

TIAGO FERREIRA ALBRECHT

ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO E
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS
MISTAS DE AÇO E CONCRETO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiæ*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

A341a
2010 Albrecht, Tiago Ferreira. 1980-
Ábacos de pré-dimensionamento e avaliação do comporta-
mento de vigas mistas de aço e concreto / Tiago Ferreira
Albrecht. – Viçosa, MG, 2010.
xv, 199p. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: José Luiz Rangel Paes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: p. 141-142.

1. Vigas. 2. Ábaco. 3. Construção mista. 4. Otimização
estrutural. 5. Projeto estrutural. 6. Construção metálica.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 624.171

TIAGO FERREIRA ALBRECHT

ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiæ*.

APROVADA: 20 de agosto de 2010.


Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga
(Coorientadora)


Gustavo de Souza Veríssimo
(Coorientador)


Márcio Sampaio Surmet Moreira


Ricardo Hallal Fakury


José Luiz Rangel Paes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus,
a Ele seja dada toda a honra e toda a glória,

ao Professor José Luiz pela dedicação no desenvolvimento dessa dissertação, sempre disposto a se aprofundar e fazer parte de cada etapa do processo. E além desse empenho agradeço pela amizade compartilhada durante esses anos de trabalhos desde a COPEVE, o ingresso no mestrado, os projetos do REUNI, o Laboratório de Engenharia Civil, aos ábacos apresentados aqui,

ao Professor Gustavo pela disposição e participação nas discussões dos pontos críticos da dissertação, pelos conselhos e pela amizade,

ao Departamento de Engenharia Civil, incluindo todos os professores que desde a graduação auxiliaram na minha formação de Engenheiro Civil,

à Universidade Federal de Viçosa,

à CAPES e ao Programa REUNI pelo provimento do recurso financeiro e pela oportunidade de trabalhar no desenvolvimento dos projetos de expansão da UFV,

aos Professores que tive oportunidade de conviver durante o mestrado, Márcio Sampaio, Reginaldo Carneiro, Rita de Cássia, Enivaldo Minette, Antonio Cleber Tibiriça, Carlos Alexandre, Aline Werneck, José Maria, José Carlos,

aos amigos do Mestrado em Engenharia Civil André Araujo, Maila Pereira, Carlos Augusto, Gustavo Irala, Marcio, Alex, Luiza Batista, Juliano, Eliane e Washigton,

ao grupo de convivência, Andréa, Guilherme, Cristiane, André, Luiza, Damares, Lucas,

aos meus Tios que me acolheram em Viçosa, Tio Nem, Tia Karla, Tia Cau, Tia Zara, Tia Culada, Tia Angela e minha madrinha Tia Rita,

às minhas irmãs, Clarissa e Maria Cecília que sempre me incentivaram,

aos meus pais, Kurt e Joana pelo apoio integral e incondicional na minha formação e para que fosse concluído o mestrado,

e à minha namorada (quando entrei no mestrado), minha noiva (durante o mestrado) e minha esposa (casamos 3 meses antes da defesa), por apoiar as minhas atividades com muito carinho e atenção, Acácia.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações preliminares	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Justificativa e relevância do tema	6
1.4 Estrutura da Dissertação.....	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 Generalidades sobre vigas mistas	10
2.2 Dimensionamento de vigas mistas segundo a ABNT NBR 8800:2008.....	14
2.2.1 Ações e combinações de ações	16
2.2.2 Largura efetiva	18
2.2.3 Conectores de cisalhamento.....	19
2.2.4 Verificação do momento fletor resistente (Estado-Limite Último)	22
2.2.4.1 Momento fletor resistente para interação completa, LNP na laje de concreto	22
2.2.4.2 Momento fletor resistente para interação completa, LNP no perfil metálico	23
2.2.4.3 Momento fletor resistente para interação parcial	24
2.2.5 Verificação ao Esforço Cortante (Estado-Limite Último)	24
2.2.6 Cisalhamento da laje e a armadura de costura	24
2.2.7 Verificação dos deslocamentos máximos (Estado-Limite de Serviço).....	27
2.2.7.1 Contraflecha	32
2.3 Ábacos e Tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas	33
3 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DOS ÁBACOS DE PRÉ- DIMENSIONAMENTO.....	40
3.1 Princípios para o desenvolvimento dos ábacos de pré-dimensionamento	41
3.2 Parâmetros considerados na geração dos ábacos	42

3.3 Vigas Secundárias	43
3.3.1 Curvas para construção escorada	43
3.3.1.1 Curvas para interação completa	43
A Curvas para estado-limite último	43
B Curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos.....	47
C Curva de Pré-dimensionamento da viga mista	56
3.3.1.2 Curvas para interação parcial	60
3.3.2 Curvas para construção não-escorada	61
3.3.2.1 Curvas para interação completa	61
A Curvas para estado-limite último	62
B Curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos.....	66
C Curva de Pré-dimensionamento da viga mista	70
3.3.2.2 Curvas para interação parcial	73
3.4 Vigas principais.....	73

4 ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO – IMPLEMENTAÇÃO E DISCUSSÃO.....	79
4.1 Considerações preliminares	80
4.2 Ferramenta de desenvolvimento das rotinas de cálculo.....	81
4.3 Implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas secundárias.....	83
4.3.1 Ábacos para construção escorada e interação completa	83
4.3.2 Ábacos para construção não-escorada e interação completa	85
4.4 Implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas principais.....	89
4.4.1 Ábacos para construção escorada e interação completa	89
4.4.2 Ábacos para construção não-escorada e interação completa	93
4.5 Exemplos de aplicação dos ábacos de pré-dimensionamento.....	97
4.6 Aspectos do comportamento de vigas mistas observados com auxílio dos ábacos de pré-dimensionamento	104
4.6.1 Influência da tipologia construtiva considerando diferentes critérios de deslocamento máximo admissível	104
4.6.2 Influência dos critérios de deslocamento máximo admissível.....	108
4.6.3 Influência da variação da carga sobreposta máxima.....	112
4.6.3.1 Construção escorada.....	112
4.6.3.2 Construção não-escorada.....	114
4.6.4 Influência da variação dos parâmetros de dimensionamento ligados à laje	116
4.6.4.1 Influência da variação da espessura da laje de concreto	117
4.6.4.2 Influência da variação da resistência característica à compressão do concreto	123

4.6.5	Influência da variação do grau de interação.....	125
4.6.5.1	Construção escorada.....	125
4.6.5.2	Construção não-escorada.....	127
4.6.6	Influência dos parâmetros de dimensionamento relacionados ao perfil de aço	129
4.6.6.1	Influência da variação da altura do perfil de aço	129
4.6.6.2	Influência da variação do peso de um perfil de aço de mesma altura.....	131
4.6.6.3	Influência da variação da resistência ao escoamento do aço do perfil.....	133
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	136
5.1	Conclusões	138
5.1.1	Ábacos de pré-dimensionamento	138
5.1.2	Avaliação do comportamento de vigas mistas.....	139
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	141
6	APÊNDICE A – ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS	145
7	APÊNDICE B – ÍNDICE DA ROTINA DE CÁLCULO IMPLEMENTADA NO MATHCAD.....	185
8	ANEXO A – LISTA DE PERFIS	198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo o Steel Design Guide nº 3 do AISC (FISHER e GRIFFIS, 2004).	29
Tabela 2 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo a ANSI/AISC 360-05 (AISC, 2005).	30
Tabela 3 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo a versão experimental do Eurocódigo 3 (ENV-1993-1-1, 1992).	30
Tabela 4 - Pares que definem a Curva de Resistência.	46
Tabela 5 – Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo	52
Tabela 6 - Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo	55
Tabela 7 – Pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento	57
Tabela 8 – Pares que definem a Curva de Resistência	66
Tabela 9 – Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo	69
Tabela 10 – Pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento.	72
Tabela 11 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com uma viga secundária apoiada na viga principal	75
Tabela 12 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com duas viga secundárias apoiadas na viga principal	76
Tabela 13 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com três viga secundárias apoiadas sobre a viga principal	77
Tabela 14 - Características do projeto	98

Tabela 15 – Grupos de vigas	98
Tabela 16 – Valores de g_{par} , g_{rev} , g_{forro} , q_{sc} e q_{csm} para os grupos de vigas.....	100
Tabela 17 –Perfis pré-dimensionados para as vigas secundárias.	102
Tabela 18 - Perfis pré-dimensionados para as vigas principais.....	103
Tabela 19 - Critérios de limites de deslocamento máximo admissível.	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de uma viga mista destacada a partir de um sistema de piso.	3
Figura 2 - Arranjo típico de um sistema de piso de um edifício de múltiplos andares em estrutura metálica, com disposição de vigas secundárias e principais.....	4
Figura 3 - (a) Interação Completa; (b) Interação Parcial (adaptado de Paes e Mirambell, 2004).	13
Figura 4 - Macro-fluxograma do resumo do processo de cálculo de vigas mistas.....	15
Figura 5 - Distribuição de tensões na laje de concreto e largura efetiva.	18
Figura 6 - Deslocamentos relativos entre laje e perfil e fluxo cisalhante.....	20
Figura 7 - Conectores de cisalhamento: (a) stud; (b) perfil U laminado (Veríssimo, 2007).	20
Figura 8 - Possíveis posições da linha neutra plástica para viga mista (NBR 8800:2008).	22
Figura 9 - Ruptura do concreto devido ao cisalhamento longitudinal.....	25
Figura 10 - Tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentadas por Chien e Ritchie, 1984.....	34
Figura 11 - Ábaco PFS (a) e ábacos FC (b) de pré-dimensionamento de vigas mistas com interação completa ou parcial com linha neutra plástica no perfil metálico, apresentado por	35
Figura 12 - Tabela de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentada por Lawson et al. (1994).	36
Figura 13 - Ábaco de pré-dimensionamento de vigas alveolares apresentado por Cimadevila et al. (2000).	37
Figura 14 - Ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentado pela ECCS (ECCS TC11, 2001).	38

Figura 15 - Gráfico de avaliação do momento resistente de cálculo em função da resistência do concreto, apresentado por Malite (1993).....	39
Figura 16 - Processo de obtenção da Curva de Resistência da viga mista escorada com interação completa.....	47
Figura 17 - Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista escorada com interação completa, aplicando o primeiro critério de deslocamento máximo admissível.....	53
Figura 18 - Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista escorada com interação completa, aplicando o segundo critério de deslocamento máximo admissível.....	55
Figura 19 - Processo de obtenção da Curva de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação completa, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível.....	57
Figura 20 - Fluxograma para geração da Curva de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação completa.....	59
Figura 21 - Curva de Pré-Dimensionamento da viga mista escorada com interação completa.....	60
Figura 22 - Curvas de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação parcial.....	61
Figura 23 - Comportamento da viga mista para situação escorada e não-escorada.....	62
Figura 24 - Processo de obtenção da Curva de Resistência da viga mista não-escorada com interação completa.....	65
Figura 25 - Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista não-escorada com interação completa, aplicando o segundo critério de deslocamento máximo admissível.....	70
Figura 26 – Processo de obtenção da Curva de Pé-dimensionamento da viga mista não escorada.....	71
Figura 27 - Curva de Pré-Dimensionamento da viga mista não-escorada com interação completa.....	72

Figura 28 - Curvas para estado-limite último (1 e 2) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.....	83
Figura 29 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista secundária, considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.	84
Figura 30 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas secundárias considerando-se construção escorada, interação completa e para uma série de perfis laminados de abas paralelas, considerando-se construção escorada e interação completa.....	85
Figura 31 - Curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.	86
Figura 32 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista secundárias considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.	87
Figura 33 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas secundárias para uma série de perfis laminados de abas paralelas, considerando-se construção não-escorada e interação completa.....	88
Figura 34 - Curvas para estado-limite último (1 e 2) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.....	90
Figura 35 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.....	91
Figura 36 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas principais para uma série de perfis laminados de abas paralelas, considerando-se construção escorada e interação completa.....	92
Figura 37 - Curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção	

não-escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.	93
Figura 38 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.....	94
Figura 39 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas principais considerando-se construção não-escorada, interação completa e para uma série de perfis laminados de abas paralelas.	96
Figura 40 - Projeto arquitetônico e lançamento estrutural de um módulo típico de um edifício de múltiplos andares (Dimensões em milímetros).	97
Figura 41 - Sequência de seleção de perfis para as vigas do Grupo 4 (VS-3, VS-4, VS-6 e VS-5).....	101
Figura 42 - Curvas de comportamento da viga mista, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}).....	105
Figura 43 - Curvas de Pré-dimensionamento para construção escorada e não-escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para a carga sobreposta máxima - Q_{csm}).....	105
Figura 44 - Curvas de comportamento da viga mista, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para a combinação rara de serviço $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).....	106
Figura 45 - Curvas de Pré-dimensionamento para construção escorada e não-escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para a combinação rara de serviço $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).....	107
Figura 46 - Curvas de Pré-dimensionamento em função da tipologia construtiva, considerando diferentes critérios de deslocamento máximo admissível.	108
Figura 47 - Curvas de comportamento da viga mista considerando-se os diferentes critérios de deslocamento máximo admissível da Tabela 19.	111
Figura 48 - Curvas de comportamento da viga mista para construção escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).....	113
Figura 49 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada e interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).....	114

Figura 50 - Curvas de comportamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).....	115
Figura 51 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).	116
Figura 52 - Curvas de comportamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, com interação completa e com variação da espessura da laje ..	117
Figura 53 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, interação completa, com variação da espessura da laje.	118
Figura 54 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, interação parcial com grau de interação mínimo, com variação da espessura da laje.	119
Figura 55 - Curvas de comportamento para construção não-escorada, com interação completa, para lajes com Steel-deck e com variação da espessura total da laje.	120
Figura 56 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje mista para construção não-escorada, interação completa, e com variação da altura total da laje.....	121
Figura 57 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje mista para construção não-escorada, interação parcial com grau de interação mínimo, com variação da altura da laje.	122
Figura 58 - Curvas de comportamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa, com distintos tipos de laje.	122
Figura 59 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, com distintos Tipos de laje, com altura total de 140 mm e interação completa.	123
Figura 60 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça ($h = 12,0$ cm) para construção escorada, com interação completa, com variação da resistência característica do concreto.	124

Figura 61 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}) com variação do grau de interação.	125
Figura 62 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) com variação do grau de interação.	126
Figura 63 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}), com variação do grau de interação.	127
Figura 64 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) com variação do grau de interação.....	128
Figura 65 - Curvas de comportamento das vigas mistas formadas pelos perfis selecionados em função da altura, para construção não-escorada e interação completa.....	130
Figura 66 - Curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis selecionados para construção não-escorada, interação completa.	131
Figura 67 - Curvas de comportamento das vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados, para construção não-escorada e interação completa.	132
Figura 68 - Curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados, para construção não-escorada e interação completa.	133
Figura 69 - Curvas de comportamento da viga mista formada por diferentes tipos de aço, para construção não-escorada e interação completa.	134
Figura 70 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista formada por diferentes tipos de aço, para construção não-escorada e interação completa.	134

RESUMO

ALBRECHT, Tiago Ferreira, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2010.
Ábacos de pré-dimensionamento e avaliação do comportamento de vigas mistas de aço e concreto. Orientador: José Luiz Rangel Paes. Coorientadores: Gustavo de Souza Veríssimo e Rita de Cássia Sant'Anna Alvarenga.

O uso de ábacos e tabelas de pré-dimensionamento para vigas mistas de aço e concreto pode proporcionar a engenheiros e arquitetos uma rápida visão sobre os resultados que podem ser alcançados com o uso desta solução construtiva. Nesse trabalho apresenta-se: a metodologia para a geração de ábacos para o pré-dimensionamento de vigas mistas, os resultados da implementação desta metodologia e uma avaliação da influência dos parâmetros relacionados ao dimensionamento das vigas mistas. Um ábaco para pré-dimensionamento representa o resultado do processo de verificação da capacidade resistente última e do comportamento em serviço, normalmente representado pelo estado-limite de deslocamento excessivo. Diversos fatores influenciam o comportamento das vigas mistas de aço e concreto. Nesse trabalho, tais fatores foram agrupados como parâmetros do sistema estrutural e parâmetros de dimensionamento. Um algoritmo de cálculo desenvolvido em ambiente Mathcad[®], baseado nas prescrições da ABNT NBR 8800:2008 para o dimensionamento de vigas mistas, possibilitou a geração de um conjunto de curvas que permite ao usuário identificar o perfil que melhor atende a uma determinada situação de projeto. São apresentados ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas formadas por perfis I laminados de abas paralelas produzidos no Brasil. Além de se constituírem numa ferramenta de grande utilidade para o pré-dimensionamento de vigas mistas, os ábacos também permitem uma visão geral sobre a influência da variação dos parâmetros envolvidos no dimensionamento de vigas mistas.

ABSTRACT

ALBRECHT, Tiago Ferreira, M. Sc, Universidade Federal de Viçosa, August, 2010.
Graphs for initial design and evaluation of the behavior of composite beams made of steel and concrete. Adviser: José Luiz Rangel Paes. Co-advisers: Gustavo de Souza Veríssimo and Rita de Cássia Sant'Anna Alvarenga.

The use of graphs and tables for steel-concrete composite beams initial design can provide a quick insight for engineers and architects on the results that can be achieved with this structural solution. In this work it is presented: a methodology for the construction of initial design graphs for composite beams, the results of the implementation of this methodology and an evaluation of the influence of the parameters that are related to the design of composite beams. A graph for initial design represents the result of the composite beam verification, including its ultimate capacity and maximum deflection under service conditions. Various parameters influence the resistance capacity and the behavior of steel and concrete composite beams. In this dissertation, these parameters are grouped as structural system parameters and design parameters. A calculation algorithm developed in Mathcad[®], according ABNT NBR8800:2008 for the verification of composite beams, allows the construction of several curves that permits the user to identify the steel profile that better fits a project situation. Graphs for initial design of composite beams formed with a hot-rolled I produced in Brazil are presented. Besides constituting a tool of great utility for initial design of composite beams, the graphs also allows a general view of the influence of the parameters that are involved with composite beams.

INTRODUÇÃO

1

No Capítulo 1 apresenta-se uma discussão inicial sobre os sistemas de piso misto de aço e concreto, de modo a proporcionar uma visão geral sobre o uso de vigas mistas no contexto dos edifícios de andares múltiplos e mostrar a importância das ferramentas de pré-dimensionamento destes elementos estruturais. Definem-se os objetivos do trabalho e apresenta-se a justificativa e relevância do tema. Por último, apresenta-se a estrutura da Dissertação, com comentários sintéticos sobre o conteúdo de cada capítulo.

1.1 Considerações preliminares

Os elementos estruturais mistos de aço e concreto constituem-se numa importante alternativa construtiva na atualidade, uma vez que os materiais utilizados são dispostos de maneira a trabalhar com a capacidade resistente que melhor podem oferecer. O concreto apresenta boa resistência à compressão e a sua capacidade de resistir à tração é praticamente desprezada, enquanto o aço apresenta excelente resistência à tração.

O uso desses dois materiais para a constituição de um elemento misto gera grande eficiência, tanto para lajes, vigas como também para pilares. No caso específico das vigas mistas, a redução de peso de aço pode ser de 20% a 40% em um sistema bem dimensionado (Queiroz, 2001).

Uma viga mista é formada pela laje, que pode ser plana de concreto armado ou mista com forma de aço incorporada, ligada por meio de conectores de cisalhamento a um perfil de aço. Nesse caso, a laje de concreto se apóia na mesa superior do perfil de aço, proporcionando uma mesa que colabora com a resistência aos esforços atuantes. Os conectores são responsáveis por garantir o trabalho solidário entre aço e concreto. Na Figura 1, apresenta-se um esquema de uma viga mista destacada a partir de um sistema de piso.

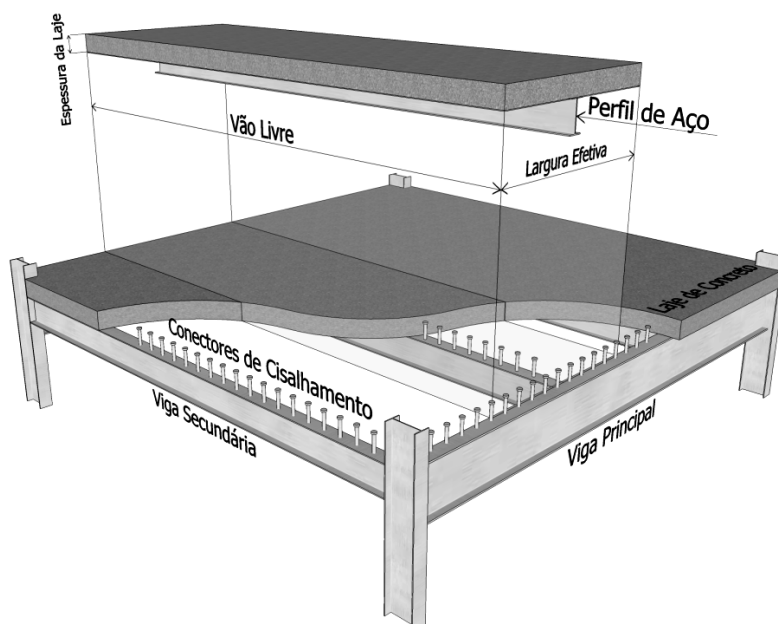


Figura 1 – Esquema geral de uma viga mista destacada a partir de um sistema de piso. O uso de estrutura de aço no Brasil poderia ser maior se consideradas as vantagens construtivas da construção mista, como por exemplo, no caso de vigas mistas, a obtenção de maiores vãos livres, a redução da altura e do peso dos perfis de aço utilizados em sistemas de piso e a possibilidade de redução da altura total do edifício.

Possivelmente, a restrição ao uso de vigas mistas ainda é influenciada pela dificuldade de dimensionamento e pela falta de uma maior difusão da metodologia de projeto destes elementos estruturais. Trata-se de um assunto que geralmente não é abordado nos cursos de graduação em Engenharia Civil e, muito menos nos cursos de Arquitetura.

O dimensionamento de vigas mistas envolve diversos parâmetros e uma longa rotina de cálculo. Com bastante frequência o calculista tem que repetir os cálculos sucessivas vezes para uma viga, de forma a obter uma solução satisfatória (Veríssimo e Paes, 2002).

Se para os engenheiros civis o dimensionamento de vigas mistas ainda é um assunto pouco difundido, isso é ainda mais limitado entre profissionais de arquitetura. A consequência mais clara deste fato é a desconsideração desses elementos estruturais na hora de projetar edificações.

Um sistema de piso de um edifício de múltiplos andares em estrutura metálica é normalmente formado por vigas principais e vigas secundárias. As vigas secundárias recebem as ações aplicadas sobre as lajes e as transmitem às vigas principais que, por sua vez, levam essas ações até os pilares. Na Figura 2 apresenta-se um arranjo típico de um sistema de piso, no qual se identificam vigas secundárias e principais.

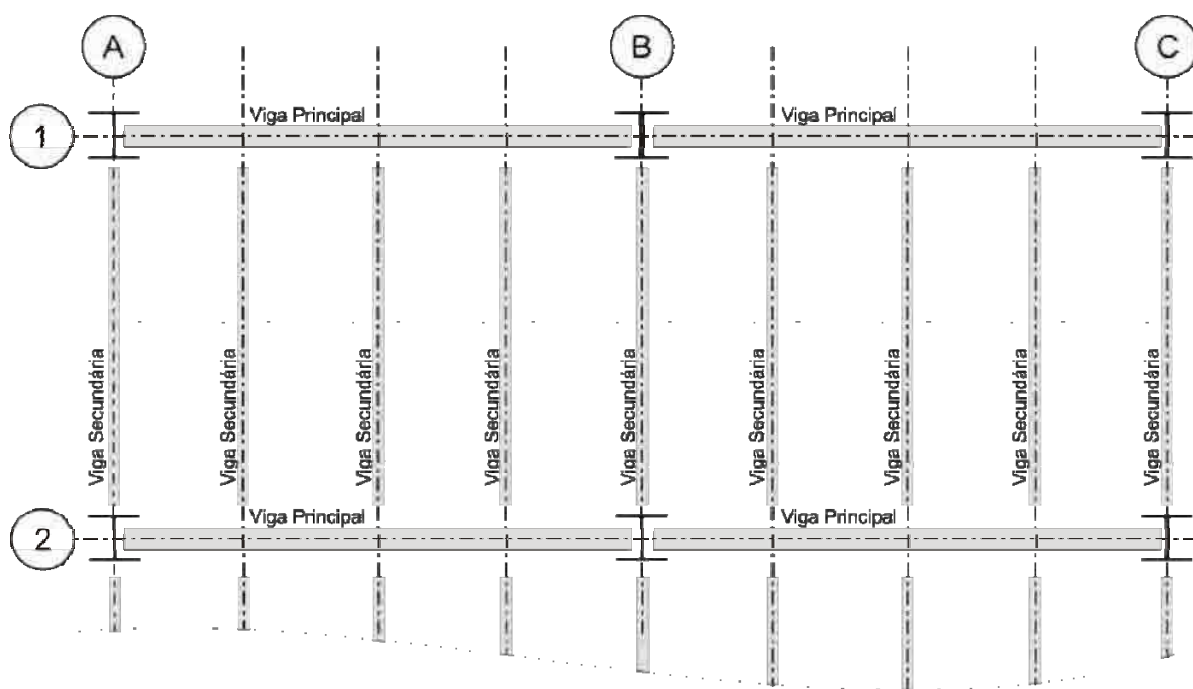


Figura 2 – Arranjo típico de um sistema de piso de um edifício de múltiplos andares em estrutura metálica, com disposição de vigas secundárias e principais.

As vigas secundárias são normalmente caracterizadas por:

- receber as ações aplicadas sobre as lajes;
- serem influenciadas diretamente pela distância entre vigas adjacentes;
- possuir um grande número de repetições.

Por outro lado, as vigas principais são marcadas por:

- receber as ações concentradas das vigas secundárias;
- conduzir as ações aos pilares.

O lançamento estrutural de um sistema de piso é fundamental para a obtenção de uma estrutura segura e economicamente competitiva. De um modo geral, o melhor arranjo para um sistema de piso é aquele que conduz à menor altura total (Bellei *et al.*, 2004). Normalmente, a distância entre vigas secundárias adjacentes, o vão livre das vigas e a tipologia construtiva (construção escorada ou não-escorada) são os fatores que inicialmente direcionam o dimensionamento dos elementos estruturais, quer seja pela resistência última ou pelo deslocamento máximo admissível. Esse conjunto de fatores será denominado como “parâmetros do sistema estrutural”.

A distância entre vigas secundárias adjacentes aumenta ou diminui a largura de contribuição das ações sobre a viga e está intimamente relacionada ao vão admissível das lajes. O vão das vigas influencia diretamente a magnitude dos esforços solicitantes. A tipologia construtiva influencia a velocidade executiva e os deslocamentos produzidos no sistema de piso.

Além desses fatores, diversos outros influenciam o dimensionamento das vigas mistas que compõem um sistema de piso, como o tipo de laje, o tipo de perfil, o tipo de conector, as características mecânicas dos materiais (aço, concreto e conector), a sobrecarga de piso, o grau de interação (completa ou parcial) e o deslocamento máximo admissível para o sistema. Esse conjunto de fatores será denominado como “parâmetros de dimensionamento”.

Com a variação dos parâmetros do sistema estrutural e dos parâmetros de dimensionamento, pode-se obter uma grande quantidade de soluções para os sistemas de pisos mistos de aço e concreto. Em função disso é possível gerar distintos tipos de ferramentas de apoio ao projeto estrutural, como programas computacionais, tabelas e ábacos de pré-dimensionamento. No contexto dos ábacos, seria possível produzir um grande número de modelos para cobrir todas as soluções de projeto, diante das diversas possibilidades de combinação das características dos sistemas de piso.

Esse trabalho trata do desenvolvimento de ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas e da avaliação do comportamento estrutural destes elementos com auxílio das ferramentas propostas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de ábacos para o pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto formadas por perfis tipo I e avaliar alguns aspectos do comportamento estrutural desses elementos.

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho se estabelecem alguns objetivos específicos:

- avaliar estratégias para construção dos ábacos de pré-dimensionamento;
- desenvolver rotinas de cálculo automático para verificação de vigas mistas em condições últimas e de serviço;
- desenvolver uma ferramenta computacional para implementação da rotina que irá gerar os ábacos;
- gerar alguns exemplos de ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas;
- estudar a influência da variação de alguns parâmetros no comportamento de vigas mistas.

1.3 Justificativa e relevância do tema

A disseminação do uso de vigas mistas na construção civil está relacionada à difusão das suas vantagens construtivas e do seu processo de dimensionamento. O pré-dimensionamento de vigas mistas é uma etapa importante, sobretudo na fase de concepção do projeto arquitetônico, visto que determina as relações de proporção viáveis para cada caso.

Os ábacos e tabelas de pré-dimensionamento são instrumentos largamente utilizados na engenharia e arquitetura para apoio ao desenvolvimento de projetos estruturais. No contexto das vigas mistas de aço e concreto, tais ábacos e tabelas permitem uma determinação rápida e bastante precisa do perfil de aço, considerando os diversos parâmetros que influenciam o seu comportamento estrutural.

O uso de ábacos e tabelas de pré-dimensionamento para vigas mistas pode proporcionar a engenheiros e arquitetos uma importante visão sobre os resultados que podem ser alcançados em cada caso, sem a necessidade de grande investimento de tempo para o dimensionamento ou uso de programas especializados.

Além destes aspectos a ABNT NBR8800:2008 introduziu diversas modificações na metodologia de cálculo de vigas mistas de aço e concreto com relação às prescrições da

ABNT NBR 8800:1986, o que torna importante desenvolver ferramentas de cálculo de acordo com a nova metodologia prescrita.

1.4 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 apresentam-se alguns aspectos importantes sobre o comportamento de vigas mistas, sobre o dimensionamento destes elementos de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 e sobre instrumentos de apoio ao projeto encontrados na literatura.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia de desenvolvimento dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas. Consideram-se vigas mistas secundárias e principais, para os casos de construção escorada e não-escorada e interação completa e parcial.

Desenvolvida a metodologia para geração dos ábacos, no Capítulo 4 apresenta-se a implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas e um exemplo de utilização do mesmo. Além disso apresentam-se alguns estudos sobre a influência da variação de alguns parâmetros no comportamento de vigas mistas.

Por fim, o Capítulo 5, apresentam-se as conclusões e impressões obtidas após a geração dos ábacos e das avaliações sobre o comportamento de vigas mistas. Além disso, apresentam-se neste capítulo, sugestões de temas para a realização de trabalhos futuros.

No Apêndice A, apresentam-se alguns exemplos de ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas, enquanto que no Apêndice B apresenta-se um resumo da rotina de cálculo implementada no programa computacional Mathcad®.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2

Neste Capítulo apresenta-se a fundamentação teórica para dar suporte ao desenvolvimento do presente trabalho, abrangendo os princípios que governam o comportamento estrutural das vigas mistas, o dimensionamento de vigas mistas segundo a ABNT NBR 8800:2008 e ábacos e tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas encontrados na literatura.

2.1 Generalidades sobre vigas mistas

As primeiras estruturas mistas de aço-concreto surgiram em 1894 nos Estados Unidos (Griffis, 1994 *apud* Silva, 2006). Os primeiros estudos sobre vigas mistas ocorreram por volta de 1914, na Inglaterra, pela empresa *Redpath Brow and Company*. Pouco tempo depois, no Canadá, foi realizada uma série de ensaios sob a supervisão da empresa *Dominium Company* (Malite, 1993).

Em meados de 1930 já se haviam estabelecido métodos de dimensionamento para vigas mistas que foram, em 1944, introduzidos na especificação da *American Association of State Highway*, AASHTO, e em 1952 na especificação do *American Institute of Steel Construction*, AISC (Silva, 2006).

Até 1986, os projetos feitos no Brasil envolvendo vigas mistas eram desenvolvidos necessariamente de acordo com normas estrangeiras, pois as normas brasileiras não cobriam esse tipo de estrutura. O assunto foi introduzido pela primeira vez numa norma brasileira, em 1986, quando da publicação da NBR 8800:1986, “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios” (Malite, 1993).

Em 2008, a NBR 8800:1986 foi revisada pela primeira vez e recebeu uma série de alterações, inclusive nas prescrições para o dimensionamento de vigas mistas. A principal alteração introduzida pela ABNT NBR 8800:2008 a respeito de vigas mistas foi a inserção de uma metodologia para o dimensionamento de vigas mistas semicontínuas.

As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas (o que é mais usual), contínuas ou semicontínuas. As vigas mistas simplesmente apoiadas são de grande eficiência para o sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão. As vigas mistas contínuas ou semi-contínuas possuem ligações rígidas ou semi-rígidas respectivamente, possibilitando uma redistribuição dos esforços de momento fletor. Desta forma as vigas mistas contínuas e semi-contínuas podem apresentar momentos negativos e a laje de concreto fica comprimida em apenas uma parte do vão, onde atuam momentos fletores positivos. A continuidade das vigas pode colaborar sob o

ponto de vista de estabilidade global da estrutura, devido a possibilidade de contar com o efeito de pórtico (Alva, 2000).

Johnson (1994) apresenta os seguintes comentários sobre as vantagens do uso de vigas mistas simplesmente apoiadas em relação às vigas mistas contínuas:

- uma pequena parte da alma do perfil fica comprimida, e a mesa superior está travada pela laje e, portanto, a resistência do perfil não fica restrita ao colapso devido à flambagem;
- as tensões na alma do perfil são relativamente baixas, criando uma situação favorável para a abertura de furos nessa região para passagem de dutos de serviço do edifício;
- momentos positivos e força cortante vertical são estaticamente determinados, e não são influenciados por fissuração, fluência ou retração do concreto;
- não há interação entre o comportamento de vigas de vãos adjacentes;
- os momentos nas colunas são menores, já que o pórtico é travado contra deslocamento lateral;
- a análise global fica simplificada e o dimensionamento é mais rápido.

Duas situações de construção são possíveis com vigas mistas: a construção escorada e a construção não-escorada (Queiroz, 2001).

Para o caso de construção não-escorada, tem-se dois instantes distintos: um primeiro instante inicial, onde o perfil isolado tem que resistir às ações devido à construção, e um segundo instante, onde o perfil e a laje, em ação conjunta, suportam as ações para as quais foram dimensionados. No caso de construção escorada, o perfil metálico não é solicitado isoladamente e, portanto, é verificado considerando o trabalho conjunto da laje de concreto e do perfil metálico.

A construção de vigas mistas escoradas refere-se à situação onde o perfil metálico é suportado por escoras, durante o lançamento do concreto da laje, que são mantidas até o concreto atingir 75% da sua resistência característica aos 28 dias (Ritchie e Chien, 1984).

Ritchie e Chien (1984) citam as vantagens e desvantagens do uso da construção escorada, que são:

Vantagens:

- elimina a necessidade de uma seção com maior altura, para suportar as ações atuantes antes do endurecimento da laje e para controlar os deslocamentos;
- elimina a necessidade de contraflecha;
- elimina o efeito de “empoçamento do concreto” pois não acontece o deslocamento inicial do perfil de aço, que influencia a quantidade de concreto lançado sobre a viga, evitando acréscimo de carga e facilitando o nivelamento da superfície.

Desvantagens:

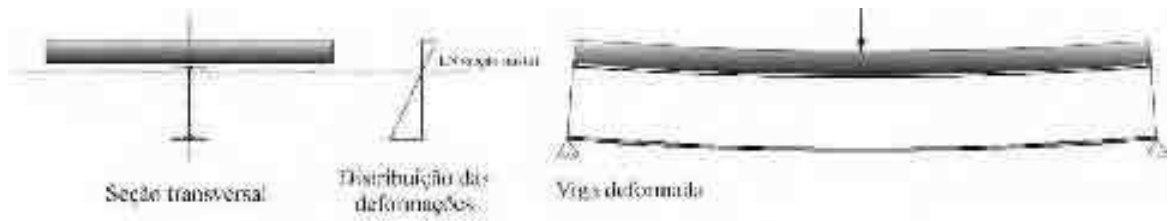
- descarta as características interessantes que a construção em aço proporciona, que são a simplicidade e o acesso imediato às outras áreas do edifício;
- requer um custo adicional das escoras e da mão-de-obra para inserí-las e retirá-las, além do fato de que devem permanecer colocadas usualmente em mais de um pavimento simultaneamente durante a construção;
- é mais suscetível ao efeito de fluência, uma vez que o peso próprio do aço e do concreto atuarão como cargas de longa duração influenciando os deslocamentos verticais da viga;
- o deslocamento instantâneo, na retirada das escoras, acentua o momento negativo nos apoios, aumentando a tendência de fissuração da laje;
- requer mais cuidado no dimensionamento e no controle de qualidade da construção, requerendo armaduras negativas nos suportes das vigas.

A análise de vigas mistas de aço e concreto pode ser realizada assumindo-se a hipótese de seções plana de Navier-Bernoulli. Para isso é necessário admitir que existe uma ligação entre o aço e o concreto, fazendo com que não haja deslizamento relativo entre a laje e o perfil de aço. Diz-se, neste caso, que há interação perfeita ou completa (Figura 3.a) (Paes e Mirambell, 2004).

Quando há deslizamento longitudinal ou vertical em relação à interface entre aço e concreto, a interação é definida como imperfeita ou parcial (Figura 3.b). Ainda na Figura 3, apresenta-se um diagrama da distribuição de tensão na seção transversal de uma viga mista com interação completa e com interação parcial. A descontinuidade observada no diagrama de deformação da seção transversal para o caso de interação parcial afeta a distribuição de tensões na seção transversal, a distribuição do fluxo cisalhante e também o

deslocamentos máximo da viga mista. Como resultado, uma viga mista com interação parcial apresenta deslocamento máximos maiores do que uma viga mista com interação completa (Paes e Mirambell, 2004).

(a) Interação Completa



(b) Interação Parcial

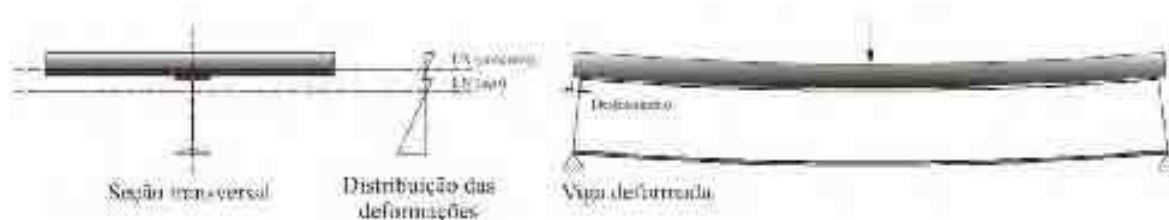


Figura 3 – (a) Interação Completa; (b) Interação Parcial (adaptado de Paes e Mirambell, 2004).

Para a formação da viga mista é fundamental a definição do tipo de laje a ser utilizada no sistema de piso. São comuns os sistemas com lajes maciças, lajes pré-moldadas e lajes com fôrma de aço incorporada.

A utilização das lajes com forma de aço incorporada é uma alternativa atraente porque permite a racionalização do processo construtivo e, por isso, são empregadas com sucesso em edifícios de aço, de concreto armado e em pontes, apresentando vantagens construtivas, estruturais e econômicas. Nardin *et al.* (2005) mencionam algumas vantagens advindas do uso de lajes com forma de aço incorporada, quais sejam:

- elimina a utilização de formas de madeira, que constituem uma parcela significativa do custo total de uma estrutura de concreto;
- reduz sensivelmente a necessidade de escoramentos, tornando o canteiro de obras mais organizado, reduzindo o tempo gasto com montagem e desmontagem dos escoramentos e retirada de forma;
- a forma de aço pode servir de plataforma de trabalho nos andares superiores e como proteção para os operários em serviço nos andares inferiores;

- as formas de aço são leves, de fácil manuseio e fácil instalação;
- o uso de formas de aço facilita a execução das diversas instalações e a fixação de forros falsos.

O somatório das características citadas anteriormente resulta em vantagens na construção, reduzindo prazos, desperdício de materiais e de mão-de-obra e incrementando a qualidade do produto final.

2.2 Dimensionamento de vigas mistas segundo a ABNT NBR 8800:2008

A seguir, apresenta-se o procedimento para o dimensionamento de vigas mistas biapoiadas com construção escorada segundo a ABNT NBR8800:2008.

Para uma situação de ação mista entre a laje de concreto e a viga metálica, devem-se fazer verificações da resistência última da seção mista e do comportamento em serviço. As etapas do dimensionamento e os dados que envolvem essas verificações podem ser observados no fluxograma mostrado na Figura 4.

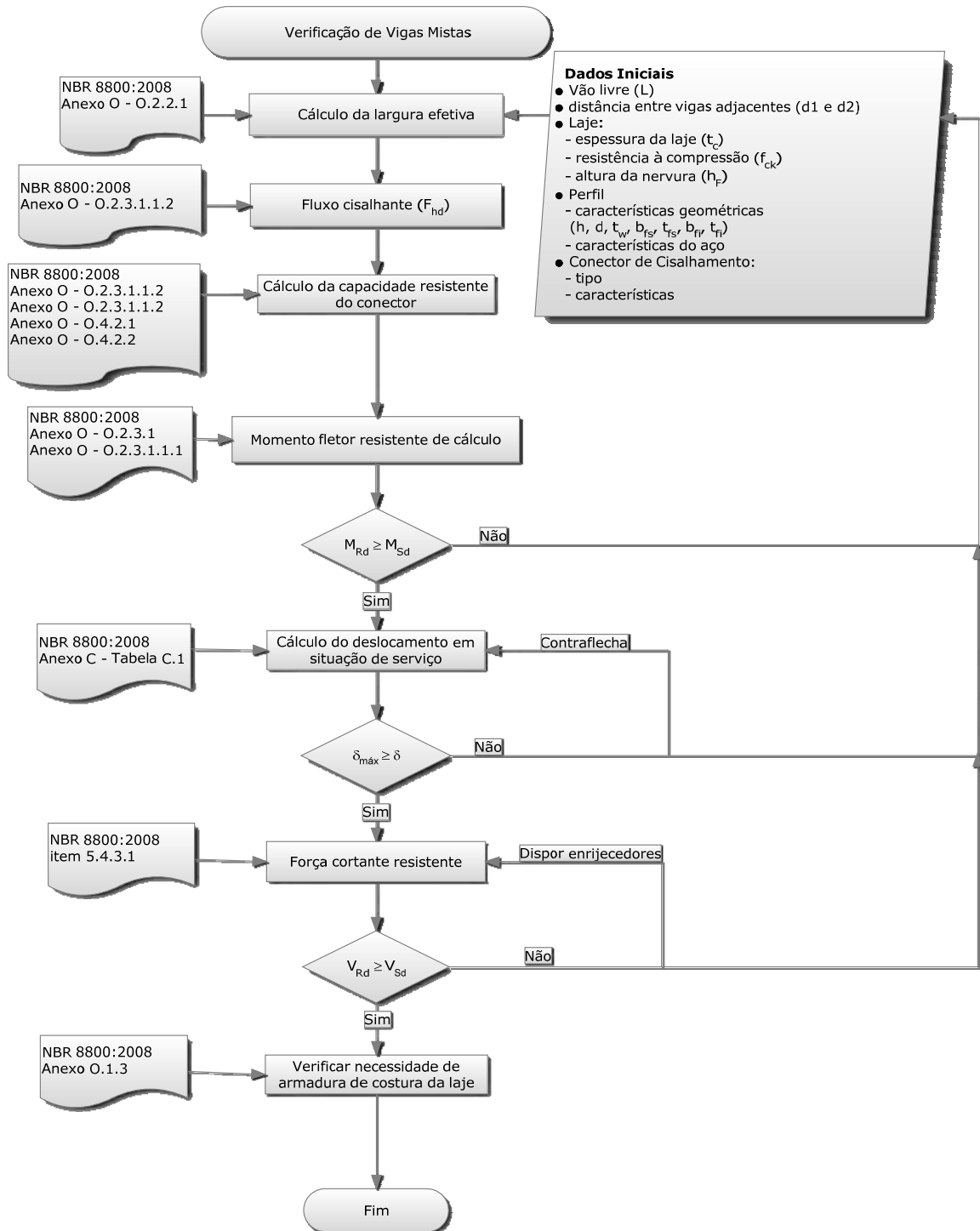


Figura 4 – Macro-fluxograma do resumo do processo de cálculo de vigas mistas.

2.2.1 Ações e combinações de ações

No dimensionamento das vigas mistas é necessário verificar a resistência aos esforços solicitantes e os deslocamentos máximos da mesma. Além disso, deve-se verificar se o perfil de aço isolado tem resistência suficiente para resistir a etapa de construção, quando a viga for executada sem escoramento. Além disso, há que se verificar o perfil de aço isolado, que também deve ter resistência suficiente para resistir às ações da etapa de construção quando a execução do sistema de piso não for escorado.

Como ações permanentes comuns em sistemas de piso para edifícios, citam-se os pesos próprios do concreto, do perfil, da forma de aço incorporada, do revestimento, dos forros e dos elementos de divisórias. Como exemplos de ações variáveis causadas pelo uso e ocupação citam-se as sobrecargas em pisos, equipamentos, mobiliários etc. As ações a serem consideradas na etapa construtiva são o peso próprio dos elementos do sistema de piso e as diversas sobrecargas que atuam nessa etapa, como trabalhadores espalhando o concreto, a ação devida aos equipamentos de polimento de piso e eventual estoque de materiais.

Nessas verificações devem ser utilizadas as combinações de ações apresentadas na ABNT NBR8800:2008.

Neste trabalho, para a verificação da resistência última da viga mista foi utilizada a combinação última normal, dada pela seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (1)$$

onde:

γ_{gi} coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

γ_{q1} coeficiente de ponderação da ação variável principal;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

- γ_{qj} coeficiente de ponderação das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação principal;
- ψ_{0j} fator de combinação para ações variáveis;
- $F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

Para a verificação da resistência última do perfil de aço isolado foi admitida a combinação última de construção, dada por:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k}) \quad (2)$$

onde:

- $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável admitida como principal para a situação transitória;
- $\psi_{0j,ef}$ representa os fatores de combinação efetivos de cada uma das ações que podem atuar concomitantemente com a ação variável especial.

Para a verificação dos deslocamentos de vigas mistas de piso, a ABNT NBR 8800:2008 indica as combinações dadas pelas expressões seguintes:

Combinações quase permanente:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (3)$$

onde:

- ψ_{2j} fator de redução para ações variáveis.

Combinação rara de serviço:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} \quad (4)$$

2.2.2 Largura efetiva

Numa viga mista de aço e concreto, a laje trabalha juntamente com o perfil metálico, solidarizada a ele por meio dos conectores de cisalhamento. Dessa forma, a viga mista é tratada como uma viga T, composta por uma mesa larga e delgada de concreto e uma nervura de aço. De acordo com Queiroz et al. (2001), a presença de deformações de cisalhamento no plano da laje de concreto faz com que as seções não mais permaneçam planas, provocando uma variação de tensões normais ao longo da largura da mesa, conhecida como efeito *shear lag*. A tensão é maior imediatamente sobre a viga e decresce à medida que a distância da linha de centro da viga aumenta, como mostrado na Figura 5. Assim, a contribuição da mesa de concreto não é totalmente efetiva, levando ao conceito de largura efetiva.

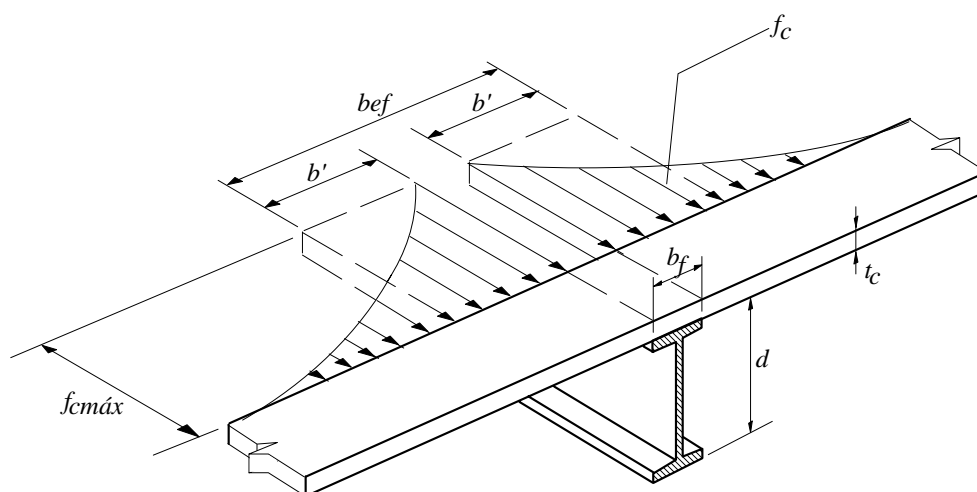


Figura 5 - Distribuição de tensões na laje de concreto e largura efetiva.

Para facilitar o procedimento de cálculo, o que se faz na prática é substituir a largura da laje sujeita à distribuição não-uniforme de tensão por uma largura fictícia, b_{ef} , que multiplicada pela tensão máxima, $f_{c\text{máx}}$, forneça a mesma resultante dada pela distribuição não-uniforme de tensões. Essa largura fictícia é denominada largura efetiva.

Uma análise teórica da largura efetiva com base na teoria da elasticidade revela que a relação entre a largura real da laje comprimida e a largura fictícia b' é complexa e depende

do tipo de carregamento, das condições de contorno, da posição da seção ao longo do vão, dentre outras variáveis (Johnson, 1994).

As normas técnicas fornecem expressões simplificadas para o cálculo da largura efetiva, e considera-se que para o caso de estruturas de edifícios é suficientemente preciso assumi-la igual a 1/8 do vão livre para cada lado da linha de centro do perfil, não devendo esse valor ser maior do que metade da distância à viga adjacente (Queiroz *et al.*, 2001).

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, a largura efetiva (b_{ef}), de cada lado da linha de centro da viga, deve ser tomada como o menor dos seguintes valores:

- a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- b) metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- c) distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

2.2.3 Conectores de cisalhamento

O princípio de funcionamento da viga mista é o trabalho conjunto dos seus componentes, formando um único elemento, que é propiciado pela ação dos conectores de cisalhamento. Sem conectores, não existe ligação mecânica entre a laje de concreto e a viga metálica. Ao serem carregados, a laje e o perfil metálico sofrem flexão independentemente, ocorrendo um deslizamento relativo na superfície de contato entre os dois, e, eventualmente, um descolamento da laje (Figura 6).

Os deslocamentos relativos entre a laje e o perfil de aço acontecem por que cada material tem um comportamento específico. A função dos conectores é resistir aos esforços que provocam os deslocamentos relativos entre a laje e o perfil de aço, ou pelo menos a uma parte deles.

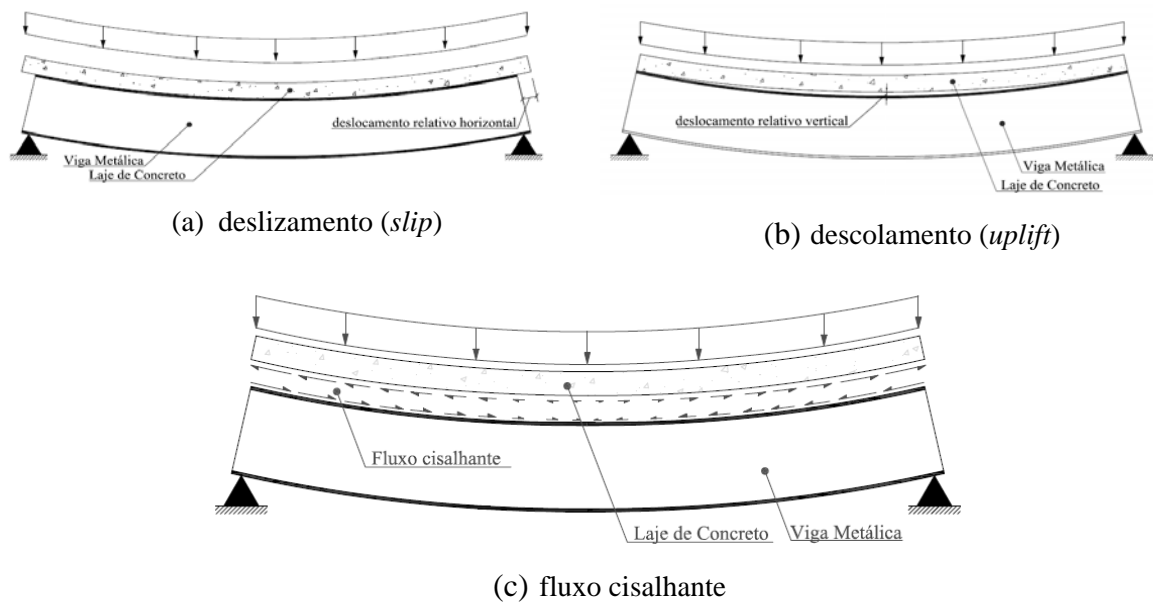


Figura 6 – Deslocamentos relativos entre laje e perfil e fluxo cisalhante.

Uma variedade de dispositivos e configurações tem sido utilizados como conectores de cisalhamento e diversos aspectos econômicos e técnicos continuam a motivar o desenvolvimento de novos produtos (Veríssimo, 2007). No Brasil, tem sido comum a utilização de dois tipos de conectores de cisalhamento em sistemas de piso de edifícios: o *stud bolt*, um conector tipo pino com cabeça, desenvolvido nos EUA na década de 40 (Figura 7a), e o conector em perfil U laminado ou formado a frio (Figura 7b).

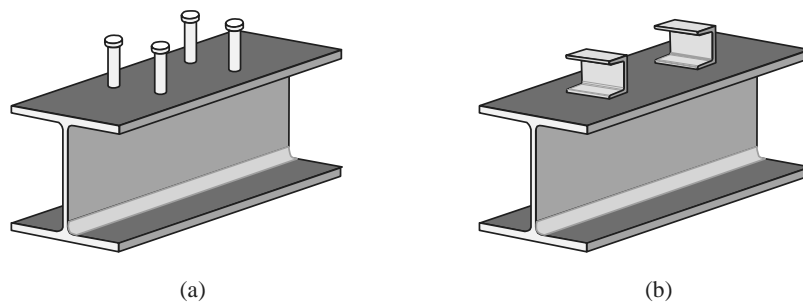


Figura 7 – Conectores de cisalhamento: (a) stud; (b) perfil U laminado (Veríssimo, 2007).

A ABNT NBR 8800:2008 apresenta expressões para determinação da capacidade resistente de conector de cisalhamento do tipo pino com cabeça e conectores tipo perfil U. Para conectores do tipo pino com cabeça, a força resistente de cálculo é dada pelo menor dos seguintes valores:

$$Q_{RD} = \frac{1}{2} \frac{A_{CS} \sqrt{f_{ck} E_C}}{\gamma_{CS}} \quad (5)$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (6)$$

onde:

γ_{CS} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

A_{CS} é a área da seção transversal do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, dado pela ABNT NBR 8800:2008 no Anexo O.4.2.1.2

R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector dado pela ABNT NBR 8800:2008 no Anexo O.4.2.1.3.

A primeira equação refere-se ao colapso do concreto à frente do conector e a segunda, ao colapso do conector.

Para conectores do tipo perfil U, a força resistente de cálculo é dada pela seguinte equação:

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{cs} + 0,5t_{wcs})L_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (7)$$

onde:

t_{fcs} é a espessura da mesa do conector, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_{wcs} é a espessura da alma do conector;

L_{cs} é o comprimento do perfil U.

2.2.4 Verificação do momento fletor resistente (Estado-Limite Último)

Para verificação da viga mista, considera-se que a seção de aço e concreto da viga mista está plastificada. Nessa verificação, a linha neutra plástica (LNP) pode estar localizada no perfil de aço ou na laje de concreto, dependendo principalmente das características do materiais.

Quando a LNP está localizada no perfil metálico, pode estar na mesa superior ou na alma do perfil (Figura 8).

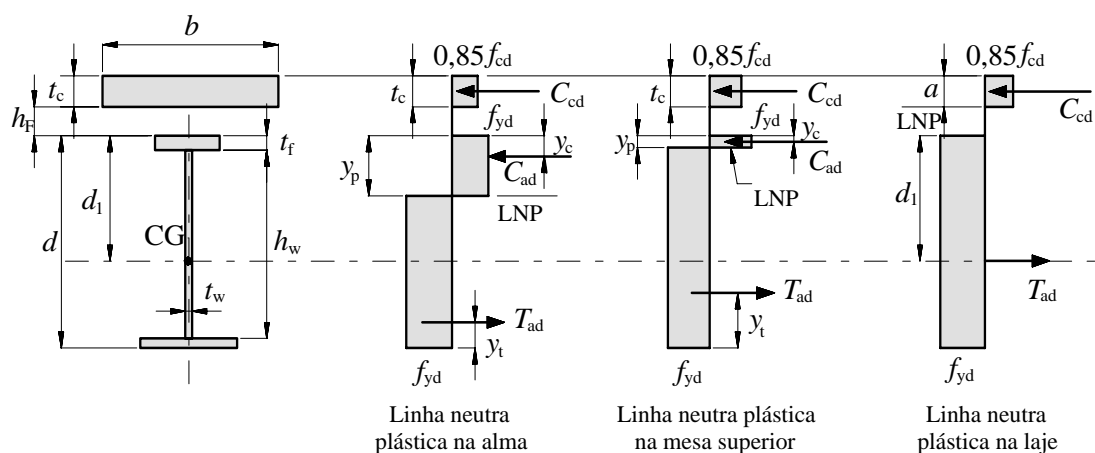


Figura 8 – Possíveis posições da linha neutra plástica para viga mista (NBR 8800:2008).

Para cada uma das posições possíveis de linha neutra a ABNT NBR8800:2008 apresenta as equações de momento resistente coerentes com a distribuição de tensões na seção transversal.

2.2.4.1 Momento fletor resistente para interação completa, LNP na laje de concreto

Quando a LNP se encontra na laje de concreto, o momento fletor resistente é dado por:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (8)$$

onde:

- β_{vm} coeficiente igual à 0,85, 0,90 ou 0,95 para vigas semicontínuas, conforme capacidade de rotação necessária para a ligação e para as vigas biapoiadas ou contínuas igual à 1,0;
- T_{ad} é força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;
- d_1 é a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;
- h_F é a espessura da laje da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada (se não houver pré-laje ou fôrma de aço incorporada, $h_F = 0$);
- t_c é a altura da laje de concreto (se houver pré-laje de concreto pré-moldada, é a espessura acima desta pré-laje e, se houver laje com fôrma de aço incorporada é a espessura acima das nervuras);
- a é a espessura da região comprimida da laje ou, para interação parcial, a espessura considerada efetiva.

2.2.4.2 Momento fletor resistente para interação completa, LNP no perfil metálico

Se a LNP está situada no perfil metálico, o momento fletor resistente é dado pela equação

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad} (d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) \right] \quad (9)$$

onde:

- C_{ad} é força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;
- C_{cd} é força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;
- y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;
- y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face inferior desse perfil;
- d é a altura total do perfil de aço.

2.2.4.3 Momento fletor resistente para interação parcial

Para interação parcial, a LNP está no perfil, podendo estar situada na mesa ou na alma, e o momento fletor resistente é dado pela equação

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad} (d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right) \right] \quad (10)$$

2.2.5 Verificação ao Esforço Cortante (Estado-Limite Último)

Segundo Johnson (1994), numa viga de aço simplesmente apoiada as tensões decorrentes da flexão próximo a um apoio estão dentro do regime elástico, mesmo quando a carga última de cálculo é aplicada. Entretanto, numa viga mista o deslizamento máximo ocorre nos apoios, de modo que as tensões normais de flexão obtidas por análise elástica simples, com base na hipótese de que as seções permanecem planas pode não ser consistente. Assim, em se tratando de uma viga mista, a determinação das tensões de cisalhamento na região próxima aos apoios, em função da taxa de variação das tensões normais em função da posição, é complexa.

Resultados experimentais (Johnson e Willmington, 1972 *apud* Johnson, 1994) demonstram que uma parte da força cortante é resistida pela laje de concreto. No entanto, não existe um modelo de cálculo consistente para a determinação da capacidade resistente da laje ao esforço cortante, já que a contribuição da laje é influenciada por diversos fatores de difícil representação matemática, tais como a continuidade da viga na região dos apoios, o grau de fissuração da laje e detalhes locais da conexão ao cisalhamento. Portanto, na prática assume-se que o esforço cortante é resistido integralmente pelo perfil de aço isolado.

2.2.6 Cisalhamento da laje e a armadura de costura

Nos edifícios usuais, a espessura das lajes não varia muito, podendo assumir valores na faixa entre 10 e 15 cm. Por outro lado, o vão das vigas mistas pode variar muito, com valores entre 4 e 18 m.

As forças longitudinais, que produzem cisalhamento na laje, têm sua magnitude influenciada pelo vão da viga.

As lajes geralmente possuem uma armadura transversal ao eixo das vigas, que contribui para a resistência ao momento fletor. Essa armadura também contribui para a resistência aos esforços de cisalhamento longitudinais, mas, eventualmente, dependendo das características da viga, é necessário fazer uma verificação da armadura da laje, pois o cisalhamento longitudinal pode assumir valores que superam a capacidade da armadura de flexão.

Historicamente, têm-se observado dois modos de ruptura das lajes devido ao cisalhamento longitudinal (Jonhson, 1994). Um desses modos é caracterizado pela ruptura da laje num plano vertical paralelo ao perfil de aço. No outro, a ruptura ocorre segundo uma superfície envolvendo os conectores de cisalhamento, conforme mostrado na Figura 9.

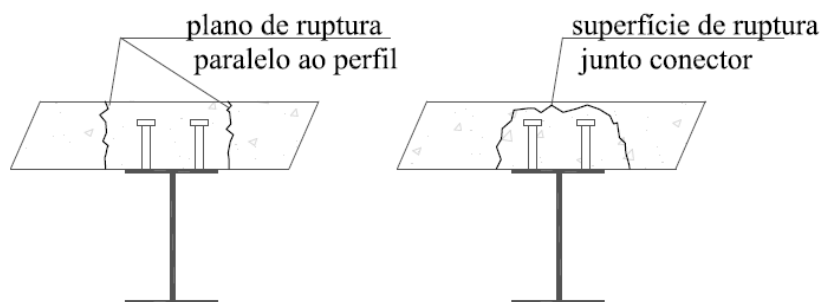


Figura 9 – Ruptura do concreto devido ao cisalhamento longitudinal.

Para combater esses tipos de ruptura, verifica-se a resistência ao cisalhamento da laje na direção longitudinal. Quando a laje de concreto mais a armadura mínima não oferecem resistência suficiente, deve-se dimensionar a armadura transversal ao perfil que garanta a resistência adequada ao cisalhamento longitudinal da laje. Essa armadura é denominada usualmente como armadura de costura.

De acordo com a ABNT NBR 8800: 2008, o esforço cortante solicitante de cálculo relacionado com o cisalhamento longitudinal da laje pode ser calculado por meio da seguinte expressão (Anexo O – 1.3.4):

$$V_{sd} = \frac{\sum Q_{m,Rd} \left(0,3 \frac{b_1}{b_1 + b_2} - 0,85 f_{cd} A_{blc} - A_{long} f_{sd} \right)}{L_m} \quad (11)$$

onde:

- $\Sigma Q_{m,Rd}$ é o somatório das forças resistentes de cálculo individuais dos conectores de cisalhamento situados no trecho de comprimento L_m (Se $\Sigma Q_{m,Rd}$ for maior do que a força resistente de cálculo necessária para interação total, usar esta última no lugar de $Q_{m,Rd}$);
- b_1 é a largura efetiva da laje a partir do eixo da viga no lado onde se analisa a resistência à fissuração longitudinal;
- b_2 é a largura efetiva da laje a partir do eixo da viga do lado oposto a b_1 ;
- f_{cd} resistência de cálculo do concreto à compressão;
- A_{blc} é a área da seção transversal da região comprimida da laje de concreto entre o plano de cisalhamento considerado e a linha de centro da viga;
- A_{long} é a área da armadura longitudinal tracionada entre o plano de cisalhamento considerado e a linha de centro da viga;
- f_{sd} resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura
- L_m é a distância entre as seções de momento máximo positivo e momento nulo nas regiões com momento positivo, ou entre as seções de momento máximo negativo e momento nulo nas regiões com momento negativo.

