

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

LILIANE DO ROCIO MARCONCIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO

CURITIBA

2008

LILIANE DO ROCIO MARCONCIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio Marino

CURITIBA

2008

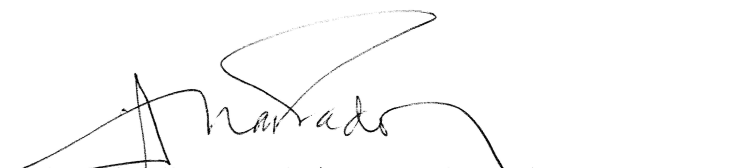
TERMO DE APROVAÇÃO

LILIANE DO ROCIO MARCONCIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO

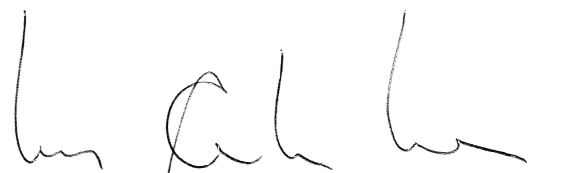
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado
Departamento de Construção Civil, UFPR

Co-orientador:



Prof. Dr. Marcos Antonio Marino
Departamento de Construção Civil, UFPR



Prof. Dr. Yuri Ivan Maggi
Departamento de Engenharia Civil, UP

Curitiba, 04 de abril de 2008.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao Dr. Rodrigo de Azevêdo Neves pela amizade, incentivo e orientação no início do mestrado.

Ao meu orientador Dr. Roberto Machado Dalledone, por todo o ensinamento transmitido e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Marcos Antonio Marino, por ter aceitado o convite de co-orientação deste trabalho.

Aos Programas de Pós-Graduação em Construção Civil e em Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e contribuição à formação científica e pessoal.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos os professores pelo embasamento teórico e incentivo.

As secretárias Ziza e Maristela, pelos ótimos serviços prestados.

Aos colegas Fábio Alceu e Mário Sérgio, pelas tardes de estudo na biblioteca e momentos de descontração.

Ao Márcio Burigo pela amizade, companhia nas aulas e nas tardes de espera por orientação.

Ao João Gabriel, pelos momentos de estudo.

Aos colegas Emílio e Felipe, pelas dicas de uso do ANSYS.

Aos meus queridos pais Amauri e Maria do Rocio pela minha formação moral e apoio em todos os momentos de minha vida.

As minhas irmãs, Solange e Elizete, pelo incentivo e motivação.

Ao Alexandre Mikio, pela consultoria em informática.

A todos que direta ou indiretamente apoiaram a conclusão deste curso.

RESUMO

As vigas mistas aço-concreto são constituídas pela associação de um perfil metálico com uma laje de concreto, ligados entre si por conectores de cisalhamento, visando aproveitar as vantagens estruturais dos materiais. Nesse contexto, este trabalho procurou verificar a influência do número, diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento, no comportamento estrutural de vigas mistas, através de modelagem numérica, comparando os resultados obtidos com os previstos por norma. Para isso, adotaram-se modelos tridimensionais de vigas mistas simplesmente apoiadas, com laje plana, interação completa e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, sujeitas a dois tipos de carregamentos: concentrado no meio do vão e uniformemente distribuído entre os apoios. As simulações foram realizadas no software ANSYS versão 10.0, que tem como base o Método de Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram comparados com referências encontradas na revisão bibliográfica, verificando-se que a modelagem numérica é uma ferramenta válida para a análise de vigas mistas aço-concreto.

Palavras-Chave: Vigas Mistas. Modelagem Numérica. Elementos Finitos (EF). Conectores de Cisalhamento.

ABSTRACT

Steel-concrete composite beams are constituted by the association of a steel profile with a concrete slab, connected by means of shear connectors, providing better management of each structural material. In this context, the propose of this work is to verify the influence of the number, diameter and height of the shear connectors, on the structural behavior of composite beams, by numerical modeling, and comparing numerical results with those provided by Standards. For this purpose three-dimensional models of simply supported composite beam with plain faces, complete shear connection and stud bolt shear connectors were adopted. The beams were subject to a midspan point load and uniformly distributed loads. Simulations had been carried out by means of the ANSYS software, version 10.0, based on the Finite Element Method. Results were compared with references found in the literature. Reported results demonstrate that the numerical approach is a valid tool to analyze the behavior of steel-concrete composite beams.

