0 16.26	0 14.79	0 13.51	0 12.37	0 11.36	0 10.46	0 9.65	0 8.92	0 8.26	0 7.66	0 6.87	0 6.17	0 5.37	0 4.53	0 3.84	0 3.25
	1,25	2,32	159.948.000	15 20.4	11 19.32	7 18.35	3 17.45	0 16.64	0 15.36	0 14.18	0 13.12	0 12.17	0 11.31	0 10.53	0 9.49	0 8.58	0 7.53	0 6.44	0 5.53	0 4.77
140	0,80	2,50	160.025.000	0 15.59	0 14.11	0 12.82	0 11.68	0 10.68	0 9.78	0 8.98	0 8.27	0 7.62	0 7.04	0 6.51	0 5.8	0 5.19	0 4.47	0 3.73	0 3.11	0 2.58
	0,95	2,52	173.742.000	0 18.91	0 17.14	0 15.61	0 14.25	0 13.06	0 12	0 11.05	0 10.2	0 9.43	0 8.74	0 8.11	0 7.27	0 6.54	0 5.69	0 4.81	0 4.07	0 3.45
	1,25	2,55	195.703.000	15 21.53	10 20.39	7 19.36	3 18.41	0 17.55	0 16.19	0 14.96	0 13.85	0 12.86	0 11.96	0 11.14	0 10.05	0 9.09	0 7.99	0 6.84	0 5.89	0 5.08
150	0,80	2,74	194.301.000	0 16.44	0 14.88	0 13.52	0 12.33	0 11.27	0 10.33	0 9.49	0 8.73	0 8.05	0 7.44	0 6.88	0 6.13	0 5.48	0 4.73	0 3.94	0 3.28	0 2.73
	0,95	2,75	210.723.000	0 19.88	0 18.03	0 16.42	0 15.01	0 13.76	0 12.64	0 11.65	0 10.76	0 9.95	0 9.23	0 8.56	0 7.68	0 6.91	0 6.02	0 5.08	0 4.31	0 3.65
	1,25	2,79	236.825.000	14 22.64	10 21.43	6 20.34	3 19.34	0 18.43	0 17.01	0 15.72	0 14.57	0 13.53	0 12.59	0 11.73	0 10.59	0 9.59	0 8.44	0 7.23	0 6.23	0 5.38
160	0,80	2,97	233.284.000	0 17.29	0 15.66	0 14.23	0 12.98	0 11.87	0 10.88	0 10	0 9.2	0 8.49	0 7.84	0 7.25	0 6.47	0 5.78	0 4.99	0 4.15	0 3.46	0 2.87
	0,95	2,99	252.801.000	0 20.83	0 18.91	0 17.23	0 15.75	0 14.44	0 13.27	0 12.23	0 11.3	0 10.46	0 9.7	0 9	0 8.08	0 7.27	0 6.33	0 5.35	0 4.53	0 3.84
	1,25	3,02	283.610.000	14 23.73	10 22.46	6 21.32	3 20.27	0 19.3	0 17.83	0 16.49	0 15.29	0 14.2	0 13.22	0 12.33	0 11.14	0 10.09	0 8.89	0 7.62	0 6.57	0 5.68
170	0,80	3,21	277.248.000	0 18.13	0 16.42	0 14.93	0 13.61	0 12.45	0 11.42	0 10.49	0 9.66	0 8.91	0 8.23	0 7.62	0 6.79	0 6.07	0 5.23	0 4.36	0 3.63	0 3.01
	0,95	3,23	300.255.000	0 21.78	0 19.78	0 18.02	0 16.48	0 15.12	0 13.9	0 12.82	0 11.84	0 10.96	0 10.16	0 9.44	0 8.47	0 7.62	0 6.64	0 5.61	0 4.75	0 4.03
	1,25	3,26	336.349.000	14 24.79	10 23.47	6 22.26	3 21.16	0 20.15	0 18.64	0 17.24	0 15.99	0 14.86	0 13.84	0 12.91	0 11.67	0 10.58	0 9.32	0 8	0 6.9	0 5.97
180	0,80	3,44	326.463.000	0 18.97	0 17.19	0 15.63	0 14.26	0 13.05	0 11.96	0 11	0 10.13	0 9.34	0 8.63	0 7.99	0 7.12	0 6.37	0 5.49	0 4.57	0 3.8	0 3.16
	0,95	3,46	353.362.000	0 22.74	0 20.65	0 18.83	0 17.22	0 15.8	0 14.54	0 13.4	0 12.39	0 11.47	0 10.64	0 9.88	0 8.87	0 7.98	0 6.96	0 5.88	0 4.98	0 4.22
	1,25	3,50	395.328.000	13 25.84	10 24.45	6 23.19	3 22.04	0 20.99	0 19.44	0 17.99	0 16.69	0 15.52	0 14.45	0 13.49	0 12.19	0 11.06	0 9.75	0 8.37	0 7.22	0 6.25
190	0,80	3,68	381.197.000	0 19.8	0 17.95	0 16.32	0 14.89	0 13.63	0 12.5	0 11.49	0 10.58	0 9.76	0 9.02	0 8.35	0 7.44	0 6.65	0 5.73	0 4.77	0 3.97	0 3.29
	0,95	3,70	412.395.000	0 23.68	0 21.51	0 19.62	0 17.95	0 16.47	0 15.16	0 13.98	0 12.92	0 11.97	0 11.1	0 10.31	0 9.26	0 8.33	0 7.26	0 6.14	0 5.2	0 4.41
	1,25	3,73	460.832.000	13 26.87	10 25.43	6 24.11	3 22.91	0 21.81	0 20.24	0 18.74	0 17.39	0 16.18	0 15.07	0 14.07	0 12.73	0 11.55	0 10.18	0 8.75	0 7.55	0 6.54
200	0,80	3,91	441.716.000	0 20.64	0 18.71	0 17.02	0 15.54	0 14.22	0 13.04	0 11.99	0 11.05	0 10.19	0 9.42	0 8.72	0 7.77	0 6.94	0 5.99	0 4.98	0 4.14	0 3.43
	0,95	3,93	477.627.000	0 24.63	0 22.38	0 20.42	0 18.69	0 17.15	0 15.79	0 14.56	0 13.46	0 12.47	0 11.57	0 10.75	0 9.65	0 8.69	0 7.57	0 6.4	0 5.42	0 4.6
	1,25	3,97	533.139.000	13 27.87	10 26.37	6 25	3 23.75	0 22.61	0 21.03	0 19.48	0 18.08	0 16.82	0 15.68	0 14.64	0 13.24	0 12.02	0 10.6	0 9.12	0 7.87	0 6.82

TABELA B.11 – Resistência da laje mista com ancoragem de extremidade - 40% de $C_{red,\ell} \cdot q_n$ (1 stud bolt a cada 3 nervuras)