A equação anterior contabiliza a força cortante solicitante de cálculo relacionada com a capacidade dos conectores de cisalhamento, subtraída da capacidade resistente da laje e da influência favorável da armadura longitudinal eventualmente presente. Essa força cortante solicitante de cálculo não deve ultrapassar a força cortante resistente de cálculo dada por (NBR 8800:2008, Anexo O – 1.3.4):

$$V_{Rd} = 0,6\eta A_{cv} \frac{f_{ck,inf}}{\gamma_c} + A_s f_{sd} + A_F f_{yFd} \leq 0,2\eta A_{cv} f_{cd} + 0,6A_F f_{yFd} \quad (12)$$

onde:

- η 0,3 + 0,7 ($\rho_c/2400$), sendo ρ_c a massa específica do concreto, em quilogramas por metro cúbico, não podendo ser tomado valor superior a 2400 kg/m³;
- A_{cv} é a área de cisalhamento do concreto no plano considerado, por unidade de comprimento de viga;
- $f_{ctk,inf}$ 0,21 $f_{ck}^{2/3}$, com $f_{ctk,inf}$ e f_{ck} em megapascal;
- γ_c coeficiente de ponderação da resistência do concreto;
- A_s é a área da armadura transversal disponível na seção da laje considerada, por unidade de comprimento da viga, incluindo qualquer armadura prevista para flexão da laje e armaduras transversais adicionais, A_{sa} , desde que devidamente ancoradas além da seção considerada;
- A_F é a área da forma de aço incorporada no plano de cisalhamento, por unidade de comprimento, caso a fôrma seja contínua sobre a viga e as nervuras estejam dispostas perpendicularmente ao perfil de aço;
- f_{yFd} resistência de cálculo ao escoamento do aço da fôrma;
- f_{ck} resistência característica do concreto à compressão

2.2.7 Verificação dos deslocamentos máximos (Estado-Limite de Serviço)

Para verificação do estado-limite de deslocamento excessivo, deve-se atender à seguinte condição:

$$\delta \leq \delta_{max} \quad (13)$$

onde:

δ_{max} deslocamento máximo admissível, para uma combinação de serviço apropriada

$$\delta_{max} = L / LIM \quad (14)$$

onde:

LIM divisor utilizado na determinação do deslocamento máximo relativo

(ex: se $\delta_{max} = L/350$, então $LIM = 350$)

Os deslocamentos máximos admissíveis para vigas mistas pertencentes a sistemas de piso são prescritos pelas normas técnicas. Esses deslocamentos devem ser entendidos como valores práticos a serem utilizados para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos da estrutura. O valor do deslocamento máximo admissível (δ_{max}) e a combinação de serviço utilizada para sua verificação têm uma importante influência na curva de comportamento da viga mista, o que exige uma avaliação mais ampla sobre as prescrições normativas apresentadas ao longo do tempo.

Para o caso de vigas de piso, o Anexo C da ABNT NBR8800:2008 prescreve um deslocamento máximo de $L/350$ e recomenda-se que caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.

No Anexo C da ABNT NBR8800:2008 recomenda-se também que o responsável técnico pelo projeto decida quais combinações de serviço devem ser usadas, conforme o elemento estrutural considerado, as funções previstas para a estrutura, as características dos materiais de acabamento vinculados à estrutura e a sequência de construção, exceto quando houver indicação explícita desta norma. Normalmente, os deslocamentos máximos admissíveis (δ_{max}) estão relacionados à aparência da estrutura, o que justifica utilizar combinações quase-permanentes de serviço para sua verificação. Apesar desta liberdade de entendimento, a ABNT NBR 8800:2008 prescreve, no item C.2.4, que nas situações em que o deslocamento venha a causar danos permanentes a elementos não-estruturais sujeitos à fissuração, como paredes divisórias e forros, colocados antes que as ações consideradas passem a atuar, deve-se utilizar uma combinação rara de serviço.

No *Steel Design Guide* nº 3 do *American Institute of Steel Construction* - AISC (FISHER e GRIFFIS, 2004) apresenta-se uma ampla discussão sobre os critérios de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos em sistemas de piso. Para o caso de vigas de piso se recomendam os critérios constantes da Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo o *Steel Design Guide* nº 3 do AISC (FISHER e GRIFFIS, 2004).

Caso	δ_{max}	Combinação de serviço
Vigas ligadas a elementos não estruturais não sujeitos à fissuração	L/360 Máximo de 25,4mm	$G_{viga} + G_{laje}$
Vigas ligadas a elementos não estruturais sujeitos à fissuração	L/360 Máximo de 10 a 25,4mm	0,5 Q_{sc}
Nota: - Q_{sc} - sobrecarga de piso		

Segundo a norma americana ANSI/AISC 360-05 - *Specification for Structural Steel Buildings* (AISC, 2005), os valores apropriados de deslocamentos máximos (δ_{max}) dependem do tipo de estrutura, do detalhamento e do uso desejado. Historicamente, os limites comuns para elementos horizontais foram de $L/360$ para sistemas de piso sujeitos a sobrecarga de uso reduzida e $L/240$ para elementos de cobertura. De acordo com o item L3 dos Comentários desta norma, o limite tradicional de $L/360$ funcionou bem para controlar fissuras em tetos de gesso com vãos comuns na primeira metade do Século XX. O mesmo aconteceu para estruturas de maior flexibilidade, que se comportaram satisfatoriamente com sistemas de teto mais tolerantes aos deslocamentos. No entanto, com o surgimento de estruturas de maiores vãos, foram observados problemas em tetos flexíveis nos quais os deslocamentos reais foram muito menores que $L/360$. Por fim, afirma-se que escolha dos critérios de deslocamentos é um tema complexo que requer uma avaliação cuidadosa por parte do profissional.

Na Tabela 2 apresenta-se uma síntese dos critérios apresentados no ANSI/AISC 360-05 - *Specification for Structural Steel Buildings* (AISC, 2005) para controle de deslocamentos excessivos.

Tabela 2 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo a ANSI/AISC 360-05 (AISC, 2005).

Caso	δ_{max}	Combinação de serviço
Para os estados-limites de serviço que envolvem deslocamentos visualmente indesejáveis, fissuração reparável ou outros danos a acabamentos interiores e outros efeitos de curto prazo	-	$G_{2p} + Q_{sc}$ $G + 0,5 S$
Para os estados-limites de serviço que envolvem deformação lenta, recalques ou efeitos de longo prazo similares	-	$G_{2p} + 0,5 Q_{sc}$
Notas:		
- G_{2p} – ação permanente introduzida após o endurecimento do concreto, devido aos componentes não estruturais		
- Q_{sc} – sobrecarga de piso		
- S – sobrecarga devido à neve		

Na versão experimental do Eurocódigo 4 (ENV-1994-1-1, 1992) recomenda-se que não devem ser ultrapassados os deslocamentos máximos (δ_{max}) prescritos na versão experimental do Eurocódigo 3 (ENV-1993-1-1, 1992). A síntese dos critérios para controle de deslocamentos excessivos aplicados a sistemas de piso, dessa norma, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos segundo a versão experimental do Eurocódigo 3 (ENV-1993-1-1, 1992).

Caso	δ_{max}	δ_2
Pisos em geral	L/250	L/300
Pisos e coberturas que suportem elementos sujeitos a fissuração, divisórias ou outros acabamentos frágeis ou partições não flexíveis	L/250	L/350
Onde o deslocamento possa influenciar a aparência do edifício	L/250	-
Nota:		
- $\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$		
onde:		
δ_1 variação da flecha da viga devido às ações permanentes imediatamente depois de carregada (estágio (1));		
δ_2 variação da flecha da viga devido à ação variável, mais quaisquer deslocamentos devidos à deformação lenta do concreto (estágio (2));		
δ_0 contraflecha da viga, medida quando descarregada (estágio (0)).		

Ao tratar o tema de deslocamentos máximos admissíveis, na versão atual do Eurocódigo 3 (EN-1993-1-1, 2005) cita-se o Anexo A1.4 da EN-1990:2002 (2002) e recomenda-se que os limites para deslocamentos verticais devem ser especificados para cada projeto e acordados com o cliente. De acordo com a alínea (3) do item A1.4.3, quando se considera o funcionamento ou dano à estrutura, aos acabamentos ou a elementos não estruturais, devem-se utilizar as ações permanentes e variáveis que ocorrem após o endurecimento do concreto ou após a execução dos referidos acabamentos. Na alínea (4) do item A1.4.3 recomenda-se que quando se considera a aparência da estrutura deve-se utilizar uma combinação quase-permanente de serviço para verificação do estado-limite de deslocamentos excessivos. Portanto, a versão atual do Eurocódigo 3 (EN-1993-1-1, 2005) não prescreve os deslocamentos máximos admissíveis.

Tendo em vista a revisão de literatura realizada sobre o tema “deslocamentos máximos admissíveis”, nota-se que existem diferentes critérios aplicados aos sistemas de piso. Apesar de ser um tema discutido há muitos anos e de sua grande influência no comportamento de vigas mistas, observa-se que não há consenso sobre esses critérios.

De maneira sintética, nota-se que a tendência observada nas versões mais atuais das normas de estruturas de aço e mistas é de se estabelecer claramente os critérios que devem ser obedecidos para os estados limites últimos (que levam a estrutura ao colapso) e permitir que o responsável pelo projeto acorde com o cliente sobre os limites aplicáveis aos estados limites de serviço, uma vez que estes não implicam na ruína da estrutura.

O cálculo do deslocamento máximo para a viga mista depende da sua função estrutural no projeto. Para as vigas secundárias a maioria dos casos se apresenta com ações distribuídas em toda a viga, e para as vigas principais normalmente têm-se ações concentradas devidas às vigas secundárias que se apoiam sobre a viga principal. Para as vigas principais, grande parte dos projetos de sistemas de piso misto apresenta três casos, que são com uma, duas e três vigas secundárias se apoiando na viga principal. Para cada caso apresentado tem-se uma equação de deslocamento máximo.

No caso de sistemas de piso misto, pode-se considerar duas tipologias construtivas: a construção não-escorada e a construção escorada. Na construção não-escorada a viga é sujeita inicialmente ao peso próprio do concreto e à sobrecarga de construção

(equipamentos e pessoas trabalhando) e por isso o perfil de aço isoladamente apresenta um deslocamento inicial. A esse deslocamento inicial deve-se acrescentar o deslocamento que ocorre devido às ações de utilização do sistema de piso, que passam a atuar na viga após o endurecimento do concreto.

2.2.7.1 Contraflecha

No caso de construção não-escorada, os deslocamentos iniciais provenientes da etapa de construção dependem basicamente da rigidez dos perfis de aço e das condições de apoio. Nessa fase, não se pode contar com a contribuição da laje para a rigidez da viga mista. Os deslocamentos ocorridos durante a aplicação do concreto podem resultar em um aumento do consumo de concreto e, conseqüentemente, do peso próprio da laje. As vigas secundárias, normalmente suportadas por vigas principais, também sofrem deslocamentos. Logo, o deslocamento total do sistema de piso é a soma dos deslocamentos das vigas principais e secundárias. Portanto, o sistema de piso misto pode ficar sujeito a um carregamento superior ao estimado para o piso e com deslocamentos maiores do que os estimados (Chien e Ritchie, 1984).

A aplicação de contraflecha, normalmente é dada para uma parcela das ações de peso próprio que atuam durante a fase de concretagem. Com este processo, evita-se o efeito de “empoçamento” de concreto e o aumento de peso próprio no sistema de piso. Além disso, a aplicação da contraflecha permite que no dimensionamento de vigas mistas, o estado-limite de deslocamento excessivo não seja dimensionante e, conseqüentemente, possibilite o uso de um perfil mais econômico.

Caso não seja possível aplicar contraflecha, uma alternativa interessante é escorar as vigas. Dessa forma, os deslocamentos que ocorrerem após a retirada do escoramento serão menores, já que a rigidez da seção mista é maior do que a do perfil de aço isolado. Essa solução possibilita resultados muito próximos aos da aplicação da contraflecha.

2.3 Ábacos e Tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas

Um bom ábaco de pré-dimensionamento de elementos estruturais deve requerer do usuário a menor quantidade possível de informação técnica para que profissionais não especializados possam efetivamente tirar proveito de sua utilização. Esta é uma característica fundamental de ábacos que têm por objetivo auxiliar engenheiros e arquitetos no pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto.

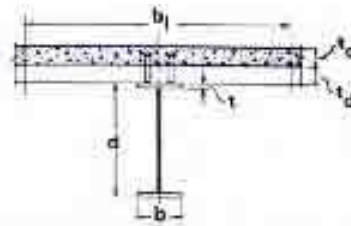
Ao longo do tempo, a construção de ábacos de pré-dimensionamento de vigas de aço e mistas foi objeto de estudo de alguns autores.

Lamas (1982) *apud* Malite (1993), desenvolveu tabelas de dimensionamento de vigas mistas.

Chien e Ritchie (1984) apresentam tabelas com momentos fletores resistentes pré-calculados para a viga mista e para o perfil de aço isolado de acordo com o CAN3-S16.1-M84 (Figura 10). As tabelas apresentam, para cada perfil, e para alguns valores da distância entre vigas adjacentes, valores pré-calculados dos momentos resistentes para 100, 75 e 50% de interação. Além destes valores são apresentados para cada caso, o valor do momento de inércia transformado e o momento resistente para o perfil de aço isolado.

COMPOSITE MEMBERS
Trial Selection Tables
Table 4.2

38 mm Deck with 65 mm Slab
 $\phi=0.90$, $\phi_c=0.60$, $\phi_{sc}=0.80$



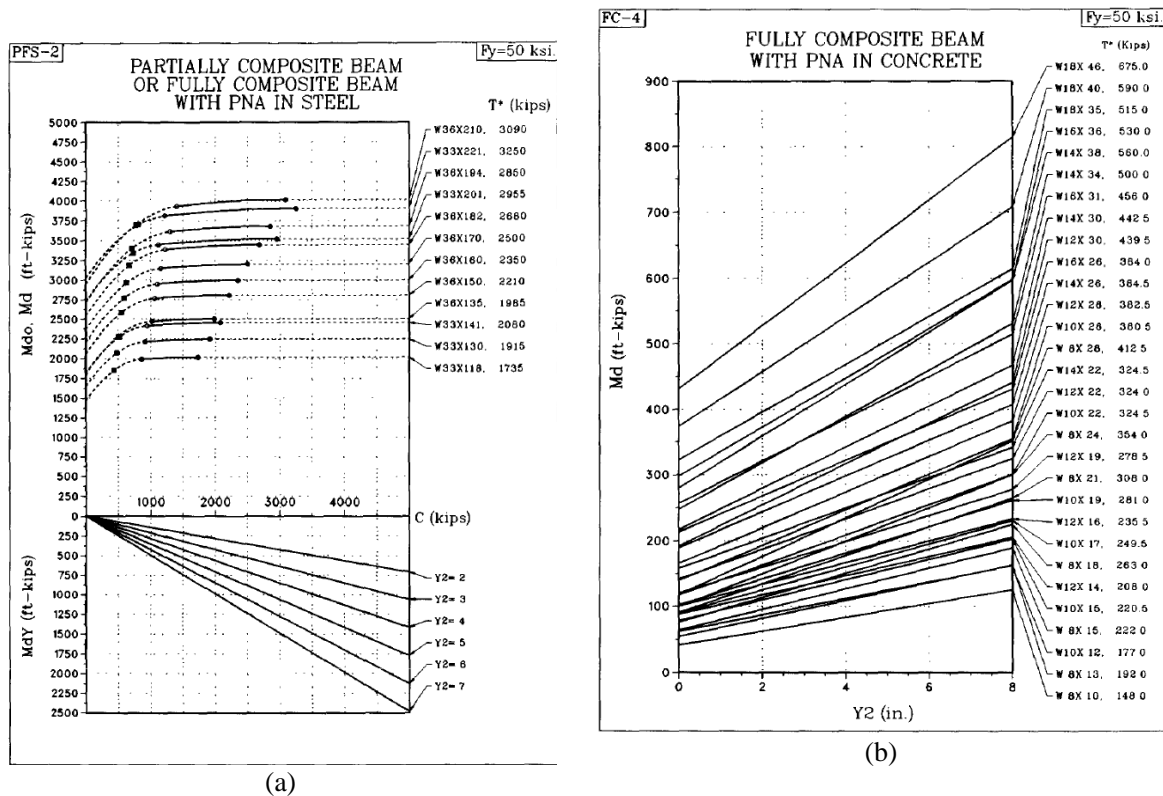
300W
20 MPa

Steel Shape#	Composite Beam*								Non-Composite Shape			
	t_w (mm)	Factored Resistances				I_x (10^6 mm^4)	S_x (10^3 mm^3)	Steel Shape Data	Unbraced Condition			
		M_c (kNm) for Shear Connections:			Q_c (kN)				L_c (mm)	M_c (kNm)	L_c (mm)	M_c (kNm)
		100%	75%	50%								
W250X73	1 600	430	362	358	1 260	328	1 360	M_f 266	5 000	257	7 500	220
W19X49	1 550	381	367	347	1 030	310	1 330	V_u 388	5 500	250	8 000	212
$d=254$	1 200	362	351	335	796	286	1 300	I_u 4 380	6 000	242	6 500	205
$l=14.2$	850	343	332	315	584	254	1 280	I_x 113	6 500	235		
$c=203$	600	318	308	295	331	212	1 180	S_x 851	7 000	227		
W250X57	1 850	378	360	337	1 230	311	1 280	M_c 243	4 000	237	6 500	197
W19X45	1 510	359	345	325	1 000	294	1 230	V_u 406	4 500	229	7 000	189
$d=204$	1 180	341	329	310	782	272	1 230	I_u 3 570	5 000	221	7 500	181
$l=15.7$	840	322	311	293	557	245	1 160	I_x 104	5 500	213	8 000	174
$c=237$	600	296	286	273	331	202	1 090	S_x 805	6 000	205		

Figura 10 – Tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentadas por Chien e Ritchie, 1984.

Vinnakota (1988) aborda uma metodologia de construção de ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas de acordo com o AISC-LRFD (AISC, 1986). Os ábacos de pré-dimensionamento apresentados por esse autor são divididos em dois grupos (Figura 11). O primeiro grupo são os ábacos PFS, para os casos de interação completa ou parcial com linha neutra plástica na seção transversal do perfil. O segundo grupo são os ábacos FC, para interação completa com a linha neutra na laje de concreto.

O pré-dimensionamento de acordo com os ábacos PFS (Figura 11 (a)), é realizado entrando-se com o valor do momento solicitante (M_{do}) e o valor da capacidade da laje de resistir à compressão (C). O ábaco PFS é válido apenas até a linha cheia que termina com um círculo cheio, para cada perfil metálico. A linha tracejada que avança à direita do círculo cheio indica que a LNP está situada acima da seção de aço, ou seja, na laje de concreto, e essa parte da curva não é mais válida. Neste caso, o usuário deve consultar o ábaco FC.



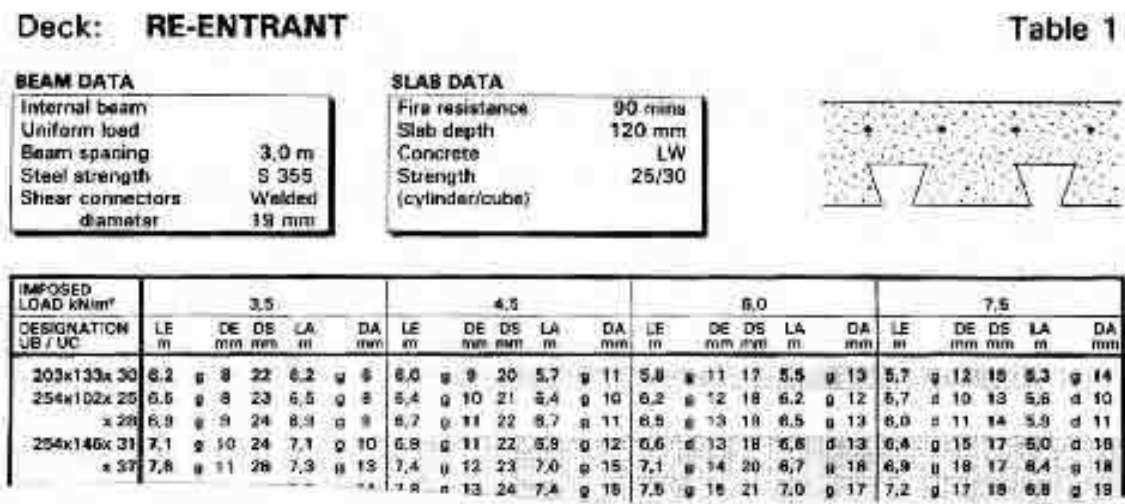
- Y_2 , é a distância do topo do perfil metálico ao ponto de aplicação da força resistente resultante de compressão do concreto, C .
- C , força resistente resultante de compressão do concreto no meio do vão (sic)
- $M_d = M_{dY} + M_{do}$. Onde,
 - M_{dY} , representa a influência da distância Y_2 no momento de cálculo M_d . Este valor é independente dos parâmetros relacionados ao perfil metálico e é uma linear da força resistente resultante de compressão do concreto, C , para valores adotados de Y_2 .
 - M_{do} , é a porção correspondente ao momento de cálculo ao caso hipotético onde $Y_2=0$. Para um perfil metálico, M_{do} é função apenas da força resultante de compressão do concreto, C .

Figura 11 – Ábaco PFS (a) e ábacos FC (b) de pré-dimensionamento de vigas mistas com interação completa ou parcial com linha neutra plástica no perfil metálico, apresentado por Vinnakota (1988).

Nesses ábacos determina-se apenas a capacidade resistente última do perfil metálico e os deslocamentos devem ser verificados separadamente. Vinnakota apresenta também ábacos para dois tipos de aço, um primeiro com $f_y = 36$ ksi ($f_y = 250$ MPa) e um segundo, com $f_y = 50$ ksi ($f_y = 345$ MPa), onde podem ser comparados os ganhos devidos ao aumento da resistência ao escoamento.

O uso dos ábacos propostos por Vinnakota (1988) possibilita escolher dentre uma série de perfis que atendem ao critério de resistência última, qual perfil atende à necessidade do usuário.

Lawson *et al.* (1994) apresentam um conjunto de tabelas de pré-dimensionamento de vigas mistas para perfis europeus, de acordo com o ENV 1994-1-1:1992. Nas tabelas apresentadas por esses autores (Figura 12), entra-se com os parâmetros de dimensionamento e para determinados valores de B e para cada caso de sobrecarga de piso, obtém-se o vão máximo suportado pelo perfil metálico. São apresentados dois valores para o vão máximo: um para conectores dispostos em todas as nervuras e outro para conectores em nervuras alternadas. Além do vão máximo, são apresentados o deslocamento total e o deslocamento devido ao peso próprio da laje e do perfil metálico.



- LE – Vão máximo com conectores em todas as nervuras
- LA – Vão máximo com conectores em nervuras alternadas
- DA – Deslocamento devido a sobrecarga de piso correspondente ao vão LA
- DE – Deslocamento devido a sobrecarga de piso correspondente ao vão LE
- DS – Deslocamento devido a ação do peso próprio da laje e do perfil metálico.

Figura 12 – Tabela de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentada por Lawson et al. (1994).

Cimadevila *et al.* (2000) apresentam um trabalho sobre vigas alveolares, que contém a metodologia de dimensionamento desses elementos e um conjunto de ábacos de dimensionamento para a série de perfis IPE, HEB e IPN. Na Figura 13, apresenta-se um ábaco de pré-dimensionamento de vigas alveolares.

A utilização desses ábacos é realizada entrando-se com o valor do vão da viga e com a carga distribuída sobre o perfil metálico, para então encontrar o perfil que atende ao projeto. Nestes ábacos são apresentadas, para cada perfil, duas curvas: uma correspondente ao perfil de aço de alma cheia e outra, ao perfil de aço alveolar.

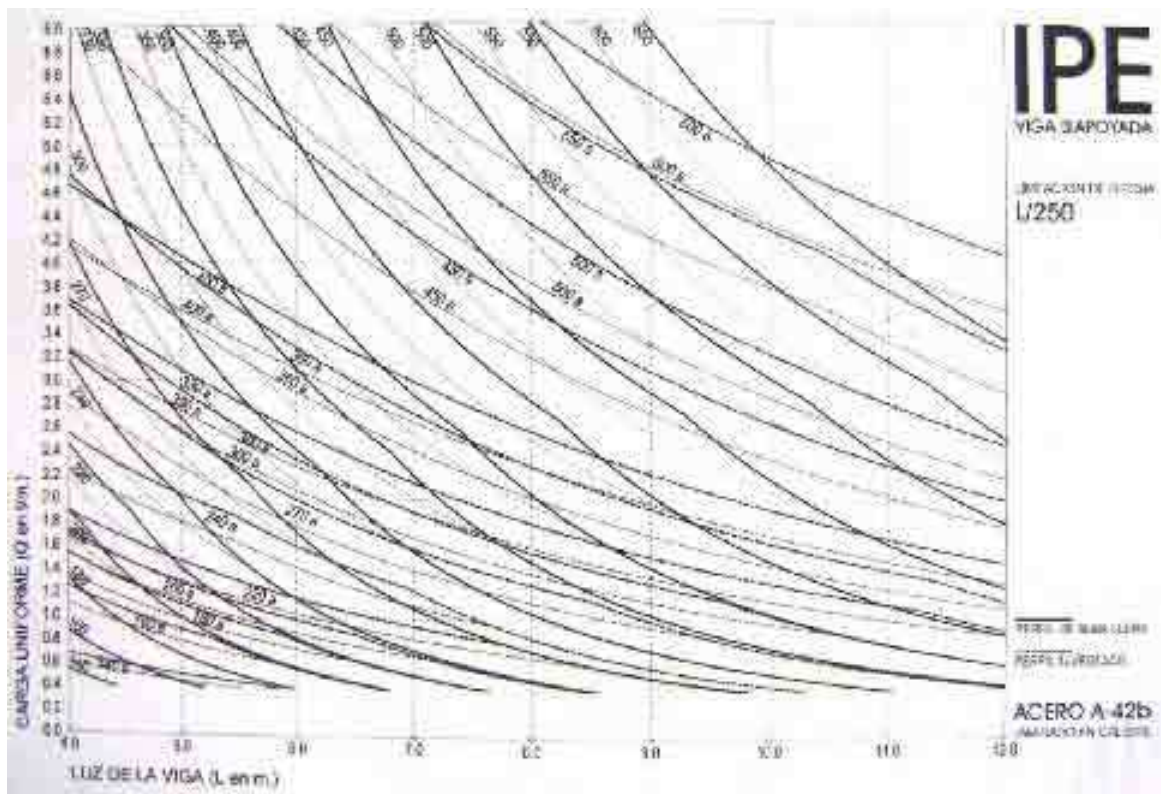


Figura 13 – Ábaco de pré-dimensionamento de vigas alveolares apresentado por Cimadevila *et al.* (2000).

A ECCS (ECCS TC11, 2001) apresentou um trabalho que cobre o pré-dimensionamento de vigas mistas formadas por perfis IPE, HE, UB e UC, de acordo com as prescrições da ENV 1994-1-1:1992. Para utilizar os ábacos apresentados nesse trabalho (Figura 14), o usuário deve ter em mãos os parâmetros de dimensionamento e entrar com o vão livre, L , e a distância média entre vigas adjacentes, B . São apresentadas nesses ábacos curvas para diversos perfis, para cinco casos de espessuras de laje e para uma sobrecarga de piso de $3,5 \text{ kN/m}^2$.

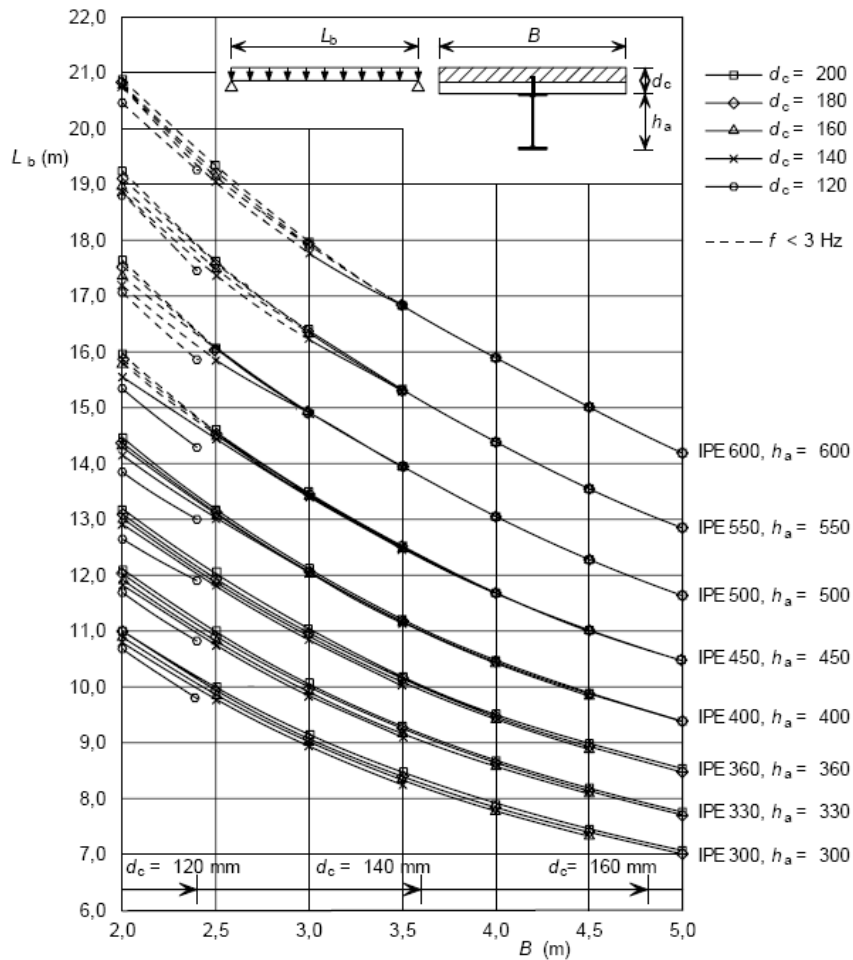


Figura 14 – Ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas apresentado pela ECCS (ECCS TC11, 2001).

Além das ferramentas de pré-dimensionamento apresentadas anteriormente, Vinnakota (1988) elabora ábacos para dois tipos de aço onde pode-se observar os ganhos devidos ao aumento da resistência ao escoamento do aço. Em Cimadevila *et. al.* (1999) são apresentados ábacos de pré-dimensionamento representando as curvas dos perfis de alma cheia e as curvas dos perfis alveolares. A ECCS (ECCS TC11, 2001) apresenta ábacos para as várias espessuras de laje, possibilitando observar o comportamento da viga mista para lajes com diferentes espessuras. Malite (1993) apresenta vários gráficos com avaliações sobre a variação de parâmetros ligados ao dimensionamento das vigas mistas. Como exemplo, apresenta-se na Figura 15 um dos gráfico dessa avaliação.

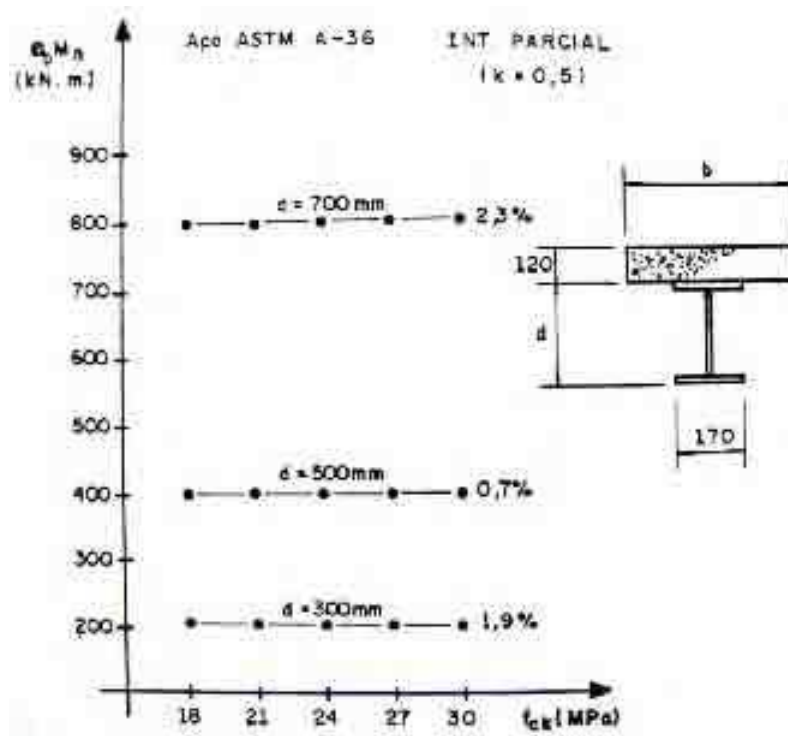


Figura 15 – Gráfico de avaliação do momento resistente de cálculo em função da resistência do concreto, apresentado por Malite (1993).

Além da utilidade imediata das ferramentas para pré-dimensionamento de perfis metálicos, que é a identificação do perfil que atende a um determinado conjunto de condições pré-estabelecidas, observa-se que essas ferramentas ainda permitem avaliar uma série de outros aspectos relacionados ao comportamento do elemento, quando se variam determinados parâmetros. Esse aspecto será discutido com detalhes no capítulo 4.

METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DOS ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

3

Neste Capítulo apresenta-se a metodologia de desenvolvimento dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas, que são formados por curvas que sintetizam um conjunto de critérios de resistência última e de comportamento em serviço. Cada curva representa uma viga mista que é formada pelo perfil indicado na mesma e que possui outras características pré-fixadas.

Para descrição da metodologia discutem-se os princípios que norteiam a criação dos ábacos de pré-dimensionamento e definem-se os parâmetros considerados para geração dos mesmos.

Descreve-se a metodologia para vigas mistas secundárias e principais, considerando-se os casos de construção escorada e não-escorada e interação completa e parcial.

3.1 Princípios para o desenvolvimento dos ábacos de pré-dimensionamento

Um bom ábaco de pré-dimensionamento de elementos estruturais deve requerer do usuário a menor quantidade possível de informação técnica para que Engenheiros e Arquitetos possam efetivamente tirar proveito de sua utilização. Esta é uma característica fundamental de ábacos que têm por objetivo auxiliar engenheiros e arquitetos no pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto.

Uma curva que compõe um ábaco de pré-dimensionamento representa a síntese de um conjunto de critérios de resistência última e de comportamento em serviço, aplicados a vigas mistas formadas com o perfil indicado na curva e com as características geométricas e mecânicas estabelecidas. Normalmente, quanto ao comportamento em serviço de vigas mistas, essas curvas consideram o estado-limite de deslocamento excessivo.

No dimensionamento de vigas mistas consideram-se duas situações construtivas distintas: construção escorada e construção não-escorada.

Para o caso de vigas mistas escoradas, a verificação do elemento é realizada em uma única etapa. Considera-se que todas as ações são resistidas pela seção mista, requerendo-se o escoramento até que o concreto apresente resistência suficiente para que o comportamento misto do elemento possa ser levado em conta. Nesse caso não é necessário verificar o comportamento da viga de aço isolada.

Para o caso de vigas mistas não-escoradas é necessário realizar a verificação da viga em duas etapas. Na primeira etapa deve-se verificar a viga de aço isolada para as ações de peso próprio da viga e do concreto fresco e de sobrecarga de construção, que atuam antes que o concreto adquira uma resistência adequada. Na segunda etapa, deve-se verificar a viga mista para o conjunto de ações atuantes sobre a estrutura.

Com a variação dos parâmetros do sistema estrutural e dos parâmetros de dimensionamento, pode-se obter uma grande quantidade de soluções para os sistemas de piso mistos de aço e concreto. Em função da ampla possibilidade de combinação das

características dos sistemas de piso, é necessário restringir condições para a geração de ábacos de pré-dimensionamento.

3.2 Parâmetros considerados na geração dos ábacos

Com base nos princípios apresentados anteriormente e nos procedimentos definidos para dimensionamento de vigas mistas de acordo com o Anexo O da ABNT NBR8800:2008, propõe-se uma metodologia para geração dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas.

Tendo em vista os ábacos de pré-dimensionamento disponíveis na literatura citados anteriormente e as amplas possibilidades de combinação das características dos sistemas de piso, busca-se criar um modelo de ábaco de pré-dimensionamento que requeira a menor quantidade possível de informações técnicas de conhecimento comum a engenheiros e arquitetos.

O primeiro parâmetro do sistema estrutural a ser considerado para geração dos ábacos é a tipologia construtiva. Devido à diferença de comportamento de vigas mistas em função desse aspecto, divide-se a geração de ábacos em duas partes: uma para vigas mistas escoradas e outra para vigas mistas não-escoradas.

Em função das premissas anteriores, tanto para o caso de vigas secundárias como para o caso de vigas principais, decidiu-se que os ábacos de pré-dimensionamento serão compostos por curvas que expressam a variação do vão livre da viga mista (L), em função da distância entre vigas adjacentes (B). Cada curva deverá representar o comportamento de uma viga mista formada por um determinado perfil metálico. Conforme definido anteriormente, B e L são parâmetros do sistema estrutural.

Para que seja possível trabalhar com a variação de B e L em um determinado ábaco, é necessário fixar os outros parâmetros que influenciam o comportamento da viga mista, denominados anteriormente como parâmetros de dimensionamento. Portanto, para cada ábaco de pré-dimensionamento, serão fixados o tipo de laje, o tipo de perfil, o tipo de conector, as características mecânicas dos materiais (aço, concreto e conector), a sobrecarga de piso, o grau de interação (completa ou parcial) e o deslocamento máximo admissível para o sistema.

Para selecionar o ábaco de pré-dimensionamento a ser utilizado, o usuário deverá definir inicialmente a tipologia construtiva e os parâmetros de dimensionamento. Uma vez identificado o ábaco que corresponde aos parâmetros fixados, o usuário poderá identificar o perfil que atenda a uma determinada condição de projeto, selecionando simplesmente a distância entre vigas adjacentes (B) e o vão livre da viga mista (L).

A metodologia de geração de ábacos de pré-dimensionamento desenvolvida neste trabalho abrange as seguintes características:

- vigas mistas biapoiadas;
- vigas secundárias e vigas principais;
- construção escorada e construção não-escorada;
- interação completa e interação parcial;
- perfis soldados e laminados;
- lajes maciças e lajes com formas de aço incorporada;
- procedimento de cálculo segundo a ABNT NBR8800:2008.

3.3 Vigas Secundárias

3.3.1 Curvas para construção escorada

3.3.1.1 Curvas para interação completa

A Curvas para estado-limite último

Para gerar uma curva $B \times L$ para estado-limite último de uma viga mista escorada com interação completa, formada por um determinado perfil de aço, é necessário determinar o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) para cada ponto da curva. O valor de M_{Rd} depende fundamentalmente da largura efetiva da mesa de concreto (b_{ef}) e do grau de interação, que nesse caso é de 100%, visto que se considera interação completa.

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, a largura efetiva (b_{ef}), de cada lado da linha de centro da viga, deve ser tomada como o menor dos seguintes valores:

- a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- b) metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- c) distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

Nos casos típicos de sistemas de piso, sendo L o vão livre da viga mista e B a distância entre vigas adjacentes, a largura efetiva (b_{ef}) corresponde ao menor dos seguintes valores: $b_{ef} = L/4$ e $b_{ef} = B$.

Para se obter a relação entre B , L e M_{Rd} para a viga mista, parte-se da verificação do estado-limite último para o momento fletor, segundo a qual deve-se atender à seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (15)$$

onde:

M_{Sd} momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} momento fletor resistente de cálculo (para a viga mista).

Para o caso de vigas biapoiadas, M_{Sd} é dado por:

$$M_{Sd} = \frac{q_d L^2}{8} \quad (16)$$

onde:

q_d valor de cálculo da ação atuante na viga mista após o endurecimento do concreto, para uma combinação última normal

$$q_d = \gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} G_{laje} + \gamma_q Q_{csm} \quad (17)$$

$$q_d = \gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} B t_c \gamma_c + \gamma_q B q_{csm} \quad (18)$$

onde:

- G_{viga} peso próprio do perfil de aço (por unidade comprimento);
- G_{laje} peso próprio da laje (por unidade comprimento);
- Q_{csm} carga sobreposta máxima (por unidade comprimento);
- q_{csm} carga sobreposta máxima (por unidade de área);
- t_c espessura da laje de concreto;
- γ_{ga} coeficiente de ponderação para o peso próprio do perfil de aço;
- γ_{gc} coeficiente de ponderação para o peso próprio da laje de concreto;
- γ_q coeficiente de ponderação para a carga sobreposta máxima;
- γ_c peso específico do concreto armado.

A carga sobreposta máxima (Q_{csm} ou q_{csm}) é composta por uma parcela de ações de caráter permanente e ações variáveis introduzidas após o endurecimento do concreto.

Substituindo a expressão (16) em (15) e levando-se em consideração a expressão (18), tem-se:

$$\frac{(\gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} B t_c \gamma_c + \gamma_q B q_{csm}) L^2}{8} \leq M_{Rd} \quad (19)$$

Considerando que a largura efetiva (b_{ef}) é determinada em função de L ou de B , podem-se construir duas curvas para estado-limite último. Para a Curva 1 considera-se que $b_{ef}=L/4$ e para a Curva 2 que $b_{ef}=B$.

Para geração da Curva 1, partindo-se de um valor de vão livre da viga mista (L_1), admite-se que $b_{ef}=L_1/4$ e determina-se $M_{Rd,I}$. Em função de $M_{Rd,I}$, calcula-se a máxima distância entre vigas adjacentes (B_1) correspondente. Variando o valor de L_1 obtêm-se os valores de B_1 que formam o conjunto de pontos da Curva 1. Partindo-se da expressão (19), o valor de B_1 é determinado por:

$$B_1 = \frac{\frac{8 M_{Rd,I}}{L_1^2} - (\gamma_{ga} G_{viga})}{(\gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm})} \quad (20)$$

Para geração da Curva 2, partindo-se de um valor da distância entre vigas adjacentes (B_1) obtida para a Curva 1, admite-se que $b_{ef}=B_1$ e determina-se $M_{Rd,II}$. Em função de $M_{Rd,II}$, calcula-se o vão livre (L_2) correspondente. Partindo dos valores de B_1 obtêm-se os valores de L_2 que formam o conjunto de pontos da Curva 2. Partindo-se da expressão (19), o valor de L_2 é determinado por:

$$L_2 = \sqrt{\frac{8 M_{Rd,II}}{\gamma_{ga} G_{viga} + B_1 (\gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm})}} \quad (21)$$

Uma vez obtidas as Curvas 1 e 2, cujos pares são apresentados na Tabela 4, deve-se definir a Curva de Resistência da viga mista (Figura 16), cujos pares (B , L) são determinados pela distância entre vigas adjacentes (B_1) e o menor valor de vão livre entre L_1 e L_2 .

Tabela 4 - Pares que definem a Curva de Resistência.

Curvas	Curva de Resistência	
	Curva 1	Curva 2
b_{ef}	$L_1/4$	B_1
Dados de Entrada	L_1	B_1
Dado de Saída	B_1	L_2
Pares	B_1, L_1	B_1, L_2
	$B_1, \text{mín}(L_1, L_2)$	

No diagrama da Figura 16, pode-se observar que as Curvas 1 e 2 se interceptam, delimitando duas zonas. Para a Zona 1, o menor momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) é obtido em função de $b_{ef}=B$, enquanto para a Zona 2, o menor M_{Rd} é obtido em função de $b_{ef}=L/4$. A reta que delimita a Zona 1 e a Zona 2 corresponde a um conjunto de pontos formados por pares $B=L/4$ e L .

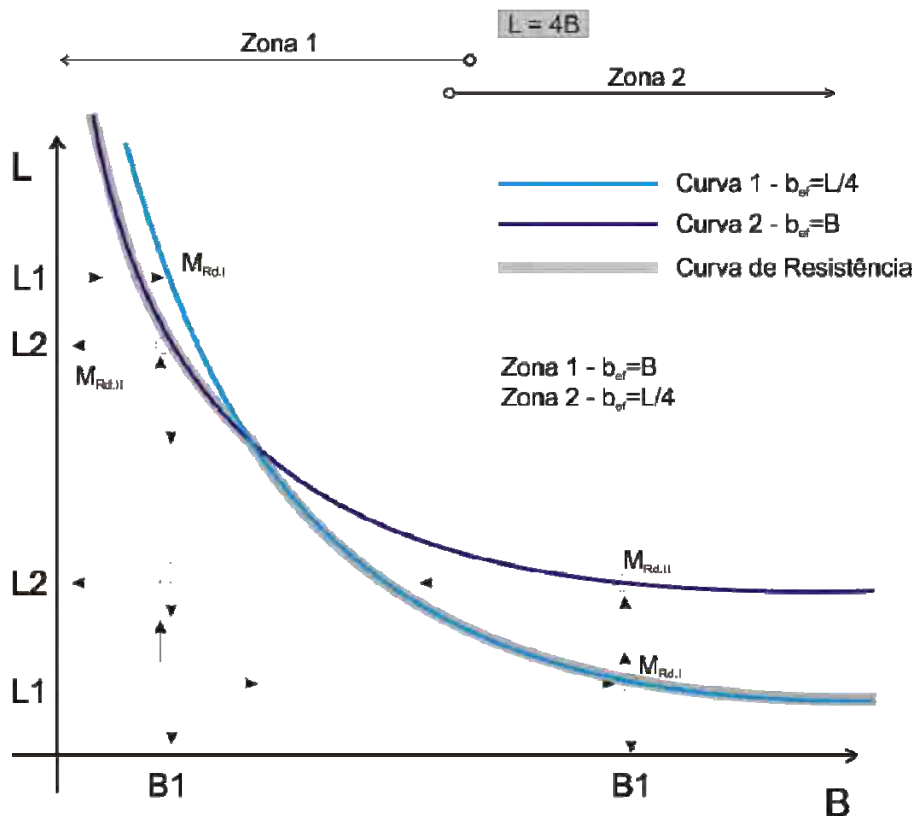


Figura 16 – Processo de obtenção da Curva de Resistência da viga mista escorada com interação completa.

B Curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos

Para gerar uma curva $B \times L$ para estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos de uma viga mista não-escorada com interação completa, formada por um determinado perfil de aço, é necessário fixar o valor do deslocamento máximo admissível (δ_{max}), que é definido em função de prescrições normativas. Para cálculo do deslocamento máximo (δ) de uma viga mista é necessário determinar o momento de inércia transformado da seção mista (I_{tr}), que depende fundamentalmente da largura efetiva da mesa de concreto (b_{ef}). Nos casos típicos de sistemas de piso, a largura efetiva (b_{ef}) corresponde ao menor dos seguintes valores: $b_{ef} = L/4$ e $b_{ef} = B$.

Para se obter a relação entre B , L e δ_{max} para a viga mista, parte-se da verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, segundo a qual deve-se atender à seguinte condição:

$$\delta \leq \delta_{\max} \quad (22)$$

onde:

δ_{\max} deslocamento máximo admissível, para uma combinação de serviço apropriada

$$\delta_{\max} = L / LIM \quad (23)$$

onde:

LIM divisor utilizado na determinação do deslocamento máximo relativo
(ex: se $\delta_{\max} = L/350$, então $LIM = 350$)

Para desenvolvimento dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas é necessário estabelecer critérios que garantam um bom desempenho desses elementos em situação de serviço.

Para estabelecer esses critérios, parte-se do princípio que o caso mais desfavorável para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos em um sistema de piso corresponde ao de uma viga mista com paredes de alvenaria (elementos não estruturais sujeitos à fissuração) sobre e sob a viga, solidarizadas com a mesma.

Tanto para construção escorada, como para não escorada, por uma questão construtiva, a alvenaria sobre a viga só é instalada após o concreto alcançar uma determinada resistência à compressão, quando já se conta com a seção mista da viga. Os deslocamentos (δ_1) devidos às ações permanentes atuantes na viga antes do endurecimento do concreto ($G_{viga} + G_{laje}$) não afetam a alvenaria. Por outro lado, os deslocamentos devidos às ações permanentes introduzidas após o endurecimento do concreto (G_{2p}), também não introduzem danos aos componentes não estruturais, supondo-se que os mesmos ainda não estão solidarizados à viga.

Os deslocamentos que efetivamente podem provocar danos aos elementos não estruturais sujeitos à fissuração ou a outros componentes da construção são os devidos à sobrecarga de piso (Q_{sc}) (de natureza variável) e os devidos à deformação lenta do concreto, calculados em função de G_{2p} . O somatório destes deslocamentos é denominado δ_2 .

Portanto, é justificável limitar o deslocamento δ_2 , provocado pela ação variável (Q_{sc}) e pela deformação lenta do concreto (calculado em função de G_{2p}), a um valor máximo de $L/350$. No caso específico da geração dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas, pode-se admitir que esta verificação seja feita para a ação Q_{csm} , denominada carga sobreposta máxima, que engloba as ações permanentes e variáveis instaladas após o endurecimento do concreto. Ao se optar pela fixação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}) na construção dos ábacos de pré-dimensionamento, não é possível computar os deslocamentos devidos à deformação lenta do concreto, visto que não se controla separadamente a parcela de G_{2p} . Tendo em vista que nem todas vigas mistas abrangidas pelos ábacos possuem paredes sobre ou sob a viga, decidiu-se não limitar o deslocamento a um valor absoluto.

Portanto o primeiro critério para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos consiste em limitar o deslocamento máximo admissível a $L/350$ para a carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

Como a percepção visual dos deslocamentos verticais da viga mista normalmente também é um fator condicionante de projeto, deve-se escolher entre duas opções:

- 1 - aplicar uma contraflecha de valor equivalente ao deslocamento devido ao valor integral ou quase-integral das ações permanentes e limitar a $L/350$ para combinação rara de serviço;
- 2 - limitar o deslocamento máximo admissível a $L/250$ para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).

[6:35:29 PM] José Luiz Rangel Paes: Portanto, para a geração dos ábacos de pré-dimensionamento deste trabalho optou-se por utilizar os dois critérios supracitados, não considerando o limite absoluto de 15mm recomendado pela ABNT NBR8800:2008 para os casos onde existem paredes de alvenaria sobre ou sob a viga, solidarizadas com a mesma. Os dois critérios adotados estão ancorados nas justificativas anteriormente apresentadas e também estão alinhados com a filosofia da normas atuais de estruturas de aço e mistas, segundo as quais os limites aplicáveis aos estados limites de serviço podem ser acordados entre o cliente e o responsável pelo projeto.

Normalmente, a primeira opção é a mais adotada pelos fabricantes de estruturas metálicas no Brasil, por ser a mais econômica e por produzir uma melhor sensação de segurança aos usuários. Geralmente, a contraflecha é dada para se obter uma superfície nivelada sob a atuação integral ou quase-integral das ações permanentes, evitando-se, inclusive, um acúmulo de concreto nas zonas mais deformadas ("empoçamento de concreto").

A segunda opção normalmente é mais rigorosa do que a primeira, uma vez que considera as ações de peso próprio, e condiciona o comportamento da viga mista implicando em um aumento de peso de aço do sistema de piso.

Em função disto, como segundo critério para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, o que pode ser visto como uma alternativa ao primeiro, limita-se o deslocamento máximo admissível a $L/250$ para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).

Portanto, para a geração dos ábacos de pré-dimensionamento deste trabalho optou-se por considerar os dois critérios supracitados, não considerando o limite absoluto de 15mm recomendado pela ABNT NBR8800:2008 para os casos onde existem paredes de alvenaria sobre ou sob a viga, solidarizadas com a mesma.

Para aplicação do primeiro critério, que limita o deslocamento máximo admissível a $L/350$, deve-se calcular o deslocamento máximo de uma viga mista biapoiada escorada submetida à carga sobreposta máxima (Q_{csm}) por meio de:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{E I_{tr}} \quad (24)$$

onde:

q_2 ações atuantes na viga mista após o endurecimento do concreto

$$q_2 = Q_{csm} \quad (25)$$

$$q_2 = B q_{csm} \quad (26)$$

onde:

q_{csm} carga sobreposta máxima por unidade de área. Esta carga engloba a parcela de ações de caráter permanente e a sobrecarga em piso introduzidas após o endurecimento do concreto;

E módulo de elasticidade do aço;

I_{tr} momento de inércia transformado da seção mista.

Substituindo as expressões (24) e (25) na expressão (23) e levando-se em consideração a expressão (27), tem-se:

$$\frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{E I_{tr}} \leq \frac{L}{LIM} \quad (27)$$

$$\frac{5}{384} \frac{(B q_{csm}) L^3}{E I_{tr}} \leq \frac{L}{350} \quad (28)$$

Considerando que a largura efetiva (b_{ef}) é determinada em função de L ou de B , podem-se construir duas curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. Para a Curva 3 considera-se que $b_{ef} = L/4$ e para a Curva 4 que $b_{ef} = B$.

Para geração da Curva 3, partindo-se dos mesmos vãos livres da viga mista adotados para a Curva 1 (L_1), admite-se que $b_{ef} = L_1/4$ e determina-se δ_I . Em função de δ_I , calcula-se a máxima distância entre vigas adjacentes (B_3) correspondente. Variando o valor de L_1 obtém-se os valores de B_3 , que formam o conjunto de pontos da Curva 3. Partindo-se da expressão (14), o valor de B_3 é determinado por:

$$B_3 = \frac{384 E I_{tr}}{1750 L_1^3 q_{csm}} \quad (29)$$

Para geração da Curva 4, partindo-se de um valor da distância entre vigas adjacentes (B_3) obtida para a Curva 3, admite-se que $b_{ef} = B_3$ e determina-se δ_{II} . Em função de δ_{II} , calcula-se o vão livre (L_4) correspondente. Partindo dos valores de B_3 obtém-se os valores de L_4 , que formam o conjunto de pontos da Curva 4. Partindo-se da expressão (14), L_4 é dado por:

$$L_4 = \sqrt[3]{\frac{384 E I_{tr}}{1750 B_3 q_{csm}}} \quad (30)$$

Uma vez obtidas as Curvas 3 e 4, cujos pares são apresentados na Tabela 5, deve-se definir a Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista (Figura 17), cujos pares (B, L) são determinados pela distância entre vigas adjacentes (B_3) e o menor valor de vão livre entre L_1 e L_4 .

Tabela 5 – Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo.

Curvas	Curva de Deslocamento Excessivo	
	Curva 3	Curva 4
b_{ef}	$L_1/4$	B_3
Dados de Entrada	L_1	B_3
Dado de Saída	B_3	L_4
Pares	L_1, B_3	B_3, L_4
	$B_3, \text{mín}(L_1, L_4)$	

No diagrama da Figura 17, pode-se observar que as Curvas 3 e 4 se interceptam em determinado ponto, delimitando duas zonas. Para a Zona 1, o menor valor de deslocamento, que corresponde à curva mínima, é obtido em função de $b_{ef}=B$, enquanto para a Zona 2, o menor valor de deslocamento é obtido em função de $b_{ef}=L/4$. A reta que delimita a Zona 1 e a Zona 2 corresponde a um conjunto de pontos formados por pares $B=L/4$ e L .

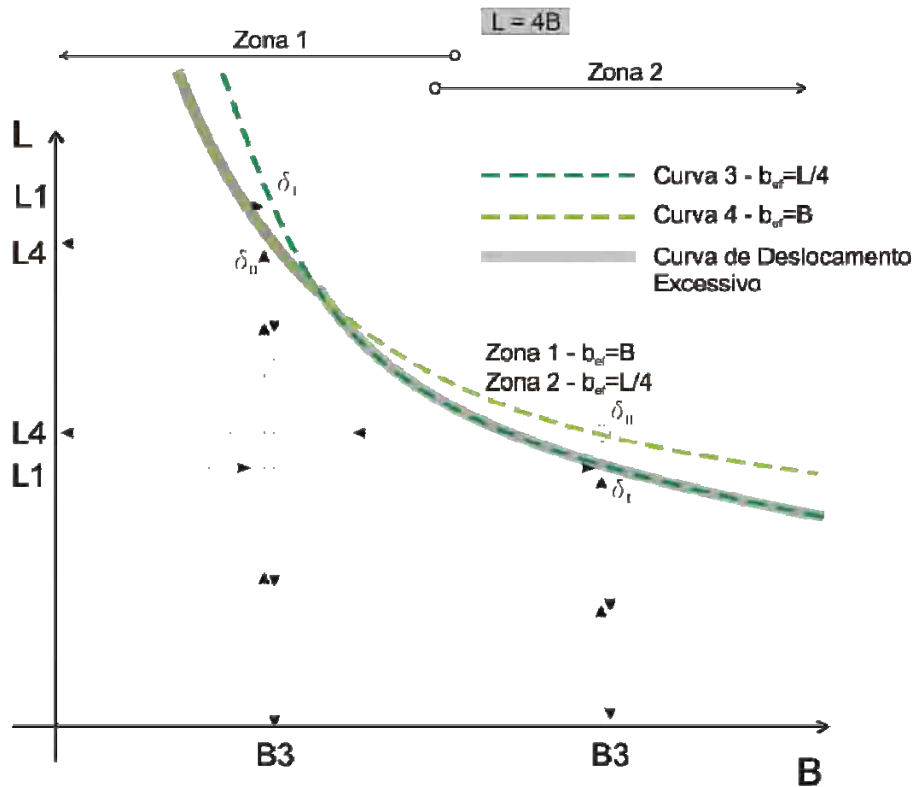


Figura 17 – Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista escorada com interação completa, aplicando o primeiro critério de deslocamento máximo admissível.

Para aplicação do segundo critério, que limita o deslocamento máximo admissível a $L/250$, deve-se calcular o deslocamento máximo de uma viga mista biapoiada escorada para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) por meio de:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{EI_{tr}} \quad (31)$$

onde:

q_2 ações atuantes na viga mista após o endurecimento do concreto

$$q_2 = G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm} \quad (32)$$

$$q_2 = G_{viga} + B t_c \gamma_c + B q_{csm} \quad (33)$$

Substituindo as expressões (23 e 31) na expressão (22) e levando-se em consideração a expressão (33), tem-se:

$$\frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{E I_{tr}} \leq \frac{L}{LIM} \quad (34)$$

$$\frac{5}{384} \frac{(G_{viga} + B t_c \gamma_c + B q_{csm}) L^3}{E I_{tr}} \leq \frac{1}{250} \quad (35)$$

Considerando que a largura efetiva (b_{ef}) é determinada em função de L ou de B , podem-se construir duas curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. Para a Curva 5 considera-se que $b_{ef} = L/4$ e para a Curva 6 que $b_{ef} = B$.

Para geração da Curva 5, partindo-se dos mesmos vãos livres da viga mista adotados para a Curva 1 (L_1), admite-se que $b_{ef} = L_1/4$ e determina-se δ_I . Em função de δ_I , calcula-se a máxima distância entre vigas adjacentes (B_5) correspondente. Variando o valor de L_1 obtêm-se os valores de B_5 que formam o conjunto de pontos da Curva 5. Partindo-se da expressão (35), o valor de B_5 é determinado por:

$$B_5 \leq \frac{\left(\frac{384 E I_{tr}}{1250 L_1^3} \right) - G_{viga}}{(t_c \gamma_c + q_{csm})} \quad (36)$$

Para geração da Curva 6, partindo-se de um valor da distância entre vigas adjacentes (B_5) obtida para a Curva 5, admite-se que $b_{ef} = B_5$ e determina-se δ_{II} . Em função de δ_{II} , calcula-se o vão livre (L_6) correspondente. Partindo dos valores de B_5 obtêm-se os valores de L_6 que formam o conjunto de pontos da Curva 6. Partindo-se da expressão (3), o valor de L_6 é determinado por:

$$L_6 \leq \sqrt[3]{\frac{384 E I_{tr}}{1250 (G_{viga} + B_5 (t_c \gamma_c + q_{csm}))}} \quad (37)$$

Uma vez obtidas as Curvas 5 e 6, cujos pares são apresentados na Tabela 6, deve-se determinar a Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista (Figura 18), cujos pares (B , L) são determinados pela distância entre vigas adjacentes (B_5) e o menor valor de vão livre entre L_1 e L_6 .

Tabela 6 - Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo.

Curvas	Curva de Deslocamento Excessivo	
	Curva 5	Curva 6
b_{ef}	$L_1/4$	B_5
Dados de Entrada	L_1	B_5
Dado de Saída	B_5	L_6
Pares	L_1, B_5	B_5, L_6
	$B_5, \text{mín}(L_1, L_6)$	

No diagrama da Figura 18, pode-se observar que as Curvas 5 e 6 se interceptam em determinado ponto, delimitando duas zonas. Para a Zona 1, o menor valor de deslocamento, que corresponde à curva mínima, é obtido em função de $b_{ef}=B$, enquanto para a Zona 2, o menor valor de deslocamento é obtido em função de $b_{ef}=L/4$. A reta que delimita a Zona 1 e a Zona 2 corresponde a um conjunto de pontos formados por pares $B=L/4$ e L .

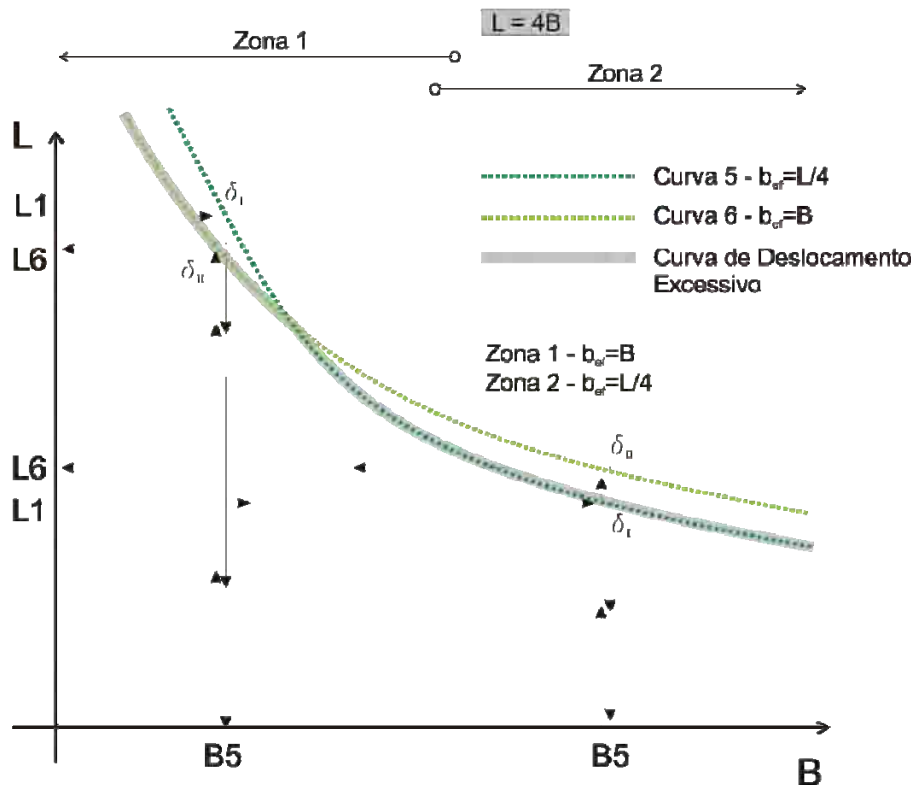


Figura 18 – Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista escorada com interação completa, aplicando o segundo critério de deslocamento máximo admissível.

C Curva de Pré-dimensionamento da viga mista

Tendo por base as curvas para estado-limite último (1 e 2) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3, 4, 5 e 6) descritas anteriormente, deve-se definir a Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, que representa a síntese dos critérios de resistência última e de deslocamento excessivo para o perfil correspondente (Figura 19). Para isto, considera-se sempre a aplicação de um dos dois critérios de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, descritos anteriormente, de maneira independente, o que implica em utilizar as Curvas 3 e 4 ou 5 e 6 separadamente.

A Curva de Pré-dimensionamento é formada por um conjunto de pares B e L_{\min} e possui descontinuidades, devido ao critério que governa o comportamento da viga mista, ora a resistência última, ora o deslocamento excessivo.

A fim de ilustrar a obtenção da Curva de Pré-dimensionamento, considerando-se o primeiro critério de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, no diagrama da

Figura 19 pode-se observar que as Curvas 1 e 2 e as Curvas 3 e 4 se interceptam em pontos cujas coordenadas valem $B = L/4$ e L , delimitando as zonas 1 e 2, conforme descrito anteriormente. Para a Zona 1, $b_{ef} = B$, enquanto que para a Zona 2, $b_{ef} = L/4$.

De acordo com

Figura 19, a Curva de Pré-dimensionamento também fica dividida nas zonas 1 e 2. Se um ponto desta curva pertence à Zona 1, $b_{ef} = B$ e suas coordenadas são definidas em função daquelas obtidas para as Curvas 2 e 4. Assim, para cada valor de B_1 deve-se tomar o menor valor entre L_2 e L_4 . Se o ponto pertence à Zona 2, $b_{ef} = L/4$ e suas coordenadas são definidas em função daquelas obtidas para as Curvas 1 e 3. Portanto, para cada valor de L_1 , deve-se tomar o menor valor entre B_1 e B_3 .

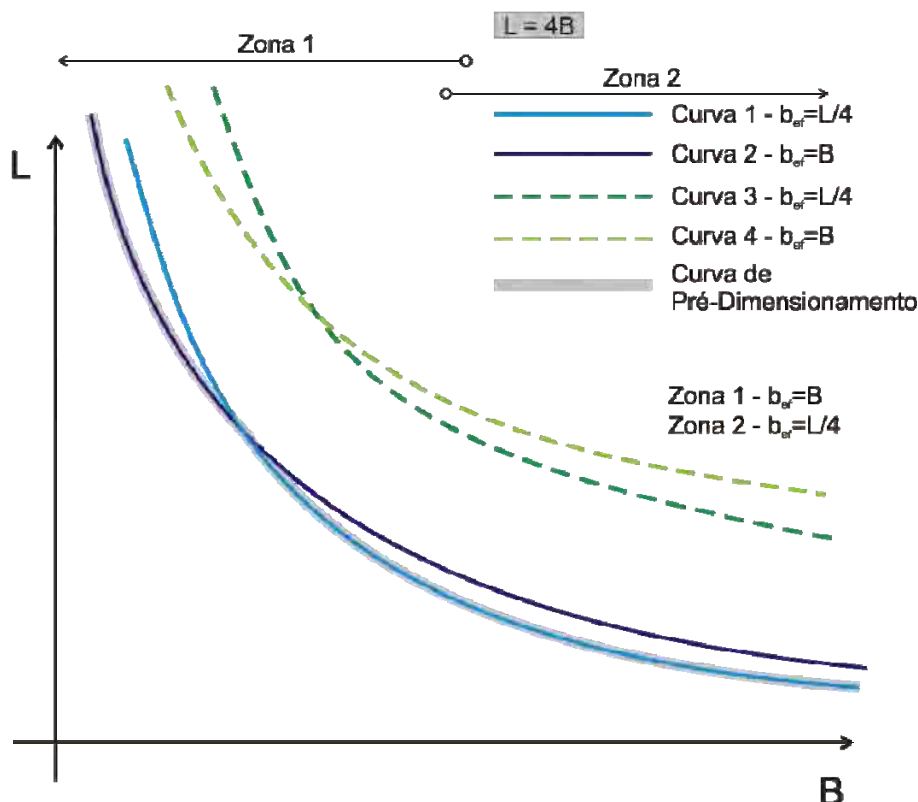


Figura 19 – Processo de obtenção da Curva de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação completa, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível.