Key words: Composite Beams. Numerical Modeling. Finite Element (FE). Shear Connectors.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – LAJE MISTA AÇO-CONCRETO	23
FIGURA 2.2 – LIGAÇÕES MISTAS	24
FIGURA 2.3 – SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS DE PILARES MISTOS	25
FIGURA 2.4 – VIGAS MISTAS COM LAJE MACIÇA	27
FIGURA 2.5 – VIGAS MISTAS FLETIDAS	28
FIGURA 2.6 – ALTURA MÍNIMA DOS CONECTORES TIPO PINO COM CABEÇA.....	29
FIGURA 2.7 – RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO NOS CONECTORES DE CISALHAMENTO	29
FIGURA 2.8 – TIPOS USUAIS DE CONECTORES.....	30
FIGURA 2.9 – TRANSFERÊNCIA DE FORÇAS DE CISALHAMENTO LONGITUDINAL E DEFORMAÇÃO DO CONECTOR TIPO PINO COM CABEÇA.....	31
FIGURA 2.10 – TIPOS DE FISSURAÇÃO NA LAJE DEVIDO À FORÇA CONCENTRADA ...	32
FIGURA 2.11 – DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS TRANSVERSAIS (ADICIONAIS) NA LAJE DE CONCRETO.....	33
FIGURA 2.12 – EQUILÍBRIO LONGITUDINAL DE FORÇAS	34
FIGURA 2.13 – INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO.....	36
FIGURA 2.14 – VIGAS MISTAS ESCORADAS	37
FIGURA 2.15 – VIGAS MISTAS NÃO ESCORADAS.....	38
FIGURA 2.16 – VIGA MISTA PROPOSTA	40
FIGURA 2.17 – ELEMENTO MISTO.....	41
FIGURA 2.18 – MODELO CINEMÁTICO DE NEWMARK.....	47
FIGURA 2.19 – ELEMENTO FINITO	50
FIGURA 2.20 – FLAMBAGEM LOCAL E TORSIONAL DE VIGA MISTA EM FLEXÃO NEGATIVA	52
FIGURA 3.1 – DIMENSÕES (MM) DOS MODELOS SIMULADOS	56
FIGURA 3.2 – ELEMENTO SOLID 65	58
FIGURA 3.3 – ELEMENTO SHELL 43.....	59
FIGURA 3.4 – ELEMENTO BEAM 189	59
FIGURA 3.5 – ELEMENTO TARGE 170 E CONTA 173	60
FIGURA 3.6 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DO PERFIL	63
FIGURA 3.7 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DOS CONECTORES	63
FIGURA 3.8 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DA ARMADURA.....	64
FIGURA 3.9 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O CONCRETO	65
FIGURA 3.10 – DISCRETIZAÇÃO DO CONECTOR DE CISALHAMENTO.....	68
FIGURA 3.11 – DISCRETIZAÇÃO DA LAJE DE CONCRETO E DA VIGA DE AÇO	69
FIGURA 3.12 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	70
FIGURA 3.13 – ACOPLAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS	70
FIGURA 3.14 – RESTRIÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE PELA CONDIÇÃO DE SIMETRIA	71
FIGURA 3.15 – CONDIÇÃO DE SIMETRIA E VINCULAÇÃO NO APOIO	72
FIGURA 3.16 – CARREGAMENTO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS.....	73
FIGURA 3.17 – CARREGAMENTO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS	74
FIGURA 4.1 – GRÁFICO FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A VIGA A3	78
FIGURA 4.2 – GRÁFICO FORÇA-DESLIZAMENTO PARA A VIGA A3.....	79
FIGURA 4.3 – GRÁFICO FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A VIGA U3	79
FIGURA 4.4 – GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS DA VIGA A3.....	80
FIGURA 4.5 – GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS DA VIGA U3	80
FIGURA 4.6 – TENSÕES DE VON MISES PARA A LAJE DA VIGA A3.....	81
FIGURA 4.7 – TENSÕES DE VON MISES PARA A LAJE DA VIGA U3.....	82

FIGURA 4.8 –	DEFORMAÇÕES NO CONECTOR A 145,83 CM DO CENTRO DA VIGA A3.....	83
FIGURA 4.9 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM.....	85
FIGURA 4.10 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM.....	86
FIGURA 4.11 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM.....	87
FIGURA 4.12 –	PRIMEIRAS FISSURAS IDENTIFICADAS NOS ELEMENTOS DA LAJE DE CONCRETO DA VIGA A3 – CARGA DE 106,56 KN	88
FIGURA 4.13 –	FISSURAS TRANSVERSAIS (DIREÇÃO Z), POR FENDILHAMENTO E POR CISALHAMENTO NA LAJE DA VIGA A3 – CARGA DE 134,72 KN.....	89
FIGURA 4.14 –	FISSURAS PARA O ÚLTIMO PASSO DE CARGA ALCANÇADO PELA VIGA A3 – CARGA DE 448,64 KN	90
FIGURA 4.15 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM	92
FIGURA 4.16 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19 MM	93
FIGURA 4.17 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22 MM	94
FIGURA 4.18 –	PRIMEIRAS FISSURAS IDENTIFICADAS NOS ELEMENTOS DA LAJE DE CONCRETO DA VIGA U3 – CARGA DE 205,92 KN	95
FIGURA 4.19 –	FISSURAS TRANSVERSAIS (DIREÇÃO Z), POR FENDILHAMENTO E POR CISALHAMENTO NA LAJE DA VIGA U3 – CARGA DE 477,38 KN	96
FIGURA 4.20 –	FISSURAS PARA O ÚLTIMO PASSO DE CARGA ALCANÇADO PELA VIGA U3 – CARGA DE 880,94 KN	97
FIGURA 4.21 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800.....	99
FIGURA 4.22 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800.....	100
FIGURA 4.23 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800.....	101
FIGURA 4.24 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800.....	103
FIGURA 4.25 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800.....	104
FIGURA 4.26 –	GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800.....	105
FIGURA 4.27 –	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM	114
FIGURA 4.28 –	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM	115
FIGURA 4.29 –	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM	116

FIGURA 4.30 –	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM	118
FIGURA 4.31–	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM	119
FIGURA 4.32 –	GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM	120