Na Tabela 7 apresenta-se um resumo dos pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento. Deve-se notar que para que seja possível obter as coordenadas da Curva de Pré-dimensionamento na Zona 1, a partir da comparação entre as curvas 2 e 4, é necessário que os valores das abscissas B sejam os mesmos. Por este motivo, neste caso, para a geração da Curva 4 utilizam-se valores de B_1 iguais aos adotados para a geração da Curva 2.

Tabela 7 – Pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento.

Curvas	Curva de Pré-dimensionamento			
	Curva de Resistência		Curva de Deslocamento Excessivo	
	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
b_{ef}	$L_1/4$	B_1	$L_1/4$	B_1
Dados de Entrada	L_1	B_1	L_1	B_1
Dado de Saída	B_1	L_2	B_3	L_4
Pares	L_1, B_1	B_1, L_2	L_1, B_3	B_1, L_4
	Se Zona 1 ($b_{ef} = B$) então ($B_1, \text{mín}(L_2, L_4)$) Se Zona 2 ($b_{ef} = L/4$) então ($\text{mín}(B_1, B_3), L_1$)			

Na Figura 20 apresenta-se um fluxograma que contém as etapas para a geração da Curva de Pré-dimensionamento de uma viga mista formada por um determinado perfil metálico.

De maneira análoga à mostrada anteriormente, pode-se obter a Curva de Pré-dimensionamento considerando-se o segundo critério de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. Para isto, deve-se considerar a síntese do comportamento entre as Curvas 1 e 2 e as Curvas 5 e 6.

Na Figura 21 mostra-se a Curva de Pré-dimensionamento de uma viga mista formada por um determinado perfil metálico, para construção escorada e interação completa, na qual pode-se observar as descontinuidades características, resultantes do processo de geração descrito anteriormente.

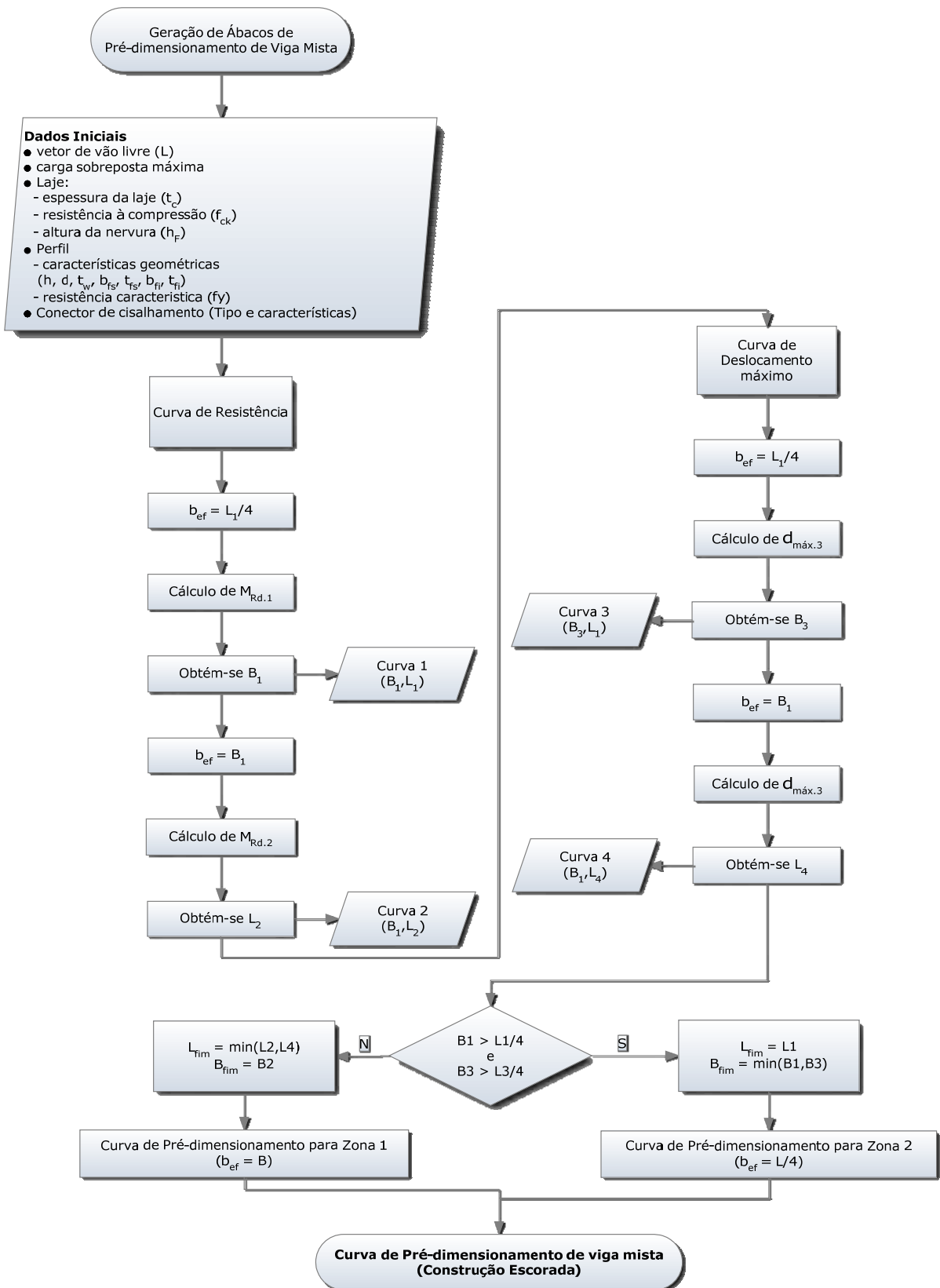


Figura 20 - Fluxograma para geração da Curva de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação completa.

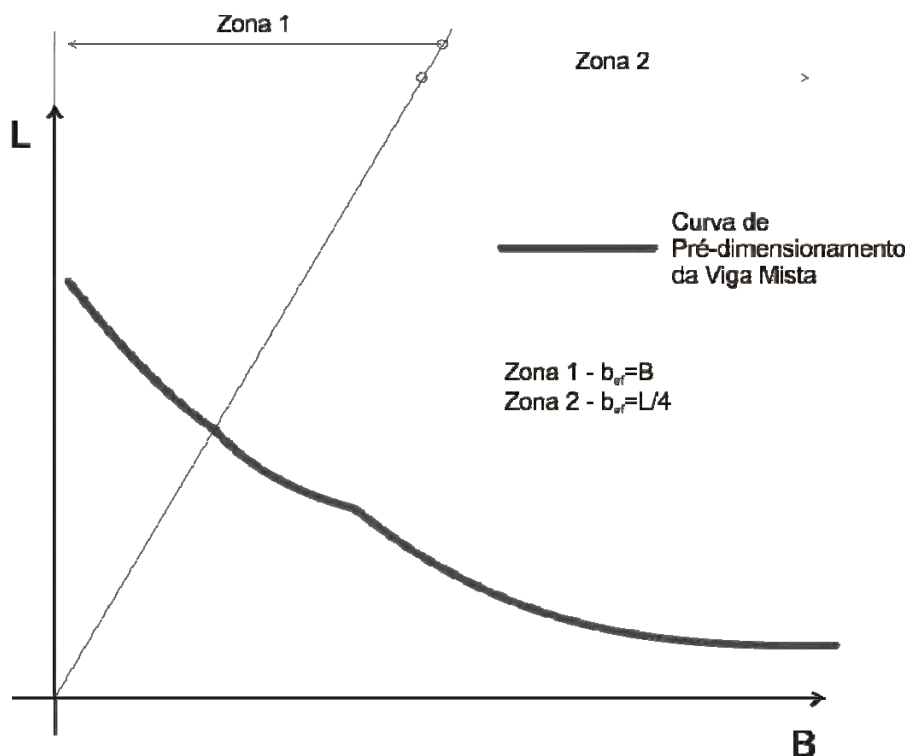


Figura 21 – Curva de Pré-Dimensionamento da viga mista escorada com interação completa.

3.3.1.2 Curvas para interação parcial

Para o caso de vigas mistas com interação parcial, a sequência de obtenção da Curva de Pré-dimensionamento é idêntica à descrita no item 3.3.1.1, com a diferença de que neste caso torna-se interessante variar o grau de interação da viga mista, respeitando-se o grau de interação mínimo prescrito no Anexo O da NBR 8800 (ABNT, 2008). O uso de vigas mistas com interação parcial pode ser uma boa alternativa de projeto quando se deseja reduzir a quantidade de conectores de cisalhamento entre o perfil e a laje de concreto.

O grau de interação da viga mista influencia o valor do momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) e o deslocamento máximo (δ) da mesma.

Na Figura 22 mostra-se um conjunto de Curvas de Pré-dimensionamento para uma mesma viga mista escorada formada por um determinado perfil metálico, variando-se o grau de interação entre 40 e 100%. Deve-se notar que essas curvas descrevem o mesmo comportamento global da curva para interação completa mostrada no item 3.2.1.1, com as discontinuidades características.

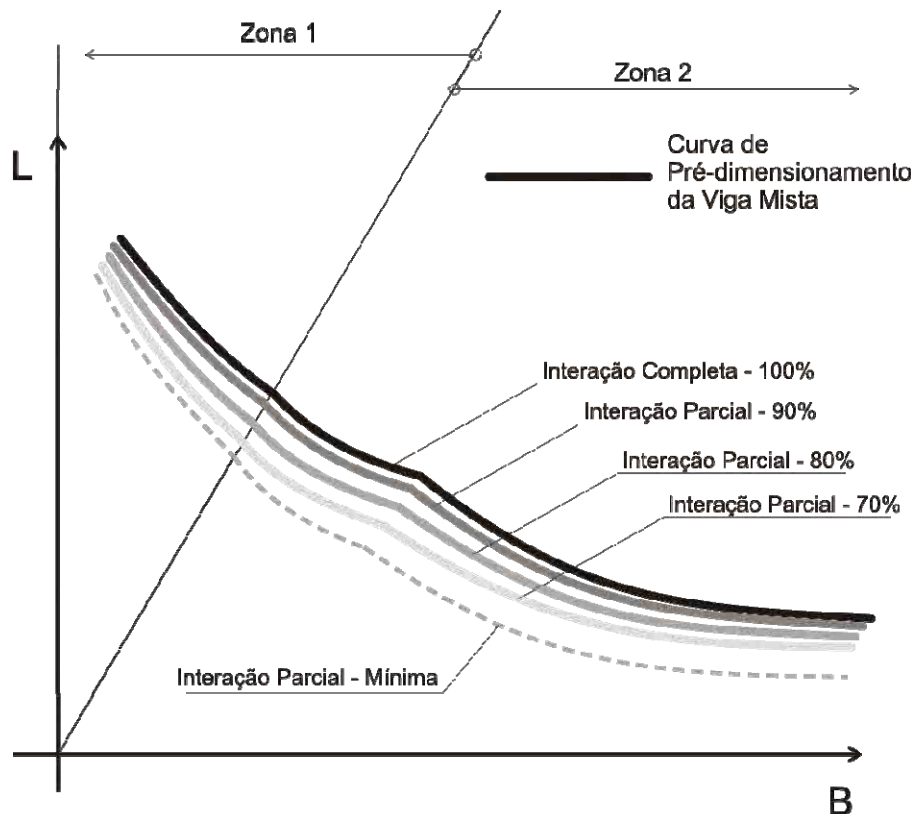


Figura 22 – Curvas de Pré-dimensionamento da viga mista escorada com interação parcial.

3.3.2 Curvas para construção não-escorada

3.3.2.1 Curvas para interação completa

Nas vigas mistas não-escoradas, o perfil de aço isolado deve ser capaz de suportar as ações de peso próprio da viga de aço, o peso próprio do concreto fresco e a sobrecarga de construção, antes do concreto atingir 75% da resistência característica à compressão. Após o endurecimento do concreto, conta-se com a seção mista da viga, que deve ser verificada para o conjunto de ações atuantes sobre o sistema de piso.

Para se obter as Curvas de Pré-dimensionamento de uma viga mista não-escorada, é interessante comparar o comportamento da mesma com relação a uma viga mista escorada por meio de um diagrama Momento x Flecha, como se mostra na Figura 23. Neste diagrama pode-se observar que os momentos fletores resistentes de cálculo (M_{Rd}) de uma viga mista escorada são equivalentes àqueles de uma viga mista não-escorada.

Uma diferença fundamental do comportamento de uma viga mista não-escorada com relação ao de uma escorada é o valor do deslocamento em situação de serviço (Figura 23). O deslocamento apresentado por uma viga mista não-escorada é fortemente influenciado pela parcela de deslocamento causada pelas ações de caráter permanente que atuam na viga de aço isolada antes do endurecimento do concreto.

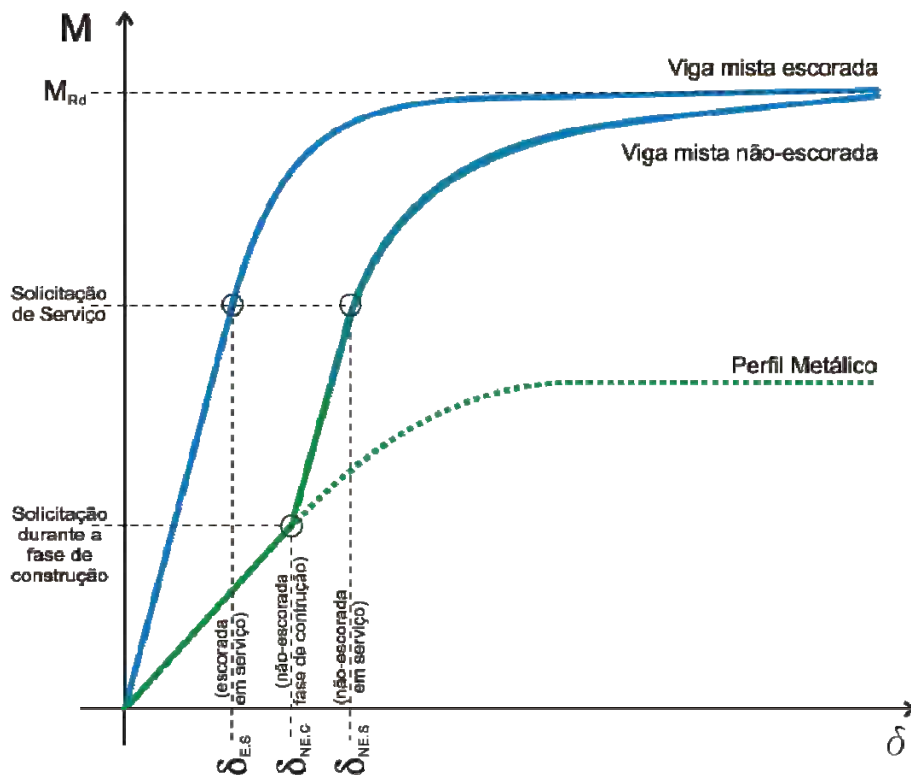


Figura 23 – Comportamento da viga mista para situação escorada e não-escorada.

A Curvas para estado-limite último

Tendo em vista que os momentos fletores resistentes de cálculo (M_{Rd}) de uma viga mista escorada e de uma não-escorada são iguais, as curvas $B \times L$ para estado-limite último de vigas mistas escoradas, apresentadas no item 3.2.1.1.A, também são válidas para a construção não-escorada. Portanto, para vigas mistas não-escoradas valem as Curvas 1 e 2 apresentadas na Figura 16. A interseção dessas curvas delimita as zonas 1 e 2, conforme descrito no item 3.2.1.1.A. Para a Zona 1, $b_{ef} = B$, enquanto que para a Zona 2, $b_{ef} = L/4$. A reta que delimita a Zona 1 e a Zona 2 corresponde a um conjunto de pontos formados por pares $B = L/4$ e L .

Para a construção não-escorada deve-se verificar também a resistência última do perfil de aço isolado para o conjunto de ações que atuam antes que o concreto atinja um determinado valor de resistência à compressão. Para gerar uma curva $B \times L$ para estado-limite último de um perfil de aço isolado é necessário determinar o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) para cada ponto da curva.

Para se obter a relação entre B , L e M_{Rd} para o perfil de aço isolado, parte-se da verificação do estado-limite último para o momento fletor, segundo a qual deve-se atender à seguinte condição:

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (38)$$

onde:

M_{sd} momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} momento fletor resistente de cálculo (para o perfil de aço isolado).

Para o caso de vigas biapoiadas, M_{sd} é dado por:

$$M_{sd} = \frac{q_d L^2}{8} \quad (39)$$

onde:

q_d valor de cálculo da ação atuante na viga de aço isolada antes do endurecimento do concreto, para uma combinação última de construção

$$q_d = \gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} G_{laje} + \gamma_q Q_c \quad (40)$$

$$q_d = \gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} B t_c \gamma_c + \gamma_q B q_c \quad (41)$$

onde:

q_c sobrecarga de construção

Substituindo a expressão (39) em (38) e levando-se em consideração a expressão (41), tem-se:

$$\frac{(\gamma_{ga} G_{viga} + \gamma_{gc} B t_c \gamma_c + \gamma_q B q_c) L^2}{8} \leq M_{Rd} \quad (42)$$

Já que para o perfil de aço isolado, o valor de M_{Rd} não depende da largura efetiva (b_{ef}), pode-se construir uma única curva $B \times L$ para estado-limite último. No entanto, para que seja possível construir a Curva de Resistência da viga mista, torna-se necessário gerar duas curvas de estado-limite último para o perfil de aço isolado, designadas Curvas 9 e 10, e compará-las com as Curvas 1 e 2.

Para geração da Curva 9, partindo-se dos mesmos vãos livres da viga mista adotados para a Curva 1 (L_1), calcula-se $M_{Rd.I}$ e determina-se a máxima distância entre vigas adjacentes (B_9) correspondente. Variando o valor de L_1 obtêm-se os valores de B_9 , que formam o conjunto de pontos da Curva 9. Partindo-se da expressão (42), o valor de B_9 é determinado por:

$$B_9 = \frac{\frac{8M_{Rd.I}}{L_1^2} - (\gamma_{ga} G_{viga})}{(\gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_c)} \quad (43)$$

Para geração da Curva 10, partindo-se de um valor da distância entre vigas adjacentes (B_1) obtida para a Curva 1, calcula-se $M_{Rd.II}$ e determina-se o vão livre (L_{10}) correspondente. Partindo dos valores de B_1 obtêm-se os valores de L_{10} , que formam o conjunto de pontos da Curva 10. Partindo-se da expressão (42), o valor de L_{10} é determinado por:

$$L_{10} = \sqrt{\frac{8M_{Rd.II}}{\gamma_{ga} G_{viga} + B(\gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_c)}} \quad (44)$$

Uma vez obtidas as Curvas 1, 2, 9 e 10 descritas anteriormente, pode-se determinar a Curva de Resistência da viga mista não-escorada (Figura 24). De acordo com a Figura 3.10

Na Tabela 8 apresenta-se um resumo dos pares que definem a Curva de Resistência da viga mista não-escorada.

Tabela 8 – Pares que definem a Curva de Resistência.

Curvas	Curva de Resistência			
	Viga mista não-escorada		Perfil de aço isolado	
	Curva 1	Curva 2	Curva 9	Curva 10
b_{ef}	$L_1/4$	B_1	$L_1/4$	B_1
Dados de Entrada	L_1	B_1	L_1	B_1
Dado de Saída	B_1	L_2	B_9	L_{10}
Pares	L_1, B_1	B_1, L_2	L_1, B_9	B_1, L_{10}
	Se Zona 1 ($b_{ef} = B$) então ($B_1, \text{mín}(L_2, L_{10})$)			
	Se Zona 2 ($b_{ef} = L/4$) então ($\text{mín}(B_1, B_9), L_1$)			

B Curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos

Para gerar uma curva $B \times L$ para estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos de uma viga mista não-escorada com interação completa, formada por um determinado perfil de aço, é necessário fixar o valor do deslocamento máximo admissível (δ_{max}), conforme discutido no item 3.2.1.1.B.

Em função dos argumentos apresentados no item 3.2.1.1.B, considera-se que os critérios para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos são válidos tanto para vigas mistas escoradas, quanto para não-escoradas, ou seja:

Primeiro critério : deslocamento máximo admissível de $L/350$ para a carga sobreposta máxima (Q_{csm});

Segundo critério : deslocamento máximo admissível de $L/250$ para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).

Para cálculo do deslocamento máximo (δ) de uma viga mista não-escorada é necessário considerar o momento de inércia da seção transversal de aço (I_a) e determinar o momento de inércia transformado da seção mista (I_{tr}), que depende fundamentalmente da largura efetiva da mesa de concreto (b_{ef}). Nos casos típicos de sistemas de piso, a largura efetiva (b_{ef}) corresponde ao menor dos seguintes valores: $b_{ef} = L/4$ e $b_{ef} = B$.

De acordo com o primeiro critério, limita-se o deslocamento máximo admissível a $L/350$ e calcula-se o deslocamento máximo de uma viga mista biapoiada não-escorada submetida à carga sobreposta máxima (Q_{csm}), que representa a soma da parcela de ações de caráter permanente e da sobrecarga em piso introduzidas após o endurecimento do concreto. Para cálculo deste deslocamento considera-se a expressão (10), que é função do momento de inércia transformado da seção mista (I_{tr}), conforme apresentado no item 3.2.1.1.B.

Tendo em vista que no procedimento de cálculo do deslocamento máximo (δ) de uma viga mista não-escorada, de acordo com o primeiro critério, utilizam-se os mesmos parâmetros indicados no item 3.2.1.1.B, as Curvas 3 e 4 para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos (Figura 3.3), também são válidas para a construção não-escorada.

Para aplicação do segundo critério, que limita o deslocamento máximo admissível a $L/250$, deve-se calcular o deslocamento máximo de uma viga mista biapoiada não-escorada para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) por meio de:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q_1 L^4}{EI_a} + \frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{EI_{tr}} \quad (45)$$

onde:

I_a momento de inércia da seção transversal de aço;

q_1 ações atuantes na viga de aço isolada antes do endurecimento do concreto

$$q_1 = G_{viga} + G_{laje} \quad (46)$$

$$q_1 = G_{viga} + B t_c \gamma_c \quad (47)$$

q_2 ações atuantes na viga mista após o endurecimento do concreto

$$q_2 = Q_{csm} \quad (48)$$

$$q_2 = B q_{csm} \quad (49)$$

onde:

q_{csm} carga sobreposta máxima por unidade de área. Esta carga engloba a parcela de ações de caráter permanente e a sobrecarga em piso introduzidas após o endurecimento do concreto;

Aplicando-se a expressão (45) para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos (expressão (22)) e levando-se em consideração as expressões (47 e 49), tem-se:

$$\frac{5}{384} \frac{q_1 L^4}{EI_a} + \frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{EI_{tr}} \leq \frac{L}{LIM} \quad (50)$$

$$\frac{5}{384} \frac{L^3}{E} \left(\frac{(G_{viga} + B t_c \gamma_c)}{I_a} + \frac{(B q_{csm})}{I_{tr}} \right) \leq \frac{1}{250} \quad (51)$$

Considerando que a largura efetiva (b_{ef}) é determinada em função de L ou de B , podem-se construir duas curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. Para a Curva 7 considera-se que $b_{ef} = L/4$ e para a Curva 8 que $b_{ef} = B$.

Para geração da Curva 7, partindo-se dos mesmos vãos livres da viga mista adotados para a Curva 1 (L_1), admite-se que $b_{ef} = L_1/4$ e determina-se δ_I . Em função de δ_I , calcula-se a máxima distância entre vigas adjacentes (B_7) correspondente. Variando o valor de L_1 obtêm-se os valores de B_7 , que formam o conjunto de pontos da Curva 7. Partindo-se da expressão (51), o valor de B_7 é determinado por:

$$B_7 = \frac{\left(\frac{384 E}{1250 L_1^3} \right) - \frac{G_{viga}}{I_a}}{\left(\frac{t_c \gamma_c}{I_a} + \frac{q_{csm}}{I_{tr}} \right)} \quad (52)$$

Para geração da Curva 8, partindo-se de um valor da distância entre vigas adjacentes (B_7) obtida para a Curva 7, admite-se que $b_{ef} = B_7$ e determina-se δ_{II} . Em função de δ_{II} , calcula-se o vão livre (L_8) correspondente. Partindo dos valores de B_7 obtêm-se os valores

de L_8 que formam o conjunto de pontos da Curva 8. Partindo-se da expressão (51), o valor de L_8 é determinado por:

$$L_8 = \sqrt[3]{\frac{384 E}{1250 \left(\frac{(G_{viga} + B_7 t_c \gamma_c)}{I_a} + \frac{(B_7 q_{csm})}{I_{tr}} \right)}} \quad (53)$$

Uma vez obtidas as Curvas 7 e 8, cujos pares são apresentados na Tabela 9, deve-se determinar a Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista (Figura 25), cujos pares (B , L) são determinados pela distância entre vigas adjacentes (B_7) e o menor valor de vão livre entre L_1 e L_8 .

Tabela 9 – Pares que definem a Curva de Deslocamento Excessivo.

Curvas	Curva de Deslocamento Excessivo	
	Curva 7	Curva 8
b_{ef}	$L_1/4$	B_7
Dados de Entrada	L_1	B_7
Dado de Saída	B_7	L_8
Pares	L_1, B_7	B_7, L_8
	$B_7, \text{mín}(L_1, L_8)$	

No diagrama da Figura 25, pode-se observar que as Curvas 7 e 8 se interceptam em pontos cujas coordenadas valem $B = L/4$ e L , delimitando a zonas 1 e 2 descritas anteriormente.

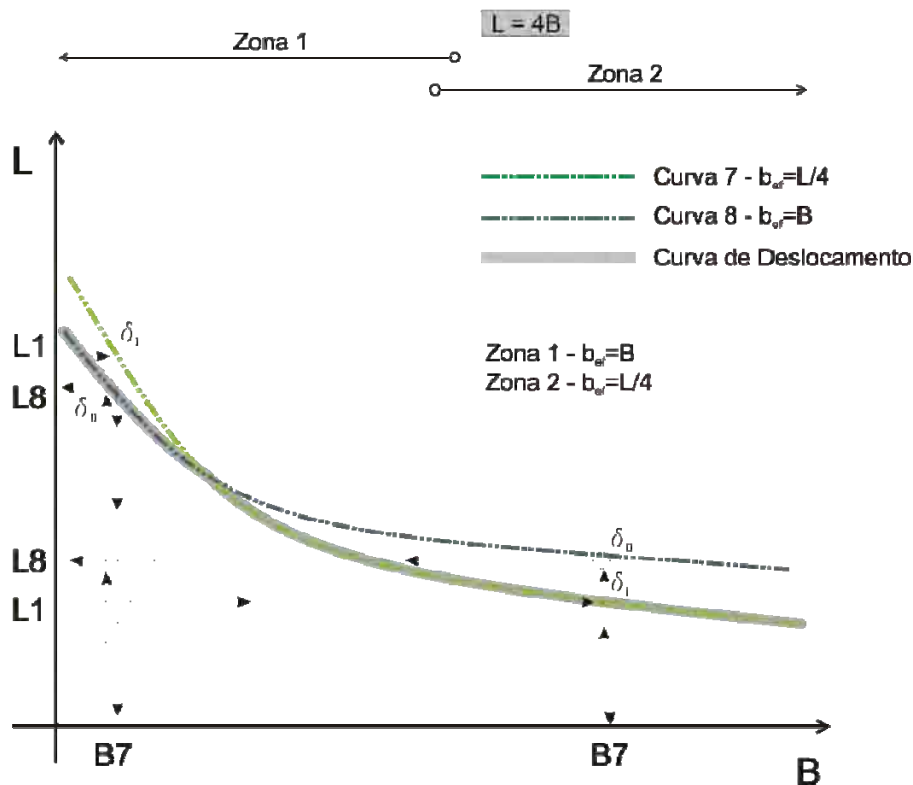


Figura 25 – Processo de obtenção da Curva de Deslocamento Excessivo da viga mista não-escorada com interação completa, aplicando o segundo critério de deslocamento máximo admissível.

C Curva de Pré-dimensionamento da viga mista

Tendo por base as curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3, 4, 7 e 8) descritas anteriormente, deve-se definir a Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, que representa a síntese dos critérios de resistência última e de deslocamento excessivo para o perfil correspondente (Figura 26). Para isto, considera-se sempre a aplicação de um dos dois critérios de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, descritos anteriormente, de maneira independente, o que implica em utilizar as Curvas 3 e 4 ou 7 e 8 separadamente.

A fim de ilustrar a obtenção da Curva de Pré-dimensionamento, considerando-se o primeiro critério de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, no diagrama da Figura 26 pode-se observar que as Curvas 1 e 2 e as Curvas 3 e 4 se interceptam em pontos cujas coordenadas valem $B = L/4$ e L , delimitando as zonas 1 e 2, conforme descrito anteriormente. Para a Zona 1, $b_{ef} = B$, e para a Zona 2, $b_{ef} = L/4$. Nota-se

também que as Curvas 9 e 10 se sobrepõem, já que a resistência última do perfil de aço isolado não depende da largura efetiva (b_{ef}).

De acordo com a Figura 26, a Curva de Pré-dimensionamento também fica dividida nas zonas 1 e 2. Se um ponto dessa curva pertence à Zona 1, $b_{ef}=B$ e suas coordenadas são definidas em função daquelas obtidas para as Curvas 2, 10 e 4. Assim, para cada valor de B_1 deve-se tomar o menor valor entre L_2 , L_{10} e L_4 . Se o ponto pertence à Zona 2, $b_{ef}=L/4$ e suas coordenadas são definidas em função daquelas obtidas para as Curvas 1, 9 e 3. Portanto, para cada valor de L_1 , deve-se tomar o menor valor entre B_1 , B_9 e B_3 .

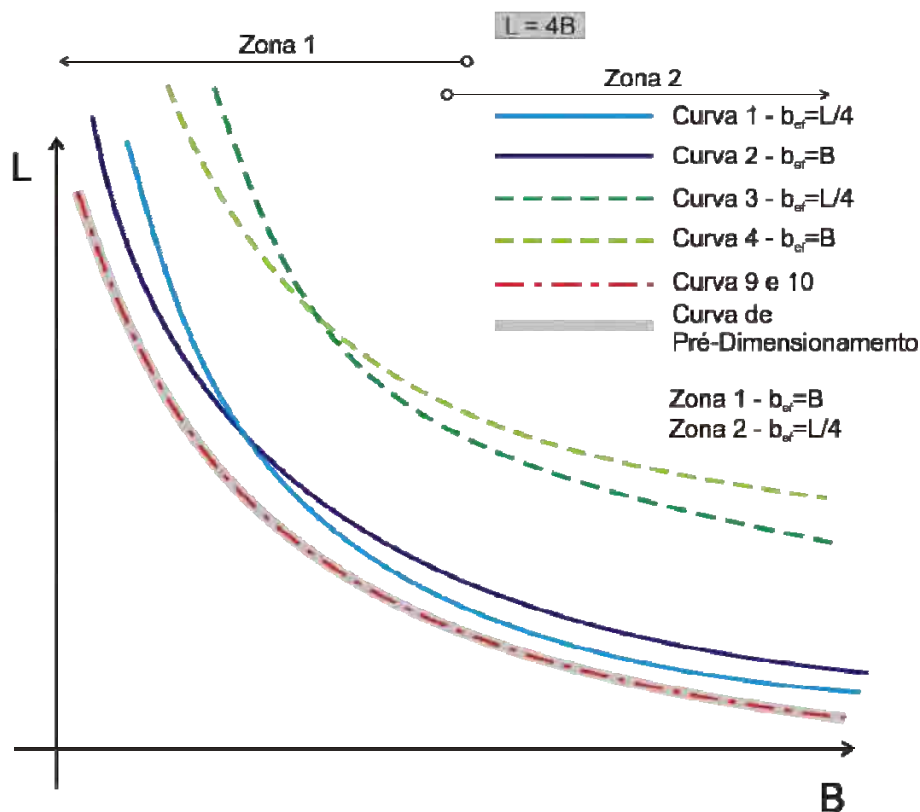


Figura 26 – Processo de obtenção da Curva de Pré-dimensionamento da viga mista não escorada.

Na Tabela 10 apresenta-se um resumo dos pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento. Deve-se notar que para que seja possível obter as coordenadas da Curva de Pré-dimensionamento na Zona 1, a partir da comparação entre as curvas 2, 10 e 4, é necessário que os valores das abscissas B sejam os mesmos. Por este motivo, nesse caso, para a geração da Curva 4 utilizam-se valores de B_1 iguais aos adotados para a geração da Curva 2.

Tabela 10 – Pares que definem a Curva de Pré-dimensionamento.

Curvas	Curva de Pré-dimensionamento					
	Curva de Resistência da viga mista		Curva de Resistência do perfil de aço isolado		Curva de Deslocamento Excessivo	
	Curva 1	Curva 2	Curva 9	Curva 10	Curva 3	Curva 4
b_{ef}	$L_1/4$	B_1	$L_1/4$	B_1	$L_1/4$	B_1
Dados de Entrada	L_1	B_1	L_1	B_1	L_1	B_1
Dado de Saída	B_1	L_2	B_9	L_{10}	B_3	L_4
Pares	L_1, B_1	B_1, L_2	L_1, B_9	B_1, L_{10}	L_1, B_3	B_1, L_4
	Se Zona 1 ($b_{ef} = B$) então ($B_1, \text{mín}(L_2, L_{10}, L_4)$) Se Zona 2 ($b_{ef} = L/4$) então ($\text{mín}(B_1, B_9, B_3), L_1$)					

De maneira análoga à mostrada anteriormente, pode-se obter a Curva de Pré-dimensionamento considerando-se o segundo critério de verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. Para isto, deve-se considerar a síntese do comportamento entre as Curvas 1 e 2, as Curvas 9 e 10 e as Curvas 7 e 8.

Na Figura 27 mostra-se a Curva de Pré-dimensionamento de uma viga mista formada por um determinado perfil metálico, para construção não-escorada e interação completa, na qual pode-se observar as descontinuidades características, resultantes do processo de geração descrito anteriormente.

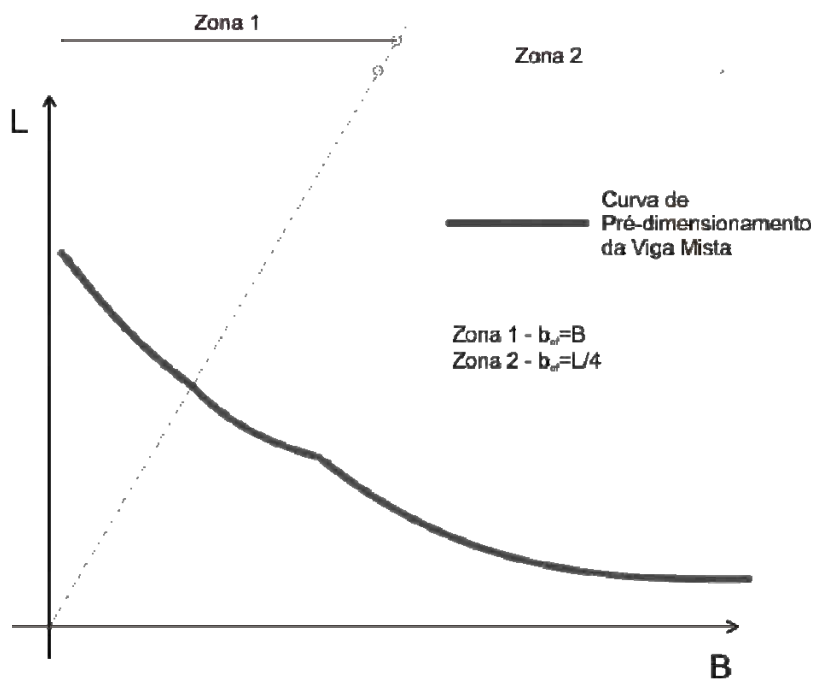


Figura 27 – Curva de Pré-Dimensionamento da viga mista não-escorada com interação completa.

3.3.2.2 Curvas para interação parcial

Para o caso de vigas mistas não-escoradas com interação parcial, a sequência de obtenção da Curva de Pré-dimensionamento é idêntica à descrita para a interação completa no item 3.2.2.1, com a diferença de que, neste caso, torna-se interessante variar o grau de interação da viga mista, respeitando-se o grau de interação mínimo prescrito no Anexo O da NBR 8800 (ABNT, 2008).

De maneira semelhante ao mostrado para o caso de vigas mistas escoradas (item 3.2.1.2), para a construção não-escorada com interação parcial pode-se obter um conjunto de Curvas de Pré-dimensionamento para uma mesma viga mista formada por um determinado perfil metálico, variando-se o grau de interação entre 40 e 100%.

3.4 Vigas principais

Em um sistema de piso, normalmente as vigas secundárias vencem o maior vão, enquanto as principais, por receberem perpendicularmente as reações concentradas das vigas secundárias, são dispostas no menor vão. Este arranjo estrutural geralmente conduz à menor altura total do sistema de piso. Frequentemente, tenta-se adotar vigas principais com a mesma altura ou ligeiramente mais altas do que as vigas secundárias.

Em função dos princípios apresentados no item 3.1, decidiu-se que os ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas principais também serão compostos por curvas que expressam a variação do vão livre da viga mista (L), em função da distância entre vigas adjacentes (B). Cada curva deverá representar o comportamento de uma viga mista formada por um determinado perfil metálico. Com isso mantém-se a idéia inicial de que os ábacos de pré-dimensionamento devem requerer a menor quantidade possível de informações técnicas de conhecimento comum a engenheiros e arquitetos.

A geração de ábacos para vigas mistas principais segue os mesmos princípios descritos no item 3.3 para vigas mistas secundárias, considerando-se os casos de construção escorada e não-escorada e interação completa e parcial.

A diferença fundamental dos procedimentos de geração de ábacos para vigas mistas principais com relação aos de vigas mistas secundárias consiste no cálculo do momento fletor solicitante de cálculo (M_{Rd}) e do deslocamento máximo (δ). Por isto, torna-se interessante avaliar arranjos estruturais típicos de sistemas de piso e identificar as condições de carregamento mais comuns para as vigas principais.

Nas Tabelas 11, 12 e 13, apresentam-se três casos típicos de arranjos estruturais de sistemas de piso, nos quais as vigas secundárias são igualmente espaçadas e descarregam sobre as vigas principais. Na mesma figura também mostram-se as expressões para cálculo do momento fletor solicitante e do deslocamento máximo para cada caso.

Tabela 11 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com uma viga secundária apoiada na viga principal .

Caso 1	
	Expressões de Esforços Solicitantes
	$Q_{p.d} = \gamma_{ga} G_{vs} + \gamma_{gc} G_{laje} + \gamma_q Q_{csm}$
	$Q_{p.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm}) \frac{L}{2}$
	$q_{piso.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm})$
	$Q_{p.d} = q_{piso.d} \frac{L}{2}$
$P_{1.d} = Q_{p.d} B$	
$P_{1.d} = \frac{q_{piso.d} B L}{2}$	
$M_{1.Sd} = \frac{P_{1.d} L}{4} + \frac{G_{viga} L^2}{8}$	
$M_{1.Sd} = \frac{q_{piso.d} B L^2}{8} + \frac{\gamma_{ga} G_{viga} L^2}{8}$	
Expressões de Deslocamento máximo	
$Q_{p.k} = G_{vs} + G_{laje} + Q_{csm}$	
$Q_{p.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm}) \frac{L}{2}$	
$q_{piso.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm})$	
$\delta_1 = \frac{1}{96} \frac{q_{piso.k} B L^4}{E I} + \frac{5}{384} \frac{G_{viga} L^4}{E I}$	
<p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -G_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de comprimento) -g_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de área) 	

Tabela 12 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com duas viga secundárias apoiadas na viga principal .

Caso 2	
	Expressões de Esforços Solicitantes
	$Q_{p.d} = \gamma_{ga} G_{vs} + \gamma_{gc} G_{laje} + \gamma_q Q_{csm}$ $Q_{p.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm}) \frac{L}{3}$ $q_{piso.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm})$ $Q_{p.d} = q_{piso.d} \frac{L}{3}$
	$P_{2.d} = Q_{p.d} B$ $P_{2.d} = \frac{q_{piso.d} B L}{3}$
	$M_{2.Sd} = \frac{P_{2.d} L}{3} + \frac{G_{viga} L^2}{8}$ $M_{2.Sd} = \frac{q_{piso.d} B L^2}{9} + \frac{G_{viga} L^2}{8}$
	Expressões de Deslocamento máximo
	$Q_{p.k} = G_{vs} + G_{laje} + Q_{csm}$ $Q_{p.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm}) \frac{L}{3}$ $q_{piso.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm})$
	$\delta_2 = \frac{23}{1944} \frac{q_{piso.k} B L^4}{E I} + \frac{5}{384} \frac{G_{viga} L^4}{E I}$
	<p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -G_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de comprimento) -g_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de área)

Tabela 13 - Arranjo estrutural típico de sistemas de piso com a identificação das ações e solicitações sobre a viga principal com três viga secundárias apoiadas sobre a viga principal.

Caso 3	
<p>D.M.F.</p>	Expressões de Esforços Solicitantes
	$Q_{p.d} = \gamma_{ga} G_{vs} + \gamma_{gc} G_{laje} + \gamma_q Q_{csm}$ $Q_{p.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm}) \frac{L}{4}$ $q_{piso.d} = (\gamma_{ga} g_{vs} + \gamma_{gc} t_c \gamma_c + \gamma_q q_{csm})$ $Q_{p.d} = q_{piso.d} \frac{L}{4}$
	$P_{3.d} = Q_{p.d} B$ $P_{3.d} = \frac{q_{piso.d} B L}{4}$
	$M_{3.Sd} = \frac{P_{3.d} L}{2} + \frac{G_{viga} L^2}{8}$ $M_{3.Sd} = \frac{q_{piso.d} B L^2}{8} + \frac{G_{viga} L^2}{8}$
	Expressões de Deslocamento máximo
$Q_{p.k} = G_{vs} + G_{laje} + Q_{csm}$ $Q_{p.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm}) \frac{L}{4}$ $q_{piso.k} = (g_{vs} + t_c \gamma_c + q_{csm})$	
$\delta_3 = \frac{19}{1536} \frac{q_{piso.k} B L^4}{E I}$	
Notas: - G_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de comprimento) - g_{vs} – peso próprio da viga secundária (por unidade de área)	

Como também pode-se observar nas Tabelas 11, 12 e 13, para geração das curvas que compõem os ábacos de pré-dimensionamento substituem-se as devidas expressões naquelas mostradas no item 3.3, com a finalidade de se obter as diversas relações entre B e L para a viga mista principal.

Para efeitos de cálculo, as vigas principais se caracterizam por receber as forças concentradas das vigas secundárias e por terem uma distância entre vigas adjacentes (B) da mesma magnitude do vão das vigas secundárias do sistema de piso. Em função disso, para geração dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas principais pode-se considerar uma distância mínima entre vigas adjacentes da ordem de 2500 mm, o que corresponde à metade do vão mínimo normalmente vencido por uma viga secundária e que representa a possibilidade de contar com a laje de concreto somente de um dos lados da viga mista.

Considerando que as distâncias entre vigas adjacentes (B), típicas de vigas principais, é da ordem do vão das vigas secundárias e que normalmente esse valor é maior que $L/4$, a largura efetiva (b_{ef}) das vigas principais fica determinada por esse último valor.

Com bastante frequência, as vigas principais de sistemas de piso possuem paredes sobre e sob a mesma. Para efeitos de geração dos ábacos de pré-dimensionamento, considera-se que as ações de caráter permanente devido às paredes devem ser computadas como uma parcela da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

ÁBACOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO - IMPLEMENTAÇÃO E DISCUSSÃO

4

Neste Capítulo apresenta-se a implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas considerando a metodologia descrita no Capítulo 3.

Para essa apresentação, seleciona-se um perfil laminado produzido no Brasil e fixam-se parâmetros de dimensionamento. Tendo isso como base, apresentam-se as curvas de pré-dimensionamento do perfil selecionado para os casos de vigas mistas secundárias e principais, considerando-se os casos de construção escorada e não-escorada e interação completa e parcial. Para cada situação, apresenta-se um exemplo de ábaco de pré-dimensionamento completo da série de perfis a qual pertence o perfil inicialmente selecionado.

Em seguida mostra-se um exemplo de utilização dos ábacos para um módulo típico de um sistema de piso de um edifício de múltiplos andares.

Por último, apresenta-se uma discussão sobre alguns aspectos do comportamento de vigas mistas, que podem ser observados a partir dos ábacos de pré-dimensionamento.

4.1 Considerações preliminares

Tendo como base a metodologia apresentada no Capítulo 3, a abrangência da mesma definida no item 3.2 e considerando a ampla possibilidade de combinação das características dos sistemas de piso, é necessário restringir algumas condições para apresentar a implementação dos ábacos de pré-dimensionamento.

Com o intuito de gerar um conjunto de ábacos que abranjam casos comuns de projetos de sistemas de piso, foram identificados alguns parâmetros de dimensionamento usuais nestes sistemas. Os parâmetros de dimensionamento estabelecidos foram:

- perfis laminados de abas paralelas fabricados no Brasil;
- aço do perfil - $f_y = 345$ MPa;
- sobrecarga de construção - $q_c = 1,0$ kN/m²
- carga sobreposta máxima (q_{csm})
 - Para vigas secundárias: 3,0 kN/m², 5,5 kN/m² e 8,0 kN/m² ;
 - Para vigas principais: 3,0 kN/m², 4,0 kN/m² e 5,0 kN/m²;
- concreto da laje – C20 – $f_{ck} = 20$ MPa;
- características das lajes:
 - laje maciça com espessura de 12 cm;
 - laje mista com forma de aço incorporada com $h_F = 75$ mm com espessura de 140mm;
- interação completa entre aço e concreto ;
- limites de deslocamento de $L/350$ para Q_{csm} .

A fim de exemplificar o processo de desenvolvimento, apresentam-se ábacos para vigas secundárias e principais separadamente. Para cada situação apresentam-se ábacos para os casos de construção escorada e não-escorada e interação completa. Neste Capítulo apresenta-se somente um ábaco completo, considerando para cada situação citada anteriormente perfis de 1ª e 2ª alma da série selecionada. No Apêndice A apresenta-se um conjunto de ábacos de pré-dimensionamento gerados em função dos parâmetros de dimensionamento definidos anteriormente. Em função de uma avaliação das possíveis combinações para geração de ábacos de pré-dimensionamento, considerando os parâmetros

mais comuns dos sistemas de piso utilizados no Brasil, verificou-se que poderiam ser gerados mais de 20.000 ábacos de pré-dimensionamento.

Antes da apresentação de cada ábaco, com o intuito de ilustrar a geração das curvas de pré-dimensionamento que compõem o mesmo, mostra-se a sequência de geração de uma curva para o perfil laminado de abas paralelas W310x21, considerando-se os parâmetros de dimensionamento fixados. O perfil escolhido é comumente utilizado em sistemas de piso de edifícios de múltiplos andares no Brasil.

Para geração dos ábacos deste Capítulo e das curvas ilustrativas adotam-se os seguintes parâmetros de dimensionamento:

- aço do perfil $f_y = 345$ MPa;
- carga sobreposta máxima (q_{csm}) $5,0$ kN/m²
- tipo de laje laje mista com forma de aço incorporada com altura da nervura, $h_F = 75$ mm;
- espessura total da laje $14,0$ cm
- concreto da laje C20 - $f_{ck} = 20,0$ MPa
- grau de interação interação completa
- critério de deslocamento excessivo $L/350$ para Q_{csm} (primeiro critério)

4.2 Ferramenta de desenvolvimento das rotinas de cálculo

Para implementação computacional dos ábacos de pré-dimensionamento foram desenvolvidas rotinas de cálculo em ambiente Mathcad[®].

O Mathcad[®] é uma ferramenta computacional que vem sendo amplamente utilizada em diversas áreas da engenharia e ganhou espaço nos últimos anos como substituto de tradicionais linguagens de programação utilizadas nos ambientes acadêmicos.

O programa possui uma interface interativa e uma ampla variedade de funções matemáticas e de recursos de programação. A sua área de trabalho integra as expressões matemáticas, as estruturas de programação, o texto e os gráficos em um mesmo documento, o que faz com que o Mathcad[®] seja um ambiente apropriado à simulação de problemas de engenharia. Além disso, esse programa vem sendo utilizado para o

desenvolvimento de memoriais de cálculo completos, justamente por permitir unir as características de um tradicional editor de textos, que permite escrever as expressões nos formatos tradicionais, com a execução interativa dos cálculos, típica das planilhas eletrônicas.

Dentre os recursos importantes para simulação de problemas de engenharia devem-se destacar as rotinas de manipulação de matrizes. Além disso, o programa oferece grande facilidade de rastrear respostas, realizar alterações e manipular as unidades das grandezas consideradas.

Em função destas características o Mathcad[®] foi selecionado para implementação dos ábacos de pré-dimensionamento. Apesar de não gerar um código executável a partir de uma compilação, trabalhando nos moldes de uma linguagem interpretada, o Mathcad[®] se mostrou adequado à geração dos ábacos, com velocidade e estabilidade compatíveis.

As rotinas de cálculo desenvolvidas em Mathcad[®] foram conectadas a um banco de dados que contém as características geométricas e mecânicas das séries de perfis considerados para elaboração dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas. No Apêndice B apresenta-se a estrutura geral da implementação dos ábacos e algumas rotinas de cálculo utilizadas.

A estratégia de implementação adotada com auxílio do Mathcad[®] proporcionou uma grande velocidade e confiabilidade na geração dos ábacos, com ampla liberdade de variação dos parâmetros de dimensionamento. Comparando as curvas de pré-dimensionamento de um mesmo perfil, geradas a partir de distintos parâmetros de dimensionamento, pode-se facilmente avaliar a influência da variação de determinadas características sobre o comportamento de uma viga mista.

Com a rotina de cálculo desenvolvida no Mathcad[®] foram realizados estudos para validação dos resultados obtidos, tomando como referência alguns exemplos disponíveis na literatura.

4.3 Implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas secundárias

4.3.1 Ábacos para construção escorada e interação completa

Na Figura 28 apresentam-se as curvas para estado-limite último (1 e 2) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), obtidas de acordo com o primeiro critério ($L/350$ para Q_{csm}), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21 e para os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

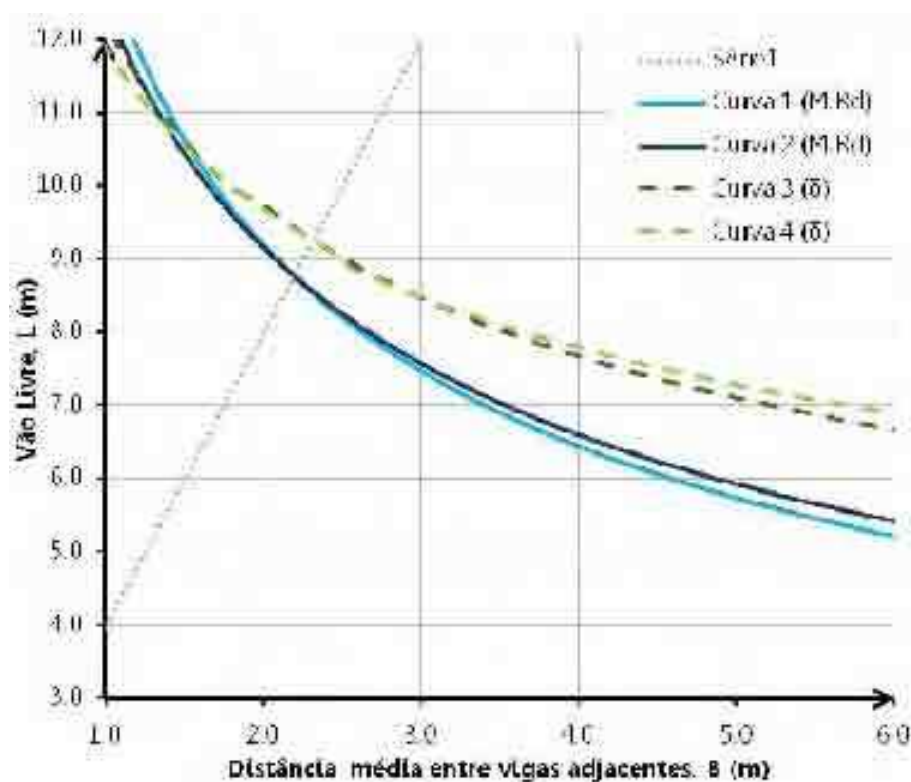


Figura 28- Curvas para estado-limite último (1 e 2) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.

Na Figura 29 mostra-se a Curva de Pré-dimensionamento da viga mista para o perfil laminado de abas paralelas W310x21, que representa a síntese dos critérios de resistência última e de deslocamento excessivo para esse perfil, para construção escorada e interação completa.

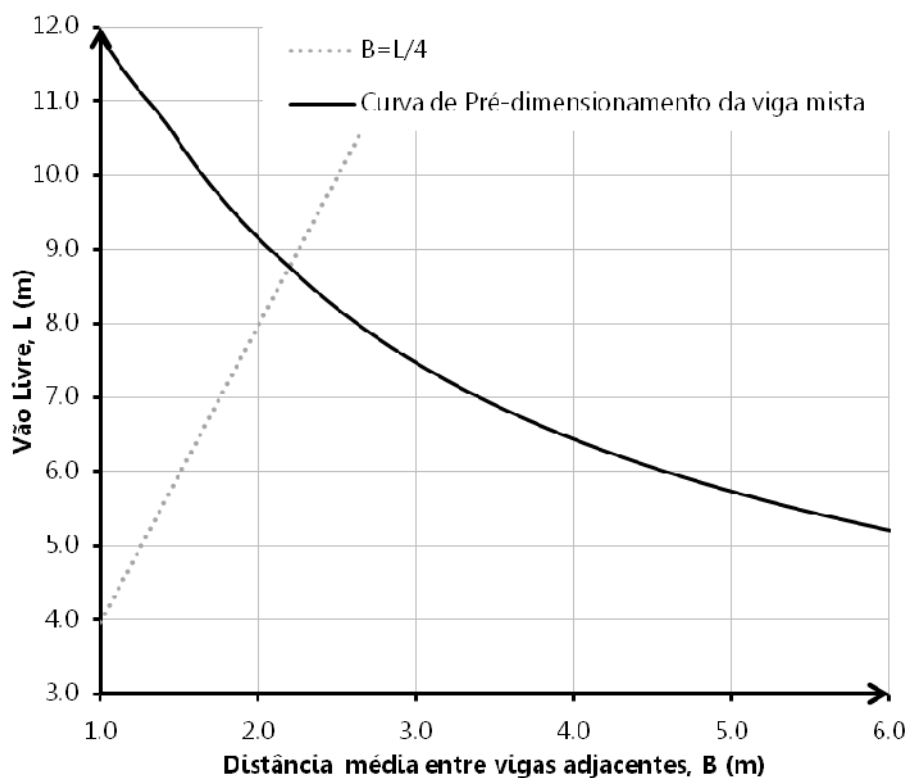


Figura 29 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista secundária, considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.

Com base na Figura 28 pode-se observar que o critério de resistência última controla o comportamento da viga mista formada pelo perfil W310x21 para construção escorada e interação completa, com os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1. Observa-se também que neste caso o critério de deslocamento excessivo utilizado ($L/350$ para Q_{csm}) só governa o dimensionamento para grandes valores do vão livre (L), o que gera uma ligeira descontinuidade na Curva de Pré-dimensionamento (Figura 29).

Conforme discutido no item 3.3.1.1.B, admitindo-se o primeiro critério de deslocamento excessivo, pressupõe-se que o projetista deverá alertar para que seja dada uma contraflecha de valor equivalente ao deslocamento devido ao valor integral ou quase-integral (em cerca de 75%) das ações permanentes.

Na Figura 30 apresenta-se um ábaco de pré-dimensionamento de vigas secundárias para os perfis de 1ª e 2ª alma da série de perfis laminados de abas paralelas à qual pertence o perfil W 310x21, considerando-se construção escorada, interação completa, o primeiro critério de deslocamento excessivo ($L/350$ para Q_{csm}) e os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1, que constam no rótulo de identificação do ábaco.

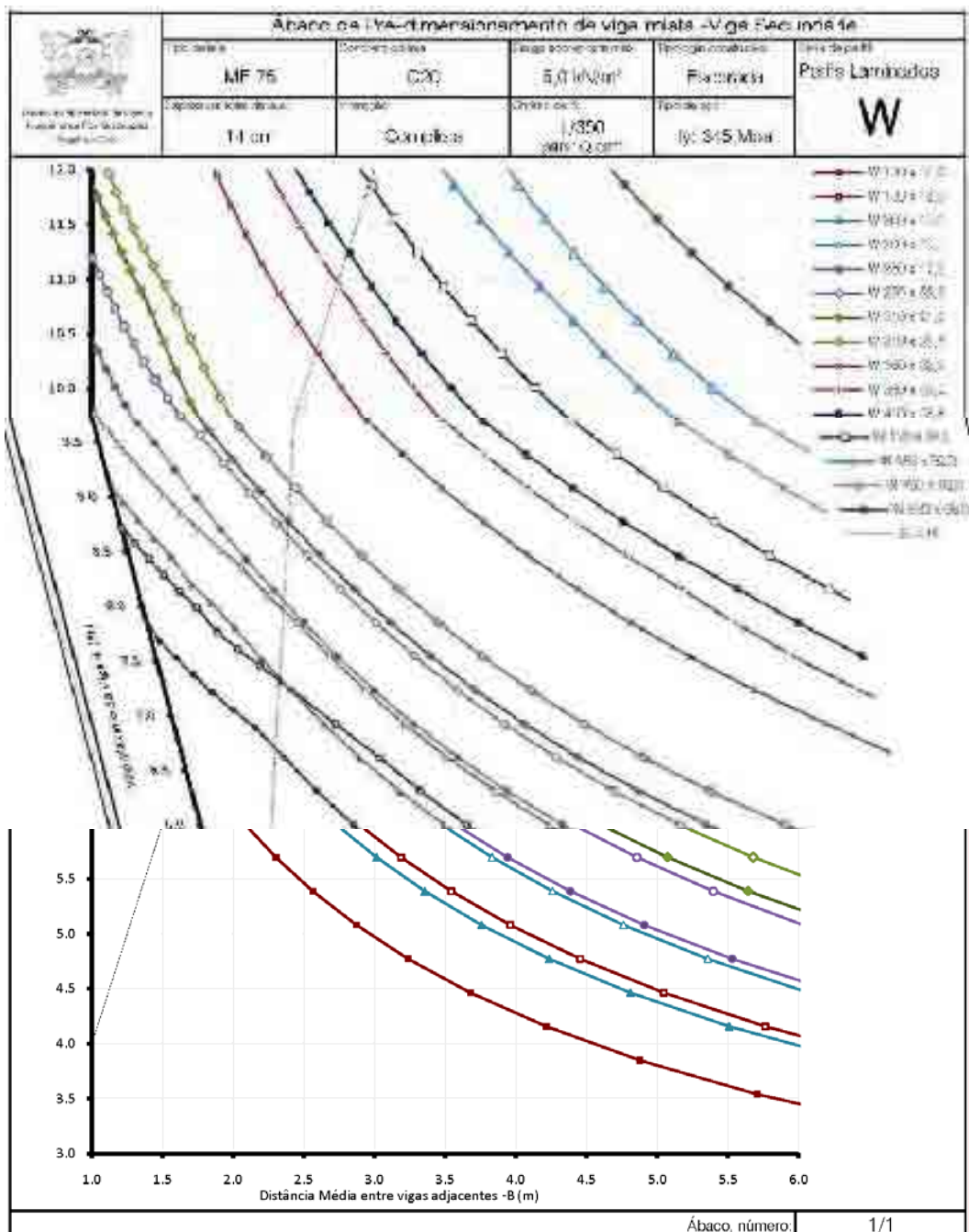


Figura 30 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas secundárias considerando-se construção escorada, interação completa e para uma série de perfis laminados de abas paralelas, considerando-se construção escorada e interação completa.

4.3.2 Ábacos para construção não-escorada e interação completa

Na Figura 31 apresentam-se as curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), obtidas de acordo com o primeiro critério ($L/350$ para Q_{csm}), considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21 e para os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

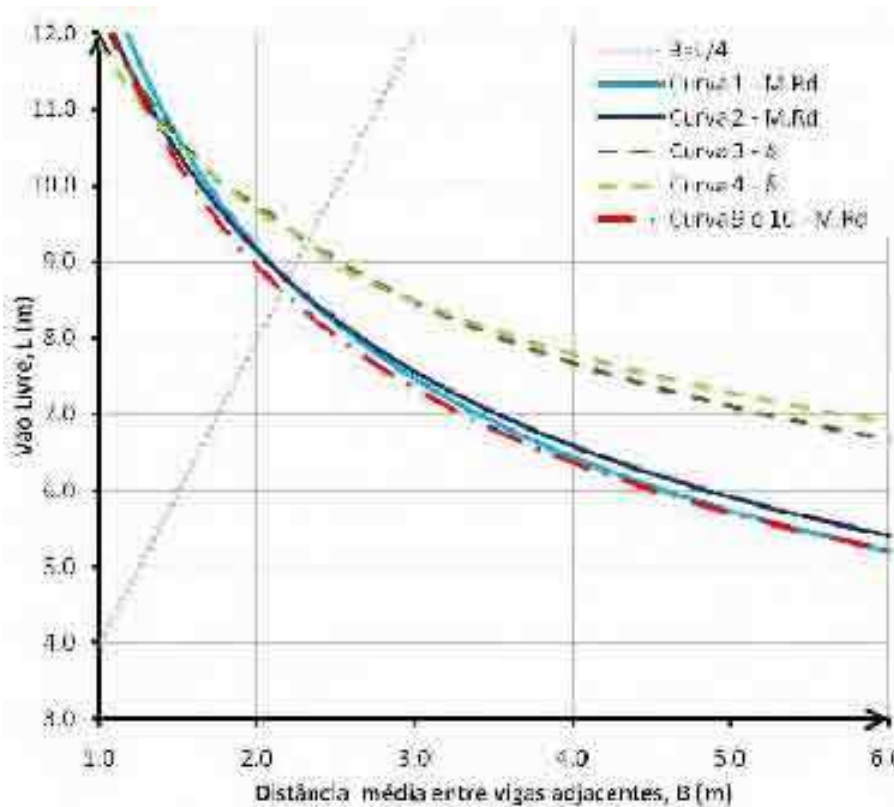


Figura 31 - Curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.

Na Figura 32 mostra-se a Curva de Pré-dimensionamento da viga mista para o perfil laminado de abas paralelas W310x21, que representa a síntese dos critérios de resistência última e de deslocamento excessivo para este perfil, para construção não-escorada e interação completa.

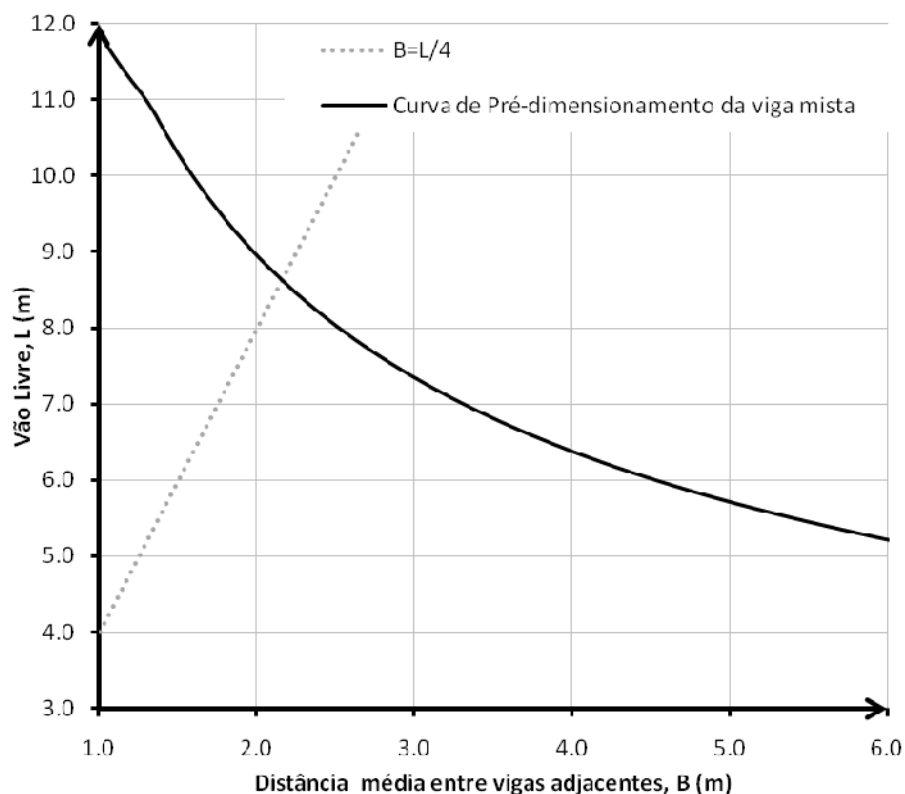


Figura 32 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista secundárias considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.