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	61
QUADRO 3.2 – PARÂMETROS DO MODELO <i>CONCRETE</i>	65
QUADRO 4.1 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM	83
QUADRO 4.2 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM	84
QUADRO 4.3 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM	84
QUADRO 4.4 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM	90
QUADRO 4.5 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19 MM	91
QUADRO 4.6 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22 MM	91
QUADRO 4.7 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800*	98
QUADRO 4.8 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800*	98
QUADRO 4.9 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800	98
QUADRO 4.10 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800*	102
QUADRO 4.11 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800*	102
QUADRO 4.12 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800	102
QUADRO 4.13 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16MM – NBR 8800*	106
QUADRO 4.14 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19MM – NBR 8800*	106
QUADRO 4.15 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22MM – NBR 8800	106
QUADRO 4.16 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16MM – NBR 8800*	107
QUADRO 4.17 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19MM – NBR 8800*	107
QUADRO 4.18 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22MM – NBR 8800	107
QUADRO 4.19 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA AS VIGAS A3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ALTURA (H) DOS CONECTORES	109
QUADRO 4.20 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA AS VIGAS A3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO (Ø) DOS CONECTORES.....	110
QUADRO 4.21 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A VIGA U3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ALTURA (H) DOS CONECTORES.....	110
QUADRO 4.22 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A VIGA U3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO (Ø) DOS CONECTORES.....	111
QUADRO 4.23 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES Ø=16 MM	113
QUADRO 4.24 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES Ø=19 MM	113
QUADRO 4.25 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES Ø=22 MM	114
QUADRO 4.26 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS U3 - CONECTORES Ø=16 MM	117
QUADRO 4.27 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS U3 - CONECTORES Ø=19 MM	117

QUADRO 4.28 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA A VIGA U3 - CONECTORES Ø=22 MM	117
------------------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	- American Institute of Steel Construction
EF	- Elementos Finitos
EUROCODE	- European Code
LRFD	- Load and Resistance Factor Design
MEF	- Método dos Elementos Finitos
NBR	- Norma Brasileira Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	GENERALIDADES	13
1.2	OBJETIVOS	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.1	O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.1.2	O USO DO CONCRETO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.1.3	ESTRUTURAS MISTAS	20
2.1.4	LAJES MISTAS	22
2.1.5	LIGAÇÕES MISTAS	23
2.1.6	PILARES MISTOS	25
2.1.7	VIGAS MISTAS	26
3	MODELAGEM NUMÉRICA	55
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	56
3.2	ELEMENTOS FINITOS ADOTADOS NA MODELAGEM NUMÉRICA	57
3.2.1	ELEMENTO SOLID 65	58
3.2.2	ELEMENTO SHELL 43	58
3.2.3	ELEMENTO BEAM 189	59
3.2.4	ELEMENTO TARGE 170 E CONTA 173	60
3.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	61
3.4	RELAÇÕES CONSTITUTIVAS	62
3.4.1	AÇO DO PERFIL	62
3.4.2	AÇO DOS CONECTORES	63
3.4.3	AÇO DA ARMADURA	64
3.4.4	CONCRETO	64
3.5	CONTATO ENTRE LAJE E VIGA	66
3.6	DISCRETIZAÇÃO E MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS ADOTADOS	67
3.7	ACOPLAMENTOS E VINCULAÇÕES	70
3.8	CARREGAMENTO	72
3.9	ANÁLISE NÃO LINEAR	74
4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	76
4.1	RESULTADOS	77
4.1.1	PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES	78
4.1.2	SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES	83
4.1.3	TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES	97
4.2	DISCUSSÃO	108
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
5.1	CONCLUSÕES	121
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS	124
	ANEXOS	

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Em meados do século passado, procurou-se tirar proveito dos sistemas construtivos em aço, que apresentam boa resistência à tração, e em concreto, cuja resistência à compressão é característica fundamental. Pela associação entre elementos de concreto armado e perfis metálicos nasceram os sistemas mistos.

De uma forma geral, os sistemas mistos aço-concreto envolvem o trabalho conjunto de elementos de concreto e perfis metálicos, cuja interação pode ser feita por meios mecânicos (conectores, mossas, ressaltos), por atrito ou por aderência.

As vigas mistas, em particular, são constituídas pela associação de um perfil metálico (geralmente um perfil “I”), situado em região predominantemente tracionada, com uma laje de concreto, situada em região predominantemente comprimida, cuja ligação mecânica é feita por dispositivos metálicos denominados de conectores de cisalhamento.

As características do aço e do concreto associadas se complementam e, portanto, do ponto de vista da resistência dos materiais, é possível tirar grande proveito da seção de aço para resistir aos esforços de tração e do concreto para os esforços de compressão. Com isso, obtêm-se elementos de elevada rigidez, que possibilitam uma melhor previsão e concepção de vãos, redução da altura dos elementos estruturais, de flechas e, conseqüentemente peso, conduzindo a um projeto com fundações mais leves, gerando ganhos de desempenho e economia. Além dessas características, os sistemas mistos possibilitam a dispensa de fôrmas e escoramentos, maior precisão dimensional da construção, pelo caráter industrializado dos perfis metálicos, e redução das proteções contra incêndio e corrosão do aço, pela presença e atuação do concreto no sistema misto.

Os primeiros edifícios a lançar mão do sistema misto, no Brasil, foram construídos na década de 50. Porém, nos últimos 20 anos, com o aquecimento na produção de aço, observado pela disponibilidade de perfis metálicos no mercado nacional, a demanda pelo sistema cresceu vertiginosamente.

Com isso, abre-se um grande campo de pesquisas, onde vários estudos poderão ser realizados. A presente dissertação enquadra-se nesse contexto, no sentido de analisar as vigas mistas numericamente, estudando-as de maneira aprofundada. A idéia central deste trabalho é modelar vigas mistas através do código de cálculo ANSYS 10.0, que tem como base o Método dos Elementos Finitos.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem por objetivo principal simular o comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto, levando-se em consideração a interface laje-viga, através de modelagem numérica.