Com base na Figura 31 pode-se observar que neste caso de construção não-escorada e interação completa, a resistência última do perfil de aço isolado controla o comportamento da viga mista formada pelo perfil W310x21, com os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1 e com a relação Q_c/Q_{csm} utilizada. Neste caso, a curva do perfil de aço isolado está ligeiramente abaixo das curvas para estado-limite último da viga mista. Observa-se também que neste caso o critério de deslocamento excessivo utilizado ($L/350$ para Q_{csm}) só governa o dimensionamento para grandes valores do vão livre (L), o que gera uma ligeira descontinuidade na Curva de Pré-dimensionamento (Figura 32).

Assim como no caso de construção escorada, admitindo-se o primeiro critério de deslocamento excessivo, pressupõe-se que o projetista deverá alertar para que seja dada uma contraflecha de valor equivalente ao deslocamento devido ao valor integral ou quase-integral das ações permanentes.

4.4 Implementação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas principais

4.4.1 Ábacos para construção escorada e interação completa

Na Figura 34 apresentam-se as curvas para estado-limite último (1 e 2) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), obtidas de acordo com o primeiro critério ($L/350$ para Q_{csm}), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21 e para os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

As curvas da Figura 34 foram obtidas admitindo-se um arranjo estrutural do sistema de piso, conforme mostrado na Tabela 12 (caso 2), no qual duas vigas secundárias se apoiam na viga principal. Para este caso considerou-se o peso próprio da viga secundária por unidade de área, $g_{vs} = 0,35$ kN/m².

Na Figura 34 pode-se observar que os valores da distância média entre vigas adjacentes (B), representados no eixo das abscissas, variam entre 3,0 m e 12,0 m. O valor $B = 3,0$ m cobre o caso de vigas principais de borda com vigas secundárias de 6,0 m de vão. O valor de $B = 12,0$ m cobre o caso de vigas principais internas, com vigas secundárias de 12,0 m de vão, em ambos os lados da viga principal. Desta forma, a reta que divide a Zona 1 ($b_{ef} = B$) e a Zona 2 ($b_{ef} = L/4$) não fica dentro dos limites apresentados no ábaco, ou seja, para as vigas principais a largura efetiva é dada por $b_{ef} = L/4$. Para o eixo das ordenadas (L) manteve-se o vão máximo de 12,0 metros, normalmente limitado por questões de transporte.

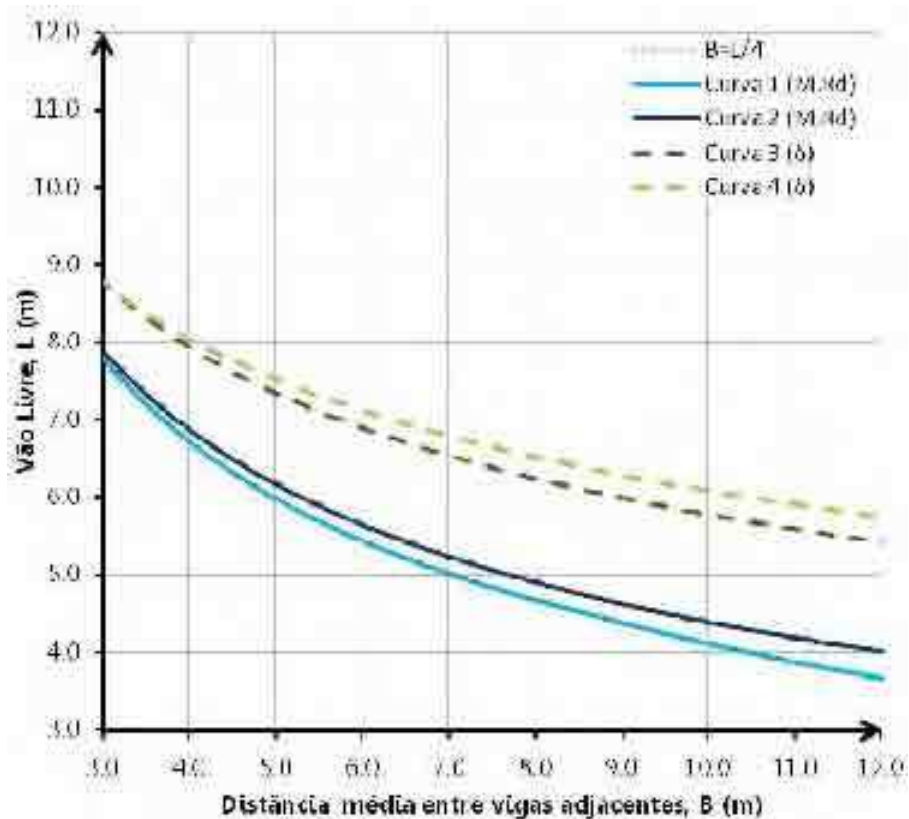


Figura 34 - Curvas para estado-limite último (1 e 2) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.

Na Figura 35 mostra-se a Curva de Pré-dimensionamento da viga mista principal para o perfil laminado de abas paralelas W 310x21, para construção escorada e interação completa.

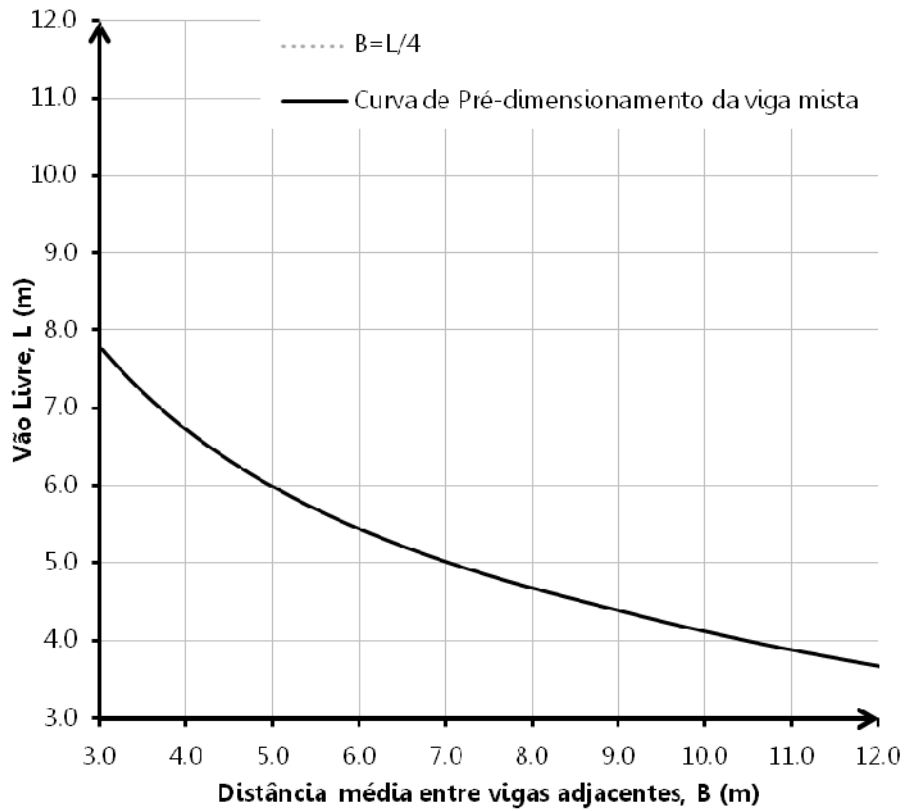


Figura 35 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.

Na Figura 36 apresenta-se um ábaco de pré-dimensionamento de vigas principais para os perfis de 1ª e 2ª alma da série de perfis laminados de abas paralelas, à qual pertence o perfil W 310x21, considerando-se construção escorada, interação completa, o primeiro critério de deslocamento excessivo ($L/350$ para Q_{csm}) e os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1, que constam no rótulo de identificação.

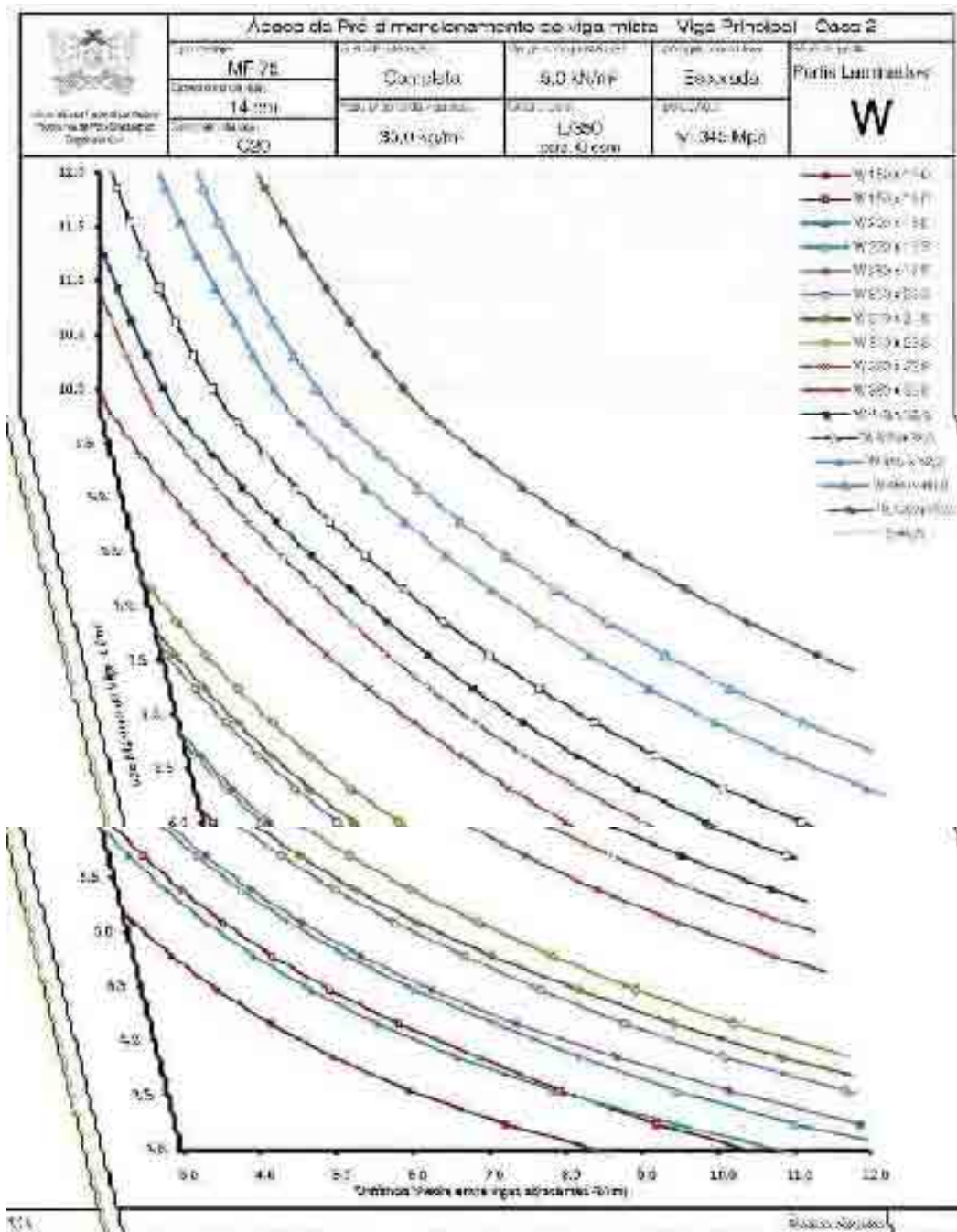


Figura 36 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas principais para uma série de perfis laminados de abas paralelas, considerando-se construção escorada e interação completa

4.4.2 Ábacos para construção não-escorada e interação completa

Na Figura 37 apresentam-se as curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), obtidas de acordo com o primeiro critério ($L/350$ para Q_{csm}), considerando-se construção escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21 e para os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

De forma semelhante ao que foi apresentado no item 4.4.1, as curvas da Figura 37, foram obtidas admitindo-se o arranjo estrutural mostrado na Tabela 3.9 (caso 2) e uma taxa $g_{vs} = 0,35 \text{ kN/m}^2$.

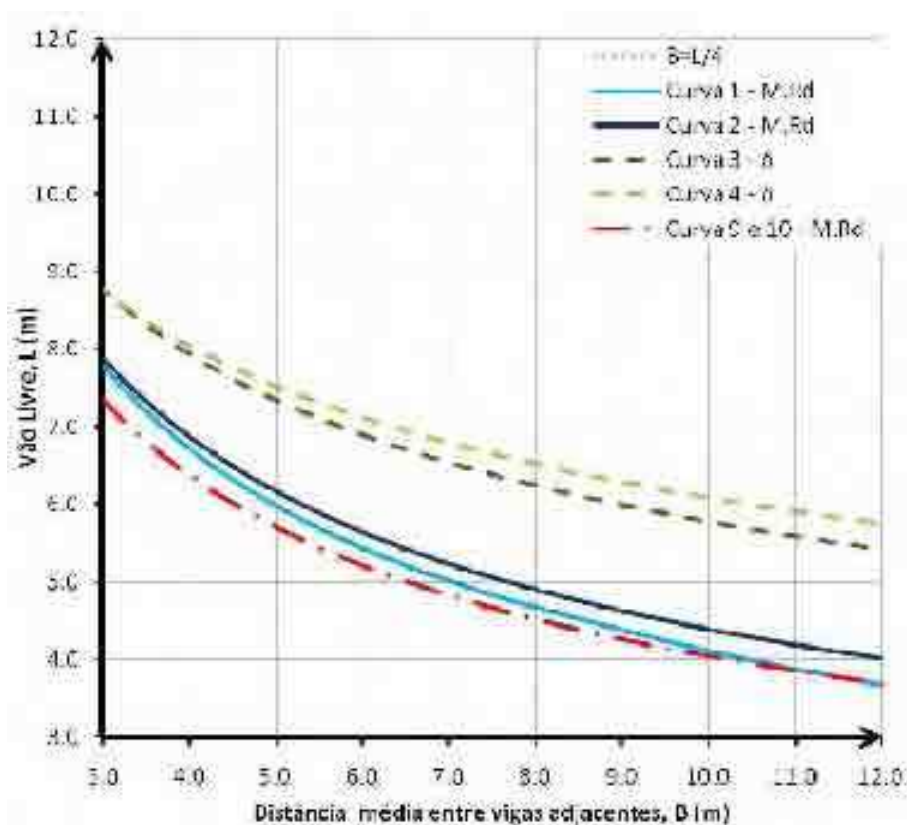


Figura 37 - Curvas para estado-limite último (1, 2, 9 e 10) e curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4), considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado de abas paralelas W310x21.

Com base na Figura 37 pode-se observar que a resistência do perfil isolado controla o comportamento da viga mista formada pelo perfil W 310x21, com os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

É importante ressaltar que apesar da resistência do perfil isolado controlar o comportamento, ainda assim tem-se ganhos por usar a viga mista. Para a geração das curvas para o estado-limite último da viga de aço isolada considera-se apenas a ação de peso próprio da viga, peso próprio da laje e uma sobrecarga de construção $q_c = 1,0 \text{ kN/m}^2$, que é menor do que as sobrecargas de piso usuais. Ou seja, se não fosse considerado o comportamento misto da viga, a curva de resistência do perfil de aço isolado seria ainda mais baixa do que a representada na Figura 37.

Uma primeira observação sobre a tipologia escorada ou não-escorada pode ser avaliada de acordo com as diversas curvas que irão formar a curva de pré-dimensionamento, como por exemplo, as curvas que são afetadas para a tipologia escorada e não-escorada são as curvas de resistência do perfil de aço isolado e as curvas de deslocamentos. Portanto, quando estas curvas forem dimensionantes pode-se tirar proveito de um possível escoramento. Como para este caso a curva que governa o dimensionamento é a curva de resistência do perfil isolado e esta curva está muito próxima da curva de resistência da viga mista, escorar não geraria grandes benefícios.

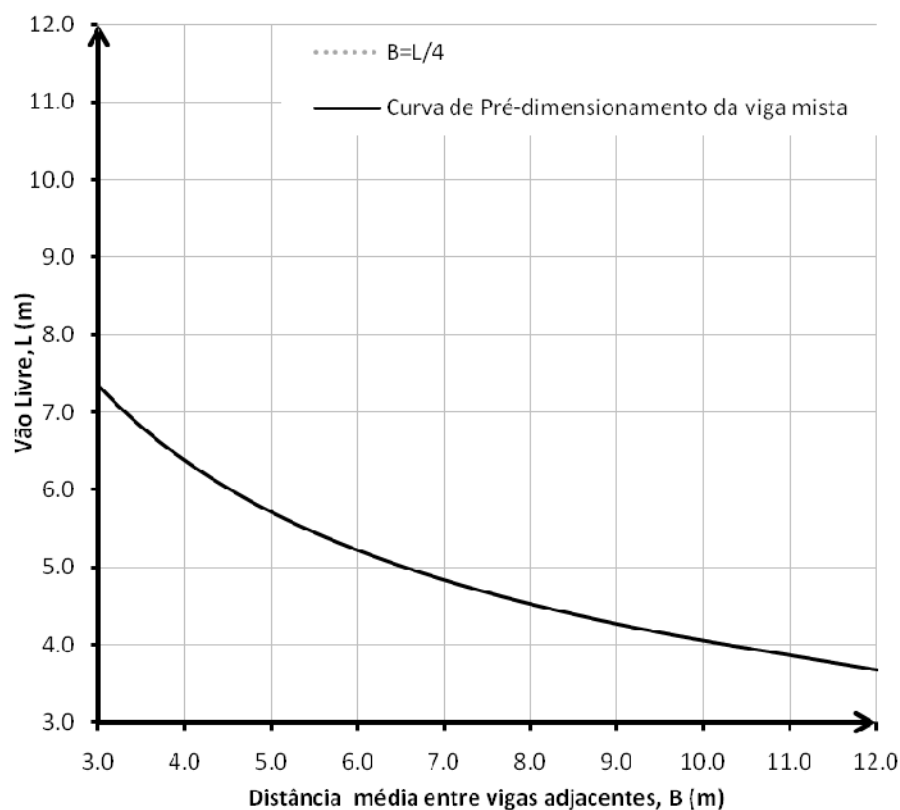


Figura 38 - Curva de Pré-dimensionamento da viga mista, considerando-se construção não-escorada e interação completa, para o perfil laminado W310x21.

Com base na observação das curvas mostradas na Figura 37, que dão origem à curva de pré-dimensionamento da Figura 38, pode-se fazer uma avaliação sobre a eventual vantagem de escorar a viga mista. A tipologia construtiva não-escorada afeta as curvas para o estado-limite de deslocamentos excessivos (3 e 4) e também limita o comportamento da viga mista em função do perfil de aço isolado. Portanto quando estas curvas controlarem o comportamento da viga mista, pode-se tirar proveito de um escoramento. Como no caso mostrado na Figura 37, a curva de resistência última do perfil de aço isolado está muito próxima das curvas para o estado-limite último da viga mista (1 e 2) e a adoção de um escoramento não geraria grandes benefícios.

Na Figura 39, apresenta-se um ábaco de pré-dimensionamento de vigas principais para perfis de 1^a e 2^a alma da série de perfis laminados de abas paralelas, à qual pertence o perfil W 310x21, considerando-se construção não-escorada, interação completa, o primeiro critério de deslocamento excessivo ($L/350$ para Q_{csm}) e os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1, que constam no rótulo de identificação.

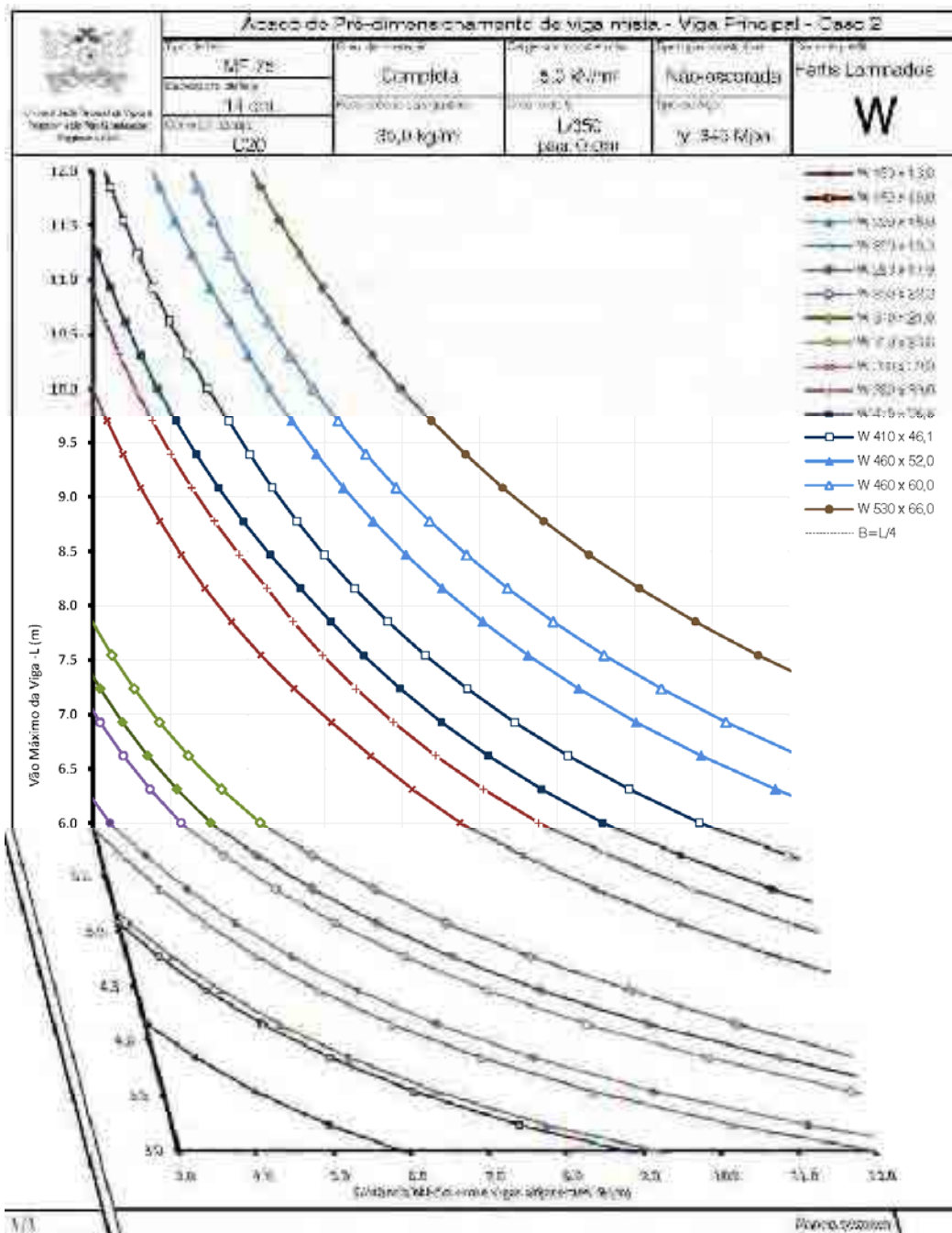


Figura 39 - Exemplo de um ábaco de pré-dimensionamento de vigas mistas principais considerando-se construção não-escorada, interação completa e para uma série de perfis laminados de abas paralelas.

4.5 Exemplos de aplicação dos ábacos de pré-dimensionamento

Apresenta-se a seguir um exemplo de aplicação dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas. Nesse exemplo procura-se explorar alguns casos típicos de vigas mistas que ocorrem em sistemas de piso de edifícios de múltiplos andares. Na Figura 40, apresentam-se o projeto arquitetônico e o lançamento estrutural de um módulo típico de um edifício de múltiplos andares cujas características são mostradas na Tabela 14.

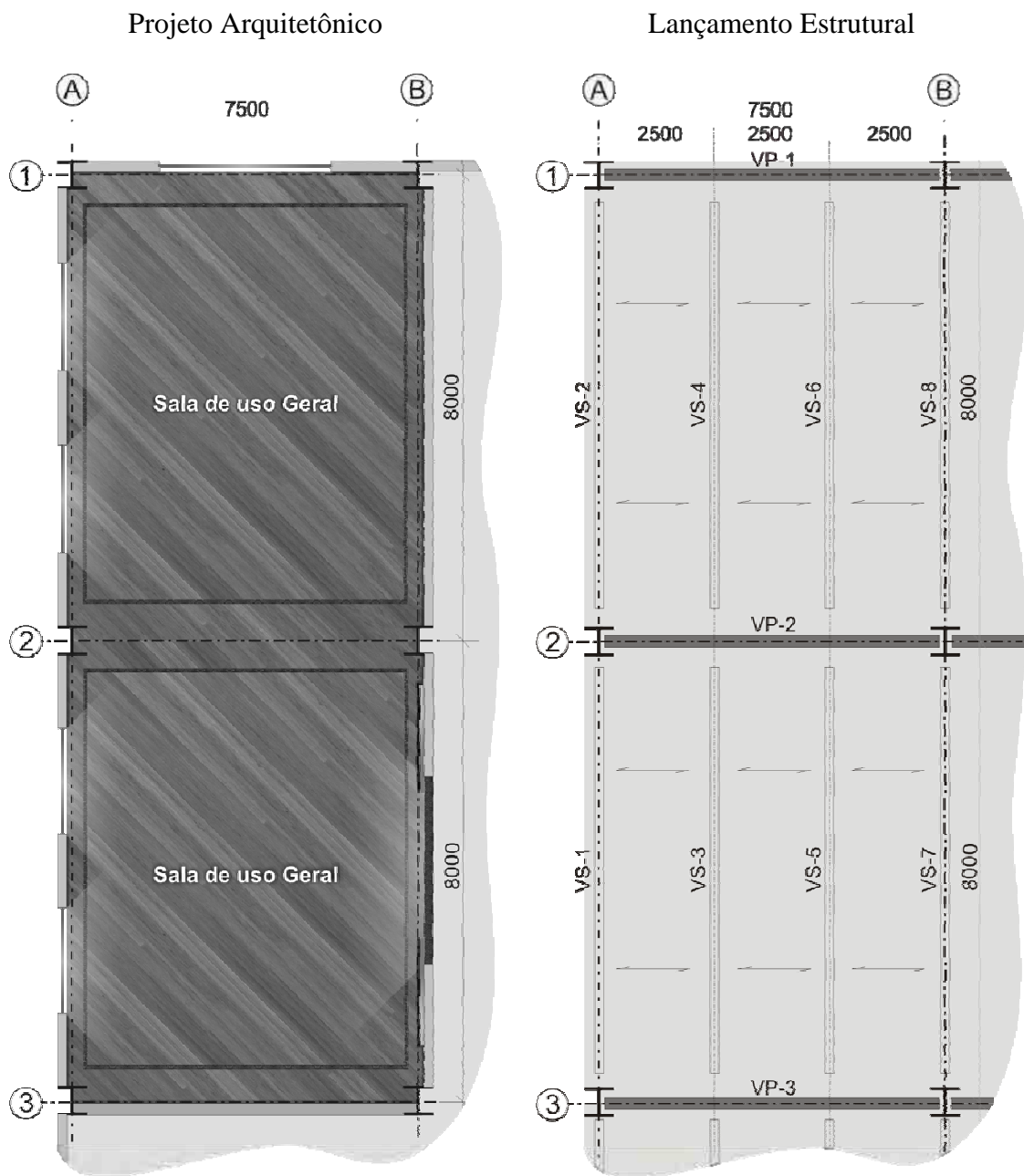


Figura 40 - Projeto arquitetônico e lançamento estrutural de um módulo típico de um edifício de múltiplos andares (Dimensões em milímetros).

Tabela 14 - Características do projeto.

Características do projeto	
Tipologia construtiva	<i>Não-escorada</i>
Sobrecarga de piso (q_{cs})	$2,0 \text{ kN/m}^2$
Revestimento do piso (g_{rev})	$0,50 \text{ kN/m}^2$
Forro de gesso (g_{forro})	$0,50 \text{ kN/m}^2$
Peso específico das paredes (γ_{par})	$17,50 \text{ kN/m}^3$ (tijolos cerâmicos furado com revestimento dos dois lados de 1,5cm)
Altura da Parede (h_{par})	$2,70 \text{ m}$
Espessura das Paredes (e_{par})	$12,0 \text{ cm}$
Tipo da laje	<i>Laje mista com forma de aço incorporada com $h_F=75\text{mm}$</i>
Espessura da laje	$14,0 \text{ cm}$
Concreto da laje	<i>C20</i>
Critério de deslocamento máximo admitido pelo projetista	$L/350$ para Q_{csm}

De acordo com a Figura 40, observa-se que neste sistema de piso existem vigas com e sem paredes sobre as mesmas. Para efeitos de pré-dimensionamento agrupam-se na Tabela 15 os parâmetros do sistema estrutural mostrado na Figura 40, com o intuito de facilitar a seleção dos ábacos que devem ser utilizados e a escolha dos perfis que atendem às características do projeto.

Tabela 15 – Grupos de vigas.

				L	B	Grupo
				(m)	(m)	
Vigas Secundárias	Com parede	Vigas de borda:	VS-1 e VS-2	8,0	1,25	1
		Vigas internas:	VS-7 e VS-8	8,0	2,50	2
	Sem parede	Vigas de borda:	-	-	-	3
		Vigas internas:	VS-3, VS-4, VS-6 e VS-5	8,0	2,50	4
Vigas Principais	Com parede	Vigas de borda:	VP-1	7,5	4,0	5
		Vigas internas:	VP-3	7,5	8,0	6
	Sem parede	Vigas de borda:	-	-	-	7
		Vigas internas:	VP-2	7,5	8,0	8

A carga sobreposta máxima por unidade de área (q_{csm}) é composta pelas ações permanentes instaladas após o endurecimento do concreto somadas às ações devidas ao uso, sendo determinadas por:

$$q_{csm} = g_{par} + g_{rev} + g_{forro} + q_{sc} \quad (54)$$

onde:

g_{par} peso próprio de parede (por unidade de área) distribuído na área de piso.

$$g_{par} = \frac{G_{par}}{B} \quad (55)$$

G_{par} peso próprio da parede (por unidade de comprimento) distribuído sobre a viga.

$$G_{par} = \gamma_{par} e_{par} h_{par} \quad (56)$$

Para a composição do peso da parede deve-se considerar o peso específico do tijolo, da argamassa de assentamento e do revestimento da parede de acordo com os valores dados pela NBR 6120 (ABNT, 1980).

Para este projeto, a espessura total da parede é de 12,0 cm e a altura é de 2,70 m. Foram considerados tijolos cerâmicos furados de 19,0 x 19,0 x 9,0 cm, espessura da argamassa de assentamento de 1,0cm e espessura de revestimento de 1,5 cm em cada lado da parede. De acordo com a NBR 6120 (ABNT 6120), o peso específico de cada um desses materiais é 13 kN/m³, 21 kN/m³ e 19 kN/m³, respectivamente. Em função destas características, o peso específico da parede é de 17,5 kN/m³ e o peso próprio da parede por unidade de comprimento de viga $G_{par} = 5,67$ kN/m.

Na Tabela 16 indicam-se os valores de g_{par} , g_{rev} , g_{forro} , q_{sc} e q_{csm} para cada grupo de viga constante na Tabela 15.

Tabela 16 – Valores de g_{par} , g_{rev} , g_{forro} , q_{sc} e q_{csm} para os grupos de vigas.

			Vigas	L (m)	B (m)	g_{par} (kN/m ²)	g_{rev} (kN/m ²)	g_{forro} (kN/m ²)	q_{sc} (kN/m ²)	q_{csm} (kN/m ²)	Grupo	
Vigas Sec.	Com parede	Vigas de borda	VS-1 VS-2	8,0	1,25	4,54	0,50	0,50	2,0	7,54	1	
		Vigas internas	VS-7 VS-8	8,0	2,50	2,27	0,50	0,50	2,0	5,27	2	
	Sem parede	Vigas de borda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
		Vigas internas	VS-3 VS-4 VS-5 VS-6	8,0	2,50	-	0,50	0,50	2,0	3,00	4	
Vigas Prin.	Com parede	Vigas de borda	VP-1	7,5	4,0	1,42	0,50	0,50	2,0	4,42	5	
		Vigas internas	VP-3	7,5	8,0	0,71	0,50	0,50	2,0	3,71	6	
	Sem parede	Vigas de borda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
		Vigas internas	VP-2	7,5	8,0	-	0,50	0,50	2,0	3,00	8	

A título de exemplo, considerando-se as vigas que compõem o Grupo 4 (VS-3, VS-4, VS-5 e VS-6) e os parâmetros de dimensionamento definidos na Tabela 14, o pré-dimensionamento é realizado conforme as seguintes etapas:

- ① Seleciona-se o ábaco de pré-dimensionamento de vigas secundárias que se apresentam na Figura 41, cujas características constam no seu rotulo de identificação;
- ② Marca-se um ponto correspondente ao par (B, L) ;
- ③ Identificam-se os perfis das curvas de pré-dimensionamento que contêm o par (B, L) ou se situam acima deste.

Ábaco de Pré-dimensionamento de viga mista - Vigas Secundárias				
 Universidade Federal do Rio de Janeiro Engenharia Civil	Tipo de laje: MF-75	Concreto da laje: C20	Carga sobrecarga max. 3,0 kN/m²	Tipologia construtiva: Não-escorada
Espessura total da laje: 14 cm	Armadura: Completa	Perfil de aço: L350 para: Q.csm	Resistência à tração: f_y: 345 MPa	Série de perfil: Perfis Laminados W

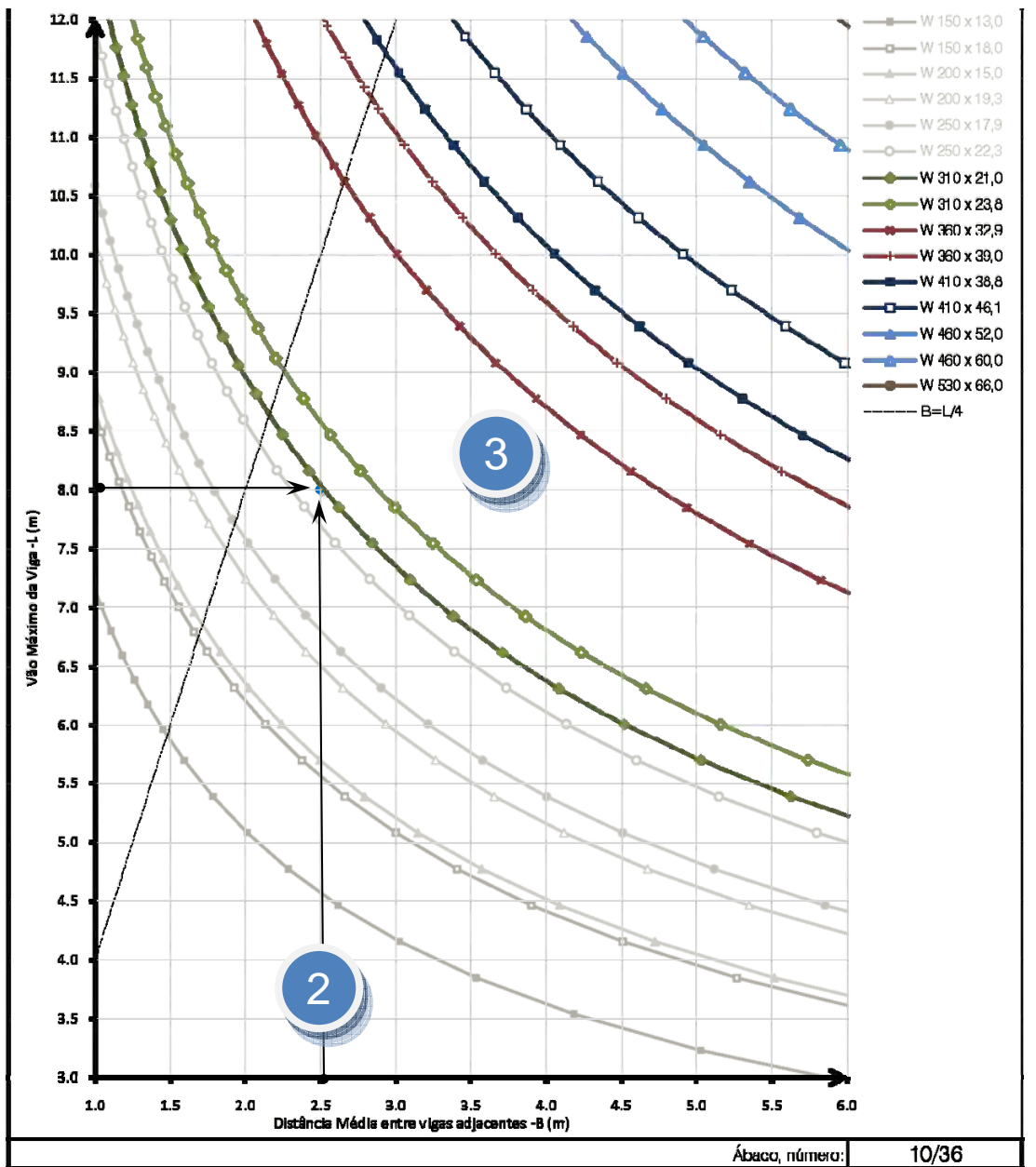


Figura 41 - Sequência de seleção de perfis para as vigas do Grupo 4 (VS-3, VS-4, VS-5 e VS-6).

Para as vigas do Grupo 4 (VS-3, VS-4, VS-6 e VS-5) e de acordo com os perfis que constam no ábacos, os perfis mais que atendem as características de projeto são:

- W 310x21,8 (o perfil mais leve)
- W 310x23,8 (se for necessário aproveitar alguma peça que estiver no estoque ou para padronizar os perfis de um piso)
- W 360x32,9 (se for necessário aproveitar alguma peça que estiver no estoque ou para padronizar os perfis de um piso)

Uma vez identificados os perfis para atendem ao Grupo 4, pode-se escolher o perfil para o projeto em função da altura, do peso ou outro critério de projeto. Para este caso escolhe-se o perfil W 310x23,8.

Da forma semelhante ao que foi feito para as vigas do Grupo 4, utilizam-se os ábacos apresentados no Apêndice A para escolher os perfis que atendem aos demais grupos de vigas do projeto. Na Tabela 17 apresentam-se os perfis selecionados para os grupos de vigas secundárias do projeto.

Tabela 17 –Perfis pré-dimensionados para as vigas secundárias.

			Vigas	L (m)	B (m)	q_{csm} (kN/m ²)	Perfis identificados	Perfil adotado	Grupo
Vigas Sec.	c/ par.	Vigas de borda	VS-1 VS-2	8,0	1,25	8,0	W 250x17,9 W 250x22,3 W 310x21,0 W 310x23,8	W 310x23,8	1
		Vigas internas	VS-7 VS-8	8,0	2,50	5,5	W 310x23,8 W 360x32,9	W 310x23,8	2
	s/ par.	Vigas de borda	-	-	-	-	-	-	3
		Vigas internas	VS-3 VS-4 VS-6 VS-5	8,0	2,50	3,0	W 310x21,0 W 310x23,8 W 360x32,9	W310x23,8	4

Definidas as vigas secundárias, calcula-se o valor do peso próprio das vigas secundárias, por unidade de área, g_{vs} , tomando-se o peso próprio das vigas que se apóiam na viga principal e dividindo pela distância entre vigas adjacentes à viga secundária, B . Como as

vigas secundárias que se apoiam nas vigas principais VP-1, VP-2 e VP-3 são as mesmas, g_{vs} é dado por:

$$g_{vs} = \frac{0,238 \text{ kN/m}}{2,50 \text{ m}} = 0,095 \text{ kN/m}^2$$

Como os ábacos para vigas principais que constam no Apêndice A cobrem até o valor de $g_{vs} = 0,30 \text{ kN/m}^2$, é possível utilizá-los para determinar o perfil da viga principal.

De posse deste valor, para cada grupo de vigas principais selecionam-se os ábacos de pré-dimensionamento no Apêndice A, em função dos parâmetros de dimensionamento definidos na Tabela 14, e identificam-se os perfis que atendem às características de projeto. Na Tabela 18 apresentam-se os perfis selecionados para os grupos de vigas principais.

Tabela 18 - Perfis pré-dimensionados para as vigas principais.

			Vigas	L (m)	B (m)	q_{csm} (kN/m ²)	Perfis identificados	Perfil adotado	Grupo
Vigas Princ.	c/ par.	Vigas de borda	VP-1	7,5	4,0	5,0	W 360x32,9 W 360x39,0 W 410x38,8 W 410x46,1	W 360x32,9	5
		Vigas internas	VP-3	7,5	8,0	4,0	W 410x46,1 W 460x52,0	W 410x46,1	6
	s/ par.	Vigas de borda	-	-	-	-	-	-	7
		Vigas internas	VP-2	7,5	8,0	3,0	W 410x46,1 W 460x52,0	W 410x46,1	8

Com isso tem-se o peso total da estrutura de piso dado pela soma do peso das vigas secundárias com o peso das vigas principais, tal como mostrado a seguir.

Considerando-se os perfis escolhidos para o sistema de piso deste exemplo (Figura 40), obtém-se um peso total de aço das vigas de **2.461 kg** e uma taxa de consumo de aço de aproximadamente **20,5 kg/m²**.

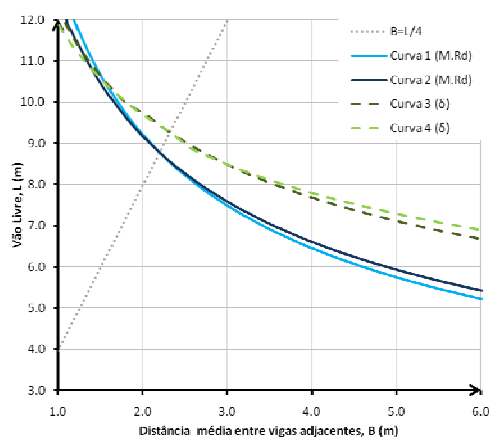
4.6 Aspectos do comportamento de vigas mistas observados com auxílio dos ábacos de pré-dimensionamento

Apresentam-se a seguir estudos sobre a influência da variação de alguns parâmetros relacionados com o comportamento de vigas mistas, desenvolvidos com base nos ábacos de pré-dimensionamento. Para esses estudos considera-se o perfil laminado de abas paralelas W 310x21 e os parâmetros de dimensionamento fixados no item 4.1.

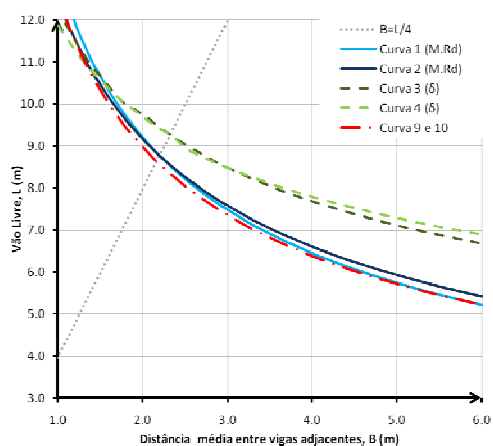
4.6.1 Influência da tipologia construtiva considerando diferentes critérios de deslocamento máximo admissível

A tipologia construtiva e o critério de deslocamento máximo admissível são aspectos que devem ser definidos em função de cada projeto. Para as vigas mistas é fundamental definir se a construção é escorada ou não-escorada. Além disso, deve-se definir um critério para avaliação dos deslocamentos excessivos, levando-se em consideração se será aplicada contraflecha e que magnitude de deslocamentos afeta os elementos não estruturais ligados à viga mista ou se os deslocamentos iniciais são importantes para a percepção visual do elemento estrutural.

Na Figura 42, apresentam-se as curvas de comportamento da viga mista para construção escorada e não-escorada, de acordo com o primeiro critério de deslocamento máximo admissível, dado por $L/350$ para a carga sobreposta máxima (Q_{csm}). Apresenta-se a seguir as curvas de pré-dimensionamento obtidas para construção escorada e para construção não-escorada com os critérios de deslocamentos dados por $L/250$ para ações de $G+Q_{csm}$, e por $L/350$ para as ações que atuam depois do endurecimento do concreto, Q_{csm} .



Construção escorada, com $L/350$ para Q_{csm}
(a)



Construção não-escorada, com $L/350$ para Q_{csm}
(b)

Figura 42 - Curvas de comportamento da viga mista, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}).

A partir das curvas da Figura 42 obtém-se as curvas de pré-dimensionamento cada tipologia construtiva, Figura 43.

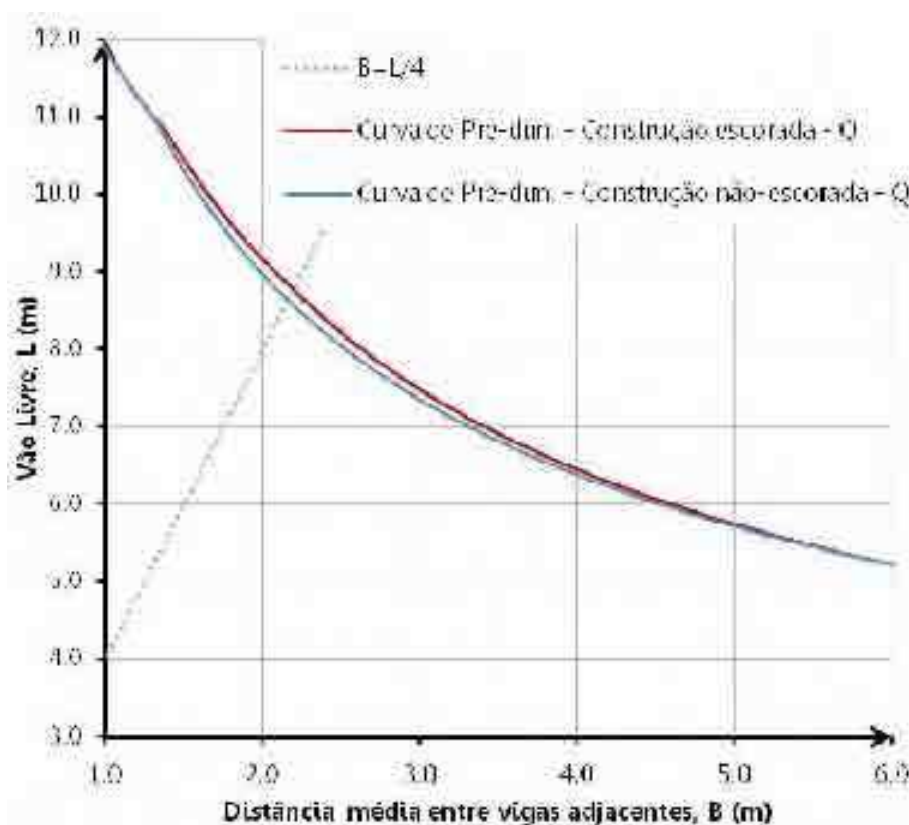


Figura 43 - Curvas de Pré-dimensionamento para construção escorada e não-escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para a carga sobreposta máxima - Q_{csm})

De forma semelhante à anterior, apresentam-se as curvas de comportamento da viga mista para as duas tipologias construtivas, de acordo com o segundo critério de deslocamento máximo admissível, dado por $L/250$ para a combinação rara de serviço ($G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) (Figura 44).

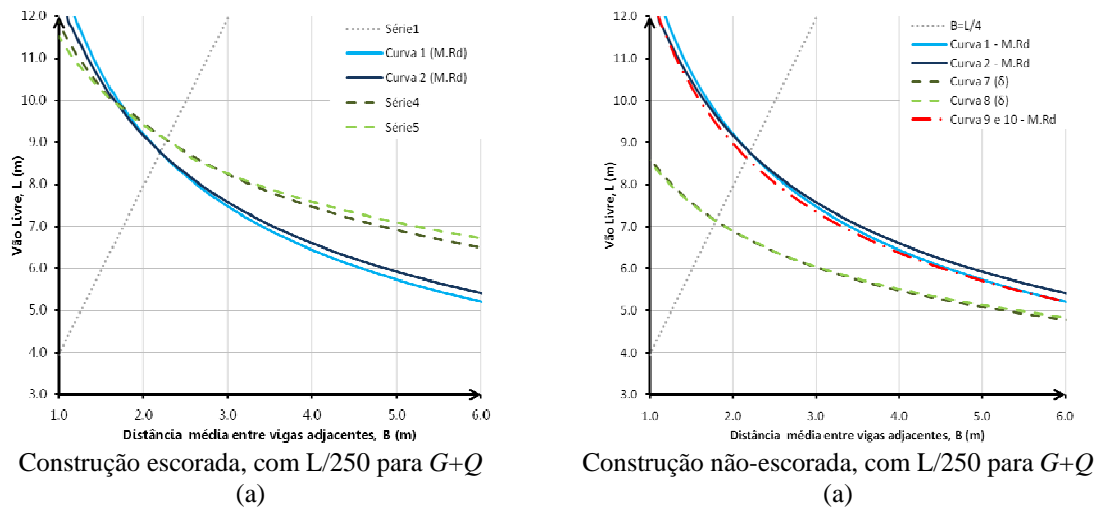


Figura 44 - Curvas de comportamento da viga mista, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para a combinação rara de serviço $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).

A partir das curvas da Figura 44.a e Figura 44.b, obtém-se as curvas de pré-dimensionamento para cada tipologia construtiva, Figura 45.

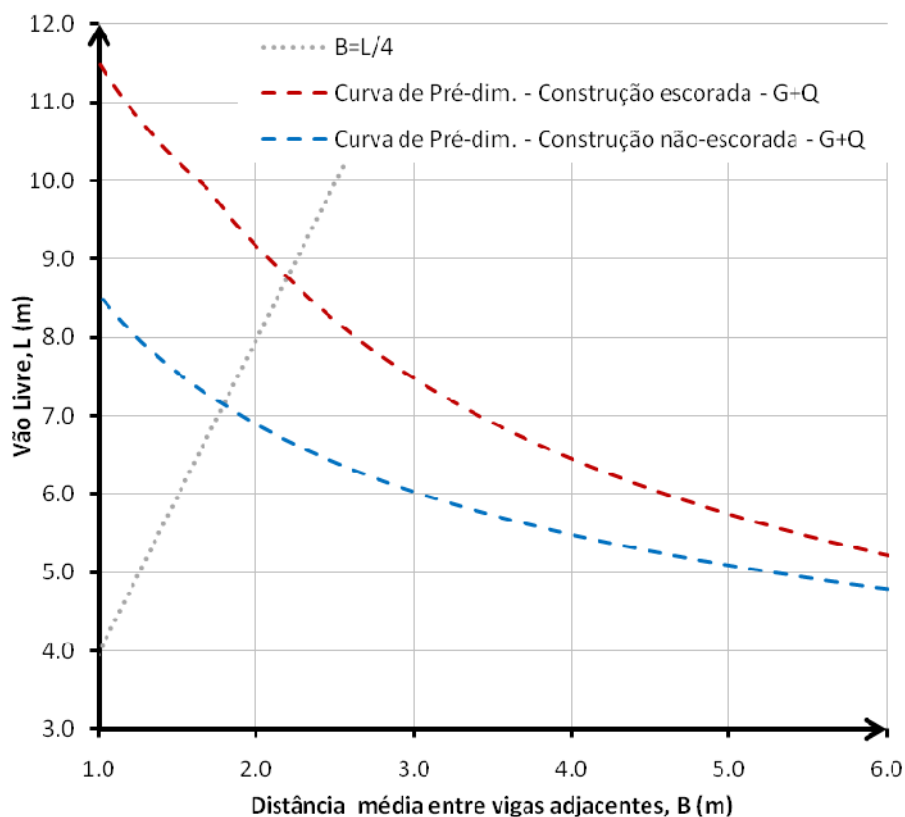


Figura 45 - Curvas de Pré-dimensionamento para construção escorada e não-escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para a combinação rara de serviço $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$).

Na Figura 46 sobrepõem-se as quatro curvas de pré-dimensionamento obtidas anteriormente. Observa-se que considerando o primeiro critério de deslocamento máximo admissível, praticamente não há diferença de comportamento entre a construção escorada e a construção não escorada. Nesse caso pressupõe-se que para a construção não-escorada, se aplique uma contraflecha de valor equivalente ao deslocamento das ações permanentes. Considerando o segundo critério, observa-se que para uma mesma distância entre vigas adjacentes, B , a viga mista escorada permite alcançar um vão livre, L , que em média, é da ordem de 20% maior que a não-escorada.

Em síntese, como em muitos casos a verificação dos deslocamentos máximos admissíveis controla o comportamento das vigas mistas, a influência da tipologia construtiva depende do critério de deslocamento considerado.

Com as curvas de pré-dimensionamento geradas, comparam-se as curvas para construção escorada com as curvas de construção não-escorada, Figura 46. Observam-se que as curvas

para construção escorada são praticamente as mesmas se diferenciando-se apenas no tramo para grandes vãos, quando o deslocamento para a curva de $G+Q_{csm}$ é dimensionante para os dois casos. A outra curva que fica muito próxima é a curva de pré-dimensionamento para construção não escorada quando, para o deslocamento, considera-se apenas Q_{csm} , ou seja, considerando contraflecha. A curva que mais se distancia é a curva para construção não escorada quando se considera para o cálculo do deslocamento as ações de $G + Q_{csm}$.

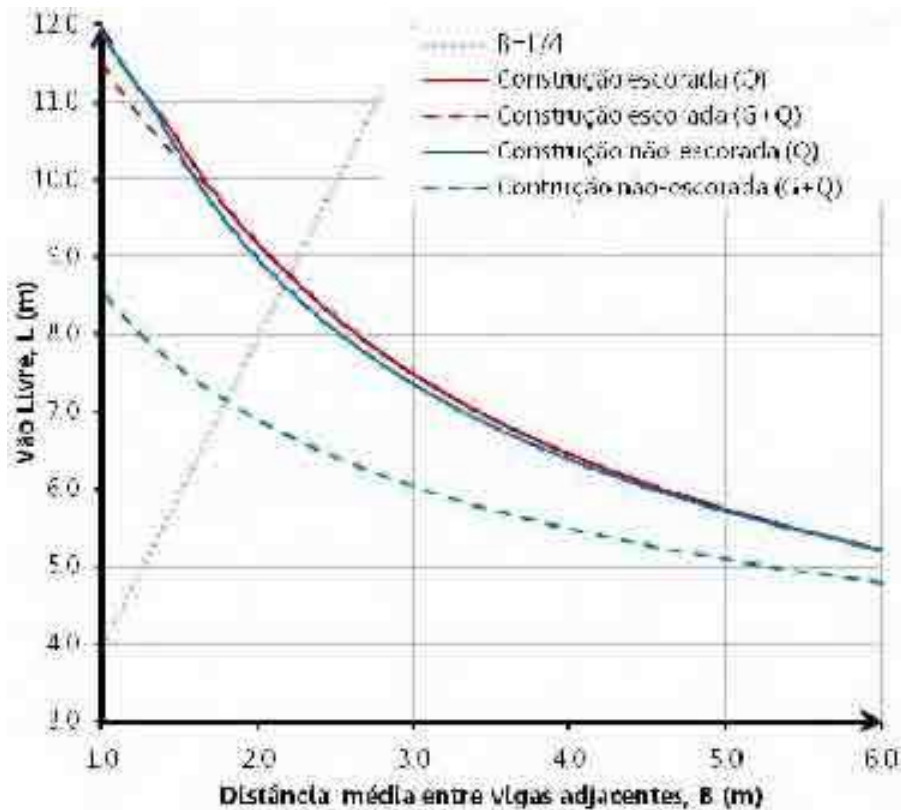


Figura 46 - Curvas de Pré-dimensionamento em função da tipologia construtiva, considerando diferentes critérios de deslocamento máximo admissível.

4.6.2 Influência dos critérios de deslocamento máximo admissível

Observando as curvas apresentadas para os casos de construção escorada e construção não-escorada, no item 4.6.1, nota-se que para a maioria dos casos as curvas de deslocamento excessivo sempre fazem parte da composição da curva de pré-dimensionamento. Em função disto e com base na revisão bibliográfica sobre os critérios de deslocamento máximo admissível, decidiu-se avaliar a influência desses critérios sobre o comportamento das vigas mistas. Na Tabela 19, apresentam-se os critérios utilizados para essa avaliação.

A metodologia apresentada no Capítulo 3 para a geração de ábacos permite gerar as curvas para o estado-limite de serviço de deslocamento excessivos de acordo com diversos critérios, inclusive os que consideram os deslocamentos máximos absolutos. Tendo em vista essa possibilidade, foram implementadas novas curvas de deslocamento (curvas 3a, 4a, 5a, 6a, 7a e 8a) para avaliar a influência dos deslocamentos absolutos apresentados na ABNT NBR 8800:2008 e no *AISC Design guide n°3* (FISHER e GRIFFIS, 2004). As curvas para o estado-limite último apresentadas em todos os casos foram obtidas a partir das prescrições da ABNT NBR8800:2008.

Tabela 19 - Critérios de limites de deslocamento máximo admissível.

Referência	Elemento estrutural	Combinação de ação para o deslocamento	Limite de deslocamento
ABNT NBR 8800:2008	Viga de piso cujos deslocamentos não provocam danos a outros componentes da construção	$G_{laje} + G_{viga} + \psi_2 Q_{csm}$	$L/350$
	Viga de piso ligada a componentes construtivos sujeitos à fissuração ⁽¹⁾	$G_{laje} + G_{viga} + Q_{csm}$	$L/350$ e 15 mm
AISC <i>Design Guide</i> nº3	Viga de piso em geral ⁽²⁾	$G_{laje} + G_{viga}^{(3)}$	$L/360$ e 25,4 mm ⁽⁴⁾
	Viga de piso cujos deslocamentos não provocam danos a outros componentes da construção	$0,5 Q_{csm}$	$L/240$
	Viga de piso ligada a componentes construtivos sujeitos à fissuração ⁽¹⁾	$0,5 Q_{csm}$	$L/360$ e 25,4 mm
Critério adotado para geração dos ábacos de pré-dimensionamento	Viga de piso cujos deslocamentos não provocam danos a outros componentes da construção	$G_{laje} + G_{viga} + Q_{csm}$	$L/250$
	Viga de piso ligada a elementos não estruturais sujeitos a fissuração ⁽¹⁾	$G_{laje} + G_{viga} + Q_{csm}$	$L/250$
		$Q_{csm}^{(5)}$	$L/350$

(1) Cita-se como exemplos de elementos não estruturais sujeitos a fissuração: Paredes em geral e forros de gesso. Deve-se enfatizar que outros elementos como janelas, portas e elementos instalados também são afetados pelos deslocamentos excessivos. Segundo o Anexo C, o projetista é responsável por avaliar quais são combinações de ações a serem adotadas;

(2) O primeiro critério do *AISC Design Guide* nº3 se aplica a todas as vigas do sistema de piso misto;

(3) No cálculo do deslocamento total devem ser considerados os deslocamentos instantâneos somados à metade do deslocamento devido aos efeitos de fluência do concreto;

(4) Para sistemas de piso com vigas principais e vigas secundárias (*in a bay*).

(5) Esse critério considera que será aplicada contraflecha relativa ao deslocamento devido ao peso próprio da laje de concreto e da viga metálica.

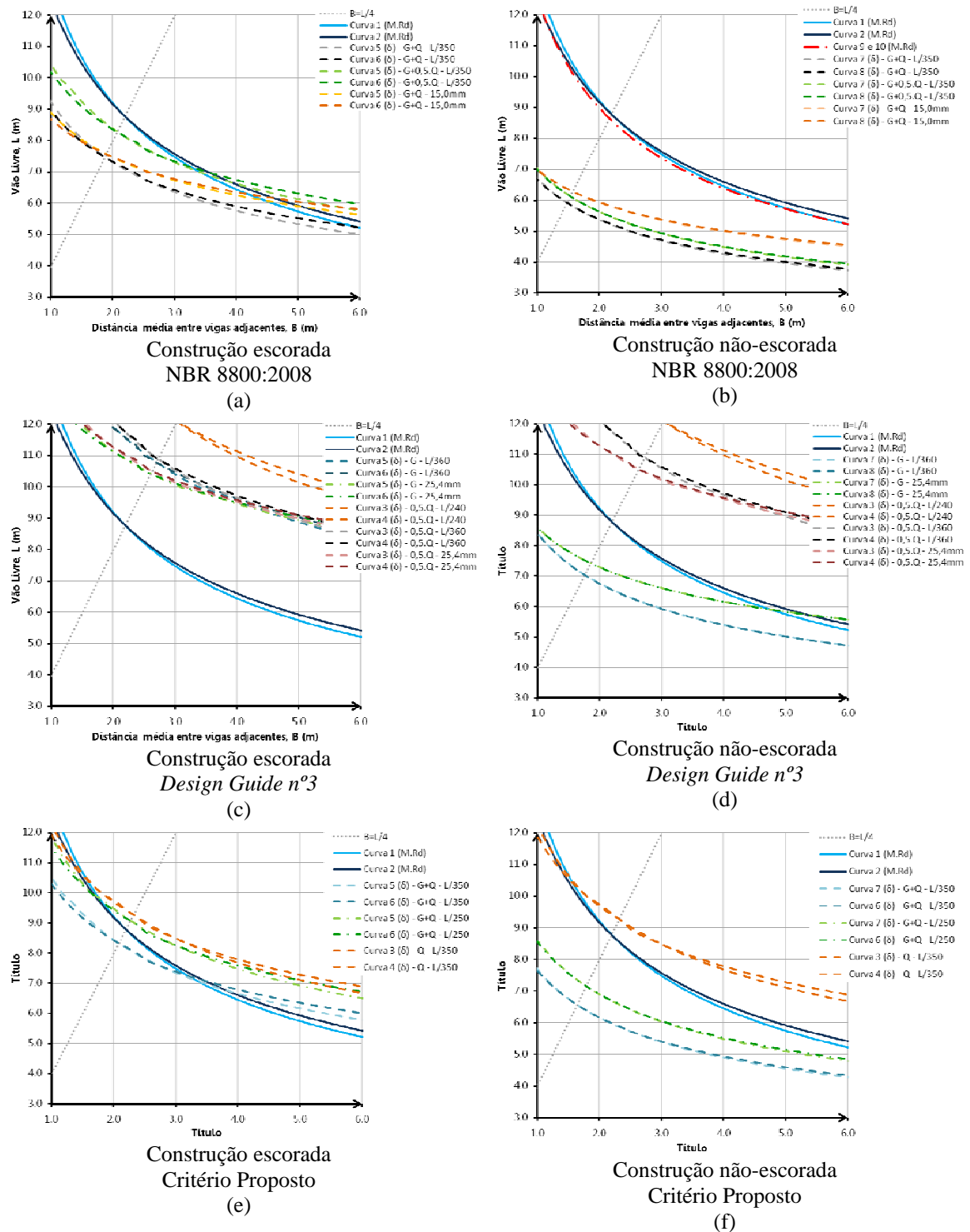


Figura 47 - Curvas de comportamento da viga mista considerando-se os diferentes critérios de deslocamento máximo admissível da Tabela 19.

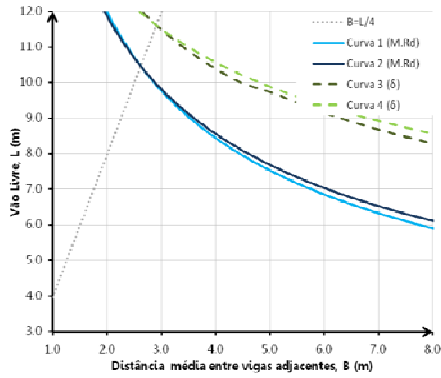
De acordo com a Figura 47, pode-se observar que as curvas para o estado-limite de deslocamento excessivo são as que controlam o comportamento da viga mista. Nota-se também que os critérios que consideram uma combinação rara de serviço ou valores absolutos para o deslocamento máximo admissível, são os mais restritivos, tanto para a construção escorada como para a construção não-escorada.

4.6.3 Influência da variação da carga sobreposta máxima

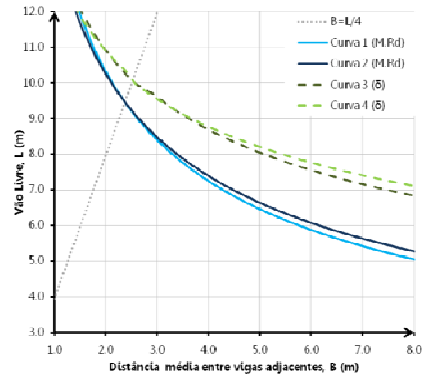
Para avaliar como as curvas de comportamento da viga mista são afetadas pela carga sobreposta máxima (Q_{csm}) foram geradas curvas com $q_{csm} = 2,0, 3,5, 5,0, 6,5$ e $8,0$ kN/m². Apresentam-se as avaliações para construção escorada e para construção não-escorada. Para este estudo considera-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}).

4.6.3.1 Construção escorada

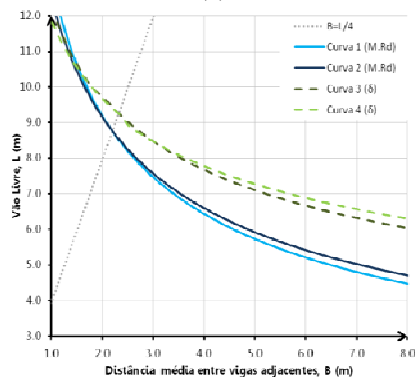
Apresentam-se a seguir as curvas de comportamento (Figura 48) e as curvas de pré-dimensionamento (Figura 49) para construção escorada, variando-se a carga sobreposta máxima, q_{csm} .