Esse objetivo, em termos gerais, equivale a conhecer melhor o comportamento estrutural (mecânico) das vigas mistas.

Especificamente, pretende-se verificar a influência do número, diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento no comportamento estrutural das vigas mistas, comparando os resultados obtidos com os previstos por norma e com os de outras referências encontradas na revisão bibliográfica. Esta verificação será realizada pela análise do deslizamento longitudinal na interface laje-viga, do deslocamento vertical no meio do vão (flecha) e da capacidade de carregamento das vigas mistas.

Os modelos numéricos contemplarão vigas mistas aço-concreto, simplesmente apoiadas, de alma compacta, com grau de interação total, laje plana de concreto armado com armadura nas duas direções (transversal e longitudinal), conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e dois tipos de carregamentos: concentrado no meio do vão e uniformemente distribuído entre os apoios. Esses modelos também podem ser adotados para análise do comportamento estrutural de outras configurações de vigas mistas e situações de carregamento. No entanto, não se podem extrapolar os dados obtidos neste trabalho para quaisquer outros elementos de estruturas mistas, tais como lajes mistas ou pilares mistos.

Não são considerados nos problemas simulados os efeitos do concreto nas primeiras idades e a deformação lenta do mesmo, ou seja, os modelos contemplam o concreto já endurecido. E, ainda, não são levadas em conta nas simulações as flambagens do perfil metálico.

A contextualização do estudo proposto, cujas generalidades estão descritas neste capítulo, foi obtida através de uma vasta revisão bibliográfica, cuja fundamentação teórica é apresentada no Capítulo 2. Embora a pesquisa englobe as características dos materiais isoladamente e das estruturas mistas, o enfoque são as vigas mistas aço-concreto e suas características, segundo a literatura.

Seqüencialmente, descreve-se no Capítulo 3 o Método dos Elementos Finitos (MEF) e apresentam-se os aspectos da modelagem das vigas mistas. Dois modelos de vigas foram considerados, um com carregamento concentrado no meio do vão e outro com carregamento distribuído uniformemente entre os apoios, ao longo do vão da viga mista. Para cada um dos modelos foram adotados três valores de diâmetros e alturas para os conectores de cisalhamento. Alguns dos modelos simulados adotaram, ainda, a variação no número de conectores.

Posteriormente, o Capítulo 4 expõe os resultados dos modelos numéricos simulados no aplicativo computacional ANSYS 10.0. Esses resultados também são comparados com o Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) e dados obtidos em outros trabalhos pesquisados e discutidos.

No quinto capítulo estão as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por último são apresentadas as referências utilizadas na concretização da dissertação e os anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 O uso do aço na construção civil

O ferro foi obtido pela primeira vez em civilizações como as do Egito, Babilônia e Índia, há aproximadamente 6 mil anos e só mais tarde tornou-se o primeiro material siderúrgico empregado na construção civil. Sua principal utilização foi na construção de pontes em arcos trabalhando à compressão, fato que ocorreu no final do século XVIII e início do século XIX. Um marco dessa tecnologia foi a ponte em Coalbrookdale na Inglaterra, construída em 1779, citada no trabalho de Bellei *et al.* (2004) como a primeira obra construída em ferro. Só na metade do século XIX o ferro fundido foi substituído pelo ferro laminado que oferecia maior segurança devido a melhoria da qualidade da matéria-prima (VASCONCELLOS, 2005). A indústria chegou a esse material por meio de uma procura constante por peças de melhores características, o que se deu em função do número de acidentes que ocorriam nas obras devido às falhas estruturais quando do emprego de materiais menos resistentes.

O aço, obtido pela fusão do minério de ferro com carvão vegetal, era pouco utilizado, pois a falta de um processo industrial de fabricação tornava o seu uso economicamente inviável. Sua aplicação era limitada a utensílios considerados de importância vital, como as lâminas de espada (METÁLICA TÉCNICA, 2008). No entanto, de acordo com Dias (2001), em 1856 o inglês Henry Bessemer idealizou um forno que possibilitava a produção do aço em larga escala com um custo significativamente menor (por volta de sete vezes menos) do valor que vigorava antes da implantação do mesmo. Porém verificou-se que este processo só poderia ser aplicado a minérios com alto teor de ferro. Mais tarde, os irmãos Martin reformularam o forno de Bessemer. O aço, então, passou a ser produzido a partir da

mistura de sucata de ferro e ferro gusa. Segundo Pfeil e Pfeil (2000), este advento, permitiu a substituição do ferro pelo aço, na construção. Mais tarde, com as melhorias incorporadas no processo de fabricação do aço, foi possível ampliar a variedade dos produtos. Foram incorporados aos aços-carbono, manganês, cromo e níquel, por exemplo, constituindo os aços de classes especiais (DIAS, 2001).

No Brasil, segundo Bellei (2004), o início da fabricação em ferro ocorreu em 1812 e a primeira aplicação do ferro fundido foi a Ponte de Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro, que apresenta cinco vãos de trinta metros e cuja construção data de 1857.

A partir de 1851, em Londres, iniciou-se a era dos grandes edifícios metálicos, com a construção do Palácio de Cristal (BELLEI *et al.*, 2004). No entanto, a obra marco da construção de edifícios de múltiplos andares, foi a fábrica de chocolates de Noisiel-Sur-Name, em 1872, perto de Paris, segundo Bellei *et al.* (2004). Já no Brasil, cerca de trinta anos após a construção do Palácio de Cristal de Londres, foi construído um edifício todo em ferro e vidro, numa praça em Petrópolis, no Rio de Janeiro (METÁLICA TÉCNICA, 2008).

O avanço da construção metálica se deu a partir da metade do século XX com o aperfeiçoamento das formas e teorias estruturais, com o aprimoramento das metalúrgicas e com a invenção da solda elétrica, bem como com o desenvolvimento de parafusos de alta resistência, contribuindo para a utilização do aço na construção civil (VASCONCELLOS, 2005).

Do ponto de vista de recomendações normativas, o Brasil caminha alguns passos atrás de países desenvolvidos. Com o objetivo de fornecer as bases para a correta aplicação dos critérios de projetos de estruturas metálicas em âmbito nacional, Pfeil e Pfeil (2000) apresentam em seu trabalho, conceitos teóricos focalizando a NBR 8800 e referindo-se, em alguns casos, às normas americana AISC e européias EUROCODE 3 e EUROCODE 4. Os critérios de projeto apresentados enquadram-se no Método dos Estados Limites. Nesse sentido, para divulgar a evolução do uso do aço, Dias (2001) explora em seu trabalho os aspectos arquitetônicos e estruturais de algumas edificações brasileiras da última década. No trabalho são apresentados diversos exemplos que servem de consulta e orientação técnica para o entendimento arquitetônico e estrutural de cada obra metálica citada.

Num outro trabalho, Dias (2002) discorre sobre as estruturas metálicas, procurando estimular e motivar a utilização do aço na construção civil. Aspectos de produção do aço, sistemas estruturais, projeto e fabricação das estruturas metálicas

e os materiais destinados à vedação dos elementos estruturais são abordados, inclusive com exemplos de aplicações. A prevenção à corrosão, sistemas de pintura e segurança contra incêndio também são descritos. Além disso, são apresentados detalhes construtivos e problemas típicos que ocorrem no sistema estruturado em aço, com suas respectivas soluções de forma a facilitar a compreensão da tecnologia de aplicação das estruturas metálicas.

Por outro lado, a finalidade de Bellei *et al.* (2004) foi a de fornecer condições para o desenvolvimento de um projeto completo de um edifício de múltiplos andares em aço. Neste trabalho o projeto e execução de estruturas de edifícios comerciais e residenciais de pequeno e médio porte são descritos. Toda a concepção e cálculo das estruturas estão baseados na segunda edição da especificação do AISC-LRFD (1993), já que a atual NBR 8800 (1986) está em processo de revisão. Para a concretização do projeto são abordadas as ligações entre os elementos estruturais, proteção contra corrosão e ação do fogo. Processos de montagem de edifícios com indicação de uso de equipamentos e noções sobre orçamento, planejamento e controle de obras também são abordados. Nos apêndices encontram-se, além das tabelas de perfis e especificações do AISC-LRFD, tolerâncias de fabricação e montagem e um projeto completo de um edifício comercial em aço, incluindo a memória de cálculo, orçamento e o planejamento do edifício.

Numa outra oportunidade, Bellei (2004) abordou aspectos construtivos e de cálculo para edifícios industriais em aço, possibilitando o desenvolvimento de projetos. A concepção de cálculo também adota a especificação do AISC-LRFD, passando pelo histórico das estruturas de aço, suas propriedades estruturais, as ligações da estrutura, pelas combinações de carga e pelas partes que compõem um edifício industrial. O trabalho termina com o detalhamento, a fabricação, a proteção e a montagem da estrutura. Ainda são apresentados, nos apêndices, o resumo da especificação do AISC, tabelas de comprimento de flambagem para colunas, tabelas gerais de perfis, chapas de piso e o projeto completo com memória de cálculo de todas as peças que compõem um edifício industrial.

2.1.2 O uso do concreto na construção civil

De acordo com Neville (1997), o primeiro concreto da história, utilizado pelos gregos e romanos, resultou inicialmente da mistura de cal, água, areia e pedra fragmentada e, posteriormente adicionou-se cinzas vulcânicas à cal para o endurecimento da mesma em construções submersas. As primeiras construções romanas em concreto, segundo Mehta e Monteiro (1994), foram aplicadas em aquedutos e muros de contenção de água. A partir da segunda metade do século XIX, o uso do concreto começou a ser amplamente difundido, em substituição da alvenaria de pedra. Também se descobriu, neste mesmo período, que a associação do aço ao concreto resultava em um material estrutural de ótimo desempenho e de fácil confecção. Assim, foi a partir do final do século XIX e início do século XX que o concreto armado passou a ser utilizado em edifícios, pontes, e obras marítimas sendo considerado até os dias atuais como o mais importante material de construção já usado pelo homem.

O concreto armado, de acordo com Vasconcelos (1992), foi aplicado pela primeira vez pelo Francês Lambot, que construiu um barco desse material em 1849. Em seguida, em 1861, outro cientista Francês, Monier, construiu vasos de flores em concreto com armadura de arame (LEONHARDT E MÖNNIG, 1982). Em 1877, o americano Hyatt entrou pela primeira vez, com um pedido de patente para uma viga confeccionada em concreto armado devido sua preocupação com a segurança das edificações ao fogo (SANTOS, 1983).