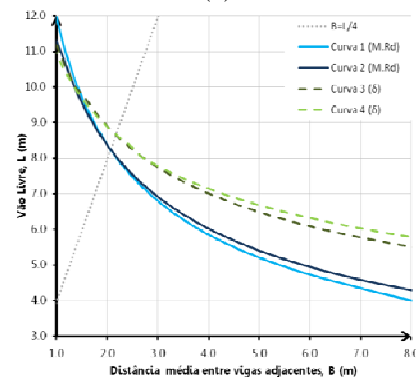
Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=2,0 \text{ kN/m}^2$
(a)



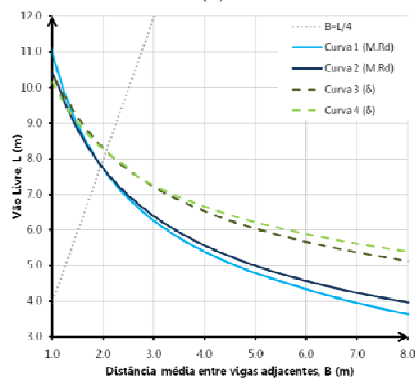
Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=3,5 \text{ kN/m}^2$
(b)



Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=5,0 \text{ kN/m}^2$
(c)



Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=6,5 \text{ kN/m}^2$
(d)



Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=8,0 \text{ kN/m}^2$
(e)

Figura 48 - Curvas de comportamento da viga mista para construção escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

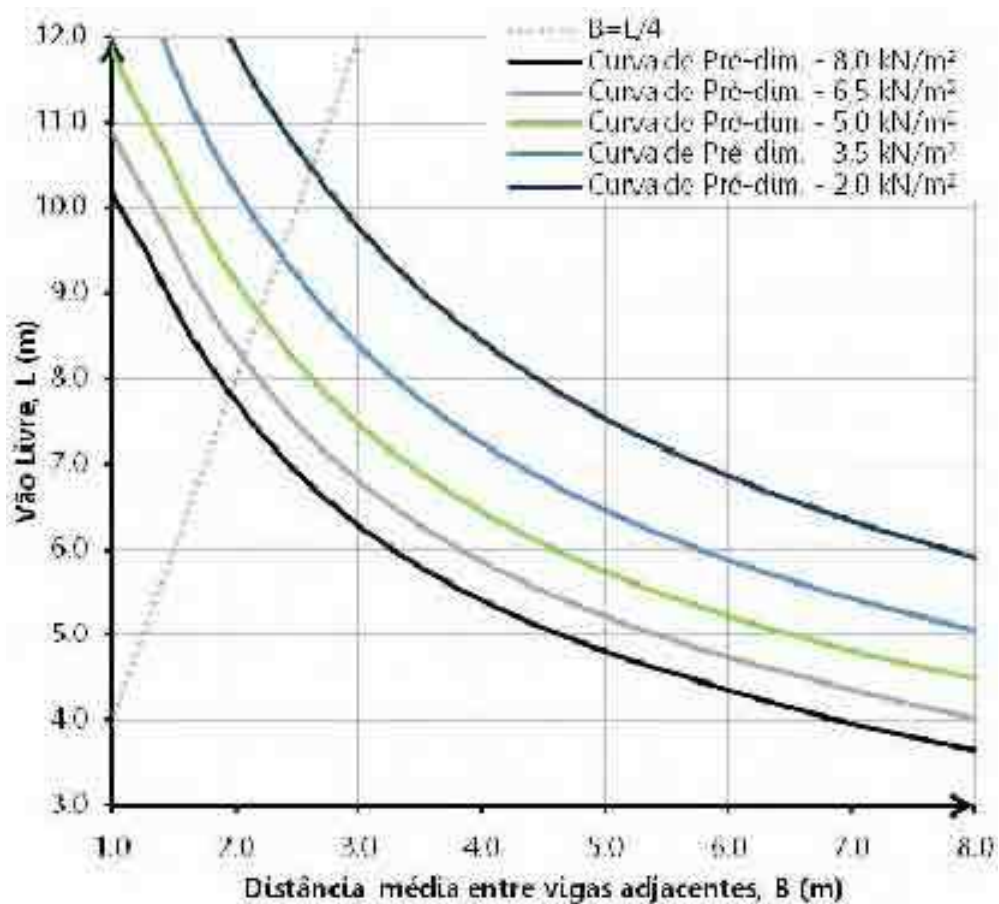
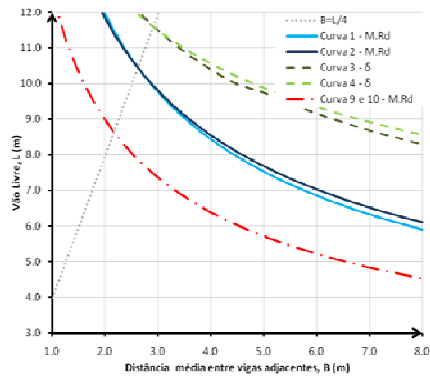


Figura 49 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada e interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

Com base na Figura 49 pode-se observar que as curvas de pré-dimensionamento apresentam uma variação praticamente uniforme na medida em que se altera a carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

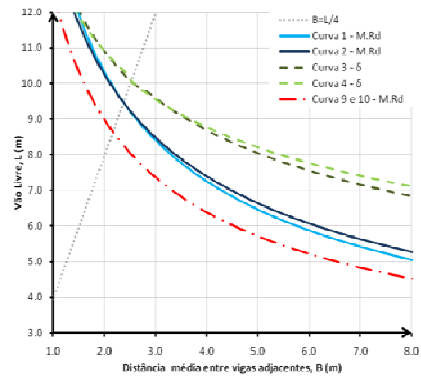
4.6.3.2 Construção não-escorada

Apresentam-se a seguir as curvas de comportamento (Figura 50) e as curvas de pré-dimensionamento (Figura 51) para a construção não-escorada, variando-se a carga sobreposta máxima (q_{csm}).



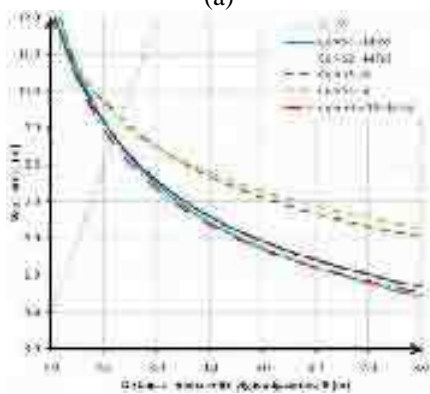
Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=2,0 \text{ kN/m}^2$

(a)



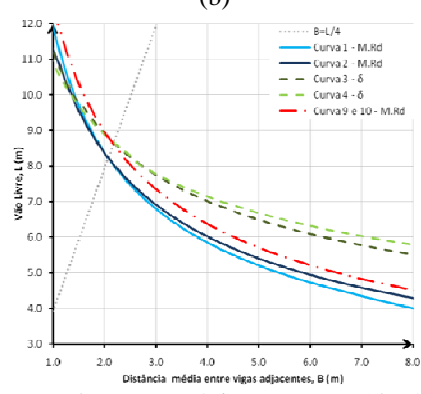
Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=3,5 \text{ kN/m}^2$

(b)



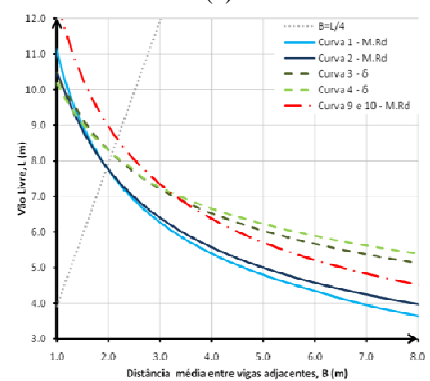
Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=5,0 \text{ kN/m}^2$

(c)



Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=6,5 \text{ kN/m}^2$

(d)



Carga sobreposta máxima - $q_{csm}=8,0 \text{ kN/m}^2$

(e)

Figura 50 - Curvas de comportamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

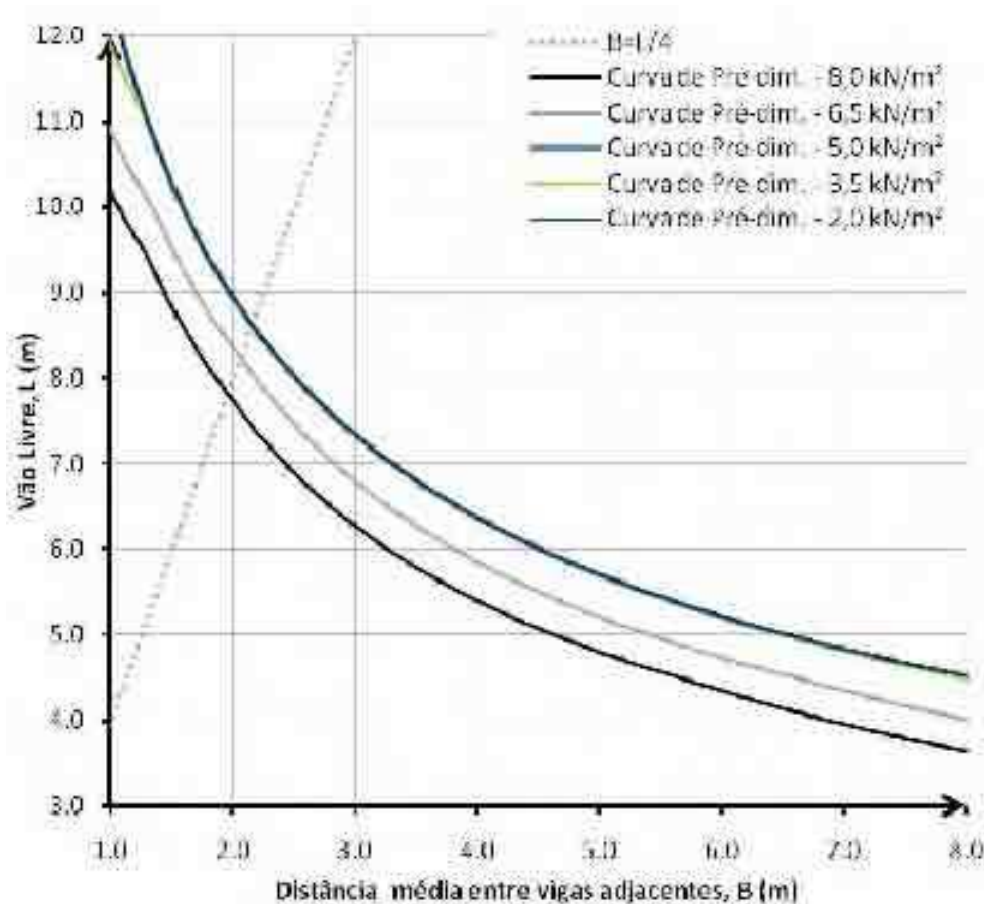


Figura 51 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa e com variação da carga sobreposta máxima (Q_{csm}).

De acordo com a Figura 50.a a Figura 50.e pode-se observar que para a construção não-escorada, até um valor de $q_{csm} = 5,0 \text{ kN/m}^2$, a curva de estado-limite último do perfil de aço isolado é a que controla o comportamento da viga mista. Para esses casos pode-se avaliar a possibilidade de utilizar a viga de aço isolada.

Para valores mais altos de q_{csm} , o comportamento da viga mista é controlado pelo estado-limite último.

4.6.4 Influência da variação dos parâmetros de dimensionamento ligados à laje

Apresentam-se a seguir estudos sobre a influência da variação dos parâmetros de dimensionamento relacionados à laje de concreto no comportamento das vigas mistas.

4.6.4.1 Influência da variação da espessura da laje de concreto

Na Figura 52 apresentam-se as curvas de comportamento da viga mista com laje maciça de espessuras iguais a 8,0, 10,0, 12,0, 14,0 e 16,0 cm, com $q_{csm} = 5,0 \text{ kN/m}^2$, para construção não-escorada e interação completa.

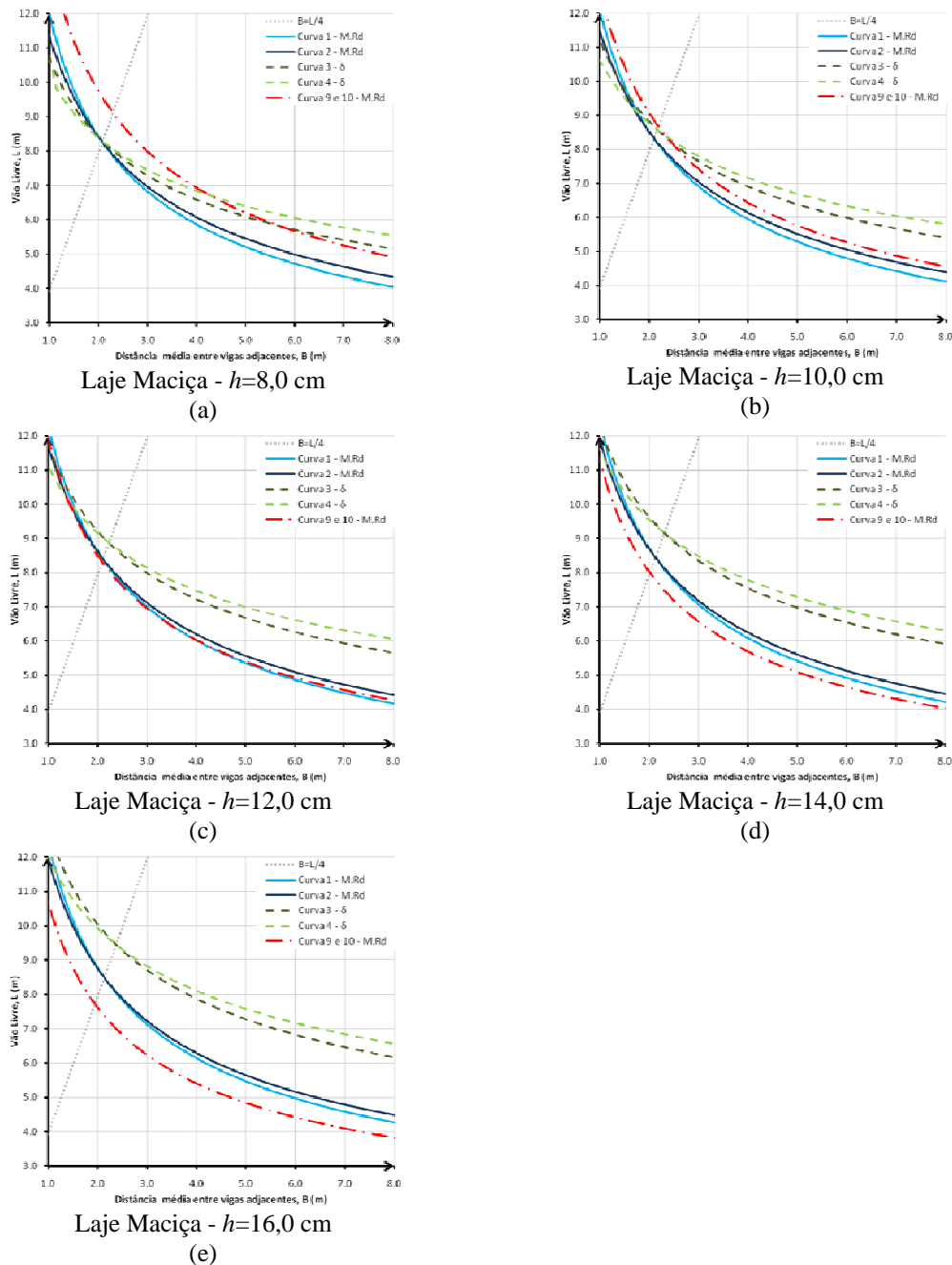


Figura 52 - Curvas de comportamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, com interação completa e com variação da espessura da laje

Nos ábacos da Figura 52 observa-se que conforme a espessura da laje aumenta, as curvas para o estado-limite último da seção mista se deslocam para cima, enquanto que a curva de estado-limite último do perfil de aço isolado se desloca para baixo. Isso acontece porque com o aumento da espessura da laje tem-se algum ganho de momento fletor resistente de cálculo, ao mesmo tempo que ocorre um aumento do peso próprio do concreto fresco na etapa de construção, o que faz com que o momento fletor resistente de cálculo do perfil de aço isolado seja reduzido. Observa-se que até a espessura de 12,0 cm a curva do perfil de aço isolado ainda não controla o comportamento da viga mista (Figura 52.a a Figura 52.e).

A partir das curvas da Figura 52, obtém-se as curvas de pré-dimensionamento para cada espessura de laje maciça considerada (Figura 53). Na Figura 53 observa-se que a curva de pré-dimensionamento para laje maciça de 8,0 cm de espessura apresenta uma diferença média menor que 10% em relação à com espessura de 16,0 cm. No entanto para grandes vãos livres, L , a curva correspondente à laje maciça com 8,0 cm de espessura é afetada pela curva de deslocamento máximo admissível.

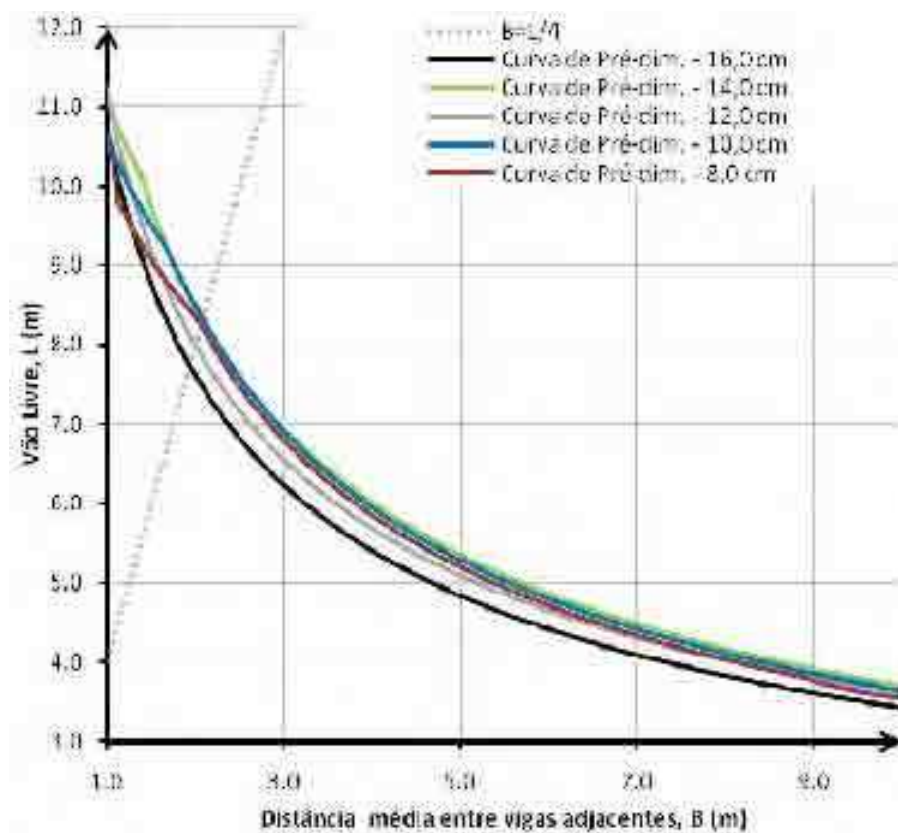


Figura 53 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, interação completa, com variação da espessura da laje.

Considerando uma simulação para interação parcial com um grau de interação mínimo (Figura 54) o comportamento da viga mista passa a ser controlado pelo estado-limite último da seção mista. Nesse caso, o ganho devido ao aumento da espessura da laje é muito pequeno e se deve basicamente à melhoria da curva de deslocamento excessivo.

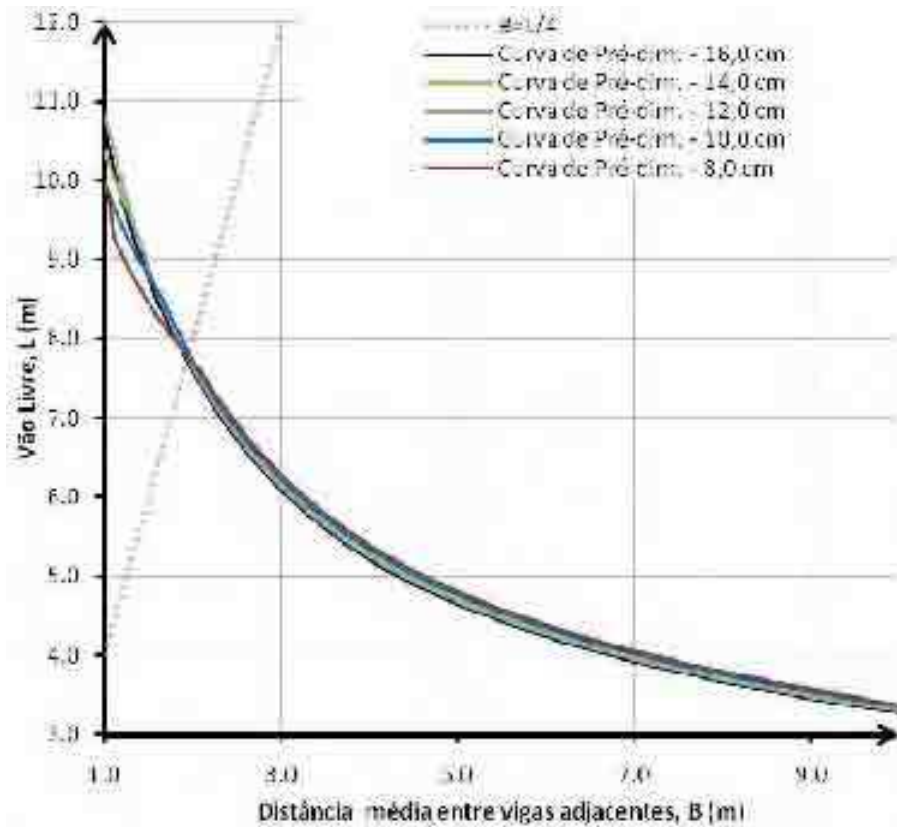
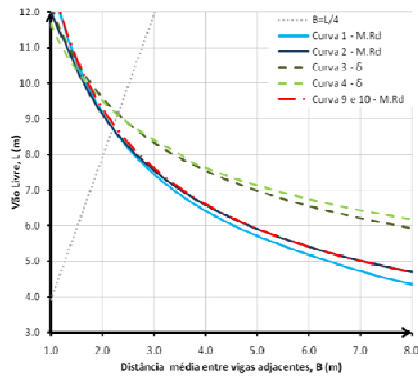


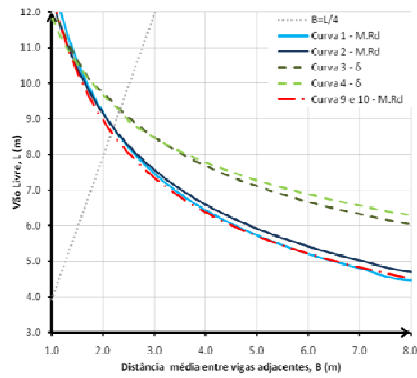
Figura 54 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça para construção não-escorada, interação parcial com grau de interação mínimo, com variação da espessura da laje.

Para o caso de lajes com forma de aço incorporada, consideram-se as alturas de 130 mm, 140 mm, 160 mm, 180 mm e 200 mm. Na Figura 55 apresentam-se as curvas de comportamento da viga mista com $q_{csm} = 5,0 \text{ kN/m}^2$, para construção não-escorada e interação completa.



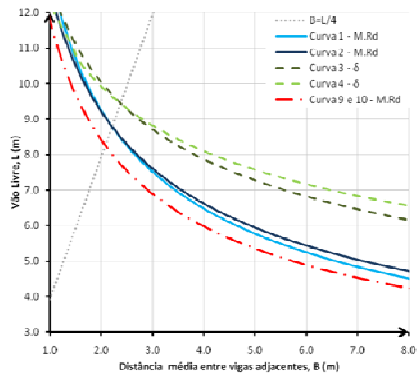
Laje com *Steel-deck* - $h=130\text{mm}$

(a)



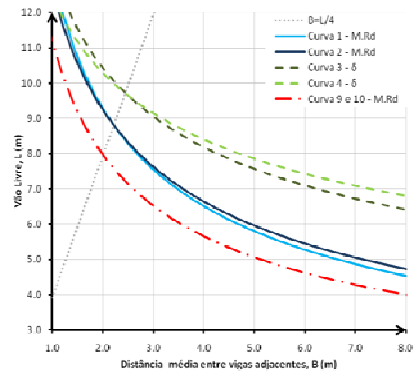
Laje com *Steel-deck* - $h=140\text{mm}$

(b)



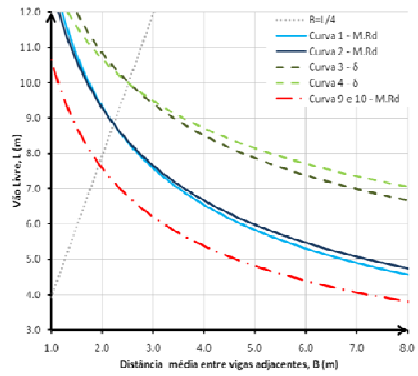
Laje com *Steel-deck* - $h=160\text{mm}$

(c)



Laje com *Steel-deck* - $h=180\text{mm}$

(d)



Laje com *Steel-deck* - $h=200\text{mm}$

(e)

Figura 55 - Curvas de comportamento para construção não-escorada, com interação completa, para lajes com *Steel-deck* e com variação da espessura total da laje.

Pode-se observar na Figura 55.a que para a espessura de 130 mm a curva para o estado-limite último do perfil de aço isolado já está próxima da curva do estado-limite último da viga mista. Conforme se aumenta a espessura da laje, aumenta-se o peso próprio do concreto fresco na etapa e construção e a curva do perfil de aço isolado passa a controlar o comportamento da viga mista.

A partir das curvas da Figura 55 obtém-se as curvas de pré-dimensionamento para cada altura total da laje mista considerada, Figura 56.

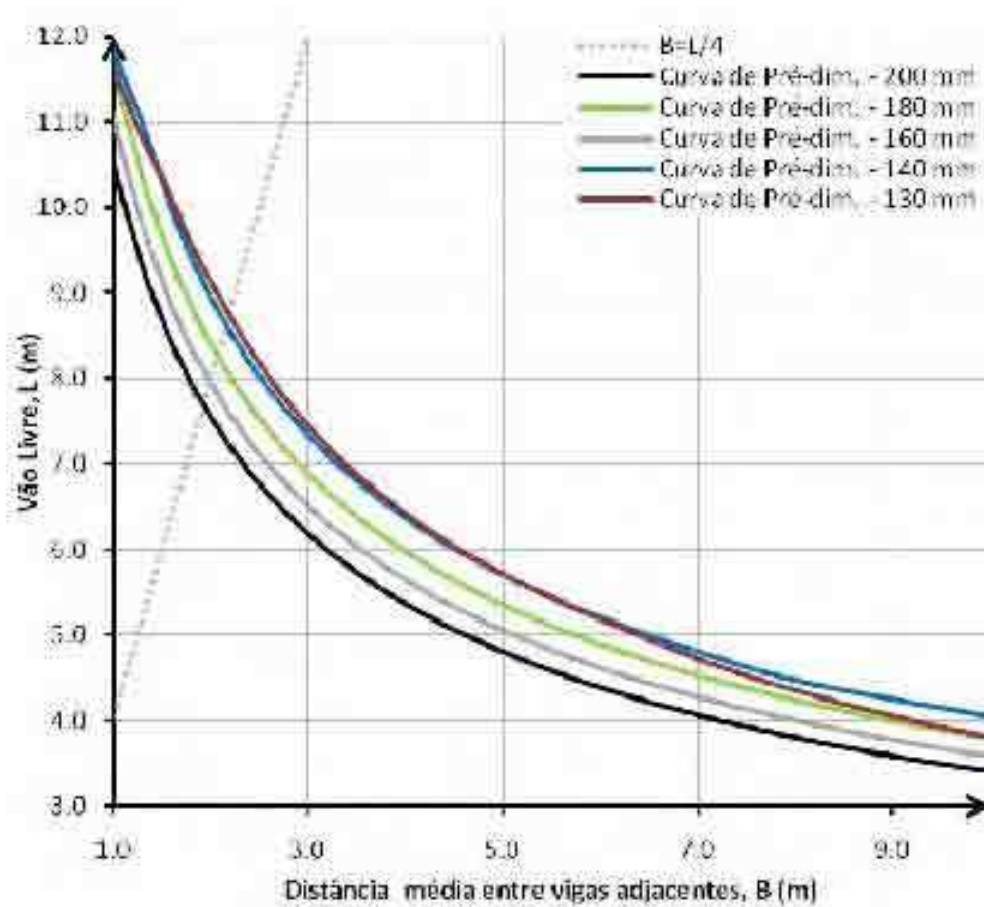


Figura 56 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje mista para construção não-escorada, interação completa, e com variação da altura total da laje.

De acordo com a Figura 56, nota-se que as curvas de pré-dimensionamento apresentam uma variação praticamente uniforme à medida que se altera a altura total da laje mista, já que a curva para o estado-limite último do perfil de aço isolado controla o comportamento da viga mista.

Considerando-se uma simulação para interação parcial com um grau de interação mínimo, Figura 57, o comportamento da viga mista passa a ser controlado pelo estado-limite último da seção mista. Neste caso, praticamente não existe ganho devido ao aumento da altura máxima da laje mista.

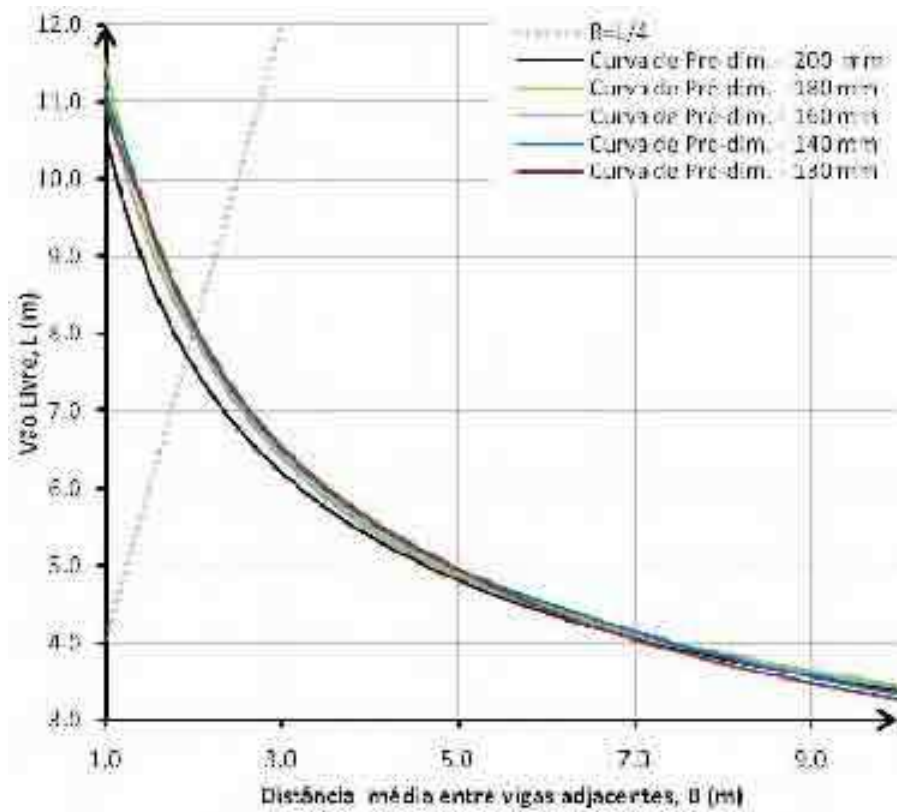
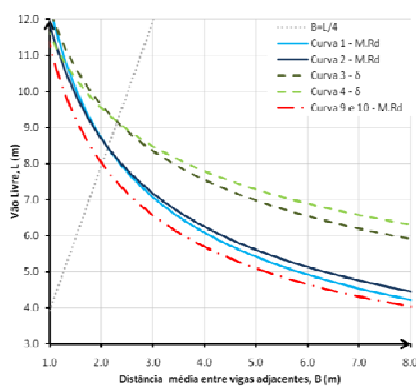
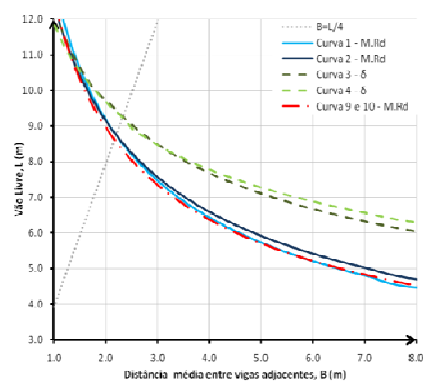


Figura 57 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje mista para construção não-escorada, interação parcial com grau de interação mínimo, com variação da altura da laje.

Nas Figura 58 e Figura 59 apresenta-se uma comparação do comportamento da viga mista com laje maciça e com laje mista, ambas com 140 mm de altura total.



Laje maciça - $h=140\text{mm}$
Interação completa
(a)



Laje com forma de aço incorporada - $h=140\text{mm}$
Interação completa
(b)

Figura 58 - Curvas de comportamento da viga mista para construção não-escorada, interação completa, com distintos tipos de laje.

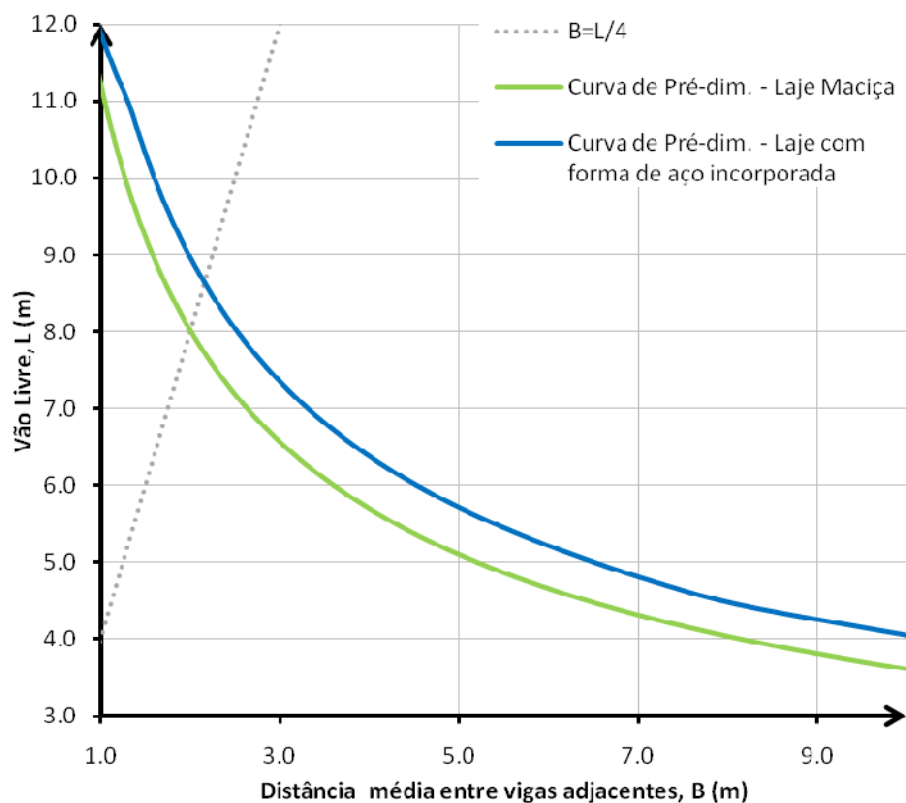


Figura 59 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, com distintos tipos de laje, com altura total de 140 mm e interação completa.

Diante dos resultados mostrados na Figura 59 observa-se que para uma mesma distância entre vigas adjacentes, B , a viga mista com laje maciça é capaz de vencer um vão ligeiramente menor do que a que utiliza forma de aço incorporada. Isso se deve ao fato de que a laje maciça, apesar de ter uma maior seção transversal de concreto colaborante, apresenta um peso próprio maior, o que acaba afetando a curva de estado-limite último do perfil de aço isolado que controla o comportamento da viga mista.

Para se obter maiores conclusões sobre a influência dos parâmetros de dimensionamento ligados à laje no comportamento das vigas mistas, seria necessário realizar um estudo mais amplo, considerando também a relação entre $Q_{csm}/(G_{viga} + G_{laje})$.

4.6.4.2 Influência da variação da resistência característica à compressão do concreto

Neste outro estudo avalia-se a influência da variação da resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , no comportamento da viga mista.

Na Figura 60, apresentam-se as curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça ($h = 12,0$ cm) para construção escorada, uma vez que a resistência do concreto não tem influência no comportamento do perfil de aço isolado.

Pode-se afirmar que o aumento da resistência característica à compressão do concreto, praticamente não afeta o comportamento da viga mista. Esse resultado reforça um conceito conhecido na área de estruturas de que a resistência à compressão do concreto não afeta o comportamento de peças tipicamente submetidas à flexão.

Nessa avaliação será apresentada a variação da resistência característica do concreto. Apresentam-se na Figura 60 as curvas para a construção escorada, uma vez que a resistência do concreto não tem influência no comportamento do perfil de aço isolado.

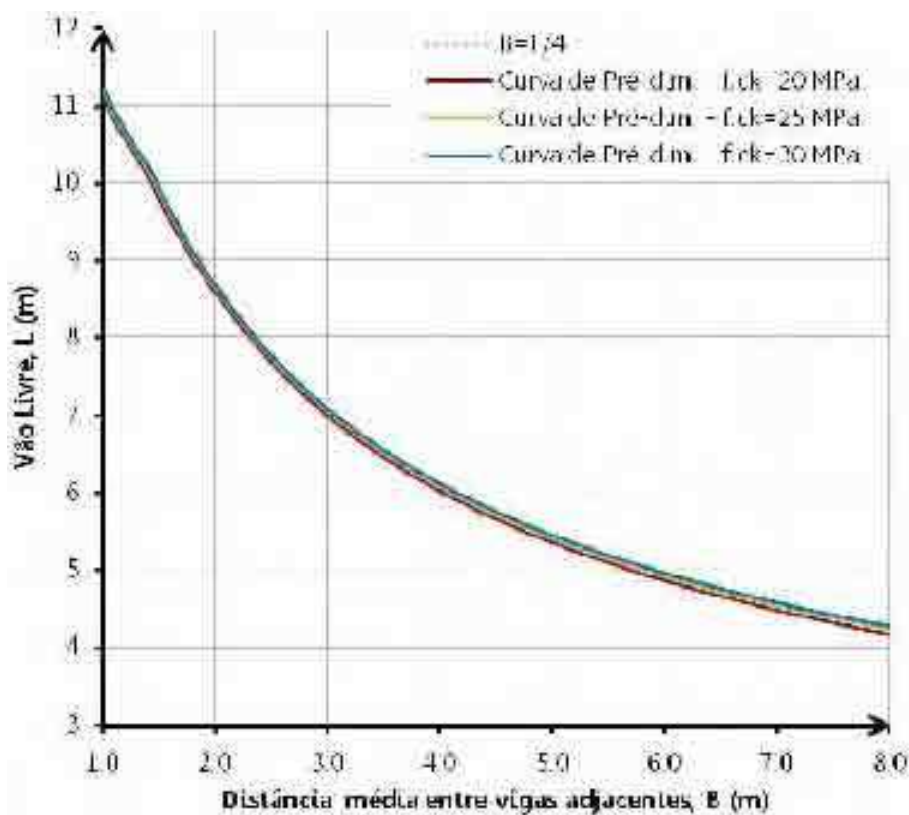


Figura 60 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista com laje maciça ($h = 12,0$ cm) para construção escorada, com interação completa, com variação da resistência característica do concreto.

4.6.5 Influência da variação do grau de interação

Para avaliar a influência do grau de interação no comportamento da viga mista foram geradas curvas de pré-dimensionamento para graus de 100%, 90%, 80%, 70% e o mínimo grau permitido pela ABNT NBR8800:2008. Apresentam-se avaliações para construção escorada e não escorada, considerando-se os dois critérios de deslocamento máximo admissível adotados neste trabalho.

4.6.5.1 Construção escorada

Na Figura 62 e Figura 61 apresentam-se as curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada, de acordo com os dois critérios de deslocamento máximo admissível adotados neste trabalho.

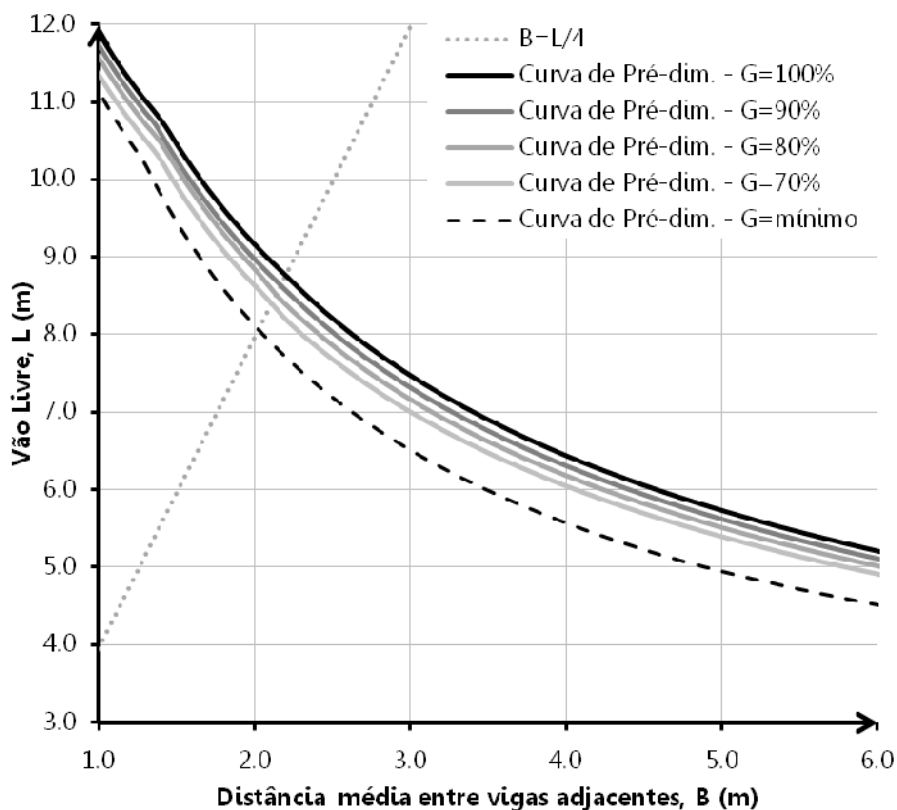


Figura 61 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}) com variação do grau de interação.

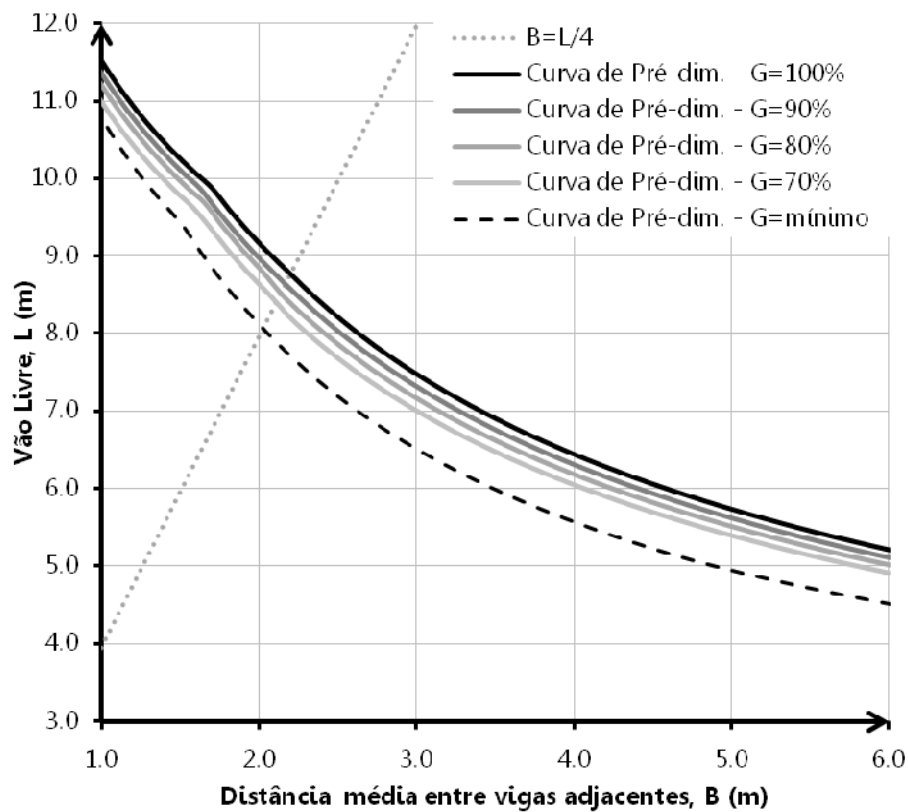


Figura 62 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) com variação do grau de interação.

Por meio da Figura 62 e Figura 61, pode-se observar que as curvas de pré-dimensionamento para distintos graus de interação apresentam uma variação quase uniforme e são formadas em grande parte pela curva de resistência da viga mista.

Para ambos os critérios de deslocamento máximo admissível, para uma mesma distância entre vigas adjacentes, B , a viga mista com um grau de interação mínimo permite alcançar um vão livre, L , que, em média, é da ordem de 15% menor do que aquele obtido para a interação completa.

4.6.5.2 Construção não-escorada

Na Figura 64 e Figura 63 apresentam-se as curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, de acordo com os dois critérios de deslocamentos máximo admissível adotados neste trabalho.

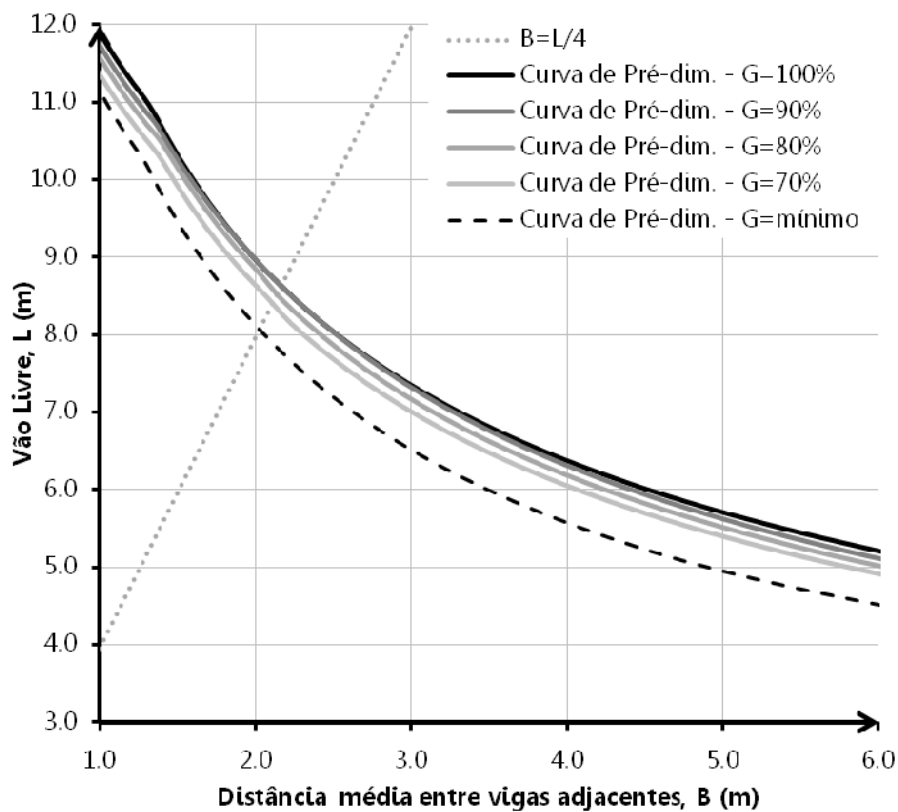


Figura 63 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}), com variação do grau de interação.

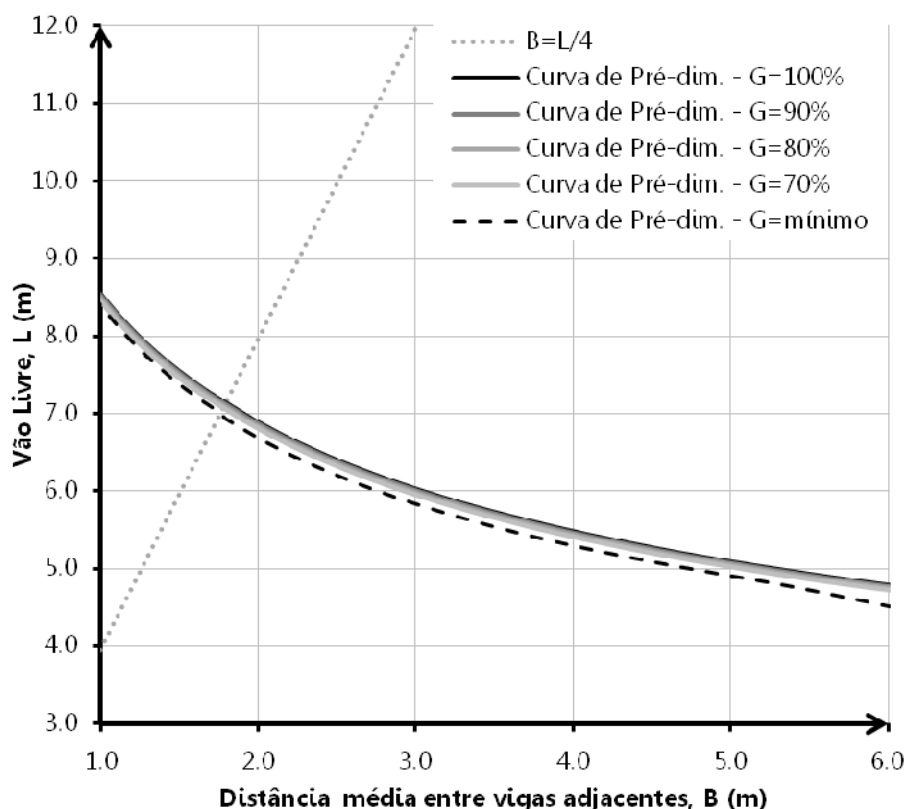


Figura 64 - Curvas de pré-dimensionamento da viga mista para construção não-escorada, considerando-se o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) com variação do grau de interação.

Com base na Figura 64 e Figura 63, pode-se observar que as curvas de pré-dimensionamento para distintos graus de interação apresentam uma variação quase uniforme.

Para as curvas de pré-dimensionamento obtidas de acordo com o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}), mantém-se uma diferença média da ordem de 15% entre os resultados obtidos com um grau de interação mínimo com relação à interação completa.

Já para as curvas de pré-dimensionamento obtidas de acordo com o segundo critério de deslocamento máximo admissível ($L/250$ para $G_{viga} + G_{laje} + Q_{csm}$) a influência da variação do grau de interação é praticamente desprezível.

4.6.6 Influência dos parâmetros de dimensionamento relacionados ao perfil de aço

4.6.6.1 Influência da variação da altura do perfil de aço

Para este estudo foram selecionados perfis laminados com uma variação de altura de aproximadamente 100 mm. Foram escolhidos os perfis W200x15, W310x21, W410x39, W530x66 e W610x101. Apresentam-se as avaliações para construção não-escorada e com $q_{csm} = 5,0 \text{ kN/m}^2$, admitindo-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{csm}).

Na Figura 65 apresentam-se as curvas de comportamento de vigas mistas formadas pelos perfis selecionados em função da altura para construção não-escorada e interação completa. Os limites dos eixos para a avaliação da variação da altura do perfil foram aumentados a fim de permitir observar o comportamento das curvas dos perfis de maior altura, W410x38,8, W530x66 e W610x101.

A partir das curvas da Figura 65 obtém-se as curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis selecionados em função da altura, para construção não-escorada e interação completa (Figura 66).

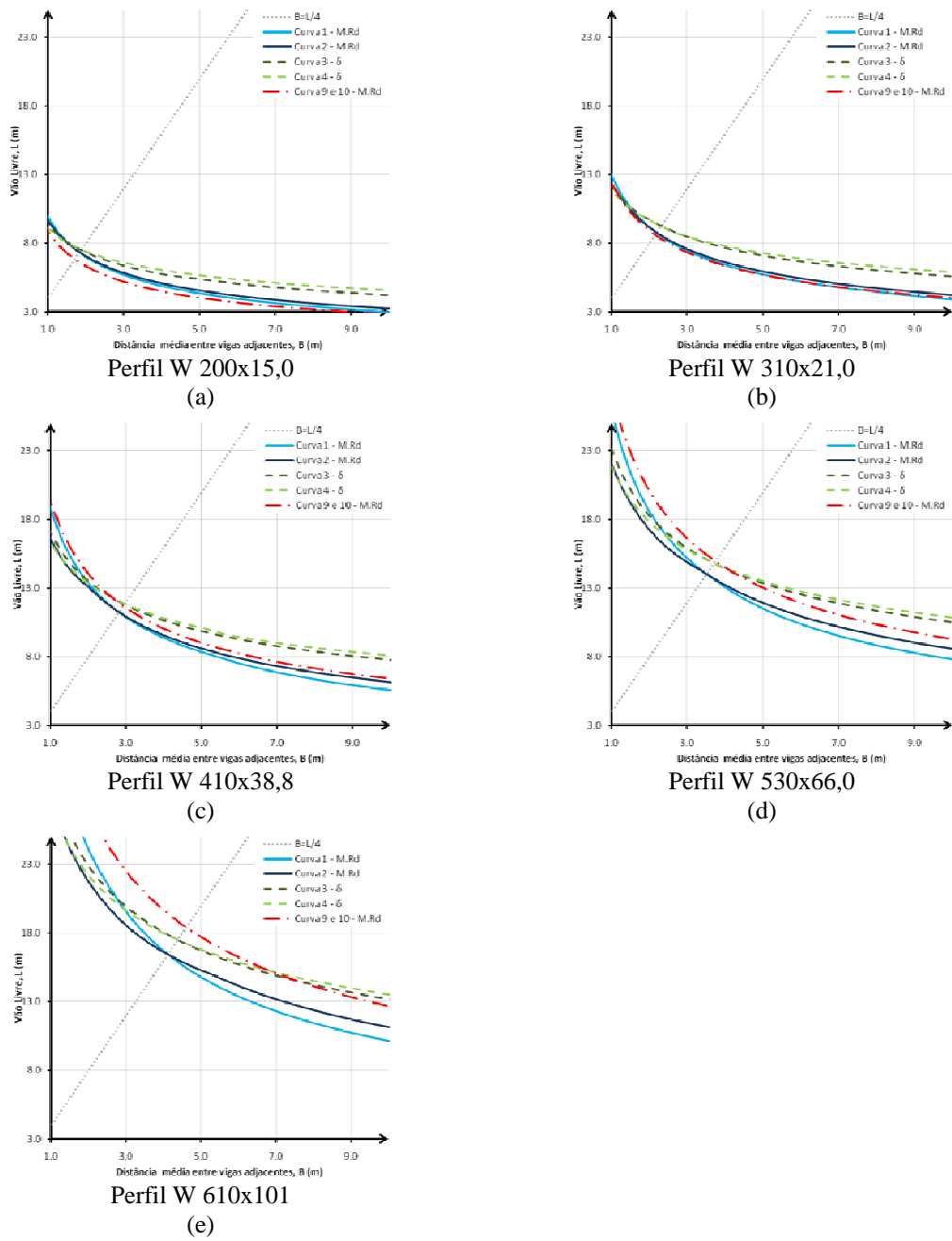


Figura 65 - Curvas de comportamento das vigas mistas formadas pelos perfis selecionados em função da altura, para construção não-escorada e interação completa.

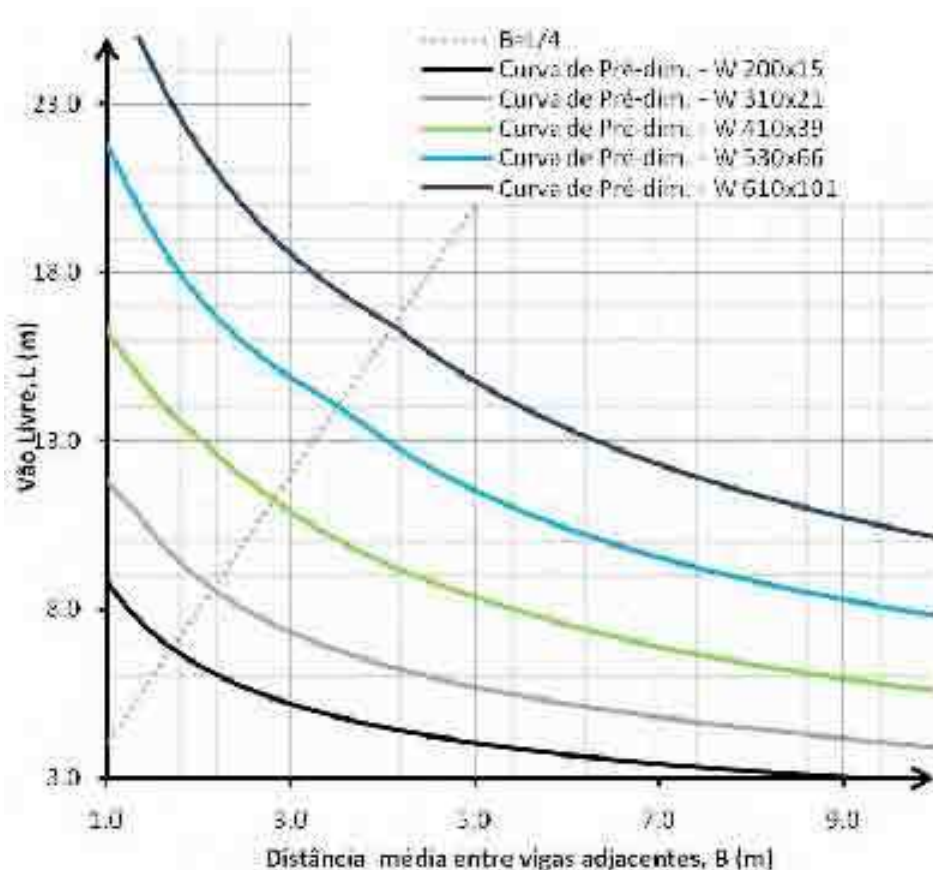


Figura 66 - Curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis selecionados para construção não-escorada, interação completa.

Com base na Figura 66 pode-se observar que as curvas de pré-dimensionamento apresentam uma variação praticamente uniforme na medida em que se aumenta a altura do perfil de aço.

4.6.6.2 Influência da variação do peso de um perfil de aço de mesma altura

Para desenvolvimento deste estudo, foram selecionados perfis laminados de altura igual ao W 310x21,0. Portanto, consideram-se os perfis W 310x21,0, W 310x28,3, W 310x38,7, W 310x52,0 e W 310x107. Para estes perfis apresentam-se avaliações para construção não-escorada, interação completa e considerando-se o primeiro critério de deslocamento máximo admissível.

Na Figura 67 apresentam-se as curvas de comportamento de vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados para construção não-escorada e interação completa. Nos gráficos da Figura 67, os limites dos eixos foram aumentados a fim de permitir observar o comportamento dos perfis mais pesados, W 310x38,7, W 310x52,0, W 310x107.

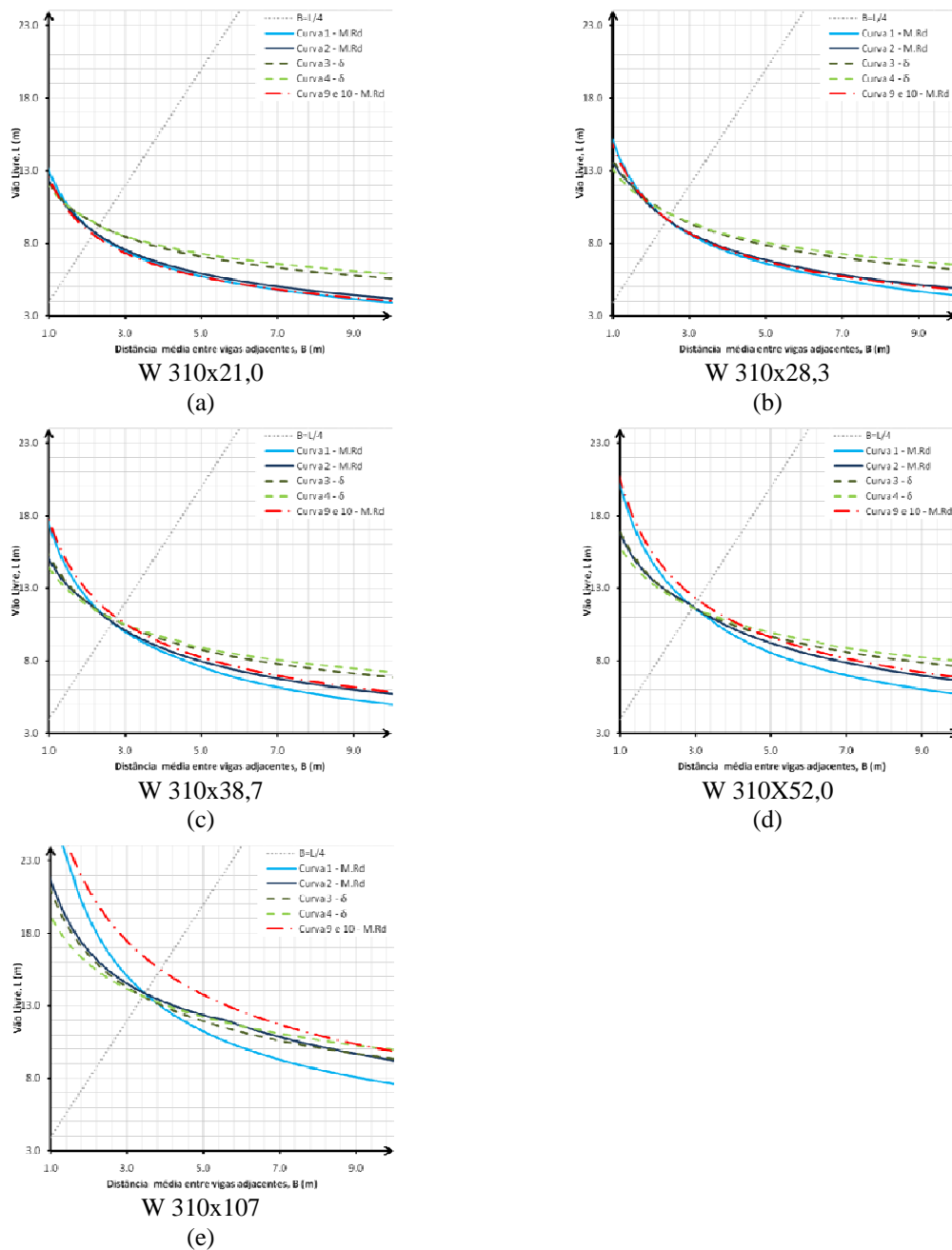


Figura 67 - Curvas de comportamento das vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados, para construção não-escorada e interação completa.

A partir das curvas da Figura 67, obtém-se as curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados, para construção não-escorada e interação completa, Figura 68.

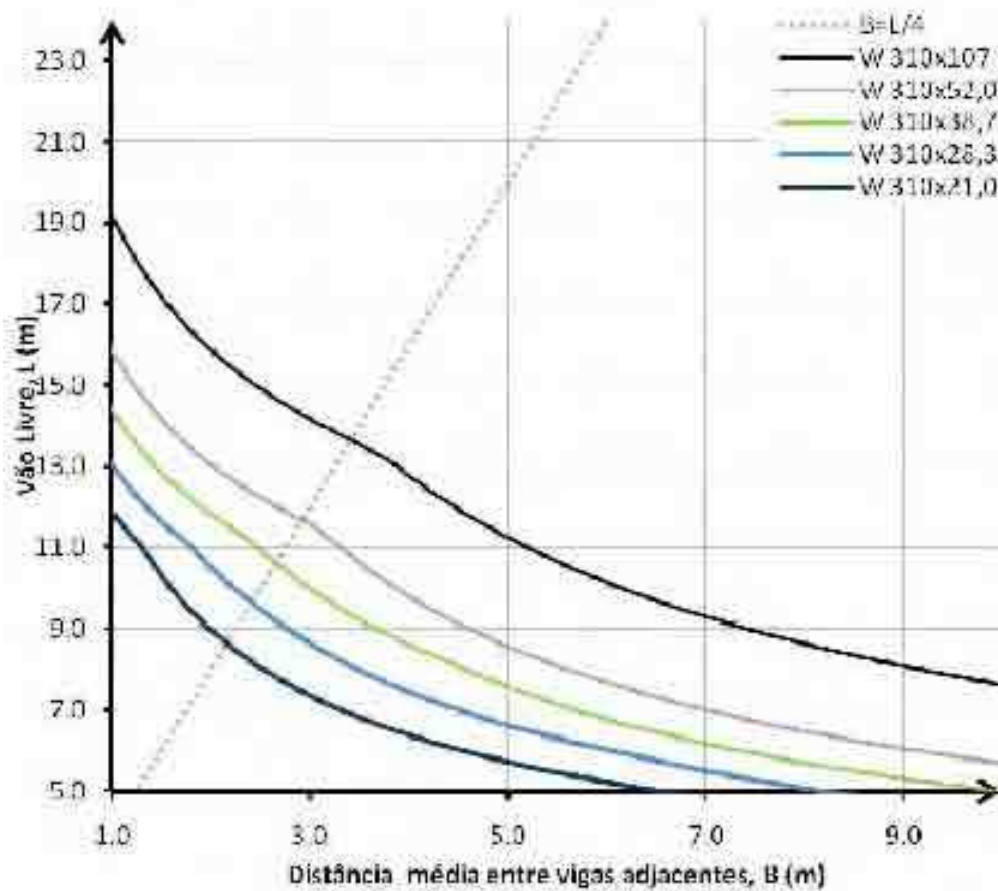


Figura 68 - Curvas de pré-dimensionamento das vigas mistas formadas pelos perfis de mesma altura e massas distintas selecionados, para construção não-escorada e interação completa.