Segundo Leonhardt e Mönnig (1982), os princípios básicos para a construção de vigas e tubos de concreto armado foram elaborados por Coignet, em 1861 que os publicou na Exposição Internacional de Paris em 1867. A partir de 1867, Monier obteve patentes para construir tubos, lajes, pontes, executando-os através de um método empírico, sem qualquer base científica (SÜSSEKIND, 1980). Em seguida, em 1873, um construtor nova-iorquino construiu uma casa em concreto armado, conhecida como Ward's Castle (LEONHARDT E MÖNNIG, 1982).

Em 1902 Mörsch publicou a primeira teoria científica do comportamento do concreto armado, comprovando-a experimentalmente, o que facilitou a ampla

difusão do seu uso. Com o passar do tempo o concreto foi evoluindo até atingir o estágio em que se encontra hoje.

No Brasil, o uso do concreto armado foi introduzido no fim do século XIX, com a construção de algumas habitações populares. Durante o século XX, de acordo com Süssekind (1980), algumas grandes obras foram realizadas, dentre elas o primeiro arranha-céu, projetado no Rio de Janeiro por Baumgart, que também foi pioneiro no uso de balanços para construir a ponte sobre o rio do Peixe em 1931. Também teve grande destaque, a usina hidrelétrica de Itaipu, no Paraná, em 1982 (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Hoje, o concreto armado é amplamente utilizado em todas as regiões do país, empregado em inúmeras aplicações.

2.1.3 Estruturas mistas

A evolução dos sistemas estruturais fez surgir uma associação entre elementos de concreto armado e perfis metálicos que ficou conhecida como sistema misto ou estrutura mista. Segundo GRIFFIS (1994) *apud* De Nardin (1999), as primeiras estruturas mistas surgiram em 1894 nos Estados Unidos com a construção de uma ponte e um edifício que utilizaram vigas metálicas revestidas com concreto, para conferir proteção contra a corrosão e a ação do fogo. Os primeiros estudos não consideravam a ação estrutural conjunta do aço e do concreto (BIANCHI, 2002). A atuação interativa entre o aço e o concreto só foi considerada a partir da concepção dos dispositivos de ligação entre os dois materiais, conhecidos no meio técnico como conectores de cisalhamento (LEHTOLA, 1992 *apud* BIANCHI, 2002).

Assim, segundo a literatura, os sistemas mistos ficaram conhecidos pela associação do uso do aço e do concreto atuando em conjunto, de forma a explorar as propriedades de cada material. A ligação que permite a interação entre os elementos de aço e concreto passou a ser feita pelo uso dos conectores.

A introdução de recomendações normativas tardou a surgir, pois o sistema é notadamente mais complexo do que o aço ou o concreto, considerados isoladamente. Segundo Vieste *et al.* (1997) *apud* Bianchi (2002) o New York Building Code fez o primeiro registro da normalização de estruturas mistas em 1930. Em

1944 os métodos para cálculo de vigas mistas foram incorporados na norma da AASHO, American Association of State Highway Officials, (hoje AASHTO) e em 1952 foi a vez do AISC estabelecer os métodos de dimensionamento para vigas mistas (DE NARDIN, 1999).

Já no Brasil a introdução dos sistemas mistos ocorreu a partir da década de 50. No entanto, a normalização do projeto e execução de estruturas de aço de edifícios pela ABNT só aconteceu pela primeira vez em 1986 através da norma NBR 8800, que trata as vigas mistas e conectores de cisalhamento. Enquanto que a incorporação dos parâmetros e procedimentos para o cálculo dos sistemas de lajes e pilares mistos, considerando-se também o dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio, ocorreu em 1999 com a publicação da norma NBR 14323, pela ABNT.

Hoje há um Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) em andamento para que se possa atualizar a norma que vigora no Brasil. Essa revisão tem o objetivo de redefinir e ampliar os critérios que regem o projeto e a execução das estruturas de aço e das estruturas mistas aço-concreto de edifícios, baseando-se no método dos estados limites. Os princípios apresentados neste projeto de norma aplicam-se às estruturas de edifícios residenciais, comerciais, industriais e públicos, às soluções usuais para barras e ligações e às estruturas de passarelas de pedestres.

Com o objetivo de comparar os aspectos construtivos, o comportamento estrutural e os procedimentos para o dimensionamento de estruturas mistas, Alva (2000), apresenta uma abordagem de análise através de exemplos numéricos. Este trabalho, focado em edifícios, engloba os principais elementos que compõem o sistema misto, enfatizando a norma norte-americana do AISC e o EUROCODE 4. O comportamento e o dimensionamento de elementos mistos frente à ação do fogo também foram analisados. Os exemplos de dimensionamento permitiram a comparação e análise dos resultados obtidos pelas normas.

Já o trabalho de Queiroz *et al.* (2001) foi motivado pela possibilidade de ampliação do uso de estruturas com elementos de aço e de concreto armado, através das informações fornecidas pelos autores. Dessa forma, discorre-se sobre sistemas mistos, que englobam as lajes mistas, as vigas mistas, os pilares mistos e as ligações mistas, e estruturas híbridas, compostas por elementos de concreto armado, elementos de aço e elementos mistos. Inicialmente são abordadas as

propriedades dos materiais, análise estrutural e estados limites aplicáveis às estruturas mistas e híbridas. Posteriormente os autores tratam da estabilidade horizontal de edificações com estruturas mistas ou híbridas, resistência de elementos mistos ao incêndio e ligações entre os elementos das estruturas híbridas. Para o desenvolvimento deste estudo procurou-se utilizar as normas brasileiras, porém comentários relevantes sobre os procedimentos de outras normas também foram feitos.

Outra fonte de informações, para um melhor entendimento do funcionamento dos sistemas mistos, é a publicação de Prestes (2005). Neste trabalho são fornecidas e identificadas as condições favoráveis de utilização dos sistemas mistos. Além disso, a resistência mecânica, a rigidez, os esforços e deslocamentos destes sistemas são avaliados através de uma análise estrutural. Ainda neste trabalho são abordadas as diferenças entre a etapa construtiva e a configuração final, bem como as implicações da utilização de dois materiais diferentes no processo construtivo. O trabalho classifica os sistemas mistos utilizados em: lajes mistas, ligações mistas, pilares mistos e vigas mistas.

Ainda enfocando o sistema misto, Fabrizzi (2007) apresentou os principais aspectos teóricos e normativos para o dimensionamento de elementos estruturais mistos que compõem edifícios de múltiplos andares, utilizando para tanto as principais normas nacionais e internacionais.

A seguir discorre-se sobre os sistemas mistos, enfocando as vigas mistas, que são o objeto de estudo deste trabalho.

2.1.4 Lajes mistas

Segundo Prestes (2005), as lajes mistas consistem em uma fôrma de aço galvanizado incorporada a uma capa de concreto com armadura adicional, disposta em duas direções, para combater as fissuras de retração do concreto (Figura 2.1).

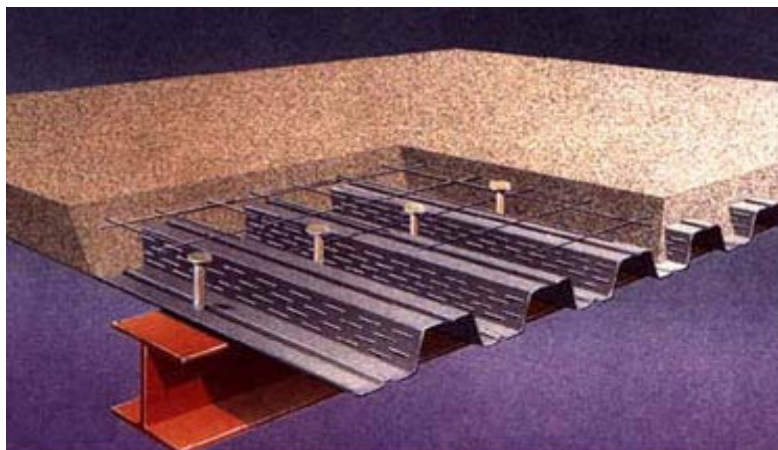


FIGURA 2.1 – LAJE MISTA AÇO-CONCRETO
FONTE: CODEME ENGENHARIA S.A. (1997)

A função da fôrma de aço é suportar as ações permanentes e sobrecargas da construção antes da cura do concreto e atuar como armadura de tração da laje depois da cura do concreto (QUEIROZ *et al.* 2001). Quando a fôrma de aço e o concreto funcionam como um sistema estrutural único, o sistema misto é obtido. A fôrma deve transmitir o cisalhamento longitudinal na interface aço-concreto por meio de saliências, chamadas de mossas, encontradas nas fôrmas trapezoidais ou por atrito com o concreto confinado nas fôrmas com cantos reentrantes (PRESTES, 2005).

2.1.5 Ligações mistas

De acordo com Queiroz *et al.* (2001), uma ligação mista (figura 2.2) ocorre quando a laje de concreto participa da transmissão do momento fletor de uma viga para um pilar ou para outra viga mista adjacente, podendo o pilar também participar da distribuição do momento no nó quando estiver suportando duas vigas mistas (QUEIROZ *et al.* 2001).

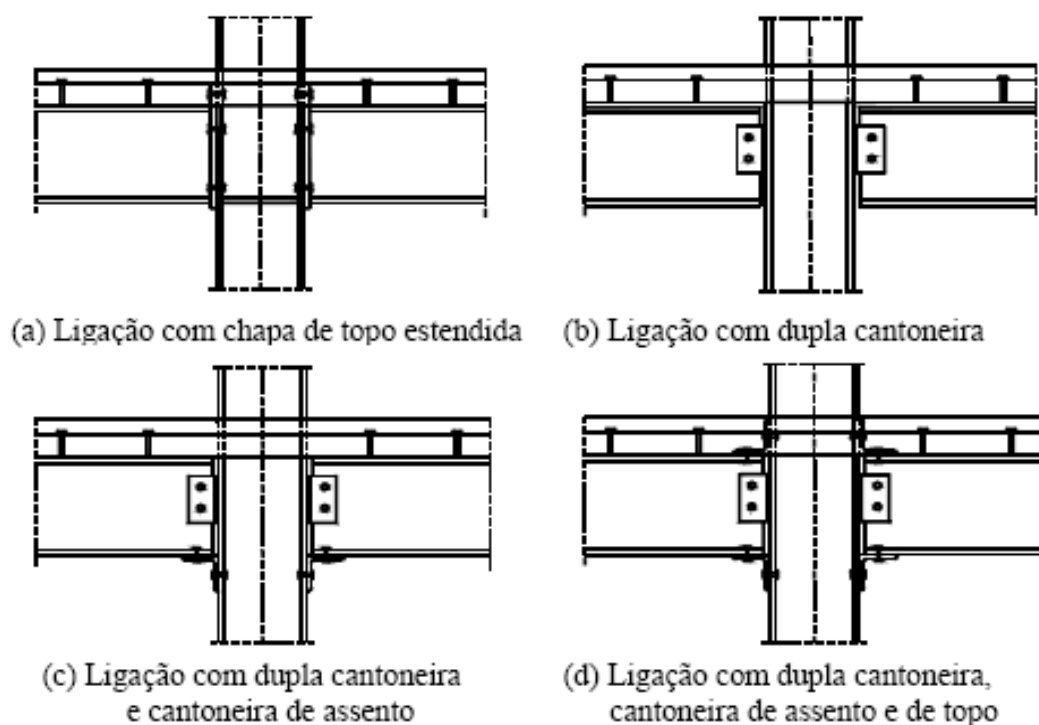


FIGURA 2.2 – LIGAÇÕES MISTAS
 FONTE: FIGUEIREDO (2004)