Com base na Figura 68 pode-se observar que as curvas de pré-dimensionamento apresentam uma variação praticamente uniforme na medida em que se altera o peso do perfil de aço.

4.6.6.3 Influência da variação da resistência ao escoamento do aço do perfil

Para avaliação da influência da variação da resistência ao escoamento do aço do perfil, f_y , no comportamento de vigas mistas foram considerados aços com $f_y = 250$ MPa, $f_y = 300$ MPa e com $f_y = 345$ MPa. Para este estudo considera-se construção não-escorada, interação completa e o primeiro critério de deslocamento máximo admissível ($L/350$ para Q_{cm}).

Apresentam-se a seguir as curvas do comportamento da viga mista formada por diferentes tipos de aço, para construção não-escorada e interação completa.

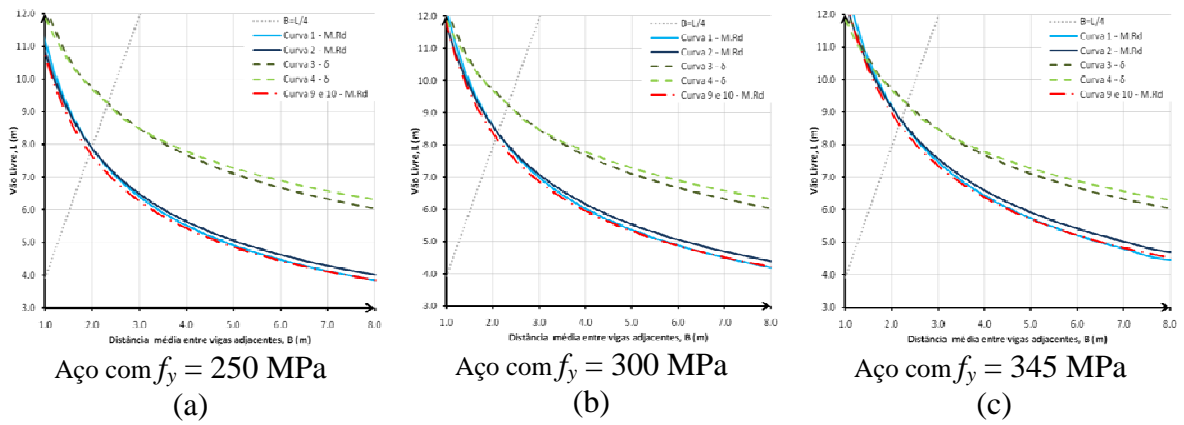


Figura 69 – Curvas de comportamento da viga mista formada por diferentes tipos de aço, para construção não-escorada e interação completa.

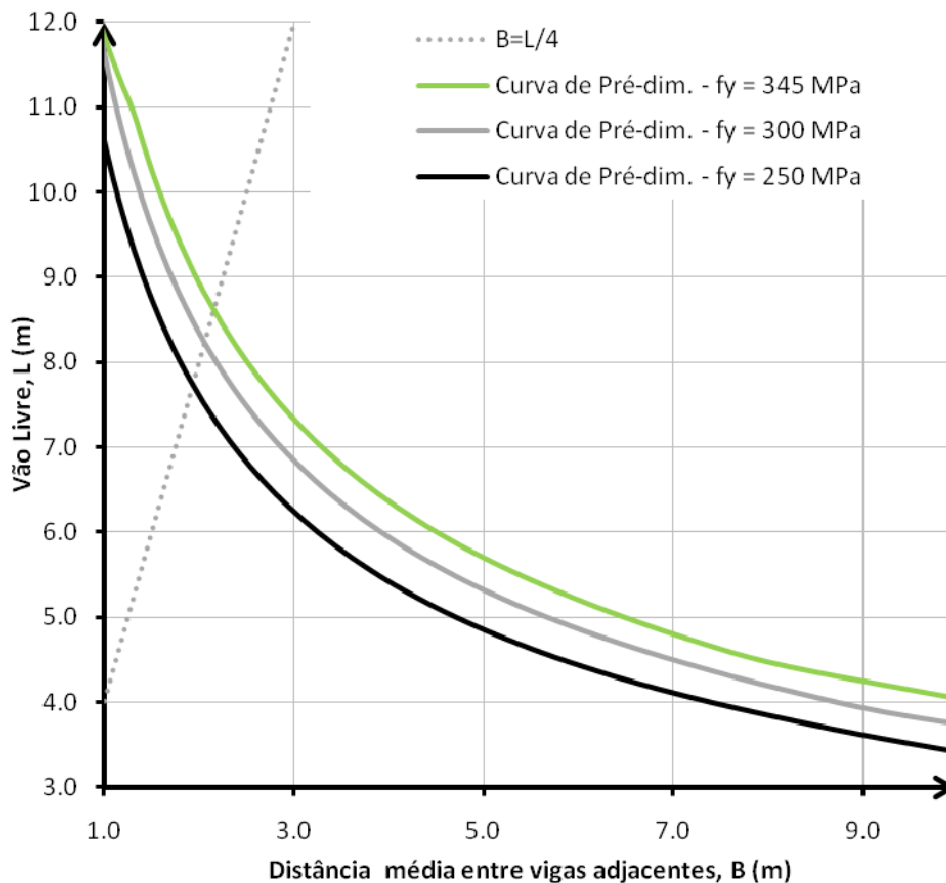


Figura 70 – Curvas de pré-dimensionamento da viga mista formada por diferentes tipos de aço, para construção não-escorada e interação completa.

Analisando os gráficos da Figura 69 observa-se que as curvas de deslocamento excessivo, só começam a fazer parte da curva de pré-dimensionamento da viga mista para o aço com $f_y = 345$ MPa. Ao aumentar a resistência ao escoamento do aço do perfil, f_y , aumenta-se o momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , da viga mista e as curvas para o estado-limite último do perfil da viga mista sobem podendo vencer maiores vãos, como pode ser visto na Figura 70. Para vigas de aço com $f_y = 250$ MPa, quem controla a curva de pré-dimensionamento da viga mista é a curva de estado-limite último do perfil de aço isolado.

Com o aumento da resistência ao escoamento dos aços, obtém-se curvas de resistência para o estado-limite último mais elevadas, o que leva a um vão livre, L , maior para uma mesma distância entre vigas adjacentes, B . Como o aumento do valor de f_y não implica em um aumento do Módulo de Elasticidade do aço, E , deve-se ficar cada vez mais atento com os deslocamentos excessivos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5

Neste Capítulo apresentam-se conclusões sobre o estudo realizado, envolvendo aspectos relativos à geração e abrangência dos ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas e aos estudos sobre o comportamento estrutural desses elementos. Apresentam-se também sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

5.1.1 Ábacos de pré-dimensionamento

O presente trabalho de pesquisa foi planejado com o objetivo geral de apresentar o desenvolvimento de ábacos para o pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto e avaliar alguns aspectos do comportamento estrutural desses elementos.

Os ábacos de pré-dimensionamento desenvolvidos abrangem os casos de vigas secundárias e principais de sistemas de piso, considerando-se construção escorada e não-escorada e interação completa e parcial.

Os ábacos de pré-dimensionamento desenvolvidos neste trabalho requerem do usuário uma quantidade mínima de informações técnicas, permitindo que, Engenheiros e Arquitetos os utilizem numa etapa preliminar de projeto. Para uso desses ábacos deve-se definir inicialmente a tipologia construtiva e os parâmetros de dimensionamento, para, em seguida, identificar o perfil que atende a uma determinada condição de projeto, selecionando simplesmente a distância entre vigas adjacentes (B) e o vão livre da viga mista (L). Em síntese, os ábacos desenvolvidos permitem realizar o pré-dimensionamento de vigas mistas de forma expedita, com muita proximidade com o dimensionamento final do elemento.

Os ábacos de pré-dimensionamento permitem identificar um conjunto de perfis que atendem aos parâmetros do sistema estrutural e aos parâmetros de dimensionamento. Em função disto, pode-se escolher um perfil em função da altura, do peso, da viabilidade econômica ou de outro critério de projeto definido pelo usuário. Isso pode ser considerado um avanço com relação ao tradicional pré-dimensionamento em função de uma fração do vão livre.

Pode-se afirmar que o Mathcad[®] atendeu plenamente às necessidades que se apresentaram ao longo do desenvolvimento dos ábacos, proporcionando grande velocidade e confiabilidade, sem prejuízos em relação a uma tradicional linguagem de programação.

Tudo isso permite afirmar que o objetivo de gerar os ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas foi alcançado satisfatoriamente.

Apesar da disponibilidade de alguns trabalhos sobre pré-dimensionamento de vigas mistas no contexto internacional, os ábacos apresentados neste trabalho consideram as características tipicamente empregadas na construção metálica brasileira. Além disso, pelo fato de contar com rotinas de cálculo abertas no ambiente Mathcad[®], existe uma ampla possibilidade de agregar outras séries de perfis e tipos de lajes, assim como alterar os critérios de resistência última e de comportamento em serviço.

Os ábacos de pré-dimensionamento apresentados neste trabalho podem ser aperfeiçoados de maneira a fornecer outras informações de projeto como o número de conectores e a taxa de armadura transversal. No entanto, deve-se ter em mente que esses ábacos não têm a finalidade de substituir a elaboração de um projeto estrutural tradicional, no qual se consideram muitos outros aspectos relacionados ao comportamento de uma estrutura como um todo.

5.1.2 Avaliação do comportamento de vigas mistas

Os estudos sobre o comportamento de vigas mistas com base nos ábacos de pré-dimensionamento podem ser de grande importância para se adquirir uma visão geral sobre a influência da variação de alguns parâmetros no dimensionamento de vigas mistas. Normalmente um engenheiro de projetos só adquire essa percepção após a participação em diversos trabalhos do gênero.

Os ábacos funcionam como uma espécie de "fotografia" do comportamento do elemento estrutural. Por esse motivo, podem se constituir em uma importante ferramenta de apoio ao ensino e ao projeto.

A partir dos estudos sobre a influência da variação de alguns parâmetros no comportamento de vigas mistas chegou-se a algumas conclusões importantes:

- os parâmetros relacionados à laje (tipo de laje, espessura e f_{ck} do concreto) exercem pouca influência no comportamento;

- os parâmetros relacionados ao perfil de aço (altura, peso e resistência ao escoamento do aço) exercem uma influência significativa no comportamento;
- a tipologia construtiva só exerce uma influencia significativa no comportamento quando se compara a construção escorada com a construção não-escorada, sem contraflechas;
- os critérios de deslocamento máximo admissível influenciam significativamente o comportamento das vigas mistas;
- o grau de interação exerce uma influência significativa no comportamento das vigas mistas, como exceção do caso de construção não-escorada, sem contraflechas.

Uma das principais questões levantadas a partir do desenvolvimento deste trabalho diz respeito aos critérios de deslocamento máximo admissível para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos.

A partir dos estudos desenvolvidos observa-se a grande variação do comportamento das vigas mistas simplesmente em função do critério de deslocamento máximo admissível adotado. Normalmente, os critérios que consideram uma combinação rara de serviço ou valores absolutos para o deslocamento máximo admissível são os mais restritivos, tanto para a construção escorada, quanto para a não-escorada.

A aplicação de contraflecha pode implicar em uma importante economia de peso de aço para o caso de construção não-escorada. Essa consideração pode ser tão significativa que a decisão de adotar contraflecha desde o início do projeto pode viabilizar ou não a construção de um sistema de piso misto de aço e concreto.

Em função da revisão de literatura realizada, ficou evidenciado que, ao longo do tempo, as normas internacionais apresentaram diferentes critérios para a verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos. No entanto, observa-se também que nas versões mais recentes de algumas normas (ANSI/AISC 360-05 (AISC, 2005) e Eurocódigo 3 (EN-1993-1-1, 2005)) não mais se apresentam critérios explícitos para este fim.

Observa-se que a tendência das normas internacionais mais atuais de estruturas de aço e mistas no contexto internacional é estabelecer critérios que devem ser obedecidos para os estados limites últimos e permitir que o responsável pelo projeto acorde com o cliente sobre os limites aplicáveis aos estados limites de serviço.

Apesar de ser uma tendência e de se reconhecer a dificuldade de se estabelecer critérios para a verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos, a ausência de critérios objetivos nas normas é prejudicial, sobretudo aos engenheiros de projeto, que passam a não contar com um critério mínimo para garantia do bom desempenho estrutural.

Todo esse conjunto de comentários permite afirmar que o objetivo de avaliar alguns aspectos do comportamento estrutural de vigas mistas com base nos ábacos de pré-dimensionamento também foi alcançado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros sugere-se:

- implementar curvas para o estado-limite de serviço de vibrações excessivas;
- avaliar estratégias para consideração do efeito de fluência no cálculo dos deslocamentos máximos de vigas mistas e na implementação de curvas para o estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos;
- implementar curvas de pré-dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio;
- realizar estudos mais aprofundados sobre critérios de deslocamento máximo admissível para vigas mista de forma que sejam considerados os diversos casos de projeto de sistemas de piso misto de aço e concreto, com vistas a subsidiar prescrições normativas no Brasil;
- desenvolver ábacos de pré-dimensionamento para vigas mistas semi-continuas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, G. M. S.; *Sobre o projeto de edifícios em Estrutura mista aço-concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2000.

AISC; ANSI/AISC 360-05 - Specification for structural steel buildings: American Institute of Steel Construction, Chicago, 2005.

AISC; LFRD - *American Institute of Steel Construction, Inc. Load and Resistance Factor Design Manual of Steel Construction*. 1st Ed., Chicago, 1986.

ABNT, *NBR-8800:2008 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O.; *Edifícios de Múltiplos Andares em Aço*. São Paulo: Pini, 2004.

CHAVES, I. A. *Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2009

CHIEN, E. Y. L. e RITCHIE, J. K. *Design and Construction of Composite Floor Systems*. Canadian Institute of Steel Construction. 1984.

CIMADEVILA, F. J. E., GUTIÉRREZ E. M. e RODRÍGUEZ, J. A. V. *Vigas Alveoladas*. BELLISCO, Ediciones Técnicas y Científicas. 2000.

ECCS TC 11; *Design Tables and Graphs for Composite Beams to Eurocode 4*. ECCS publication no. 113, Brussels. 2001.

ENV 1993-1-1; Eurocode 3. *Design of Steel Structures. Parte 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization. 1992.

ENV 1994-1-1; Eurocode 4. *Design of Composite Steel and Concrete Structures. Parte 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, 1992.

FISHER, M. W. J. e GRIFFIS, L. G. *Steel Design Guide 3 - Serviceability Design Consideration for Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Inc. 2003.

GRIFFIS, L. G. *The 1994 T. R. High Lecture: Composite Frame Construction*. National Steel Construction Conference, AISC, New York. 1994.

JOHNSON, R. P.; WILLMINGTON, R. T.; *Vertical shear in continuous composite beams*. *Proc. Instn Civil Engrs*, 53, 189-205, setp., 1972.

JOHNSON, R. P. *Composite structures of steel and concrete*. Blackwell Scientific Publications. 1994.

LAMAS, A. R. G. e BENTO, J. A. R. S. P. *“Vigas Mistas – Tabelas para dimensionamento de Seções”*. Universidade Técnica de Lisboa, 1982.

LAWSON R. M., CHUNG K. F.; *Composite Beam Design to Eurocode 4*. Publication 121, The Steel Construction Institute. 137p. 1994.

MALITE, M. *Vigas Mistas aço-concreto: ênfase em edifícios*. Publicação 021/93. Universidade de São Paulo, 1993.

DE NARDIN, S; SOUZA, A.S.C. ; EL DEBS, A.L.H.C. *Estruturas mistas aço-concreto: origem desenvolvimento e perspectivas*. In: 47 Congresso Brasileiro do Concreto, Olinda. 2005.

PAES, J. L. R., MIRAMBELL E. *Una Evaluación de los Efectos de La Interaccion Imperfecta en Vigas Mixtas*. CILAMCE. 2004.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; da Mata, L. A. C.; *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. Editora O Lutador, Belo Horizonte, Brasil, 2001.

SILVA, A. R. *Análise Numérica de Vigas Mistas com Interação Parcial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2006.

VERÍSSIMO, G. S., RIBEIRO, J. C. L., PAES, J. L. R.; *Software para cálculo de vigas mistas*. II CICOM-Congresso Internacional de da Construção Metálica. São Paulo. IBS. 2002.

VERÍSSIMO, G. S.; *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EE-UFGM, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

VINNAKOTA S., FOLEY C. M., VINNAKOTA M. R.; *Design of Partially or Fully Composite Beams, with Ribbed Metal Deck, Using LRFD Specifications*. American Institute of Steel Construction. 1988.

ÁBACOS

APÊNDICE - **A** 

Neste Apêndice apresentam-se os ábacos de pré-dimensionamento de vigas mistas de acordo com a metodologia descrita no capítulo 3 e com os parâmetros definidos no capítulo 4.

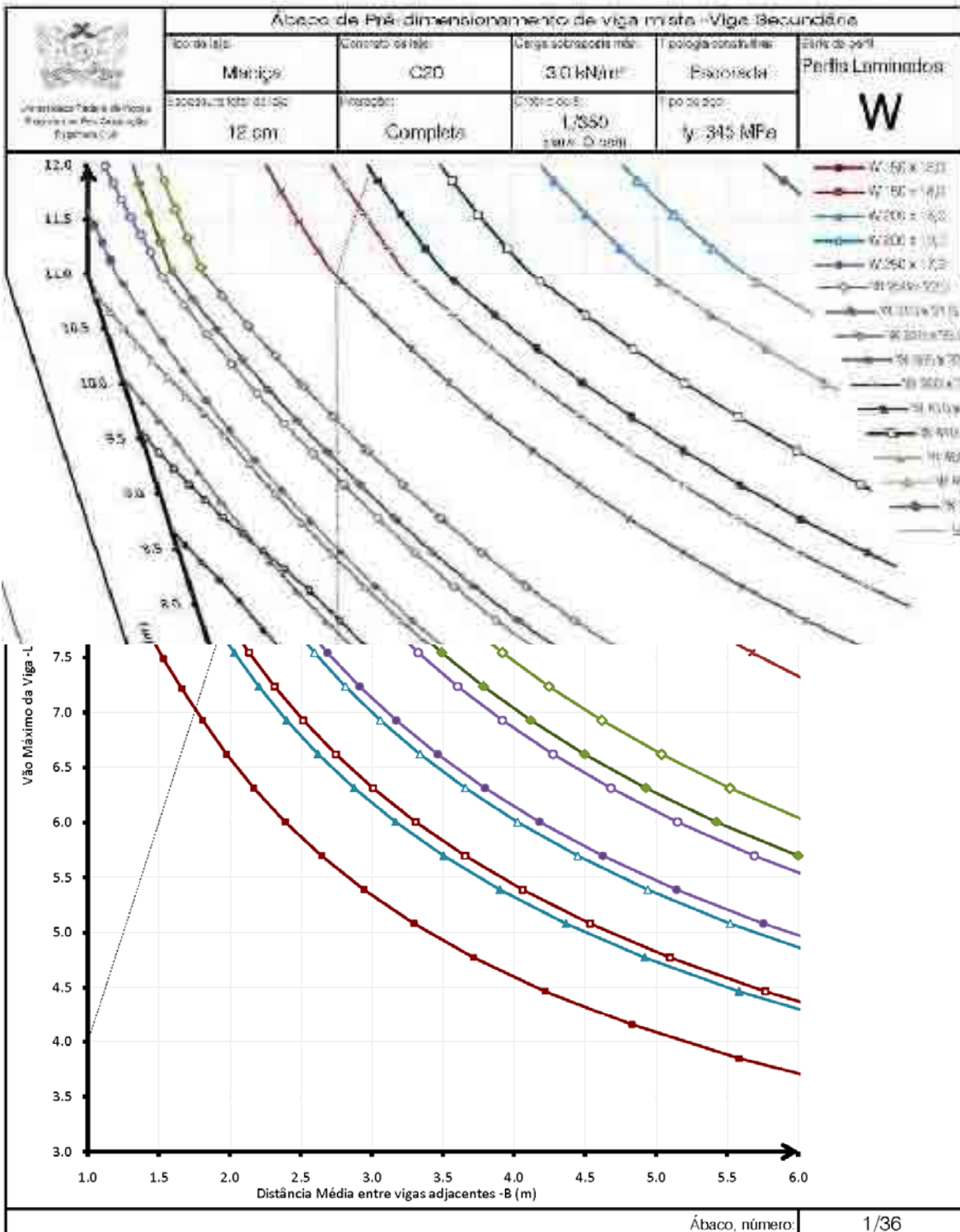
Na Tabela A.1 apresenta-se a numeração dos ábacos deste apêndice e os parâmetros considerados para cada caso.

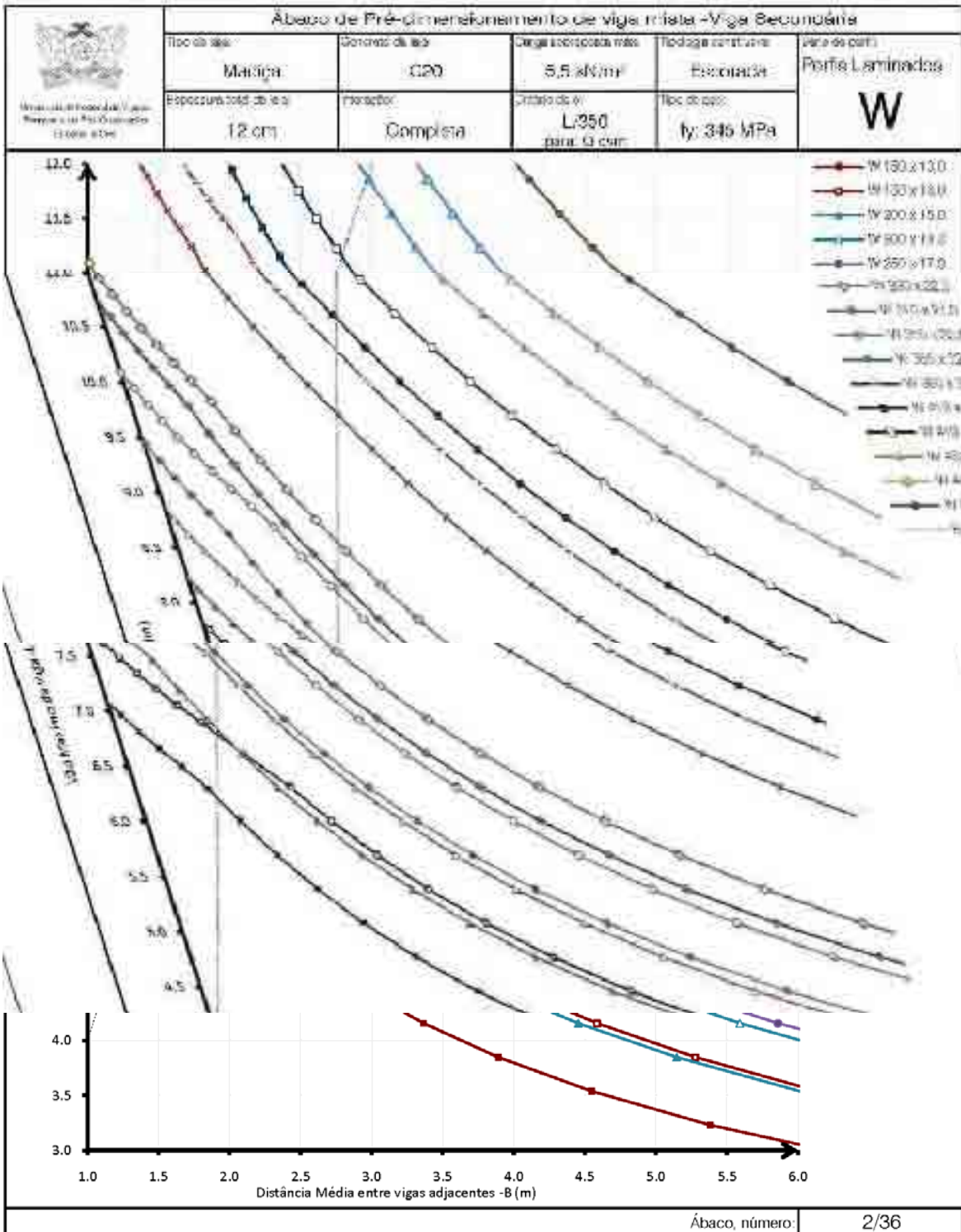
Tabela A.1 – Numeração dos ábacos de pré-dimensionamento do Apêndice A.

Lista de Ábacos												
Tipo	Número do Ábaco	Tipologia Construtiva	Série de Perfil	Tipo de Aço	Tipo de Laje	f_{ck} do Concreto	Altura da laje	Carga Sobr. máx.	δ_{vs}	Comb. p/ δ_{max}	Critério de δ_{max}	Grau de Interação
				(MPa)		(MPa)	mm	kN/m ²	kN/m ²		-	%
Viga Secundárias	1	Escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00	-	Q_{csm}	L/350	100%
	2							5,50				
	3							8,00				
	4				STDK-MF75	20	140	3,00				
	5							5,50				
	6							8,00				
	7	Não-escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00				
	8							5,50				
	9							8,00				
	10				STDK-MF75	20	140	3,00				
	11							5,50				
	12							8,00				
Viga Secundárias	13	Não-escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00	-	$G+Q_{csm}$	L/250	100%
	14							5,50				
	15							8,00				
	16				STDK-MF75	20	140	3,00				
	17							5,50				
	18							8,00				
Viga Principal - Caso 2	19	Escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00	0,30	Q_{csm}	L/350	100%
	20							4,00				
	21							5,00				
	22				STDK-MF75	20	140	3,00				
	23							4,00				
	24							5,00				
	25	Não-escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00				
	26							4,00				
	27							5,00				
	28				STDK-MF75	20	140	3,00				
	29							4,00				
	30							5,00				
Viga Principal - Caso 2	31	Não-escorada	Perfis Laminados (1º e 2º alma)	fy= 345	Maciça	20	120	3,00	0,30	$G+Q_{csm}$	L/250	100%
	32							4,00				
	33							5,00				
	34				STDK-MF75	20	140	3,00				
	35							4,00				
	36							5,00				

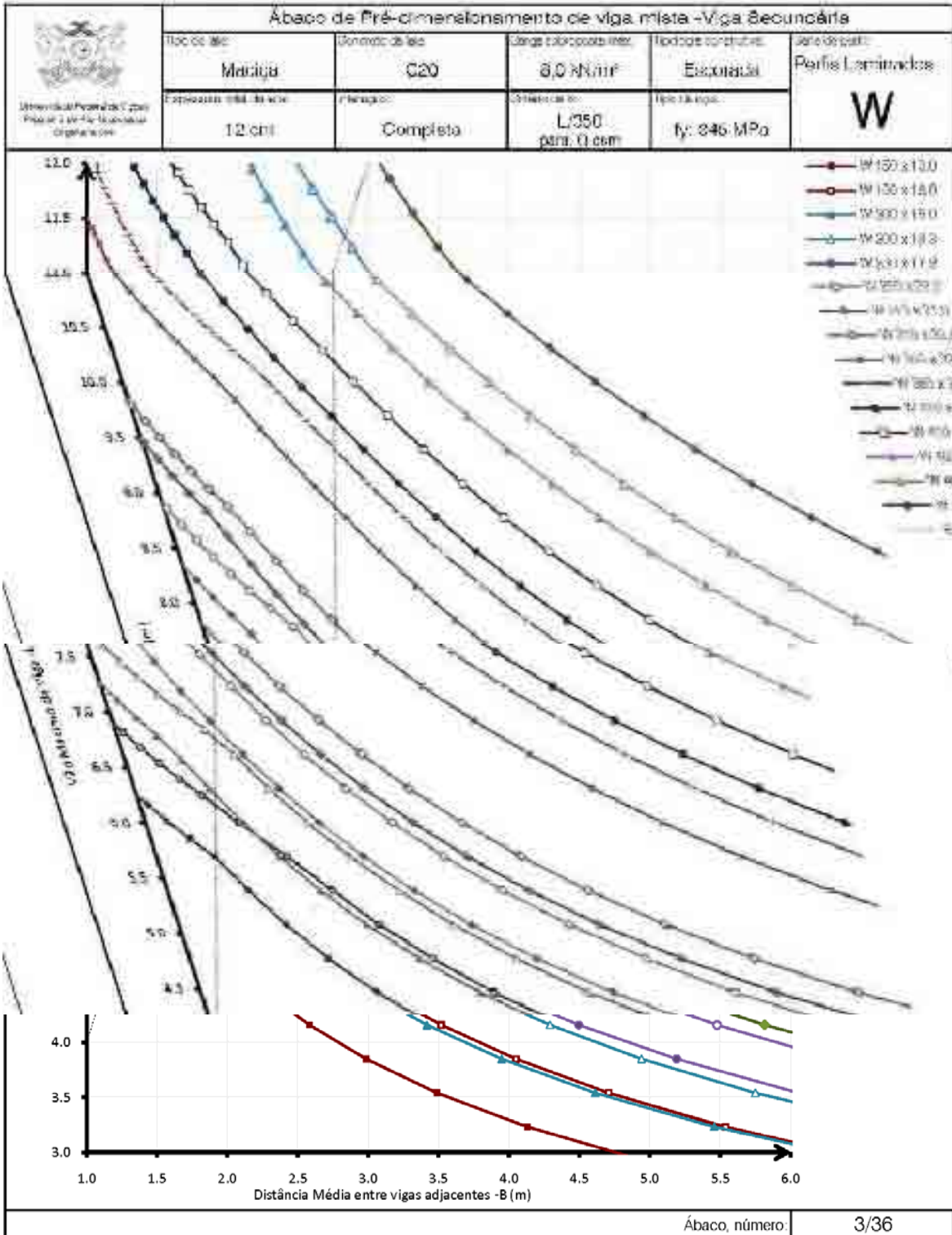
VIGAS SECUNDÁRIAS

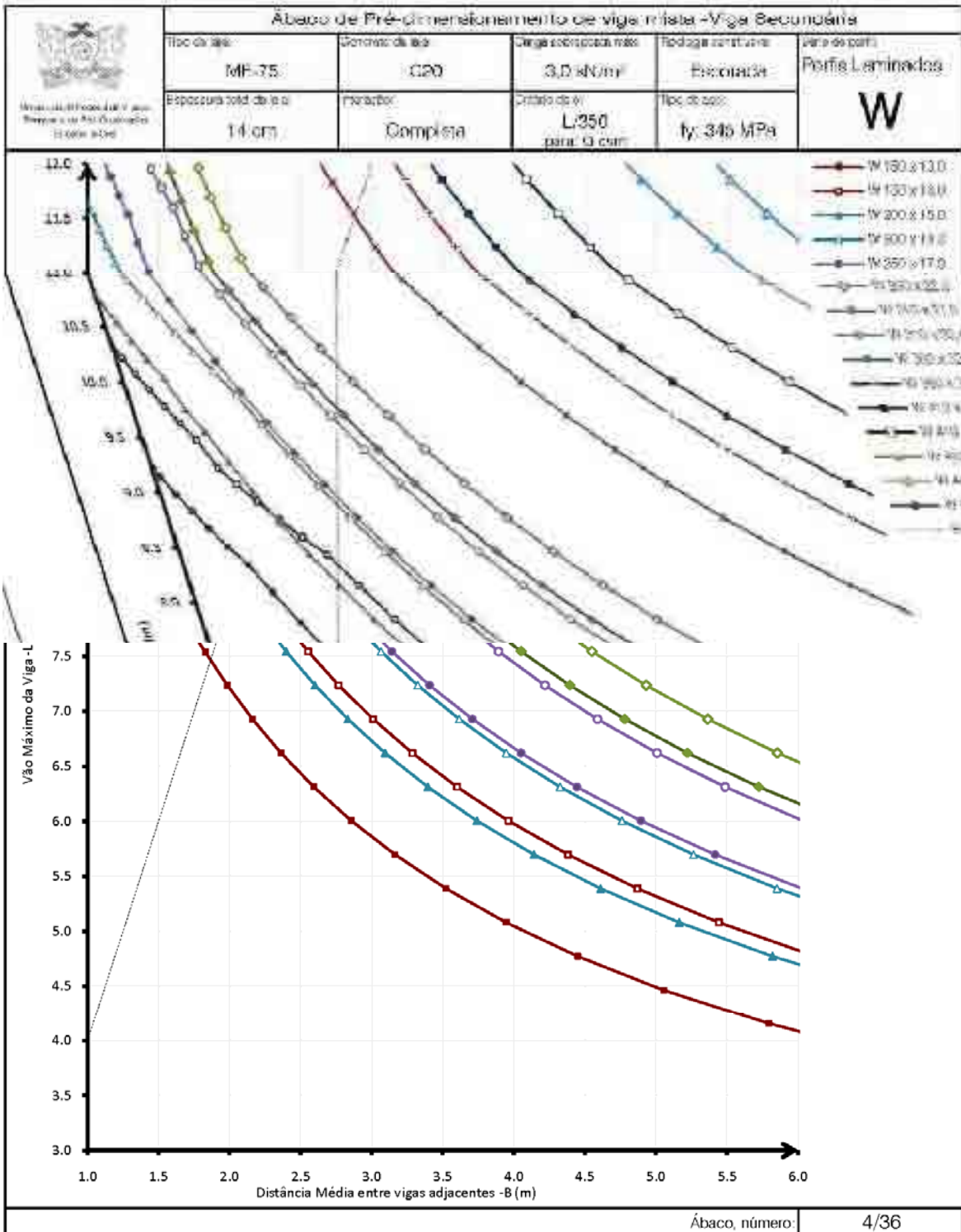
ÁBACOS: 01 AO 18

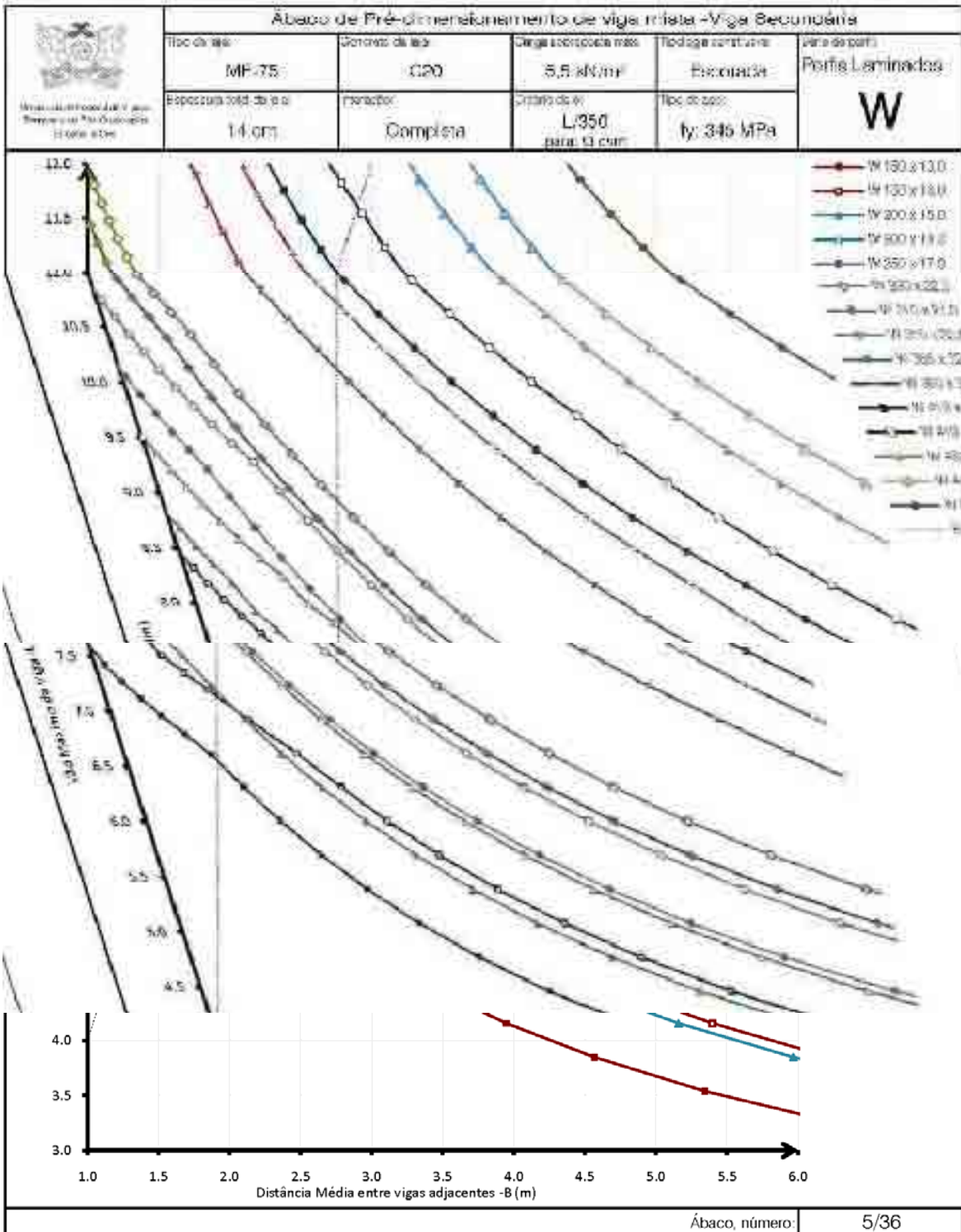


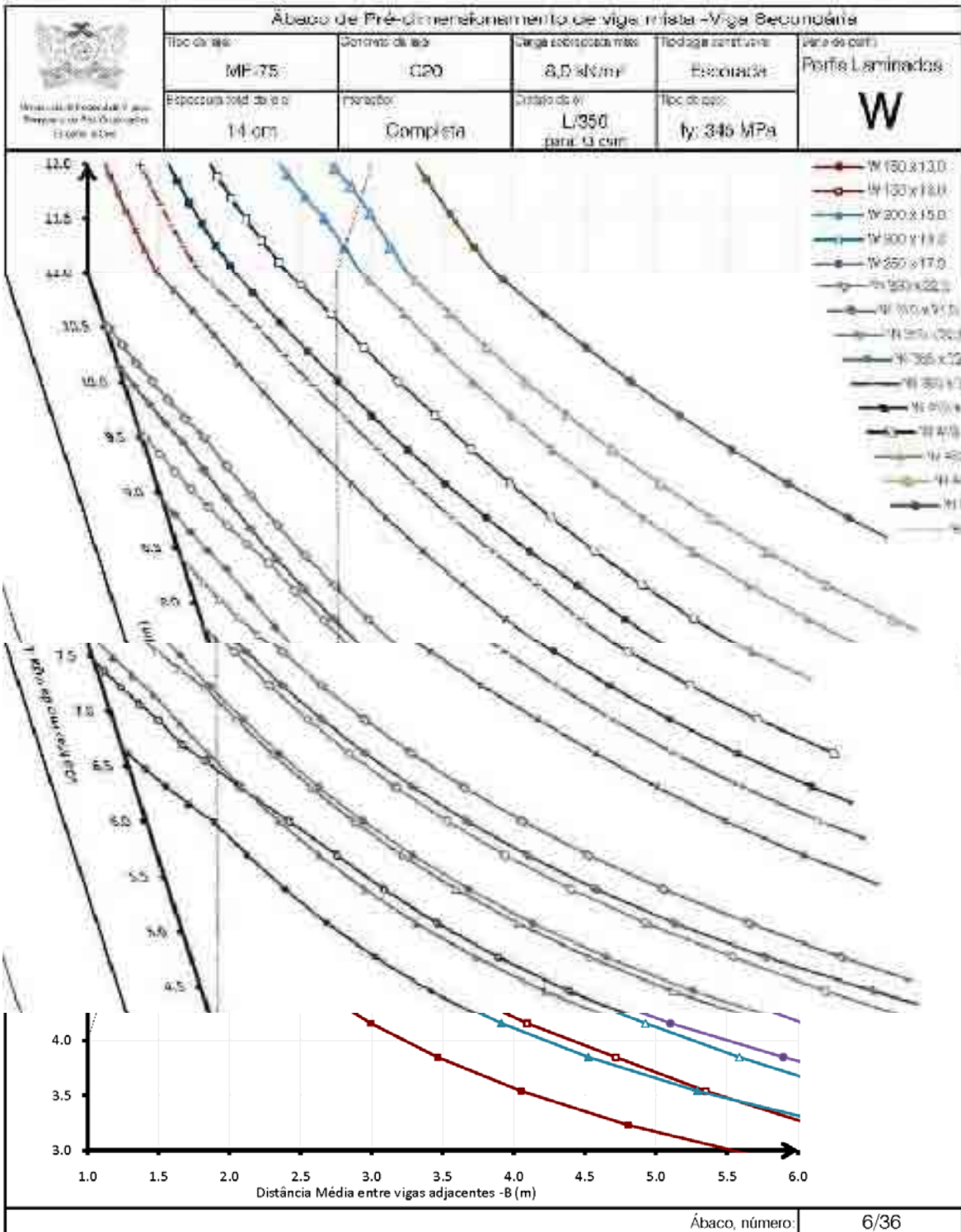


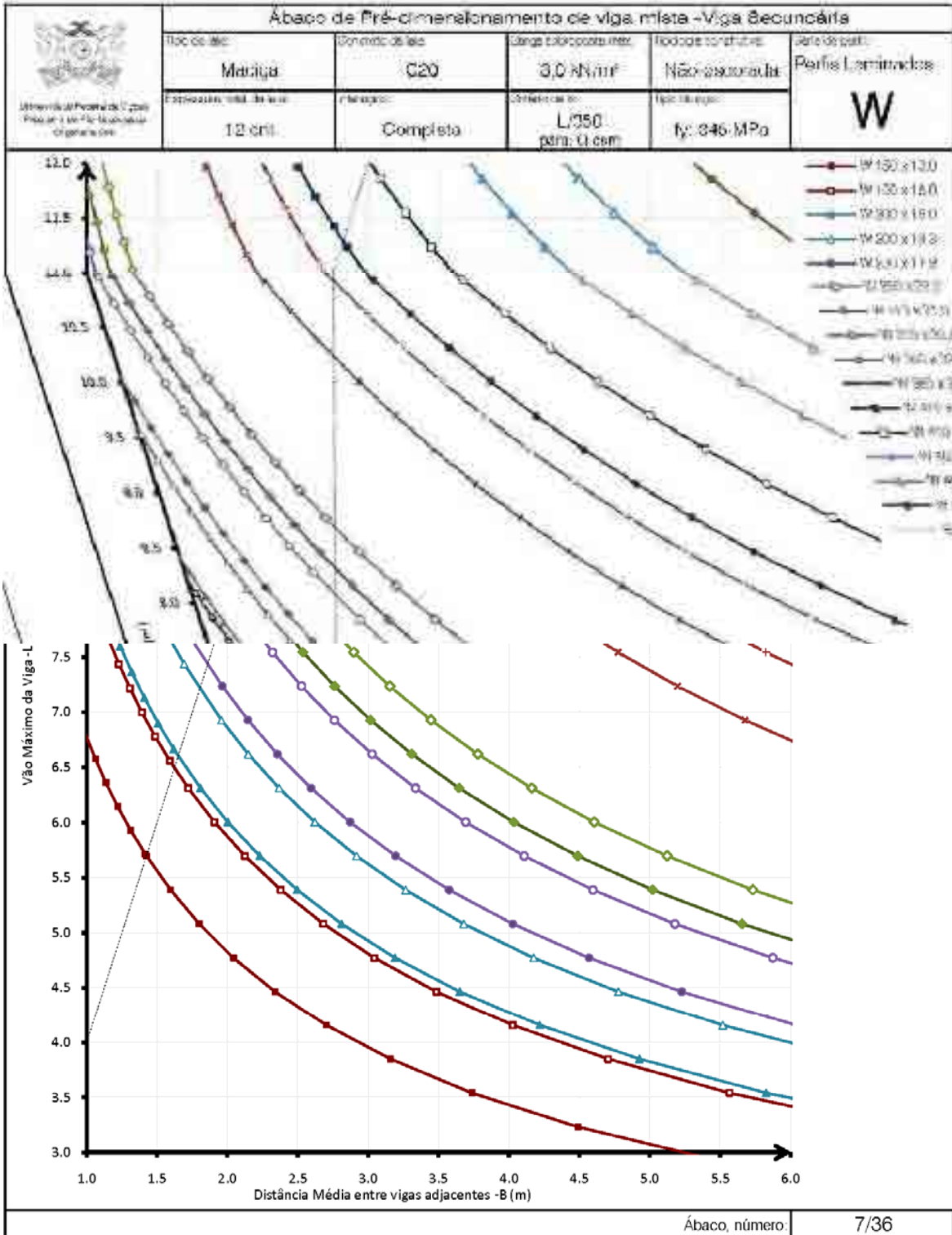
Ábaco, número: 2/36

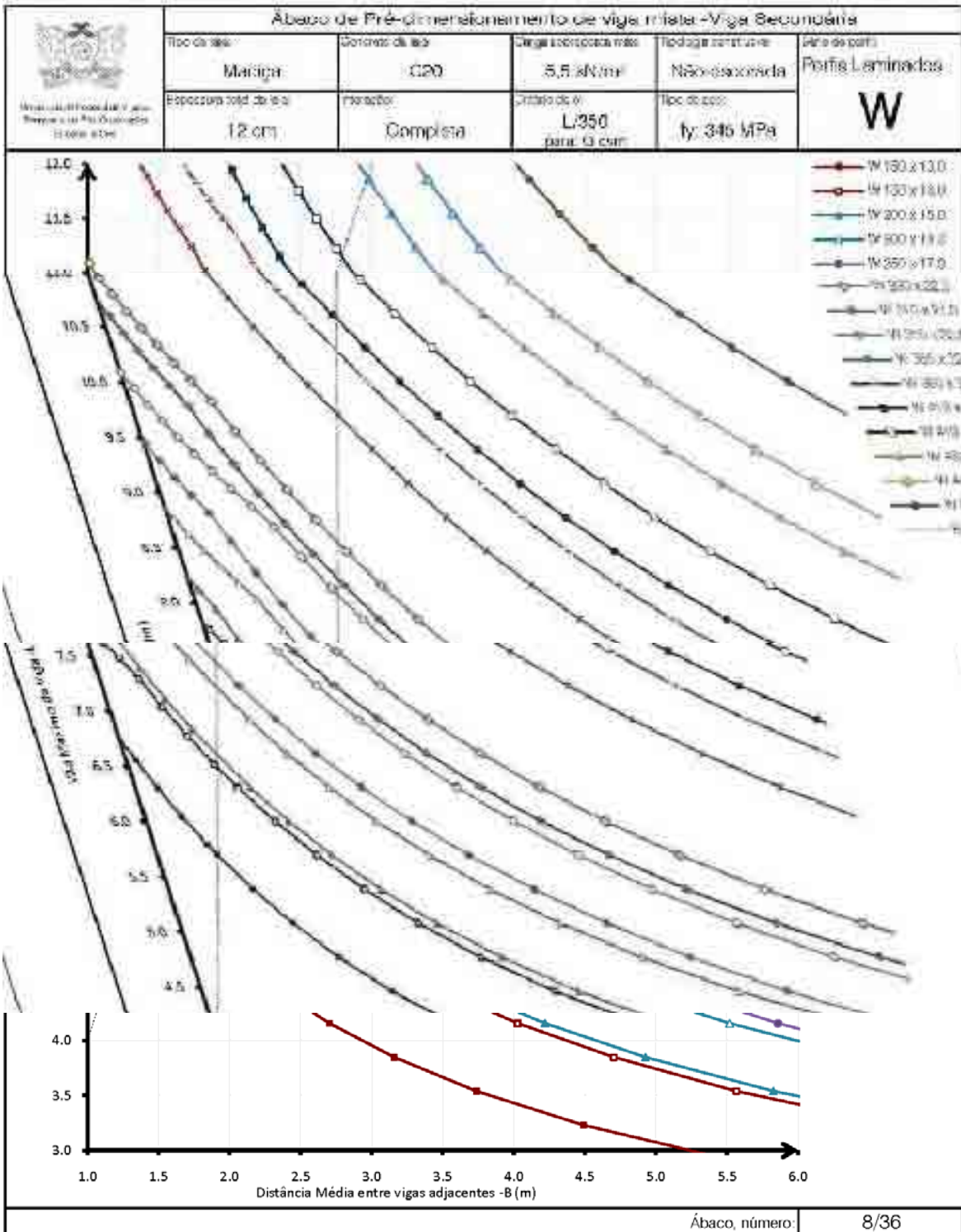


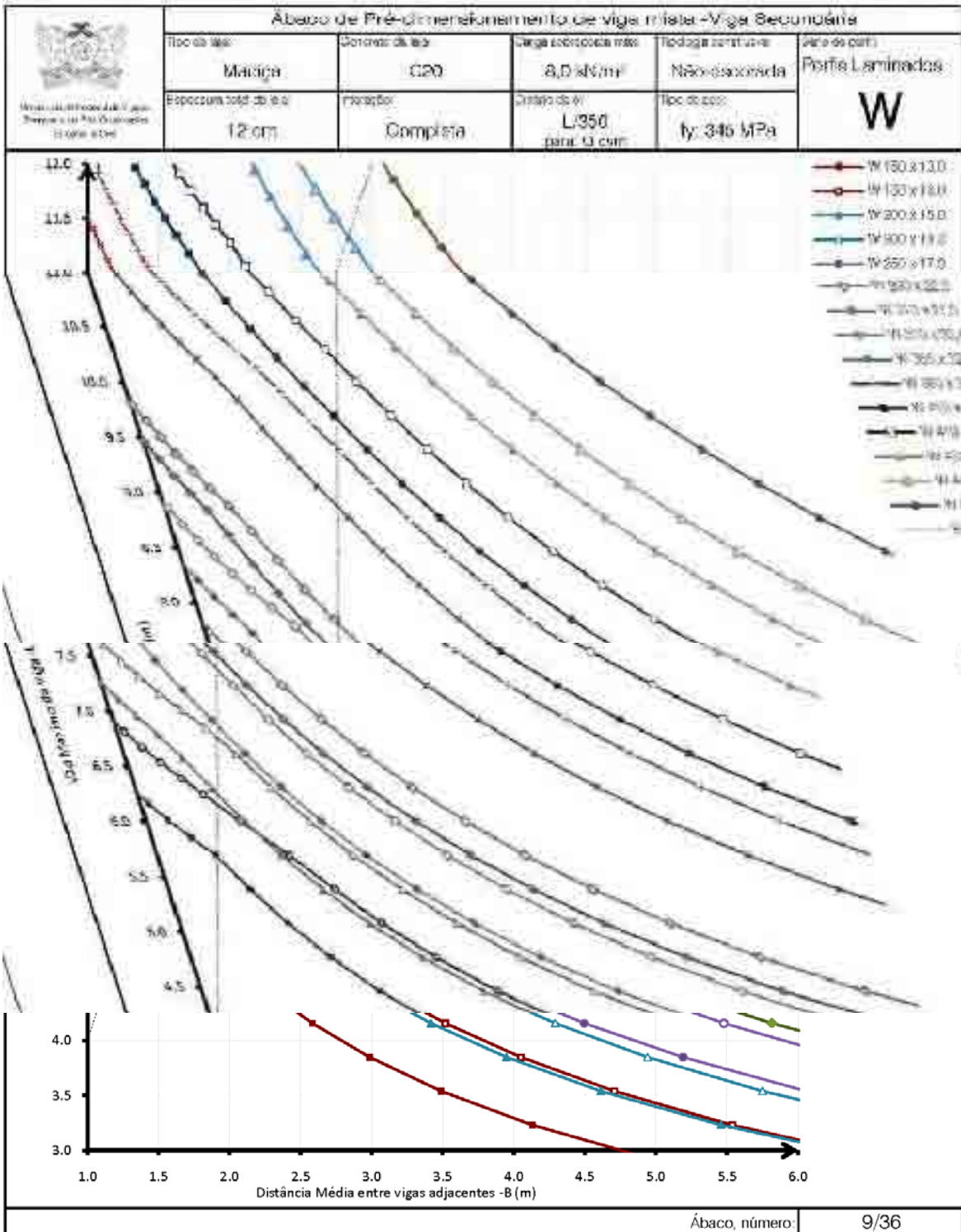




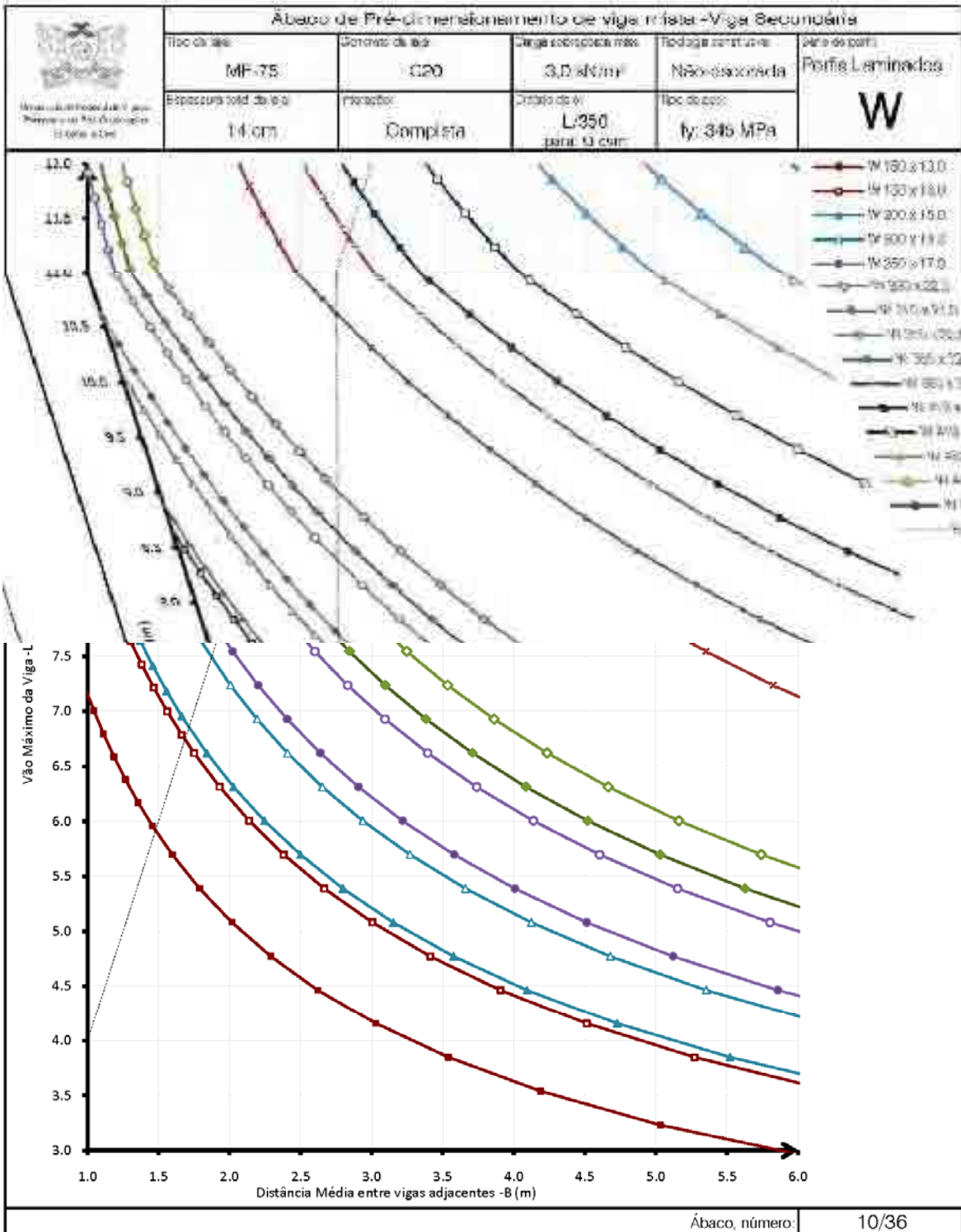


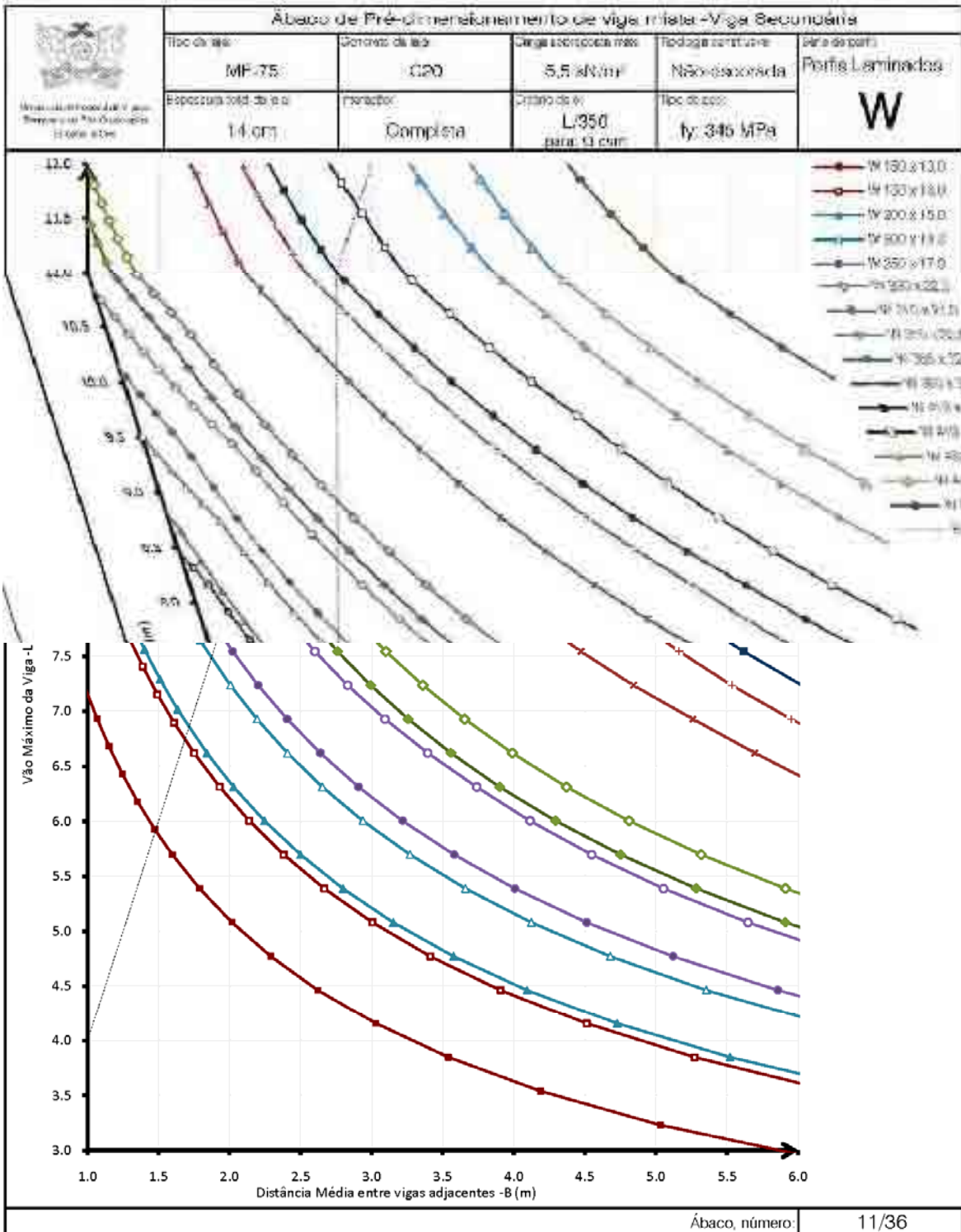


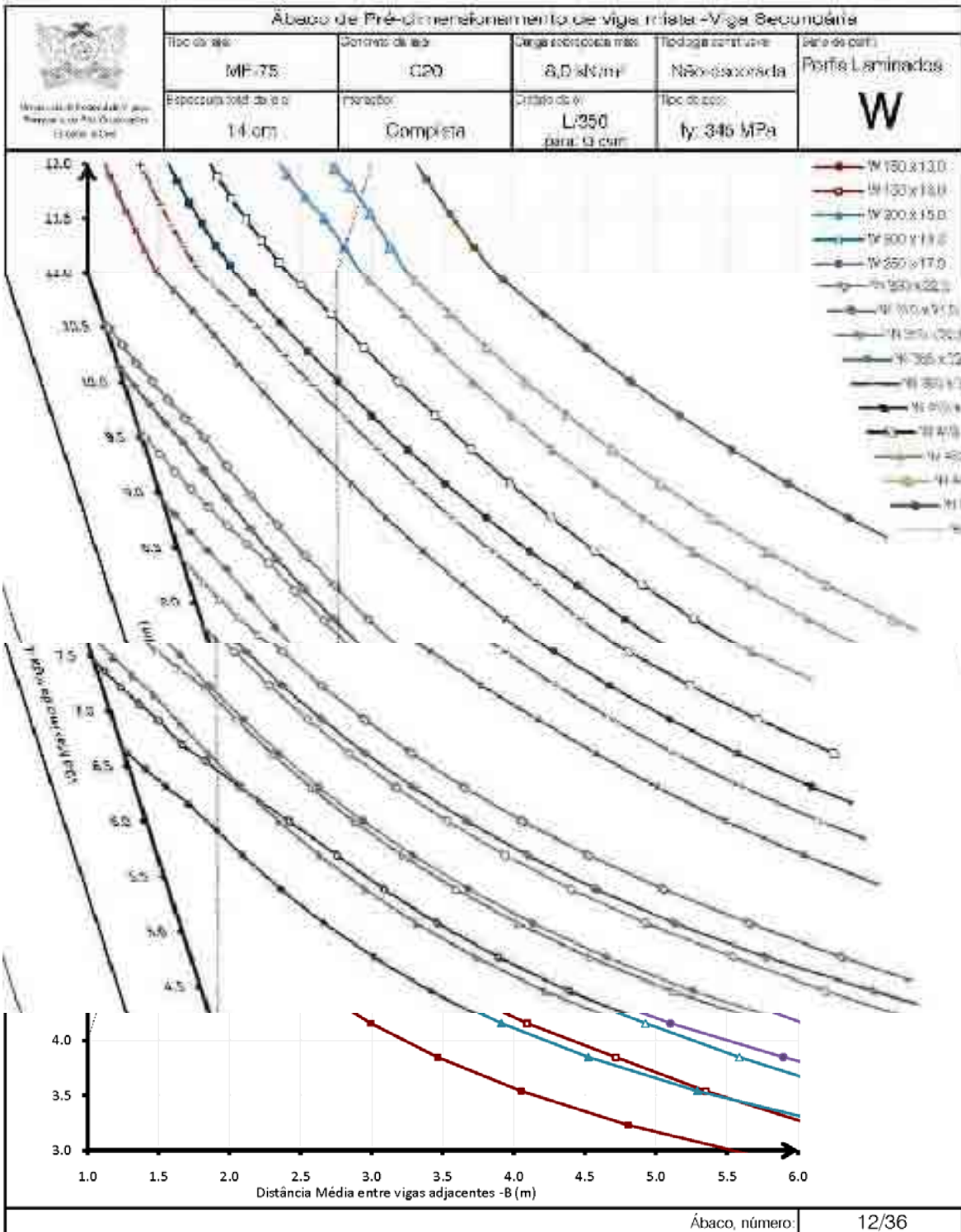




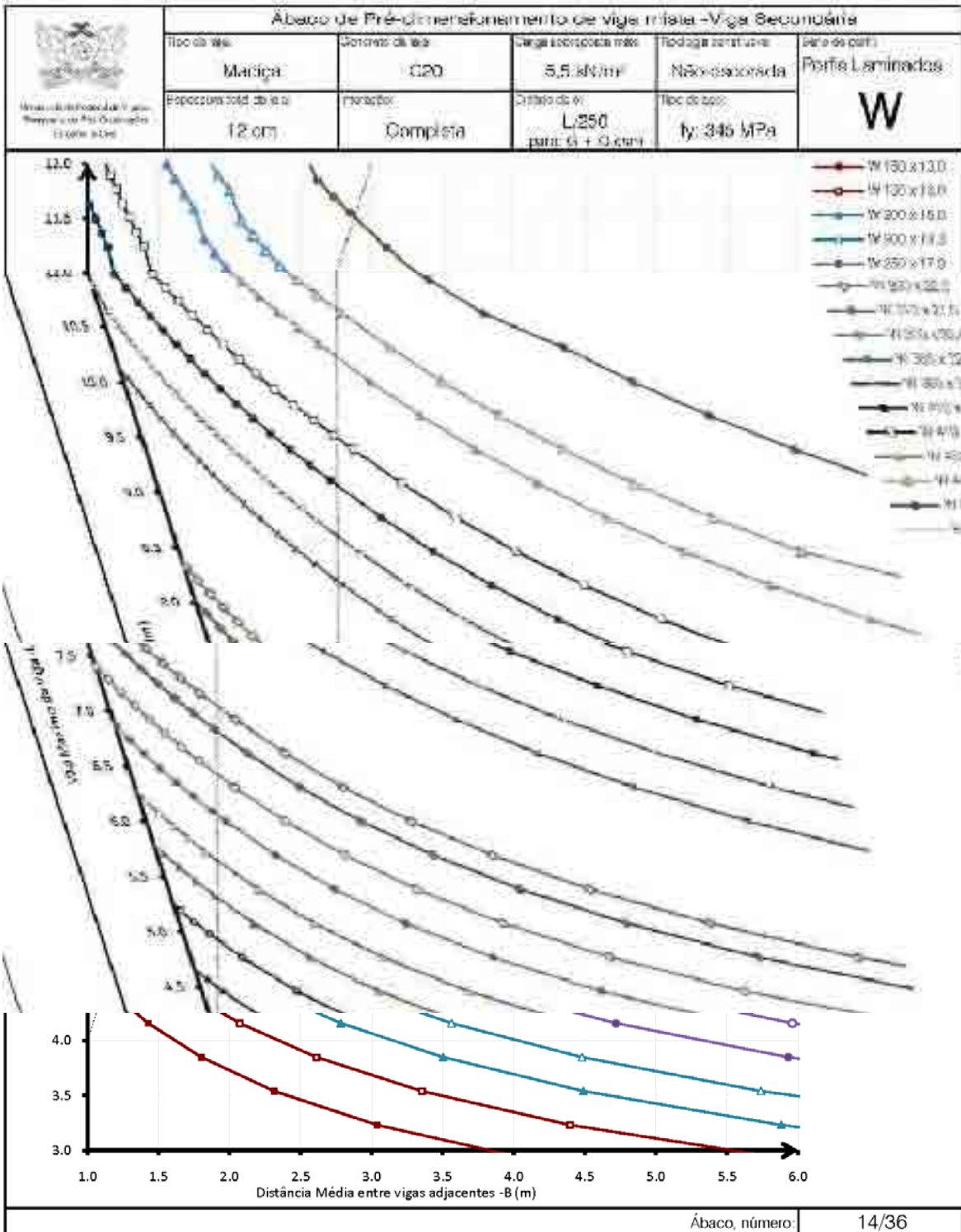
Ábaco, número: 9/36

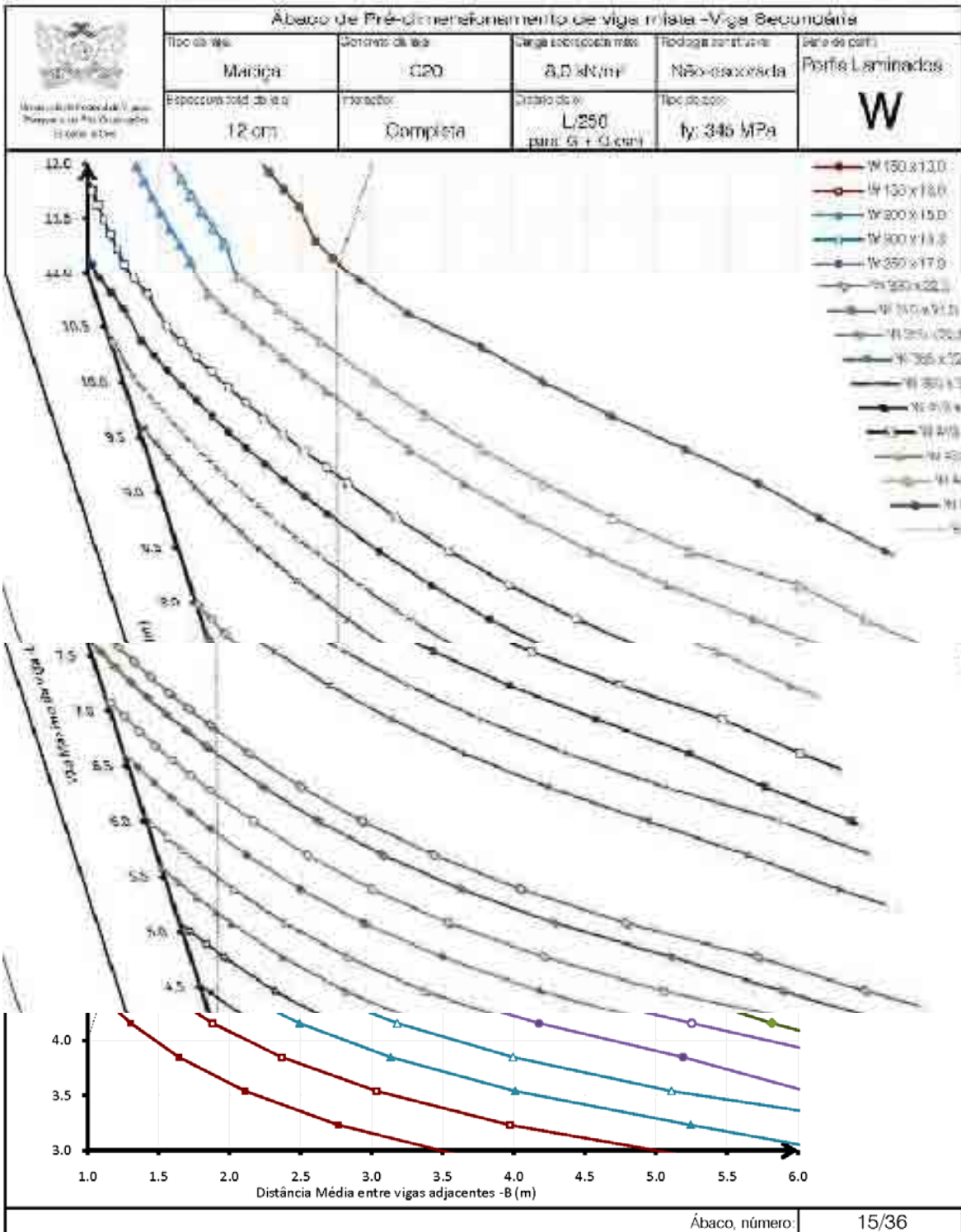


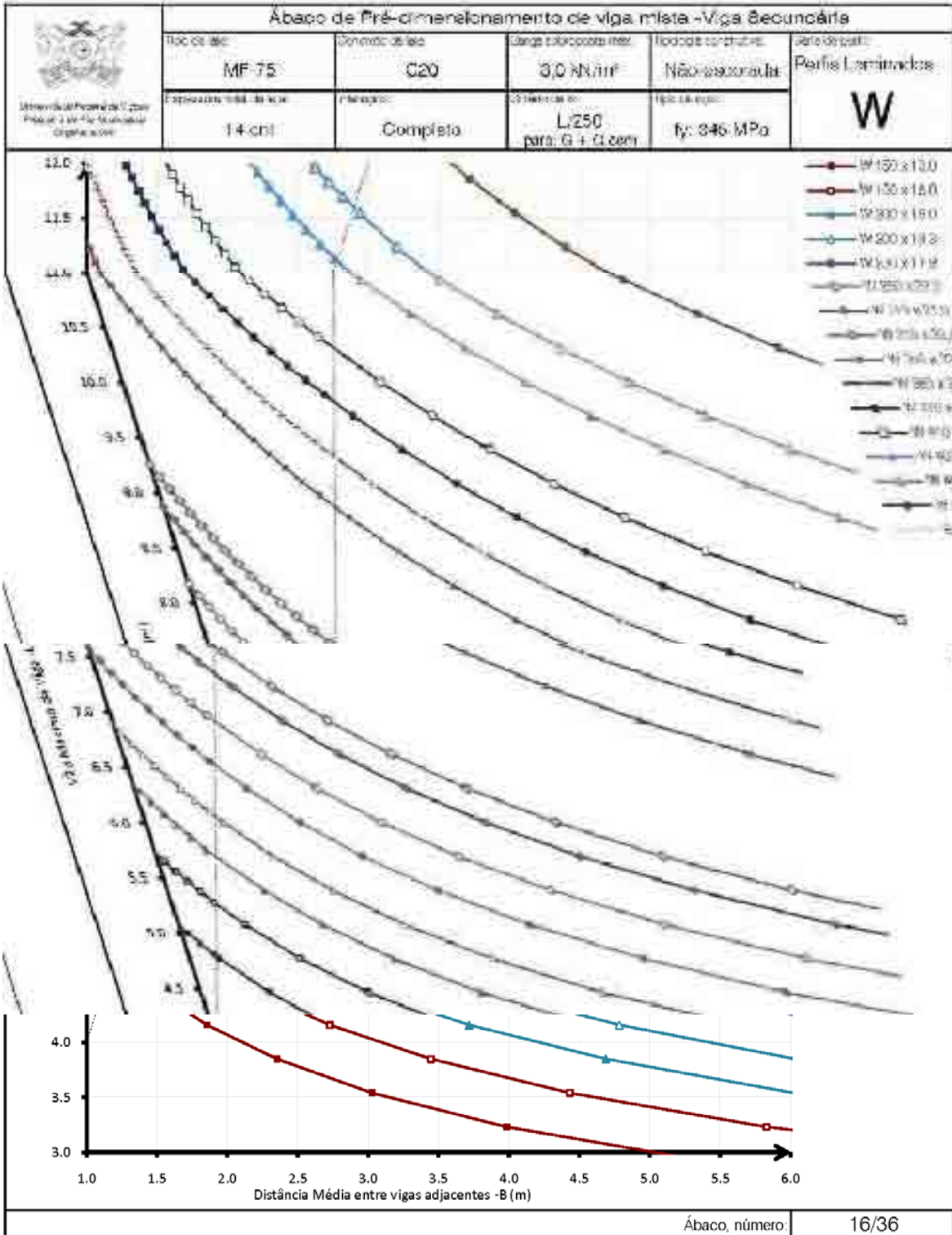


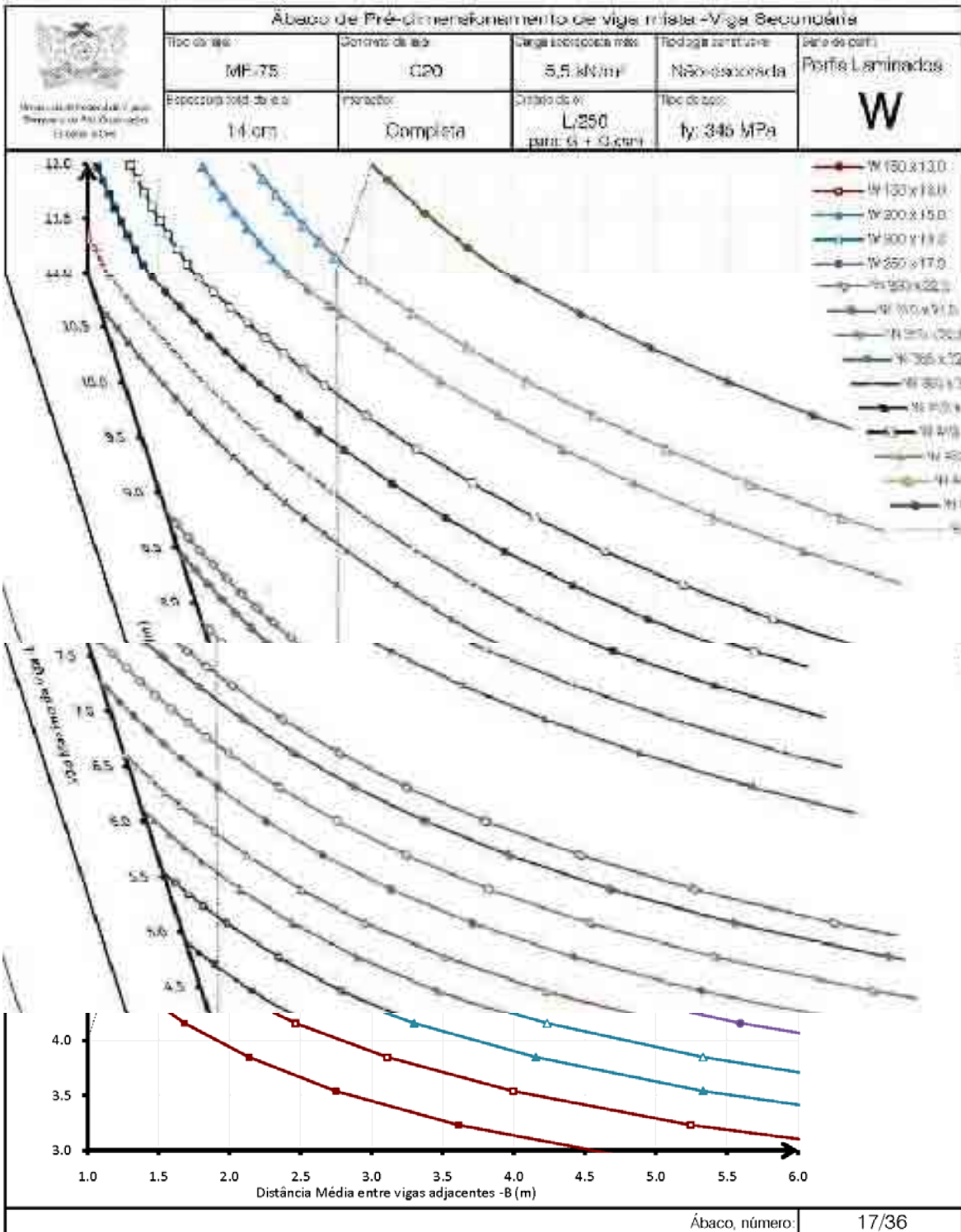


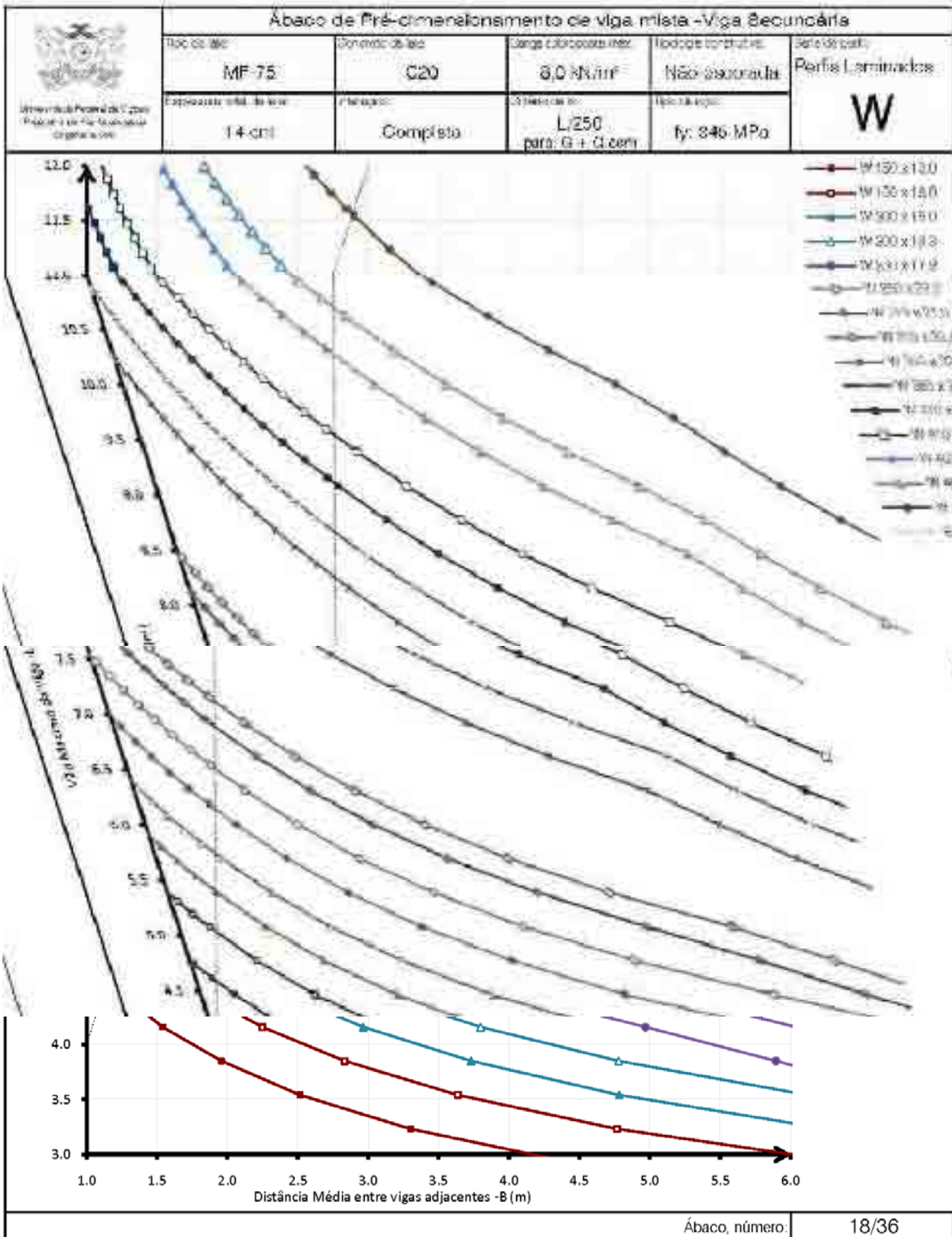
Ábaco, número: 12/36







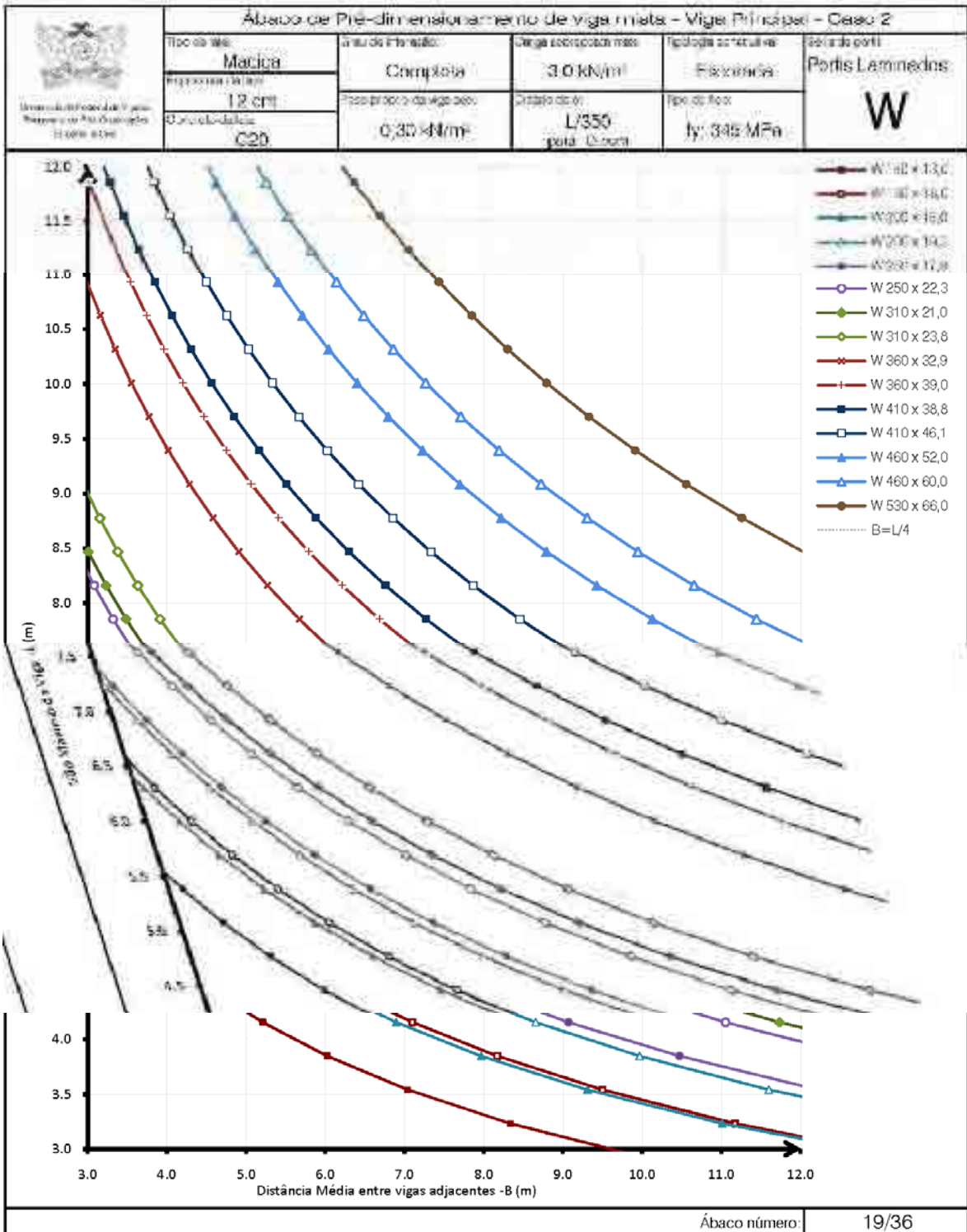


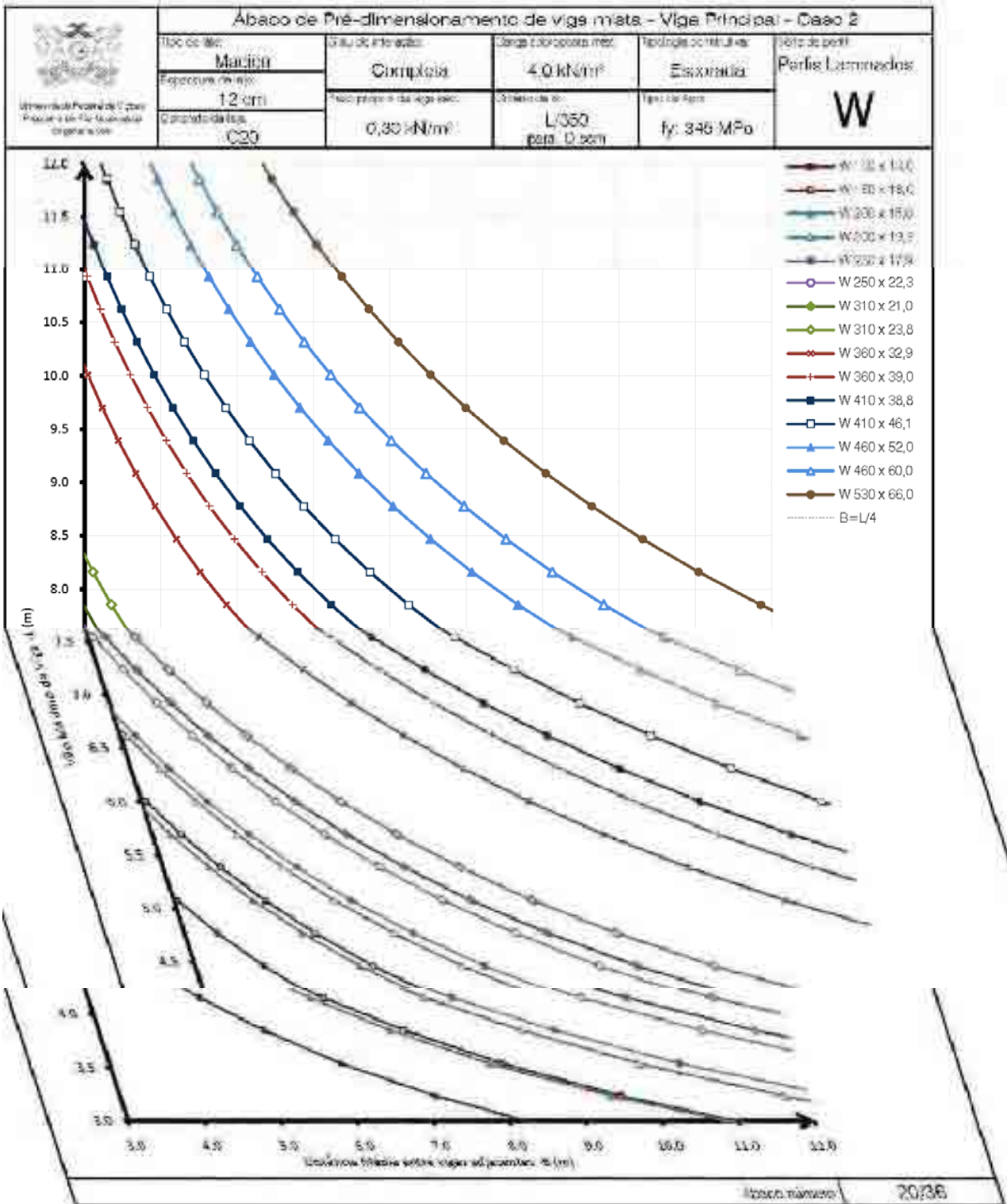


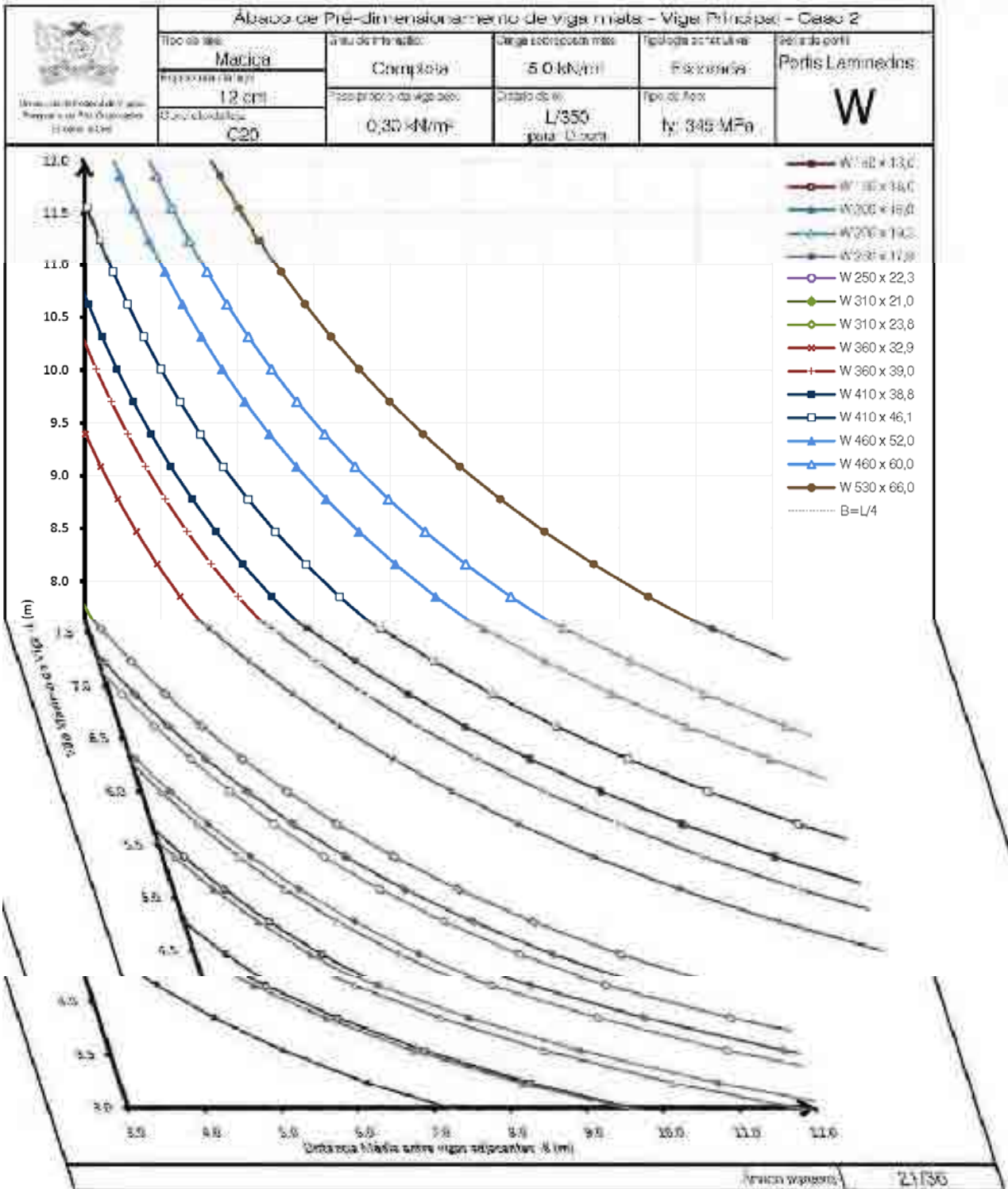
VIGAS PRINCIPAIS

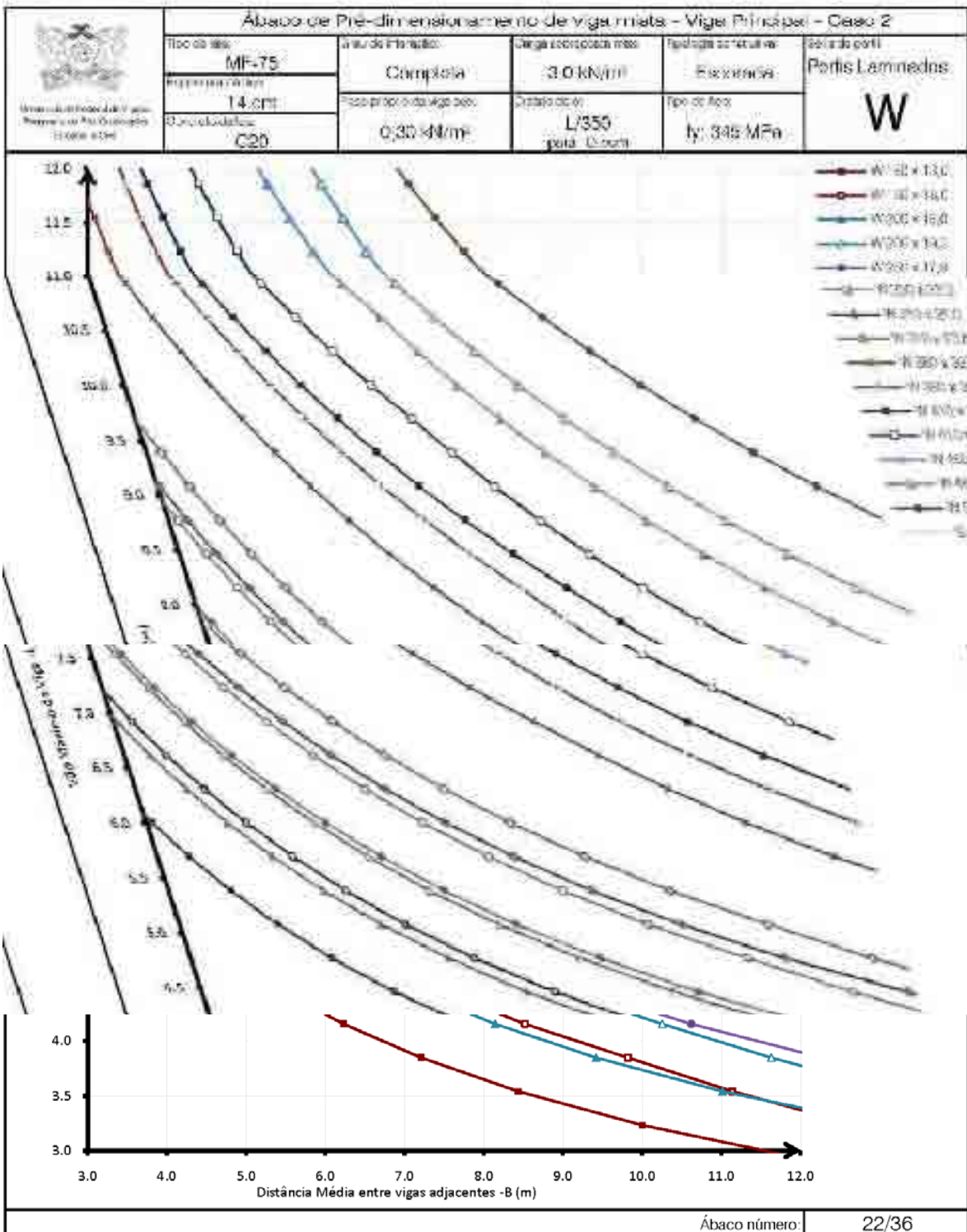


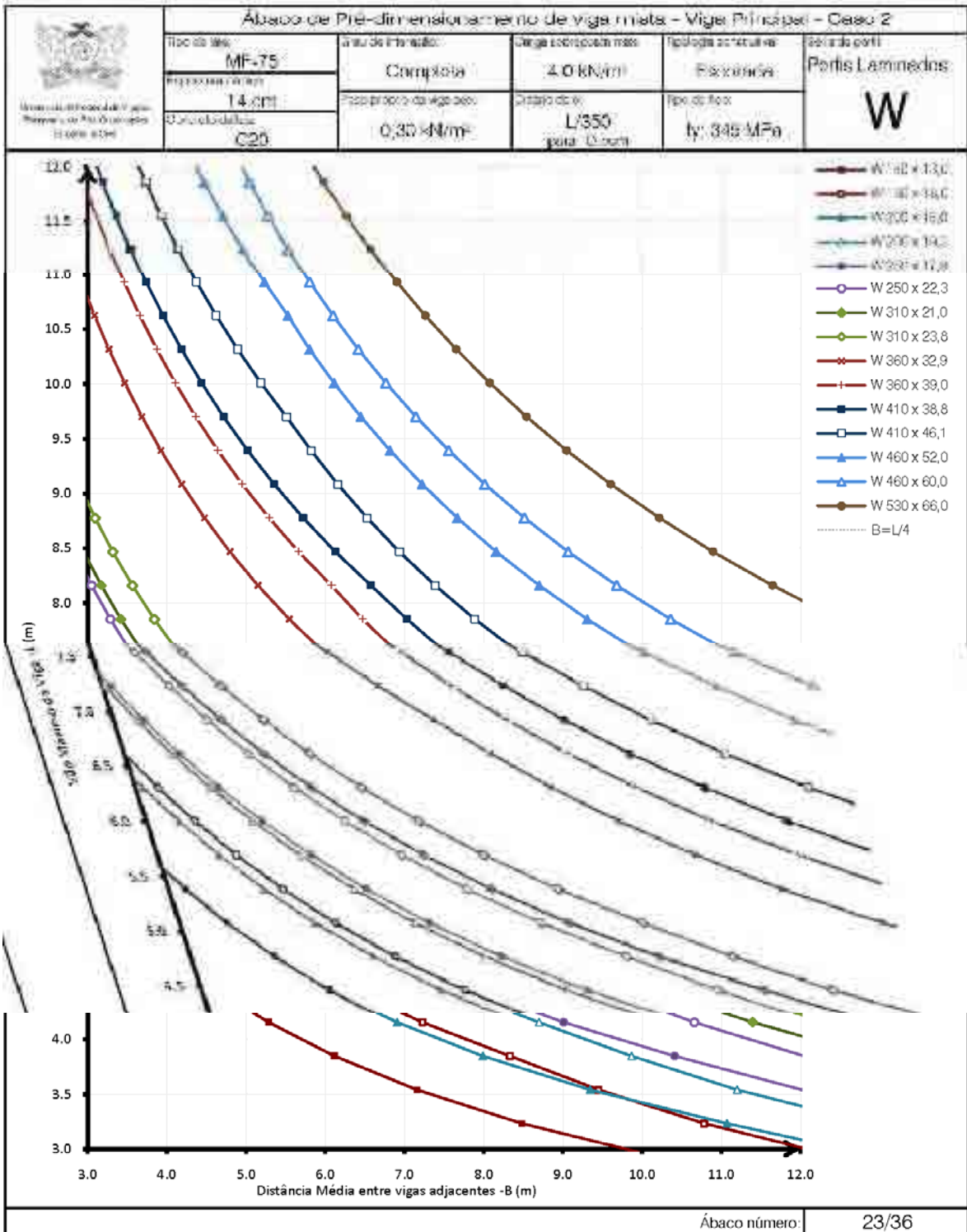
ÁBACOS: 19 AO 36

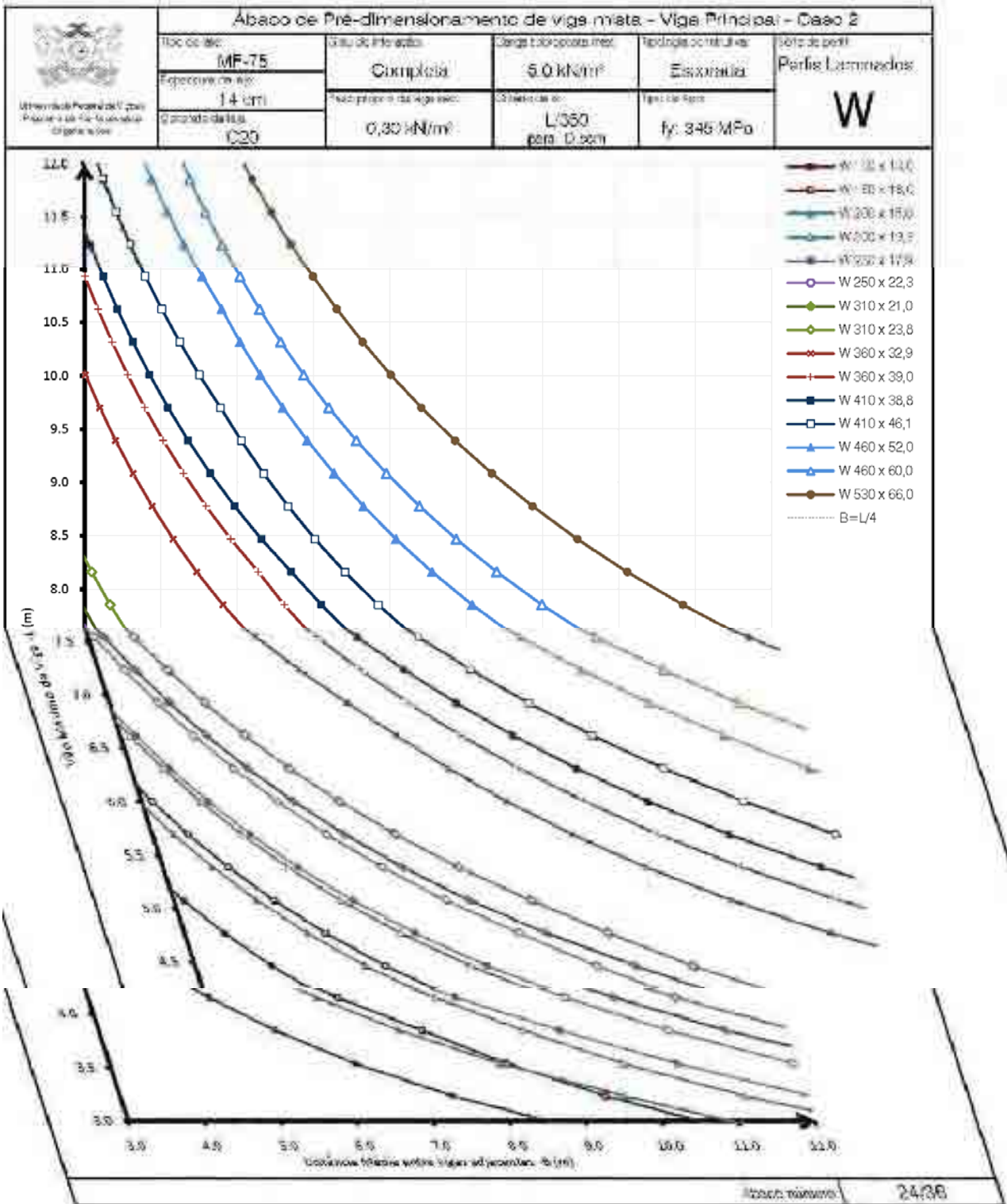


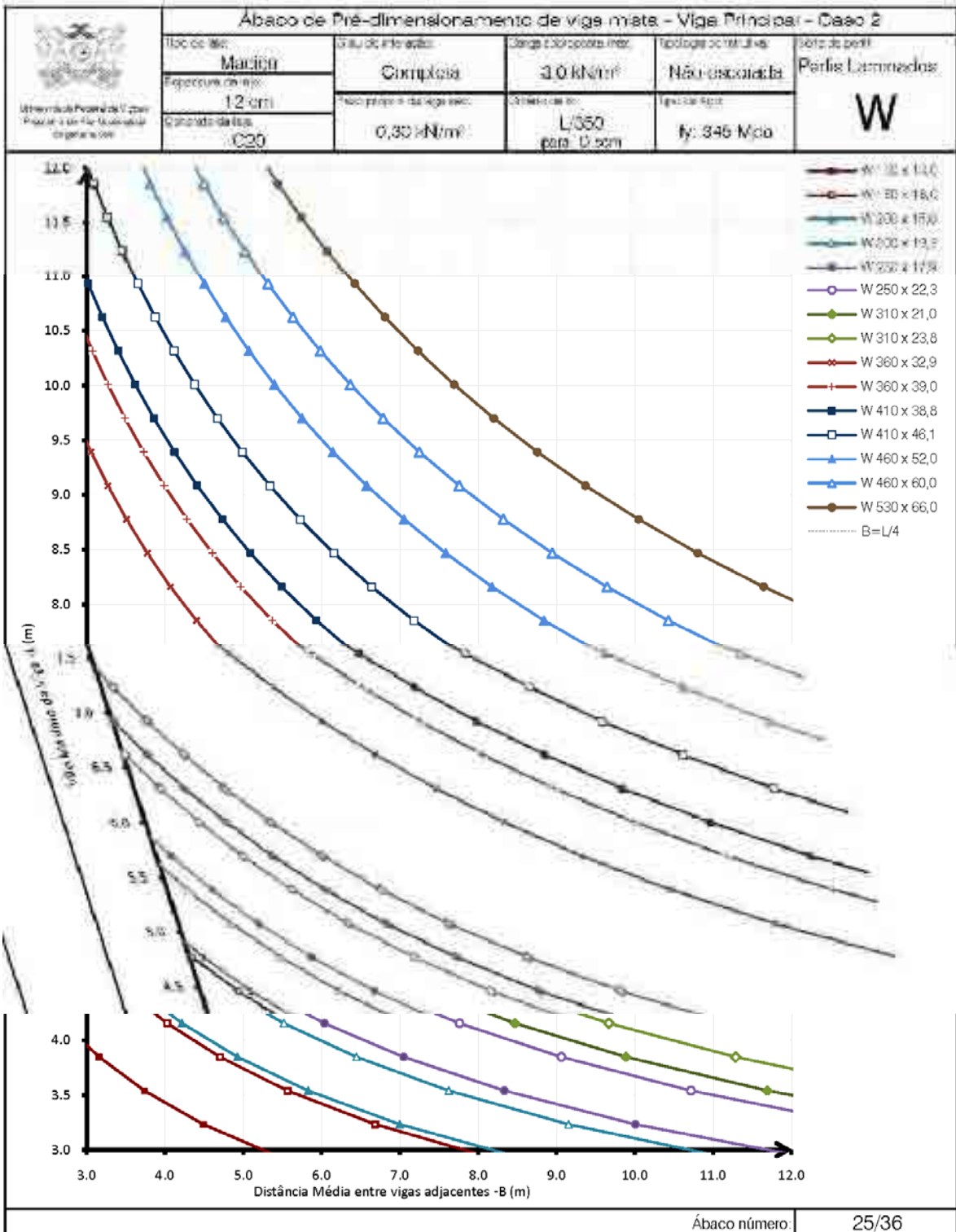


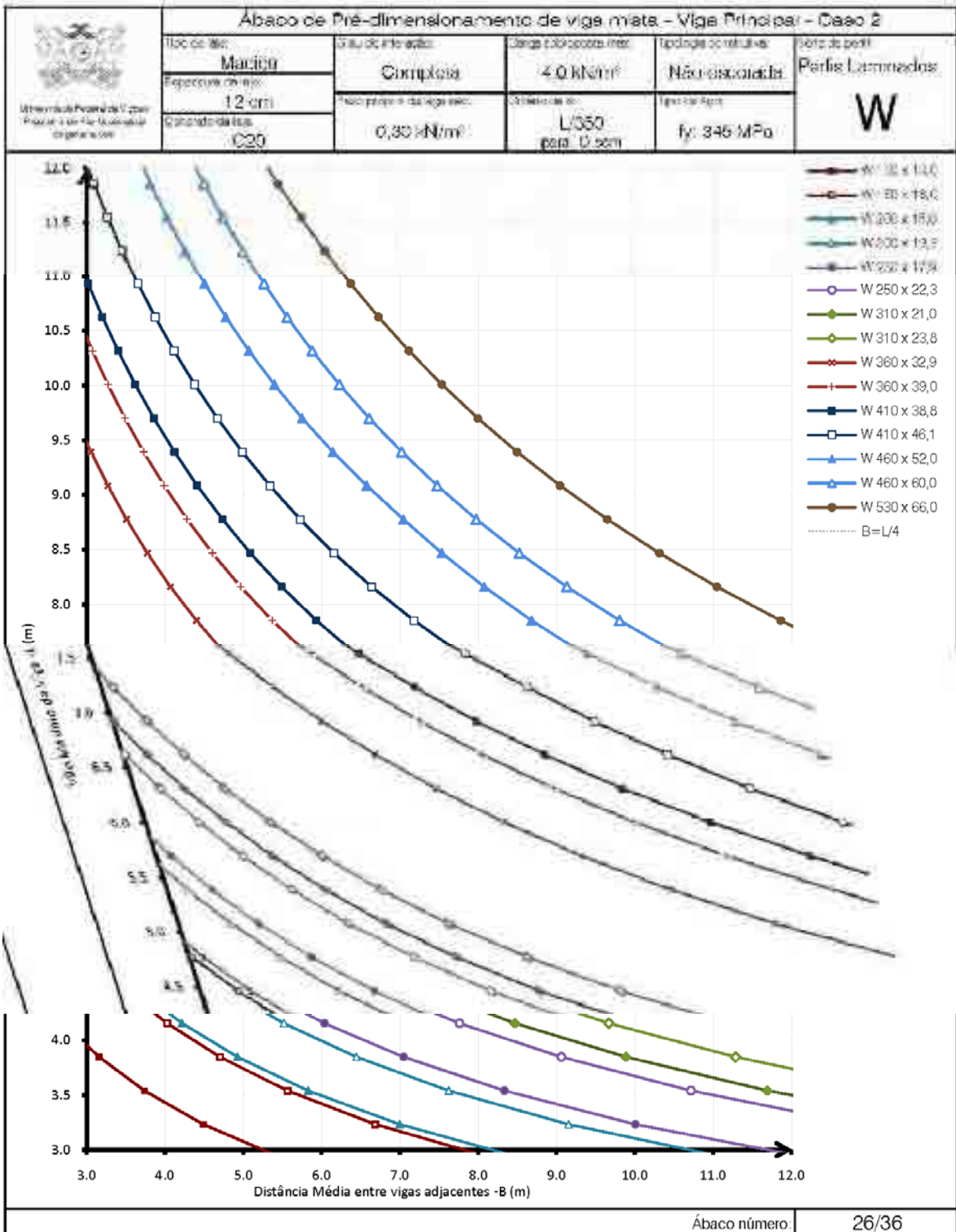


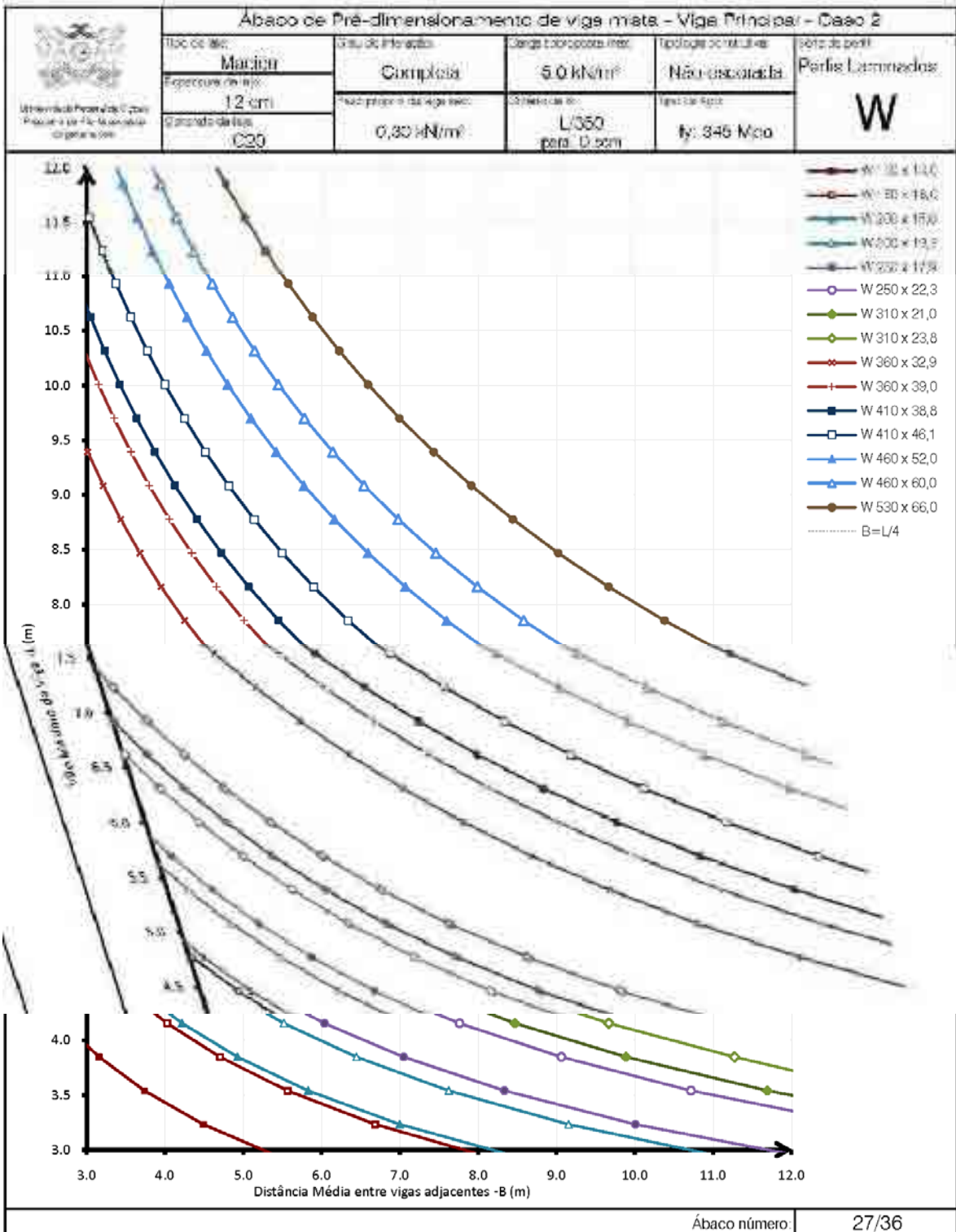


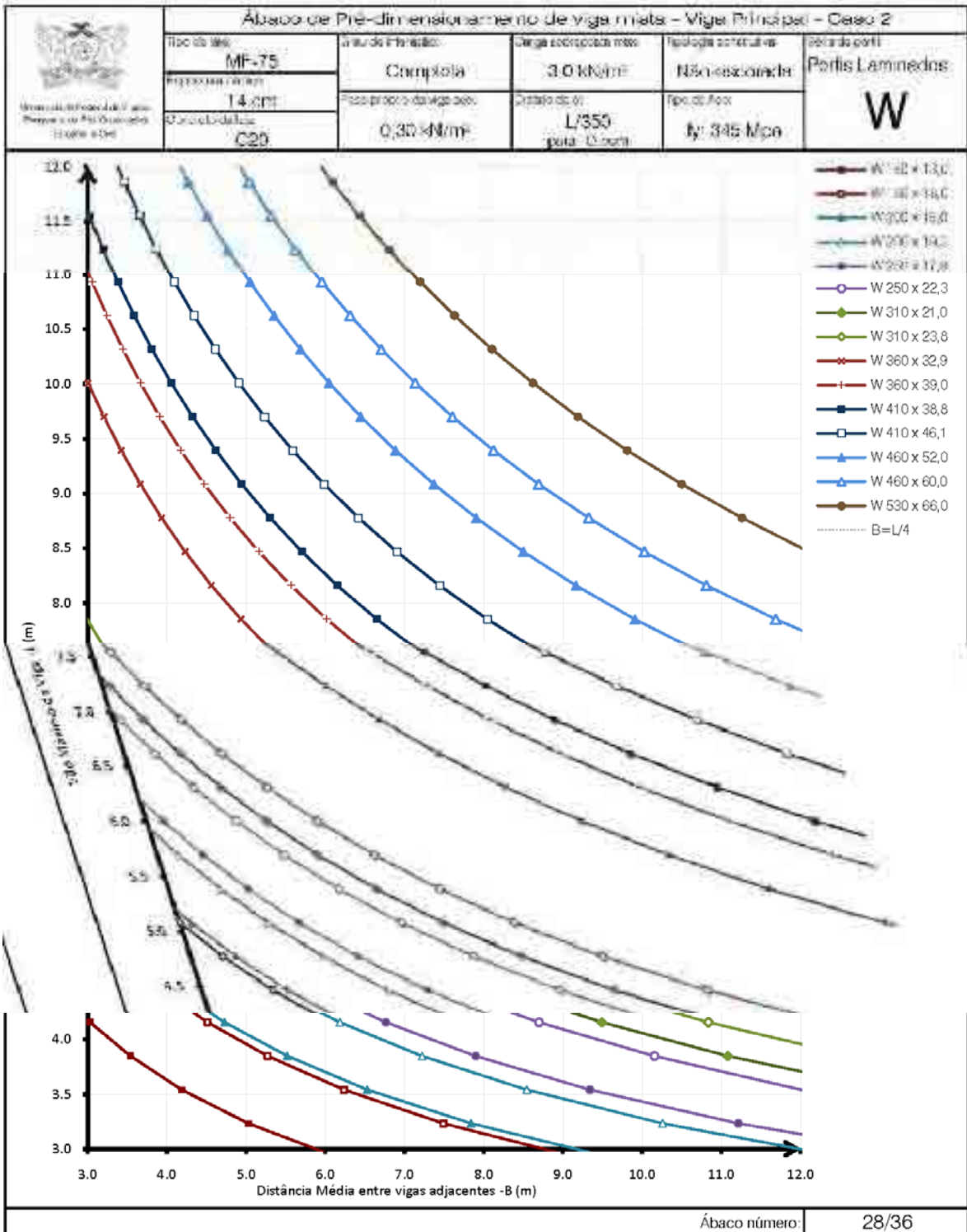


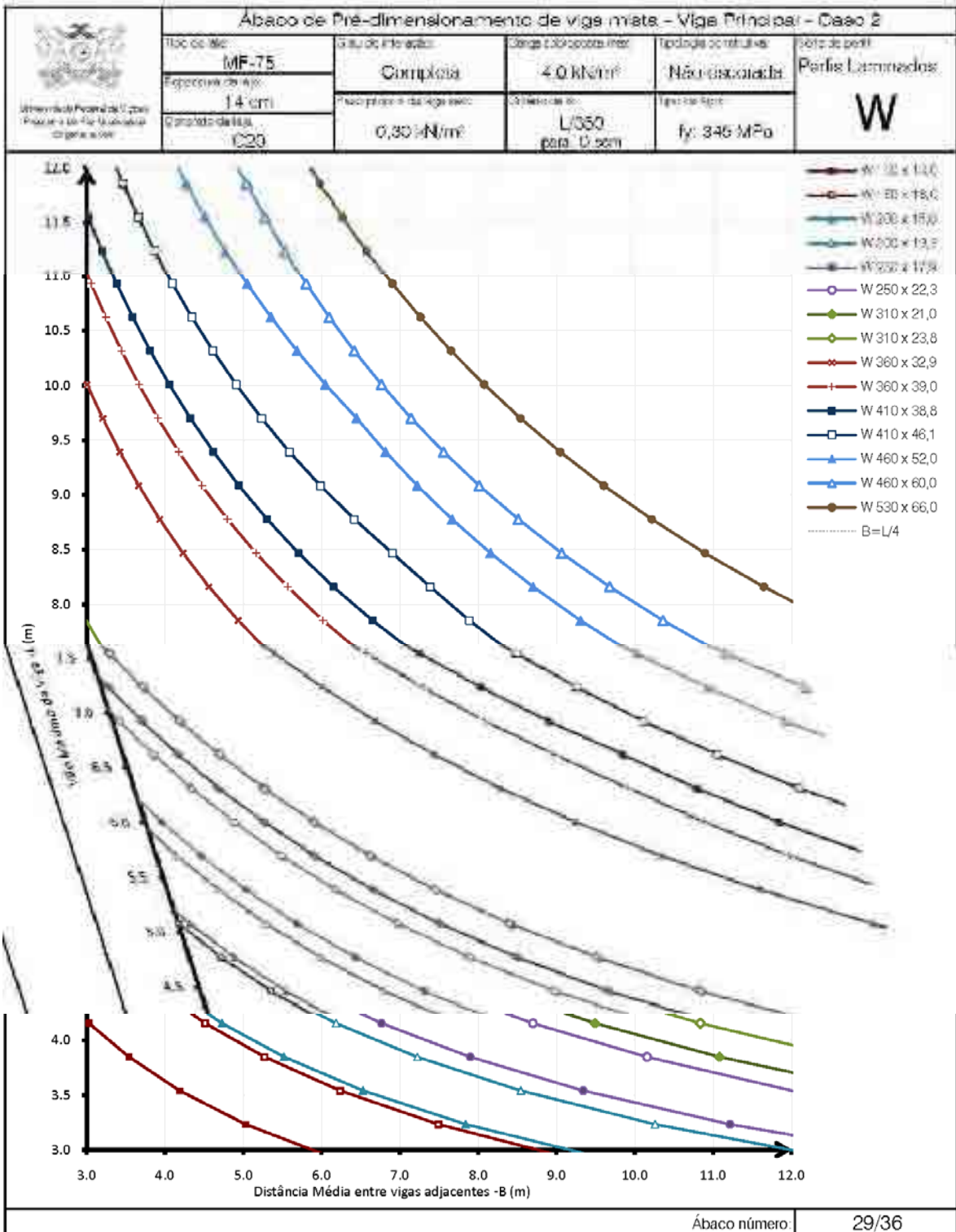


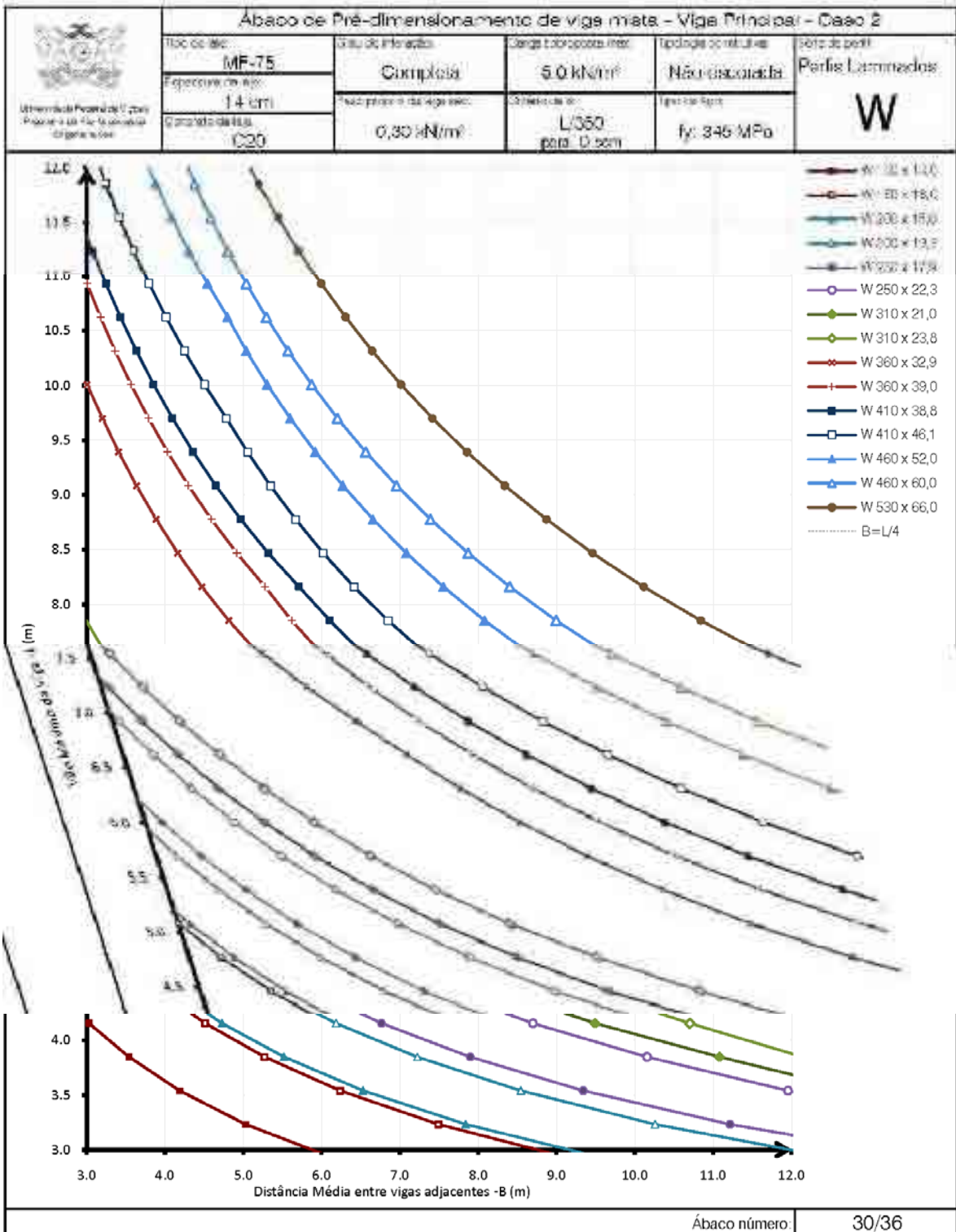


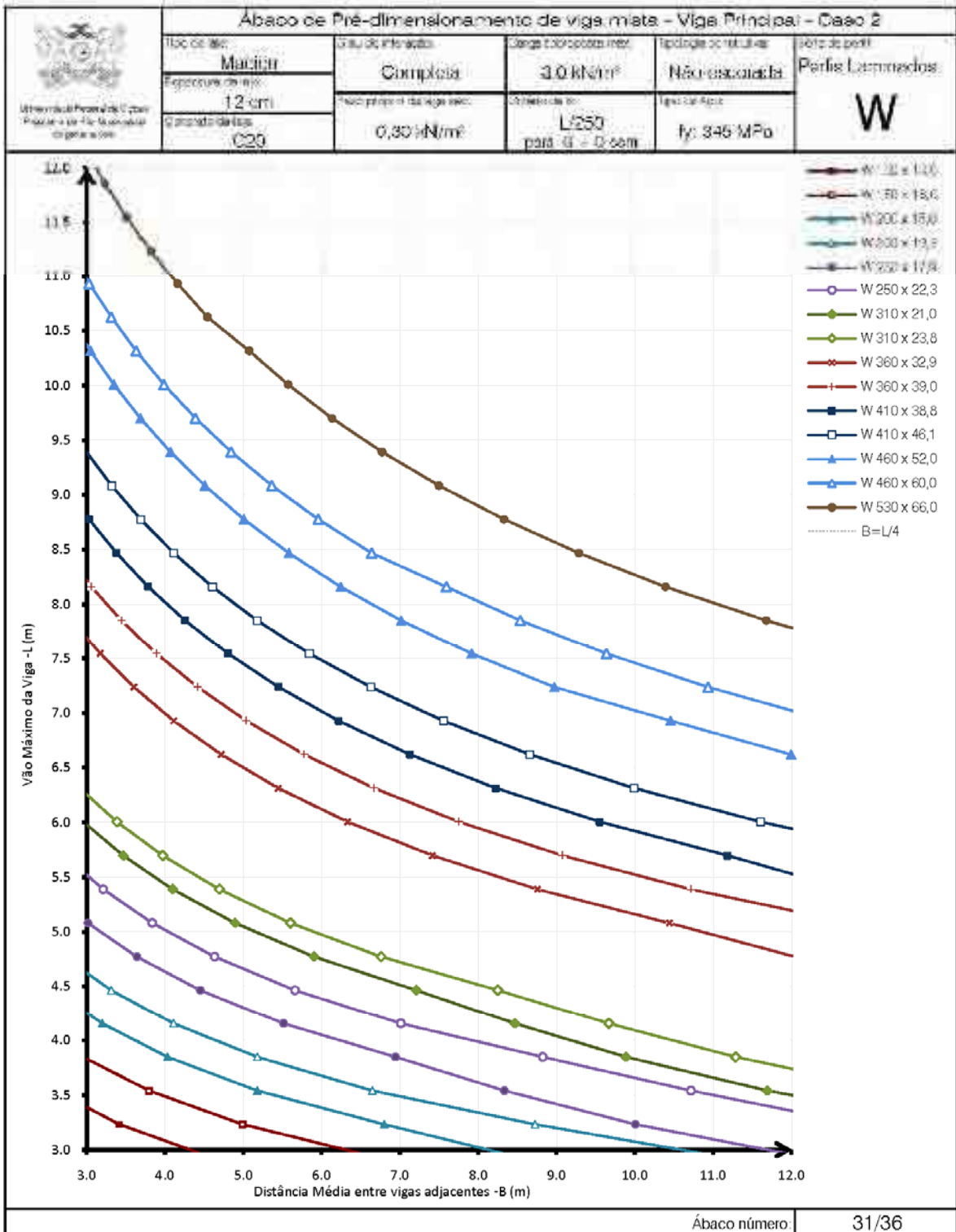


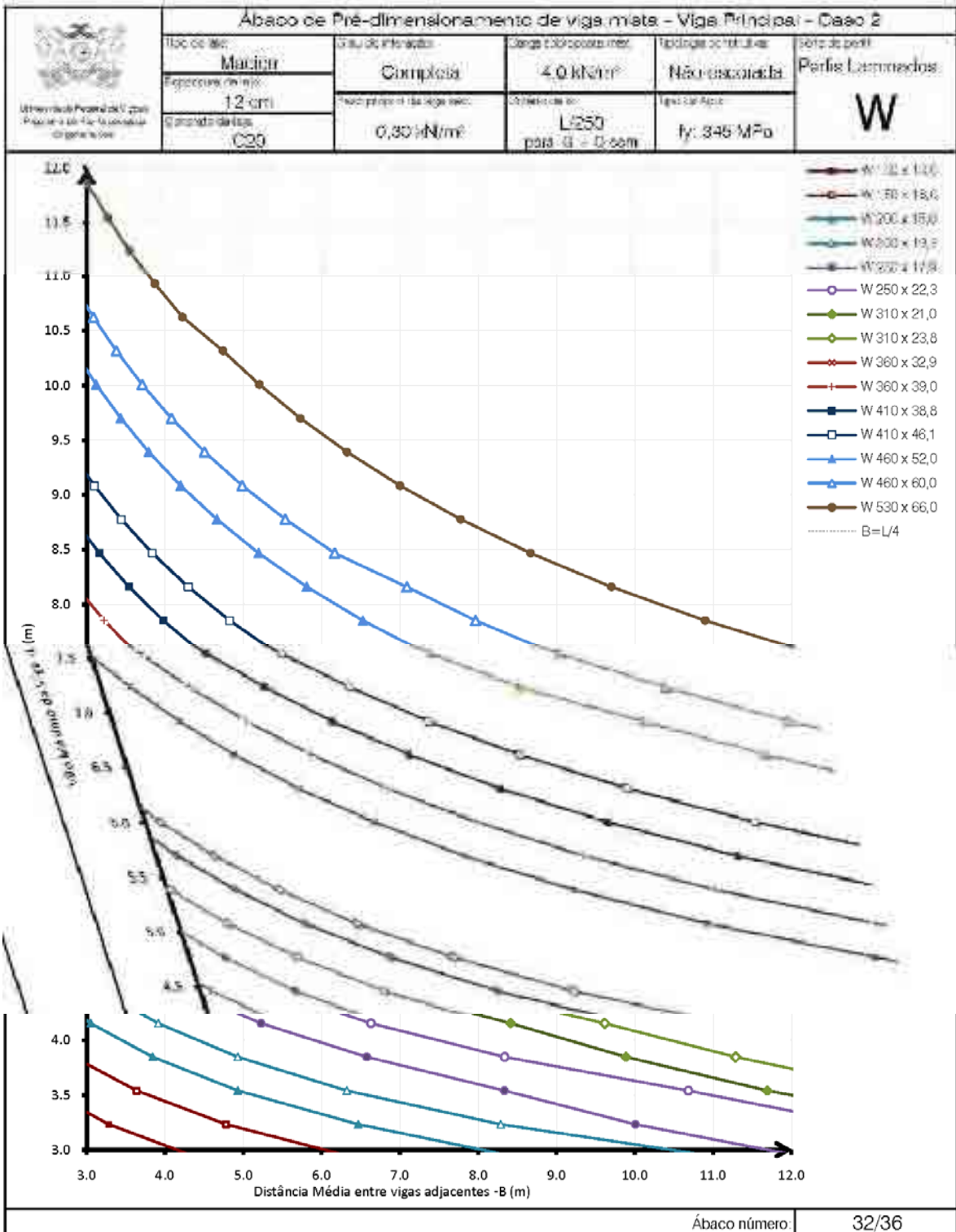


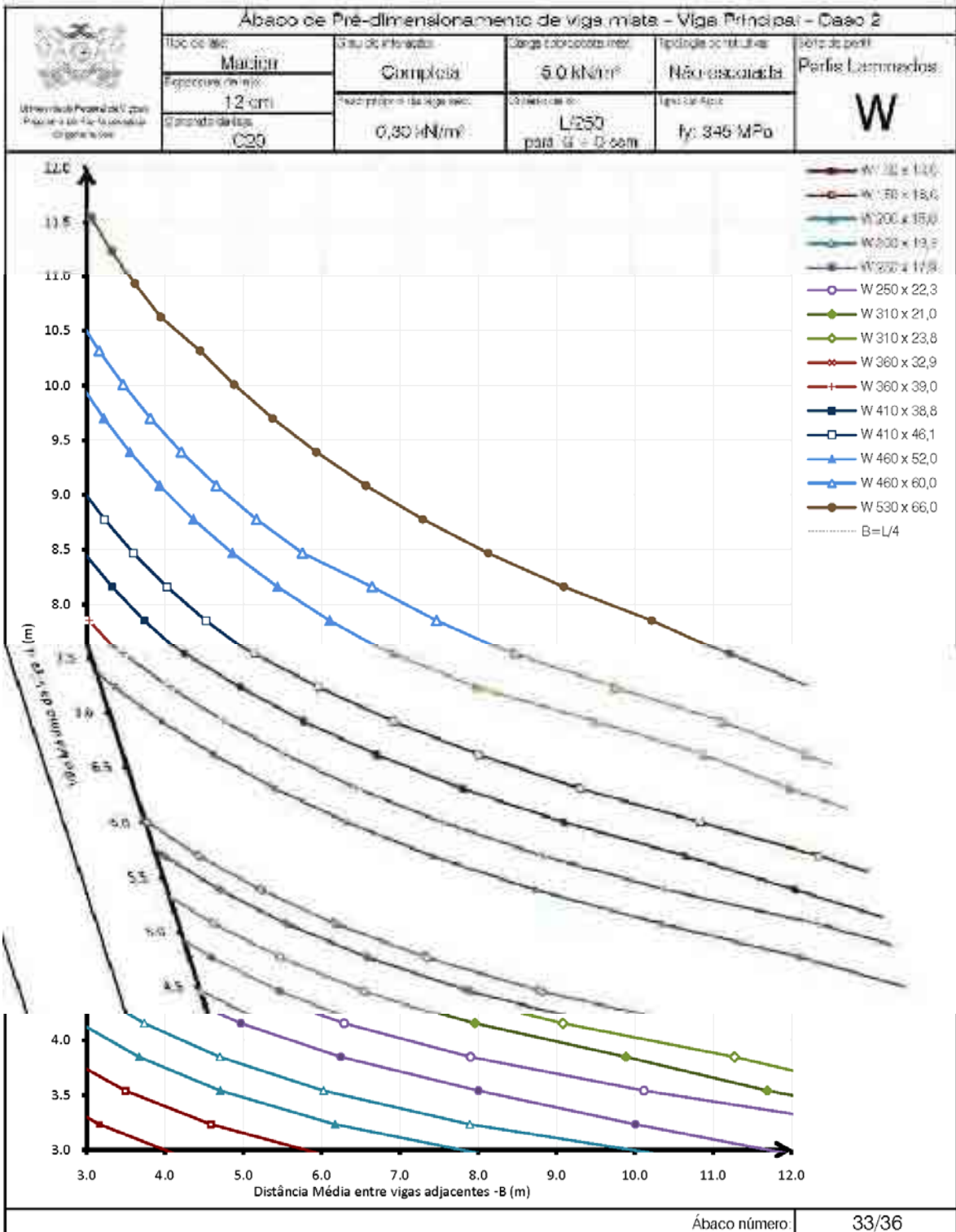


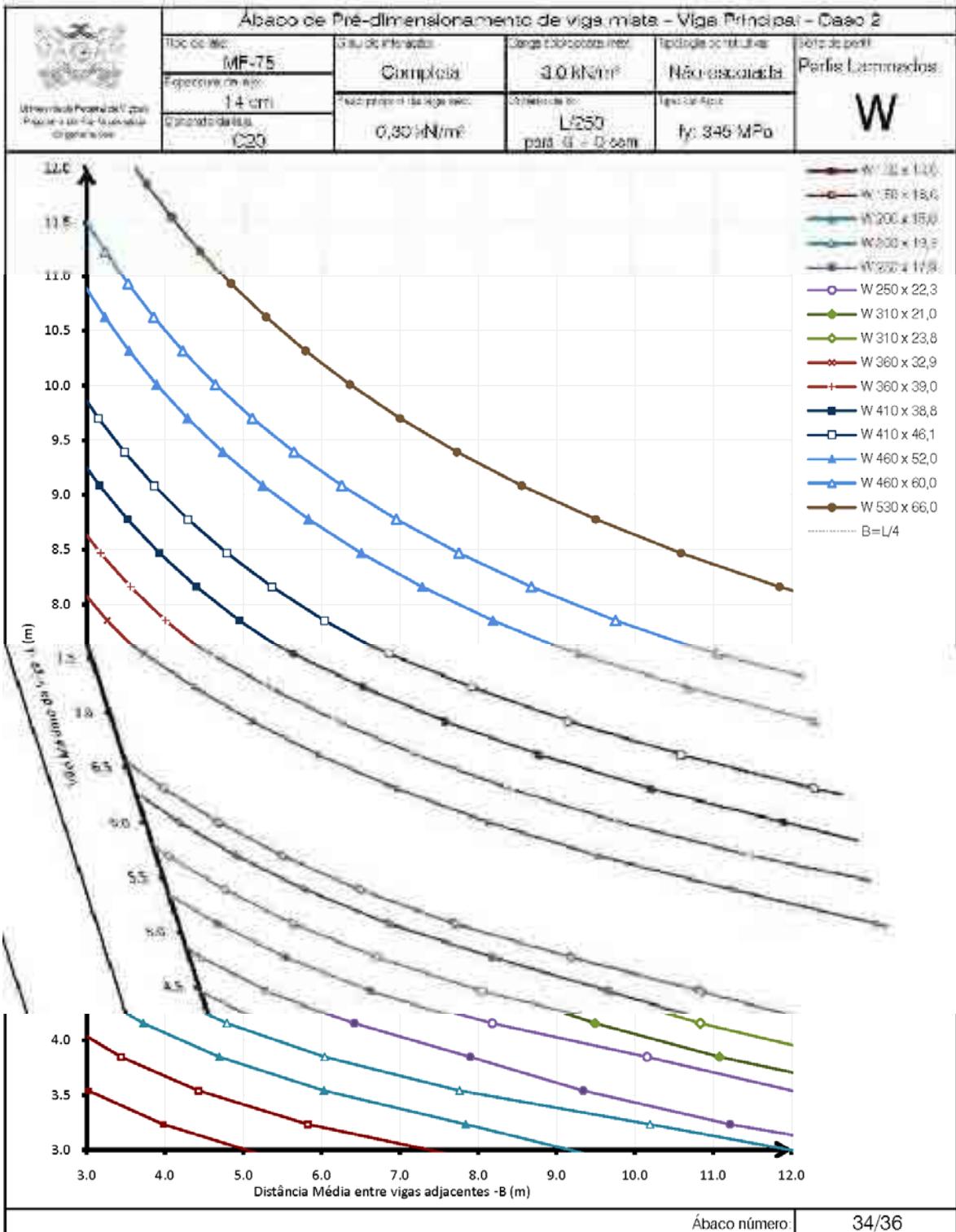


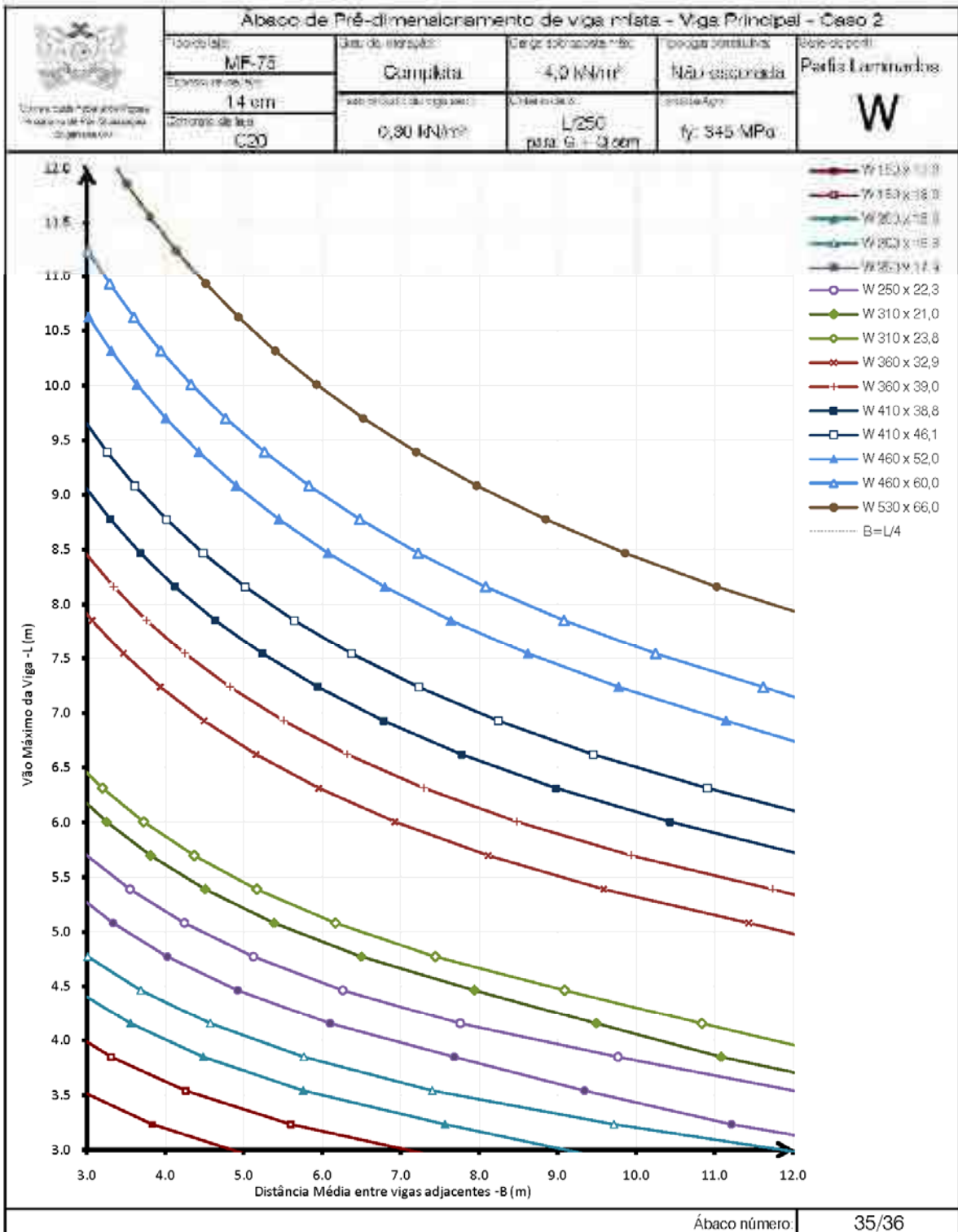


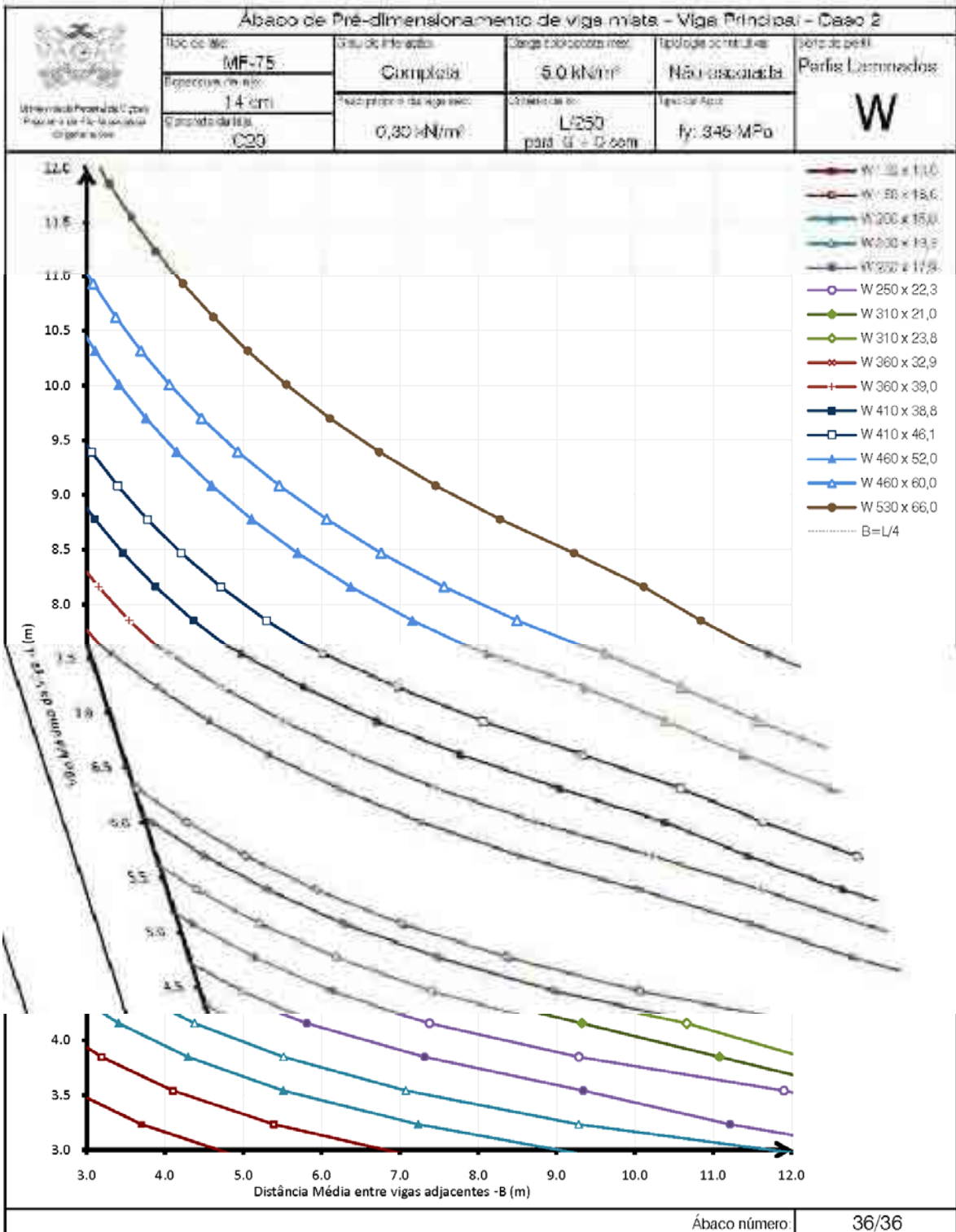












Neste Apêndice é apresentado o índice da rotina de cálculo implementada no Mathcad para a obtenção das curvas de pré-dimensionamento de vigas mistas. Juntamente com o índice, apresenta-se algumas fotografias das telas da rotina de cálculo.

1. Dados Iniciais

1.1. Série de Perfis

Neste item escolhe-se qual a série de perfil que será analisada, como mostra a figura seguinte.

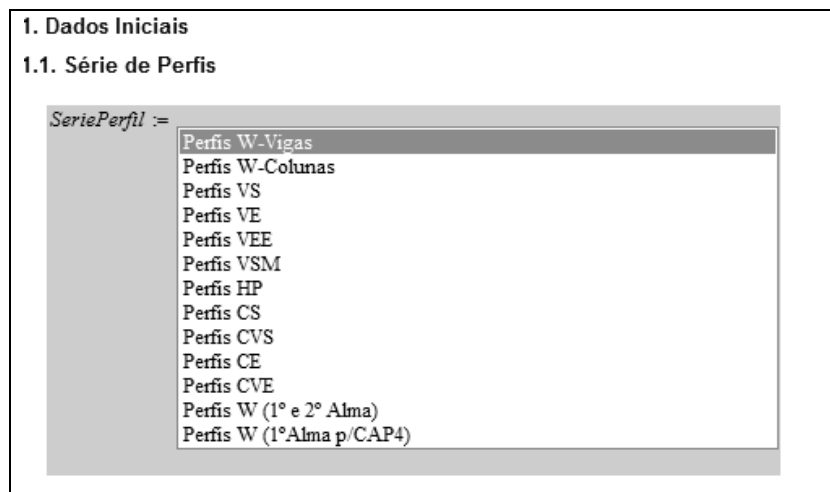


Figura A.1 – Entrada de dados no Mathcad, série de perfis.

1.2. Vetor de vão Livre

O vetor de vão livre foi definido externamente e por isso faz uma leitura de um arquivo externo. Na figura a seguir apresenta-se uma fotografia da tela de entrada de dado do vetor de vão livre.

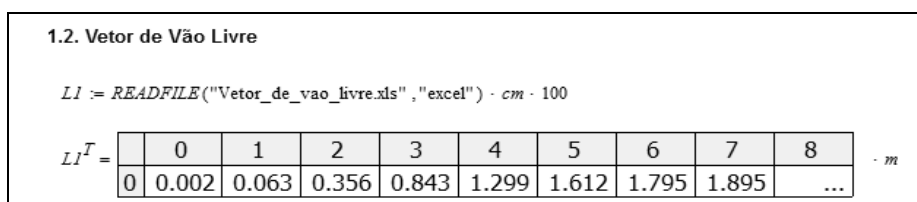


Figura A.2 – Entrada de dados no Mathcad, vetor de vão livre.

1.3. Cargas atuantes

As cargas que serão consideradas para a geração dos ábacos são definidas logo no início da rotina de cálculo, tal como apresenta-se na figura a seguir.

1.3. Cargas Atuantes		
- Sobrecarga de Peso Próprio	$G_{viga_i} := X_{i,23} \cdot \frac{kgf}{m}$	
- Sobrecarga de Utilização	$q_{csm} := 3 \frac{kN}{m^2}$	q.csm = Carga Máxima Sobreposta e é a carga devido ao revestimento, paredes e sobrecarga de utilização
- Sobrecarga de Construção	$q_c := 1.00 \frac{kN}{m^2}$	q.c = Carga de construção e é a carga solicitante que atua apenas durante a fase de construção.
- Sobrecarga de Construção	$g_{vs} := 30 \frac{kgf}{m^2}$	g.vs = Taxa de peso próprio das vigas secundárias de um sistema de piso composto por vigas mistas.

Figura A.3 – Entrada de dados no Mathcad, definição das cargas atuantes.

1.4. Tipo de Viga (Viga Principal e Viga Secundária)

Como podem ser criados ábacos para vigas secundárias e para vigas principais, deve-se escolher entre os tipos implementados o tipo desejado. Na figura a seguir apresenta-se o quadro de escolha implementado no Mathcad.

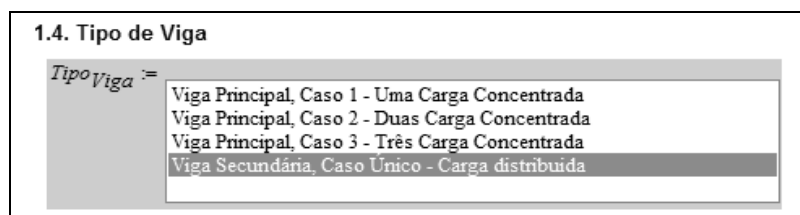


Figura A.4 – Entrada de dados no Mathcad, escolha do tipo da viga.

2. Coeficientes de Ponderação

Os coeficientes foram definidos da mesma forma que define-se as cargas atuantes.

3. Propriedades dos Materiais

3.1. Propriedades do aço

As propriedades do aço devem ser definidas pelo usuário, e é possível escolher qual aço utilizar em caixa de escolha, da mesma forma que se escolhe entre as séries de perfis e o tipo de viga. Para este trabalho foram implementados os aços, A-36 ($f_y = 250$ MPa), Civil 300 ($f_y = 300$ MPa), A572 G50 ($f_y = 345$ MPa) e o aço Civil 350 ($f_y = 350$ MPa).

3.2. Propriedades do perfil de aço

As propriedades do perfil foram importadas de um arquivo externo, que continha todas as propriedades dos perfis de cada série. Portanto quando escolhe-se uma série para a geração

dos ábacos, imediatamente o Mathcad importa todos os dados dos perfis da série escolhida. Essa leitura é realizada da mesma forma que realiza-se a importação do vetor de vão livre.

3.3. Propriedades da laje

Como características da laje escolhe-se o tipo da laje, que pode ser laje maciça e laje com forma de aço incorporada. Além desta escolha, defini-se a valor da altura da laje (para o cálculo da resistência colaborante da laje deve-se considerar a altura da nervura), a resistência característica, o módulo de elasticidade e a resistência característica do concreto.

4. Definição do Somatório de Q_{Rd}

4.1. Interação Completa

Para a interação completa calcula-se o menor valor entre a resistência à compressão da laje e a resistência à tração do concreto, obtendo-se assim o valor do fluxo cisalhante de cada perfil. Deste ponto começa-se a utilizar os índices i e j nas variáveis que dependem do perfil metálico e da variação do vão livre. O índice i é usado para a variação de perfis, ou seja, cada perfil está relacionado com um i . E o índice j está relacionado com os incrementos de vãos do vetor vão.

Com o valor do fluxo cisalhante definido e considerando que a interação completa transmite 100% desse fluxo, tem-se então o valor do somatório das resistências que os conectores devem resistir. Na figura a seguir, apresenta-se o calculo do fluxo cisalhante.

<p>4.1. Interação Completa</p> $\bar{T}_i := A_i \cdot f_{yd}$ $F_{hd_{i,j}} := \begin{cases} 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{ef_{i,j}} \cdot t_c & \text{if } (0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{ef_{i,j}} \cdot t_c) \leq T_i \\ T_i & \text{if } (0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{ef_{i,j}} \cdot t_c) > T_i \end{cases}$ <p>Grau de Interação: $\eta_l := 100\%$</p> $\Sigma Q_{Rd_{i,j}} := \eta_l \cdot F_{hd_{i,j}}$		<p>Se a Linha Neutra estiver na viga metálica, o valor do fluxo cisalhante é o a capacidade de compressão da laje, caso a linha neutra esteja na laje de concreto o fluxo cisalhante é a capacidade de tração da viga (T).</p>
--	--	--

Figura A.5 - Definição da interação entre o perfil metálico e a laje de concreto.

4.2. Interação Mínima e Parcial

Para a definição da interação parcial calcula-se o valor da interação parcial mínima permitida pela norma como mostrado na figura a seguir. Ou então define-se o grau de interação desejado.

4.2. Interação Parcial

Para interação parcial utilizou-se o numero de conectores da interação parcial menos um.

$$L_{e_j} := \frac{L_j}{m} = \dots$$

$$\eta_{min_{i,j}} := \begin{cases} \text{if } (bf_i \cdot tf_i) = (b\tilde{f}_i \cdot t\tilde{f}_i) \\ \quad \text{if } L_{e_j} \leq 25 \\ \quad \left[1 - \frac{E}{578 \cdot f_y} \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_{e_j}) \right] \text{ if } 1 - \frac{E}{578 \cdot f_y} \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_{e_j}) \geq 0.40 \\ \quad 0.40 \text{ otherwise} \\ \quad 1 \text{ otherwise} \\ \text{if } [(bf_i \cdot tf_i) \neq (b\tilde{f}_i \cdot t\tilde{f}_i)] \wedge [b\tilde{f}_i \cdot t\tilde{f}_i \leq 3 \cdot (bf_i \cdot tf_i)] \\ \quad \text{if } L_{e_j} \leq 20 \\ \quad 0.40 \\ \quad \left[1 - \frac{E}{578 \cdot f_y} \cdot (0.30 - 0.015 \cdot L_{e_j}) \right] \text{ if } \left[1 - \frac{E}{578 \cdot f_y} \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_{e_j}) \right] \geq 0.40 \\ \quad 0.40 \text{ otherwise} \\ \quad 1 \text{ otherwise} \\ \quad \text{"-"} \text{ otherwise} \end{cases}$$

Figura A.6 - Definição da interação parcial entre o perfil metálico e a laje de concreto.

5. Obtenção das Curvas de Resistência da Viga Mista para geração dos ábacos

Para gerar a curva de comportamento do momento resistente de cálculo da viga mista, implementou-se um algoritmo que calcula a posição da linha neutra e em função da altura da linha neutra obtém-se o momento resistente de cálculo.

Da mesma forma, foi implementada para interação parcial outro algoritmo que considera as equações para interação parcial.

5.1. Curva 1 - Curva de Resistência ($b_{ef} = L/4$)

Apresenta-se na figura a seguir o algoritmo implementado para cálculo do momento resistente de cálculo para a curva 1.

$$\begin{aligned}
M_{Rd1i,j} &= \text{if } (\Sigma Q_{Rd1i,j} \geq A_i \cdot f_{yd}) \wedge (0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c \geq A_i \cdot f_{yd}) \\
&\quad \left| \begin{array}{l}
a_{i,j} \leftarrow \begin{cases} \frac{(A_i \cdot f_{yd})}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j}} & \text{if } \frac{(A_i \cdot f_{yd})}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j}} \leq t_c \\
t_c & \text{otherwise} \end{cases} \\
C_{cd1i,j} \leftarrow 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot a_{i,j} \\
T_{ad_i} \leftarrow A_i \cdot f_{yd} \\
M_{Rd1i,j} \leftarrow (\beta_{vm} \cdot T_{ad_i} \cdot \left(d_{1i} + h_F + t_c - \frac{a_{i,j}}{2} \right)) \\
M_{Rd1i,j}
\end{array} \right. \\
&\quad \text{if } (\Sigma Q_{Rd1i,j} \geq 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c) \wedge (A_i \cdot f_{yd} \geq 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c) \\
&\quad \left| \begin{array}{l}
C_{cd1i,j} \leftarrow (0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c) \\
C_{ad1i,j} \leftarrow \frac{1}{2} (A_i \cdot f_{yd} - C_{cd1i,j}) \\
A_{afi} \leftarrow (b_{fi} \cdot f_i) \\
\text{if } C_{ad1i,j} \leq A_{afi} \cdot f_{yd} \\
\quad \left| \begin{array}{l}
C_{cd1i,j} \leftarrow 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c \\
C_{ad1i,j} \leftarrow \frac{1}{2} (A_i \cdot f_{yd} - C_{cd1i,j}) \\
y_{pi,j} \leftarrow \frac{C_{ad1i,j}}{(f_i \cdot b_{fi}) \cdot f_{yd}} \cdot f_i \\
y_{ci,j} \leftarrow \frac{y_{pi,j}}{2} \\
y_{ti,j} \leftarrow \frac{\left[(f_i - y_{pi,j}) \cdot b_{fi} \cdot \left[(f_i - y_{pi,j}) + h_i + f_i + \frac{y_{pi,j}}{2} \right] \right] + \left[h_i \cdot r_{wi} \cdot \left(\frac{h_i}{2} + f_i \right) \right] + \left(f_i \cdot b_{fi} \cdot \frac{f_i}{2} \right)}{\left[(f_i - y_{pi,j}) \cdot b_{fi} \right] + (h_i \cdot r_{wi}) + (f_i \cdot b_{fi})} \\
M_{Rd.completa.mesa_{i,j}} \leftarrow (\beta_{vm} \cdot \left[C_{ad1i,j} \cdot (d_i + y_{ti,j} + y_{ci,j}) + C_{cd1i,j} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d_i + y_{ti,j} \right) \right]) \\
M_{Rd.completa.mesa_{i,j}}
\end{array} \right. \\
\quad \text{if } C_{ad1i,j} > A_{afi} \cdot f_{yd} \\
\quad \left| \begin{array}{l}
C_{cd1i,j} \leftarrow 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{efi,j} \cdot t_c \\
C_{ad1i,j} \leftarrow \frac{1}{2} (A_i \cdot f_{yd} - C_{cd1i,j}) \\
y_{pi,j} \leftarrow f_i + h_i \cdot \left[\frac{C_{ad1i,j} - (f_i \cdot b_{fi}) \cdot f_{yd}}{(r_{wi} \cdot h_i) \cdot f_{yd}} \right] \\
y_{ci,j} \leftarrow \frac{(y_{pi,j} - f_i) \cdot r_{wi} \cdot \left[f_i + \left(\frac{y_{pi,j} - f_i}{2} \right) \right] + \left[f_i \cdot b_{fi} \cdot \left(\frac{f_i}{2} \right) \right]}{(y_{pi,j} - f_i) \cdot r_{wi} + f_i \cdot b_{fi}} \\
y_{ti,j} \leftarrow \frac{(d_i - f_i - y_{pi,j}) \cdot r_{wi} \cdot \left[f_i + \left(\frac{d_i - y_{pi,j} - f_i}{2} \right) \right] + \left(f_i \cdot b_{fi} \cdot \frac{f_i}{2} \right)}{(d_i - f_i - y_{pi,j}) \cdot r_{wi} + f_i \cdot b_{fi}} \\
M_{Rd.completa.alma_{i,j}} \leftarrow (\beta_{vm} \cdot \left[C_{ad1i,j} \cdot (d_i + y_{ti,j} + y_{ci,j}) + C_{cd1i,j} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d_i + y_{ti,j} \right) \right]) \\
M_{Rd.completa.alma_{i,j}}
\end{array} \right.
\end{array}
\end{aligned}$$

Figura A.7 - Cálculo do momento resistente de cálculo.

Calculado o momento resistente obtêm-se os valores da máxima distância entre vigas suportada pelos perfis, que correspondem a um vão livre. Na figura a seguir, mostra-se a equação de obtenção do $B1$.

$$B1_{i,j} = \frac{M_{Rd1_{i,j}} - \frac{1.25 \cdot G_{viga_i} \cdot (Ll_j)^2}{8}}{caso_{vp.MRd} \cdot \left[\left[1.25 \cdot \xi_{vs} + 1.4 \cdot t_{c.eq} \cdot (\gamma\gamma_c) + 1.5 \cdot q_{csm} \right] \cdot (Ll_j)^2 \right]}$$

Figura A.8 – Cálculo do momento resistente de cálculo.

5.2. Curva 2 - Curva de Resistência ($b_{ef} = B$)

A geração da curva 2 é realizada da mesma forma apresentada anteriormente utilizando como largura efetiva o valor da distância entre vigas adjacentes.

6. Obtenção das Curvas de Deslocamento para geração dos ábacos

6.1. Divisor do Limite de Deslocamento - Critério de Deslocamento excessivo máximo

O divisor é definido, da mesma forma que foram definidas as cargas atuantes. O valor deste divisor pode ser alterado em função dos critérios escolhidos pelo profissional.

6.2. Curvas 3, 5 e 7 ($b_{ef} = L/4$), para Interação Completa e Parcial (90%, 80%, 70% e min)

Para o cálculo do deslocamento, calcula-se o módulo de elasticidade transformado, e em seguida calcula-se a largura efetiva transformada. Com esses valores, calcula-se o valor de a_{tr} e y_{tr} usando um algoritmo que faz interações repetidas para encontrar o valor correto, esse algoritmo é apresentado na figura a seguir.

$$\begin{aligned}
A'_{c_{i,j}} &= b_{tr_{i,j}} \cdot t_c \\
a_{tr_{i,j}} &= t_c \\
\begin{pmatrix} a_{tr_{i,j}} \\ y_{tr.atr_{i,j}} \end{pmatrix} &:= \begin{cases} a_{trvelho} \leftarrow 0 \\ A_{cint} \leftarrow A'_{c_{i,j}} \\ a_{int} \leftarrow a_{tr_{i,j}} \\ \text{while } |a_{int} - a_{trvelho}| > 10^{-10} \text{ cm} \\ \quad \left| \begin{array}{l} a_{trvelho} \leftarrow a_{int} \\ y_{int} \leftarrow \frac{(A_i \cdot y_{t_i}) + A_{cint} \cdot \left(d_i + t_c + h_F - \frac{a_{int}}{2} \right)}{(A_i + A_{cint})} \\ a_{int} \leftarrow d_i + h_F + t_c - y_{int} \\ A_{cint} \leftarrow b_{tr_{i,j}} \cdot a_{int} \end{array} \right. \\ \left. \begin{pmatrix} a_{int} \\ y_{int} \end{pmatrix} \end{cases} \\
a_{tr_{i,j}} &:= \begin{cases} t_c & \text{if } d_i + h_F + t_c - y_{tr.atr_{i,j}} \geq t_c \\ (d_i + h_F + t_c - y_{tr.atr_{i,j}}) & \text{otherwise} \end{cases} \\
A'_{c_{i,j}} &:= b_{tr_{i,j}} \cdot a_{tr_{i,j}} \\
y_{tr_{i,j}} &:= \begin{cases} \begin{cases} A'_{c_{i,j}} \leftarrow b_{tr_{i,j}} \cdot t_c \\ \frac{A_i \cdot y_{t_i} + A'_{c_{i,j}} \cdot \left(d_i + h_F + \frac{t_c}{2} \right)}{A_i + A'_{c_{i,j}}} \end{cases} & \text{if } a_{tr_{i,j}} \geq t_c \\ y_{tr.atr_{i,j}} & \text{if } (a_{tr_{i,j}} < t_c) \end{cases}
\end{aligned}$$

Figura A.9 – Cálculo dos valores de a_{tr} e y_{tr} .

Calculado esses valores, calcula-se então o valor da inércia transformada da viga mista. Na figura a seguir apresenta-se o algoritmo para do cálculo de I_{tr} .

$$I_{tr_{i,j}} = \begin{cases} I_{X_i} + A_i \cdot (y_{tr_{i,j}} - y_{t_i})^2 + \frac{b_{tr_{i,j}} \cdot (t_c)^3}{12} + (b_{tr_{i,j}} \cdot t_c) \cdot \left(d_i + h_F + \frac{t_c}{2} - y_{tr_{i,j}} \right)^2 & \text{if } (y_{tr_{i,j}} \leq d_i) \\ I_{X_i} + A_i \cdot (y_{tr_{i,j}} - y_{t_i})^2 + \frac{b_{tr_{i,j}} \cdot (a_{tr_{i,j}})^3}{12} + (b_{tr_{i,j}} \cdot a_{tr_{i,j}}) \cdot \left(d_i + h_F + t_c - \frac{a_{tr_{i,j}}}{2} - y_{tr_{i,j}} \right)^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Figura A.10 – Cálculo dos valores de I_{tr} .

Em posse dos valores de a_{tr} , y_{tr} e I_{tr} basta utilizar as equações apresentadas no capítulo 3 para obter cada uma das curvas de deslocamento.

Os itens a seguir estão implementados no Mathcad e são referentes à obtenção do deslocamento para cada caso.

6.2.1. Curva 3 - Curva de Deslocamento Excessivo ($Q / I_{tr} - Lim.1$)

6.2.2. Curva 5 - Curva de Deslocamento Excessivo ($G / I_{tr} + Q / I_{tr} - Lim.2$)

6.2.3. Curva 7 - Curva de Deslocamento Excessivo ($G / I_a + Q / I_{tr} - Lim.2$)

6.3. Curvas 4, 6 e 8 ($b_{ef} = B$), para Interação Completa e Parcial (90%, 80%, 70% e min)

Da mesma forma que foi realizada a obtenção dos valores para geração das curvas 3, 5 e 7 considerando a largura efetiva em função do vão livre, altera-se a largura efetiva para a distância entre vigas adjacentes e obtém-se os valores de a_{tr} , y_{tr} e I_{tr} . E novamente em posse destes valores e das equações apresentadas no capítulo 3 geram-se, nos itens a seguir, as curvas 4, 6 e 8.

Os itens a seguir estão implementados no Mathcad e são referentes à obtenção do deslocamento para cada caso.

6.3.1. Curva 4 - Curva de Deslocamento Excessivo ($Q / I_{tr} - Lim.1$)

6.3.2. Curva 6 - Curva de Deslocamento Excessivo ($G / I_{tr} + Q / I_{tr} - Lim.2$)

6.3.3. Curva 8 - Curva de Deslocamento Excessivo ($G / I_a + Q / I_{tr} - Lim.2$)

7. Obtenção da Curva de Resistência do Perfil de Aço

Foi implementado neste item toda a rotina de cálculo de perfis metálicos isolados considerando todas as características dos perfis seguindo a seqüência apresentada dos itens a seguir.

7.1. Esbeltez da Alma do Perfil

7.2. FLT - Flambagem Lateral com Torção

7.3. FLM - Flambagem Local da Mesa

7.4. FLA - Flambagem Local da Alma

7.5. Momento Resistente da Viga de Aço Isolada

7.6. Curvas 9 e 10

A obtenção das curvas 9 e 10 foi implementada da mesma forma que se obtém as curvas 1 e 2 e de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3.

8. Algoritmos de Seleção dos dados para composição da Curva de Pré-dimensionamento

Calculadas todas as curvas, é necessário escolher as partes que realmente irão compor a curva de pré-dimensionamento. Para isto desenvolveu-se um algoritmo, que seleciona dentre as curvas desejadas, os pares que fazem parte da curva de pré-dimensionamento de vigas mistas. Para cada um dos itens seguintes, foram elaborados algoritmos de seleção dos pares considerando cada uma das curvas que compõe cada caso.

8.1. Obtenção da Curva de Pré-dimensionamento para construção Escorada com: Qcsm com Itr e para Lim.2 (Curvas 1, 2, 3 e 4)

8.2. Obtenção da Curva de Pré-dimensionamento para construção Não-escorada com: Qcsm com Itr e para Lim.2 (Curvas 1,2, 9, 10, 3 e 4)

8.3. Obtenção da Curva de Pré-dimensionamento para construção Escorada com: G + Q com Itr e Itr respectivamente (Curvas 1,2, 5 e 6)

8.4. Obtenção da Curva de Pré-dimensionamento para construção Não-escorada com: G + Q com Ia e Itr respectivamente (Curvas 1, 2, 9, 10, 7 e 8)

9. Ábacos

Uma das ferramentas do Mathcad que facilitaram o desenvolvimento dos ábacos foi a visualização dos ábacos durante a implementação da rotina de cálculo. Estes ábacos apresentam a visualização imediata dos resultados dos algoritmos. Nas figuras do item a seguir, apresentam-se dois dos ábacos que foram montados no Mathcad. Em todos os outros itens, também foram elaborados ábacos tal como estes de acordo com as informações que se desejava controlar.

9.1. Curvas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 para elaboração do ábaco de pré-dimensionamento

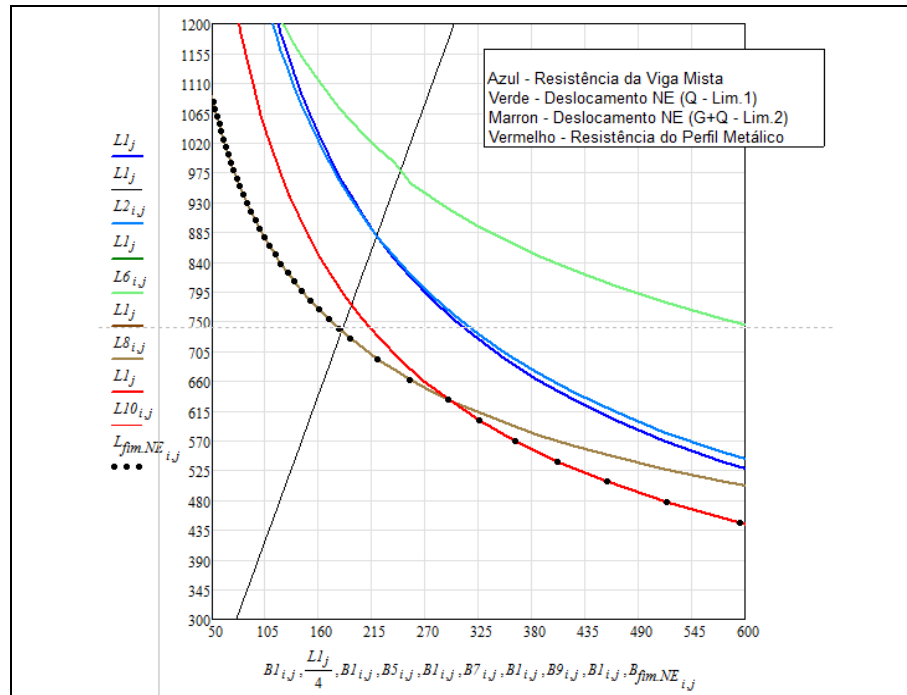


Figura A.11 – Ábaco do Mathcad com as curvas 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

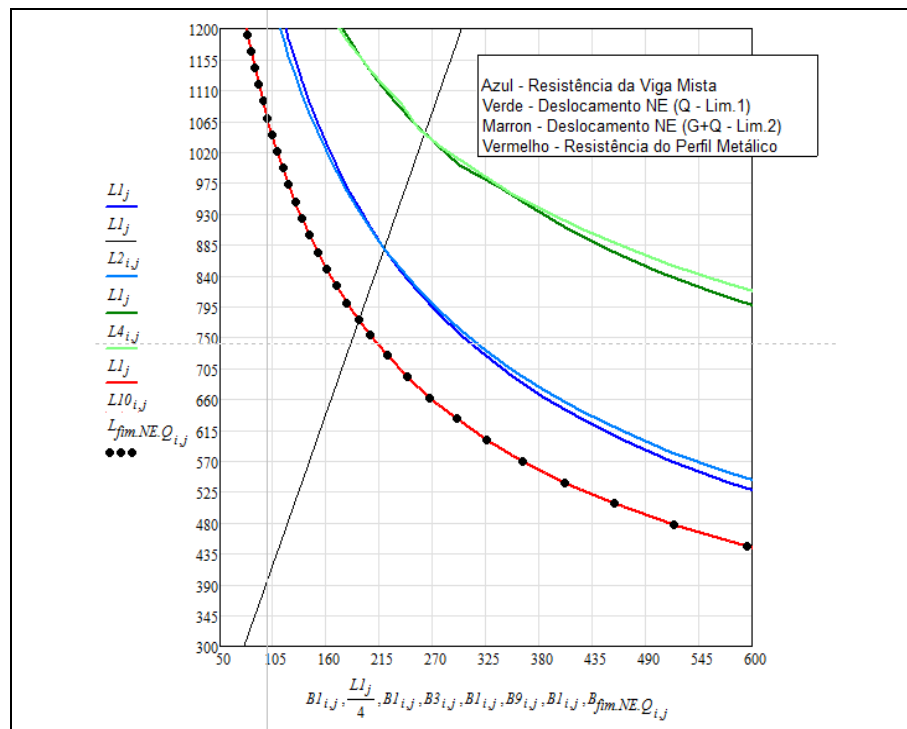


Figura A.12 – Ábaco do Mathcad com as curvas 1, 2, 3, 4, 9 e 10.

9.2. Curvas de pré-dimensionamento FimE, FimNE e FimQ, para construção escorada, não-escorada e com carga sobreposta máxima respectivamente.

9.3. Curvas de pré-dimensionamento com interação parcial Fimp.E, Fimp.NE e FimQ para interação de 90%, 80%, 70% e mínima.

10. Exportação dos dados para Elaboração e tratamento no Excel

Obtidos todos os dados para elaboração das curvas de pré-dimensionamento de cada perfil para os diferentes casos, optou-se por exportar os dados para o Excel a fim de elaborar um padrão de apresentação que fosse agradável, apresentando uma leitura simples.

Para isso foi construída uma tabela no Mathcad, com os dados que devem constar no rotulo de informações de cada ábaco. Na figura do item 10.1.2 mostra-se parte da tabela que construída no Mathcad e na parte inferior da mesma figura observa-se a ferramenta de exportação do Mathcad para o arquivo 'output.1-exported.xls' do Microsoft Excel.

10.1. Curva de Pré-dimensionamento (Vigas Secundárias e Principais),

10.1.1. Dados de entrada (Input - Visualização apenas)

10.1.2. Dados de Saída (Output)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	""	"Tipo Conect:"	1.00	"Tipo da laje:"	2.00	"Q.csm:"	3.00	"Lim:"	350.00	""
1	""	"Diam do Conect:"	19.10	"Esp. da laje:"	14.00	"Desl máx:"	"L/Lim1"	"Tipo de Const:"	"Escorada"	""
2	""	"h Conect:"	130.00	"Concreto:"	20.00	"Ações p/ δ:"	"Q.csm"	"Tipo de Viga:"	"Viga Secundária"	""
3	""	"Tipo do Aço:"	"A-36"	"Série de Perfis:"	"Perfil Laminado"	"g.vs:"	""	""	""	""
4	""	""	""	""	""	""	""	""	""	""
5	""	""	""	""	""	""	""	""	""	""
6	"Tipo de Curva"	"Perfis "	""	""	""	""	""	""	""	""
7	"L.fim.E.Q"	"W 150 x 13,0"	0.06	0.36	0.84	1.30	1.61	1.80	1.89	1.95
8	"L.fim.E.Q"	"W 150 x 18,0"	0.06	0.36	0.84	1.30	1.61	1.80	1.89	1.95
9	"L.fim.E.Q"	"W 150 x 24,0"	0.06	0.36	0.84	1.30	1.61	1.80	1.89	...

Figura A.13 - Tabela do Mathcad com os dados de saída para elaboração dos ábacos.

10.2. Curvas que compõem a curva de pré-dimensionamento (Para Capítulo 4)

Como parte desta dissertação utilizou-se da geração de curvas de pré-dimensionamento para estudar o comportamento das curvas de acordo com a variação dos parâmetros relacionados à viga mista.

Para este estudo elaborou-se mais uma tabela com os dados referentes a cada caso para serem exportados e em seguida analisados no Microsoft Excel. Na figura A.14 apresenta-se parte da tabela dos dados de saída das curvas de comportamento da viga mista.

10.2.1. Dados de entrada (Input - Visualização apenas)

10.2.2. Dados de Saída (Output)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	""	"Tipo Conect.:"	1.0	"Tipo da laje:"	2.0	"q.csm"	3.0	"Tipo de Viga:"	"VS"	""
1	""	"Diam. Conect.:"	19.1	"Esp. da laje:"	14.0	"Lim.2.:"	250.0	"g.vs"	""	""
2	""	"h Conect.:"	130.0	"Concreto.:"	20.0	"Lim.1.:"	350.0	"Tipo do Aço:"	"A-36"	""
3	"Tipo da Curva"	"Perfil"	""	""	""	""	""	""	""	""
4	"L1"	"W 310 x 21,0"	0.1	0.4	0.8	1.3	1.6	1.8	1.9	1.9
5	"L2"	""	0.1	0.4	0.9	1.2	1.4	1.6	1.6	1.6
6	"L4"	""	0.5	1.5	2.5	3.2	3.5	3.7	3.8	3.8
7	"L6"	""	0.5	1.4	2.3	2.9	3.2	3.4	3.5	3.5
8	"L8"	""	0.3	0.9	1.5	1.9	2.1	2.2	2.3	2.3
9	"L10"	""	0.1	0.3	0.7	1.0	1.2	1.3	1.3	...

Figura A.14 - Tabela do Mathcad com os dados de saída para elaboração dos estudos de comportamento de vigas mista.

LISTA DE PERFIS

ANEXO - **A**

Neste Anexo são apresentadas as características dos perfis que são utilizados nessa dissertação.

Perfil	d (mm)	bf _s (mm)	tf _s (mm)	bf _i (mm)	tf _i (mm)	tw (mm)	h (mm)	Área (cm ²)	cg (cm)	I _x (cm ⁴)	W _{xs} (cm ³)	W _{xi} (cm ³)	r _x (cm)	Z _x (cm ³)	I _y (cm ⁴)	W _{ys} (cm ³)	r _y (cm)	z _y (cm)	Massa (kg/m)
W 150 x 13,0	148	100	5	100	5	4	138	16,6	7,4	635,0	85,8	85,8	6,2	96,4	82,0	16,4	2,2	25,5	13,0
W 150 x 18,0	153	102	7	102	7	6	139	23,4	7,7	939,0	122,7	122,7	6,3	139,4	126,0	24,7	2,3	38,5	18,4
W 150 x 22,5	152	152	7	152	7	6	139	29,0	7,6	1229,0	161,7	161,7	6,5	179,6	387,0	50,9	3,7	77,9	22,8
W 150 x 24,0	160	102	10	102	10	7	139	31,5	8,0	1384,0	173,0	173,0	6,6	197,6	183,0	35,9	2,4	55,8	24,7
W 150 x 29,8	157	153	9	153	9	7	138	38,5	7,8	1739,0	221,5	221,5	6,7	247,5	556,0	72,6	3,8	55,8	30,2
W 150 x 37,1	162	154	12	154	12	8	139	47,8	8,1	2244,0	277,0	277,0	6,9	313,5	707,0	91,8	3,8	110,8	37,5
W 200 x 15,0	200	100	5	100	5	4	190	19,4	10,0	1305,0	130,5	130,5	8,2	147,9	87,0	17,4	2,1	140,4	15,2
W 200 x 19,3	203	102	7	102	7	6	190	25,1	10,2	1686,0	166,1	166,1	8,2	190,6	116,0	22,7	2,1	35,9	19,7
W 200 x 22,5	206	102	8	102	8	6	190	29,0	10,3	2029,0	197,0	197,0	8,4	225,5	142,0	27,9	2,2	43,9	22,8
W 200 x 26,6	207	133	8	133	8	6	190	34,2	10,3	2611,0	252,3	252,3	8,7	282,3	330,0	49,6	3,1	76,3	26,8
W 200 x 31,3	210	134	10	134	10	6	190	40,3	10,5	3168,0	301,7	301,7	8,9	338,6	410,0	61,2	3,2	94,0	31,6
W 200 x 35,9	201	165	10	165	10	6	181	45,7	10,1	3437,0	342,0	342,0	8,7	379,2	764,0	92,6	4,1	141,0	35,9
W 200 x 41,7	205	166	12	166	12	7	181	53,5	10,2	4114,0	401,4	401,4	8,8	448,6	901,0	108,5	4,1	165,7	42,0
W 200 x 46,1	203	203	11	203	11	7	181	58,6	10,2	4543,0	447,6	447,6	8,8	495,3	1535,0	151,2	5,1	229,5	46,0
W 200 x 52,0	206	204	13	204	13	8	181	66,9	10,3	5298,0	514,4	514,4	8,9	572,5	1784,0	174,9	5,2	265,8	52,5
W 200 x 59	210	205	14	205	14	9	182	76,0	10,5	6140,0	584,8	584,8	9,0	655,9	2041,0	199,1	5,2	303,0	59,7
W 200 x 71,0	216	206	17	206	17	10	181	91,0	10,8	7660,0	709,3	709,3	9,2	803,2	2537,0	246,3	5,3	374,5	71,4
W 200 x 86,0	222	209	21	209	21	13	181	110,9	11,1	9498,0	855,7	855,7	9,3	984,2	3139,0	300,4	5,3	458,7	87,1
W 250 x 17,9	251	101	5	101	5	5	240	23,1	12,5	2291,0	182,5	182,5	10,0	211,0	91,0	18,1	2,0	28,8	18,1
W 250 x 22,3	254	102	7	102	7	6	240	28,9	12,7	2939,0	231,4	231,4	10,1	267,7	123,0	24,1	2,1	38,4	22,7
W 250 x 25,3	257	102	8	102	8	6	240	32,6	12,8	3473,0	270,3	270,3	10,3	311,1	149,0	29,3	2,1	46,4	25,6
W 250 x 28,4	260	102	10	102	10	6	240	36,6	13,0	4046,0	311,2	311,2	10,5	357,3	178,0	34,8	2,2	54,9	28,7
W 250 x 32,7	258	146	9	146	9	6	240	42,1	12,9	4937,0	382,7	382,7	10,8	428,5	473,0	64,8	3,4	99,7	33,0
W 250 x 38,5	262	147	11	147	11	7	240	49,6	13,1	6057,0	462,4	462,4	11,1	517,8	594,0	80,8	3,5	124,1	38,9
W 250 x 44,8	266	148	13	148	13	8	240	57,6	13,3	7158,0	538,2	538,2	11,2	606,3	704,0	95,1	3,5	146,4	45,2
W 250 x 73,0	253	254	14	254	14	9	225	92,7	12,7	11257,0	889,9	889,9	11,0	983,3	3880,0	305,5	6,5	463,1	72,8
W 250 x 80,0	256	255	16	255	16	9	225	101,9	12,8	12550,0	980,5	980,5	11,1	1088,7	4313,0	338,3	6,5	513,1	80,0
W 250 x 89,0	260	256	17	256	17	11	225	113,9	13,0	14237,0	1095,2	1095,2	11,2	1224,4	4841,0	378,2	6,5	574,3	89,4
W 250 X 101,0	264	257	20	257	20	12	225	128,7	13,2	16352,0	1238,8	1238,8	11,3	1395,0	5549,0	431,8	6,6	656,3	101,0
W 250 X 115,0	269	259	22	259	22	14	225	146,1	13,5	18920,0	1406,7	1406,7	11,4	1597,4	6405,0	494,6	6,6	752,7	114,7

Perfil	d (mm)	bf _s (mm)	tf _s (mm)	bf _i (mm)	tf _i (mm)	tw (mm)	h (mm)	Área (cm ²)	cg (cm)	I _x (cm ⁴)	W _{xs} (cm ³)	W _{xi} (cm ³)	r _x (cm)	Z _x (cm ³)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	z _y (cm)	Massa (kg/m)
W 310 x 21,0	303	101	6	101	6	5	292	27,2	15,2	3776,0	249,2	249,2	11,8	291,9	98,0	19,5	1,9	31,4	21,4
W 310 x 23,8	305	101	7	101	7	6	292	30,7	15,3	4346,0	285,0	285,0	11,9	333,2	116,0	22,9	1,9	36,9	24,1
W 310 x 28,3	309	102	9	102	9	6	291	36,5	15,4	5500,0	356,0	356,0	12,3	412,0	158,0	31,0	2,1	49,4	28,7
W 310 x 32,7	313	102	11	102	11	7	291	42,1	15,6	6570,0	419,8	419,8	12,5	485,3	192,0	37,6	2,1	59,8	33,0
W 310 x 38,7	310	165	10	165	10	6	291	49,7	15,5	8581,0	553,6	553,6	13,1	615,4	727,0	88,1	3,8	134,9	39,0
W 310 x 44,5	313	166	11	166	11	7	291	57,2	15,7	9997,0	638,8	638,8	13,2	712,8	855,0	103,0	3,9	158,0	44,9
W 310 x 52,0	317	167	13	167	13	8	291	67,0	15,9	11909,0	751,4	751,4	13,3	842,5	1026,0	122,9	3,9	188,8	52,6
W 310 x 97,0	308	305	15	305	15	10	277	123,6	15,4	22284,0	1447,0	1447,0	13,4	1594,2	7286,0	477,8	7,7	725,0	97,0
W 310 x 107,0	311	306	17	306	17	11	277	136,4	15,6	24839,0	1597,4	1597,4	13,5	1768,2	8123,0	530,9	7,7	806,1	107,1
W 310 x 117,0	314	307	19	307	19	12	277	149,9	15,7	27563,0	1755,6	1755,6	13,6	1952,6	9024,0	587,9	7,8	893,1	117,7
W 360 x 32,9	349	127	9	127	9	6	332	42,1	17,5	8358,0	479,0	479,0	14,1	547,6	291,0	45,9	2,6	72,0	33,0
W 360 x 39,0	353	128	11	128	11	7	332	50,2	17,7	10331,0	585,3	585,3	14,4	667,7	375,0	58,6	2,7	91,9	39,4
W 360 x 44,0	352	171	10	171	10	7	332	57,7	17,6	12258,0	696,5	696,5	14,6	784,3	818,0	95,7	3,8	148,0	45,3
W 360 x 51,0	355	171	12	171	12	7	332	64,8	17,8	14222,0	801,2	801,2	14,8	899,5	968,0	113,3	3,9	174,7	50,9
W 360 x 57,8	358	172	13	172	13	8	332	72,5	17,9	16143,0	901,8	901,8	14,9	1014,8	1113,0	129,4	3,9	199,8	56,9
W 360 x 64,0	347	203	14	203	14	8	320	81,7	17,4	17890,0	1031,1	1031,1	14,8	1145,5	1885,0	185,7	4,8	284,5	64,1
W 360 x 72,0	350	204	15	204	15	9	320	91,3	17,5	20169,0	1152,5	1152,5	14,9	1285,9	2140,0	209,8	4,8	321,8	71,7
W 360 x 79,0	354	205	17	205	17	9	320	101,2	17,7	22713,0	1283,2	1283,2	15,0	1437,0	2416,0	235,7	4,9	361,9	79,4
W 360 x 91,0	353	254	16	254	16	10	320	115,9	17,6	26755,0	1515,9	1515,9	15,2	1680,1	4483,0	353,0	6,2	538,1	91,0
W 360 x 101,0	357	255	18	255	18	11	320	129,5	17,8	30279,0	1696,3	1696,3	15,3	1888,9	5063,0	397,1	6,3	606,1	101,7
W 360 x 110,0	360	256	20	256	20	11	320	140,6	18,0	33155,0	1841,9	1841,9	15,4	2059,3	5570,0	435,2	6,3	664,5	110,4
W 360 x 122,0	363	257	22	257	22	13	320	155,3	18,2	36599,0	2016,5	2016,5	15,4	2269,8	6147,0	478,4	6,3	732,4	121,9
W 410 x 38,8	399	140	9	140	9	6	381	50,3	19,9	12777,0	640,5	640,5	15,9	736,8	404,0	57,7	2,8	90,9	39,5
W 410 x 46,1	403	140	11	140	11	7	381	59,2	20,2	15690,0	778,7	778,7	16,3	891,1	514,0	73,4	3,0	115,2	46,5
W 410 x 53,0	403	177	11	177	11	8	381	68,4	20,1	18734,0	929,7	929,7	16,6	1052,2	1009,0	114,0	3,8	176,9	53,7
W 410 x 60,0	407	178	13	178	13	8	381	76,2	20,3	21707,0	1066,7	1066,7	16,9	1201,5	1205,0	135,4	4,0	209,2	59,8
W 410 x 67,0	410	179	14	179	14	9	381	86,3	20,5	24678,0	1203,8	1203,8	16,9	1362,7	1379,0	154,1	4,0	239,0	67,7
W 410 x 75,0	413	180	16	180	16	10	381	95,8	20,7	27616,0	1337,3	1337,3	17,0	1518,6	1559,0	173,2	4,0	269,1	75,2
W 410 x 85,0	417	181	18	181	18	11	381	108,6	20,9	31658,0	1518,4	1518,4	17,1	1731,7	1804,0	199,3	4,1	310,4	85,3
W 460 x 52,0	450	152	11	152	11	8	428	66,6	22,5	21370,0	949,8	949,8	17,9	1095,9	634,0	83,5	3,1	131,7	52,3

Perfil	d (mm)	bf _s (mm)	tf _s (mm)	bf _i (mm)	tf _i (mm)	tw (mm)	h (mm)	Área (cm ²)	cg (cm)	I _x (cm ⁴)	W _{xs} (cm ³)	W _{xi} (cm ³)	r _x (cm)	Z _x (cm ³)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	z _y (cm)	Massa (kg/m)
W 460 x 60,0	455	153	13	153	13	8	428	76,2	22,7	25652,0	1127,6	1127,6	18,4	1292,1	796,0	104,1	3,2	163,4	59,8
W 460 x 68,0	459	154	15	154	15	9	428	87,6	22,9	29851,0	1300,7	1300,7	18,5	1495,4	941,0	122,2	3,3	192,4	68,8
W 460 x 74,0	457	190	15	190	15	9	428	94,9	22,9	33415,0	1462,4	1462,4	18,8	1657,4	1661,0	174,8	4,2	271,3	74,5
W 460 x 82,0	460	191	16	191	16	10	428	104,7	23,0	37157,0	1615,5	1615,5	18,8	1836,4	1862,0	195,0	4,2	303,3	82,2
W 460 x 89,0	463	192	18	192	18	11	428	114,1	23,2	41105,0	1775,6	1775,6	19,0	2019,4	2093,0	218,0	4,3	339,0	89,6
W 460 x 97,0	466	193	19	193	19	11	428	123,4	23,3	44658,0	1916,7	1916,7	19,0	2187,4	2283,0	236,6	4,3	368,8	96,9
W 460 x 106,0	469	194	21	194	21	13	428	135,1	23,5	48978,0	2088,6	2088,6	19,0	2394,6	2515,0	259,3	4,3	405,7	106,1
W 530 x 66,0	525	165	11	165	11	9	502	83,6	26,2	34971,0	1332,2	1332,2	20,5	1558,0	857,0	103,9	3,2	166,0	65,6
W 530 x 72,0	524	207	11	207	11	9	502	91,6	26,2	39969,0	1525,5	1525,5	20,9	1755,9	1615,0	156,0	4,2	244,6	71,9
W 530 x 74,0	529	166	14	166	14	10	502	95,1	26,5	40969,0	1548,9	1548,9	20,8	1804,9	1041,0	125,5	3,3	200,1	74,7
W 530 x 82,0	528	209	13	209	13	10	501	104,5	26,4	47569,0	1801,9	1801,9	21,3	2058,5	2028,0	194,1	4,4	302,7	82,0
W 530 x 85,0	535	166	17	166	17	10	502	107,7	26,8	48453,0	1811,3	1811,3	21,2	2099,8	1263,0	152,2	3,4	241,6	84,5
W 530 x 92,0	533	209	16	209	16	10	502	117,6	26,7	55157,0	2069,7	2069,7	21,7	2359,8	2379,0	227,6	4,5	354,7	92,3
W 530 x 101,0	537	210	17	210	17	11	502	130,0	26,8	62198,0	2316,5	2316,5	21,9	2640,4	2693,0	256,5	4,6	400,6	102,1
W 530 x 109,0	539	211	19	211	19	12	501	139,7	26,9	67226,0	2494,5	2494,5	21,9	2847,0	2952,0	279,8	4,6	437,4	109,7
W 610 x 101,0	603	228	15	228	15	11	573	130,3	30,1	77003,0	2554,0	2554,0	24,3	2922,7	2951,0	258,8	4,8	405,0	102,3
W 610 x 113,0	608	228	17	228	17	11	573	145,3	30,4	88196,0	2901,2	2901,2	24,6	3312,9	3426,0	300,5	4,9	469,7	114,1
W 610 x 125,0	612	229	20	229	20	12	573	160,1	30,6	99184,0	3241,3	3241,3	24,9	3697,3	3933,0	343,5	5,0	536,3	125,7
W 610 x 140,0	617	230	22	230	22	13	573	179,3	30,9	112619,0	3650,5	3650,5	25,1	4173,1	4515,0	392,6	5,0	614,0	140,8
W 610 x 155,0	611	324	19	324	19	13	573	198,1	30,6	129583,0	4241,7	4241,7	25,6	4749,1	10783,0	665,6	7,4	#####	155,5
W 610 x 174,0	616	325	22	325	22	14	573	222,8	30,8	147754,0	4797,2	4797,2	25,8	5383,3	12374,0	761,5	7,5	#####	174,9