Uma ligação mista entre um elemento misto e um outro qualquer, segundo o EUROCODE 4 *apud* Figueiredo (2004), é definida como aquela em que a armadura contribui para a resistência da ligação.

Ainda consta na literatura que as ligações mistas podem ser classificadas de acordo com sua rigidez ou resistência. Dessa forma, têm-se as ligações classificadas em flexíveis ou rotuladas, semi-rígidas e rígidas, conforme sua rigidez e, rotuladas, de resistência parcial e de resistência total de acordo com sua resistência (QUEIROZ *et al.* 2001).

Nesse contexto, Figueiredo (2004) aplica o Método dos Elementos Finitos no desenvolvimento de um modelo numérico, através do código de cálculo ANSYS, para a análise de ligações mistas viga-pilar. Além deste modelo desenvolveu-se também um programa experimental envolvendo ligações mistas com chapa de topo estendida, cujos resultados foram comparados com os resultados da análise numérica e com os valores obtidos a partir de um modelo analítico, desenvolvido pela autora, que procurou adaptar à realidade brasileira o método de cálculo de ligações mistas, que deriva do Método dos Componentes proposto pelo

EUROCODE 3. Esta adaptação foi elaborada em termos de perfis e detalhes de ligações.

2.1.6 Pilares mistos

Segundo Queiroz *et al.* (2001), um pilar misto é constituído por um perfil de aço revestido por concreto ou tubo de aço preenchido por concreto (Figura 2.3). O pilar misto resiste predominantemente às cargas de compressão (PRESTES, 2005).

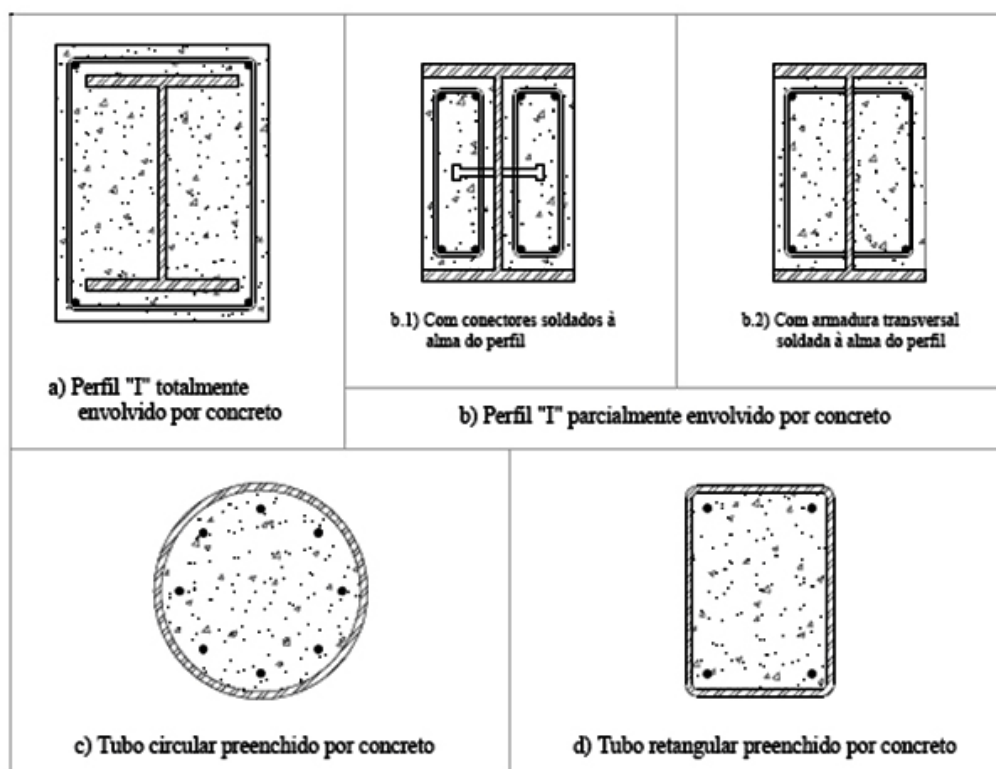


FIGURA 2.3 – SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS DE PILARES MISTOS
 FONTE: FABRIZZI (2007)

Dessa forma, De Nardin (1999) objetivou conhecer o comportamento de pilares mistos tubulares axialmente comprimidos ao variar a forma da seção transversal e a espessura dos perfis. Foram realizados ensaios em seções tubulares quadradas, circulares e retangulares, preenchidas com concreto de aproximadamente 50 MPa de resistência. Através destes ensaios percebeu-se que o esmagamento do concreto ocorreu antes da flambagem local do perfil tubular, em

diversos pontos. A conclusão deste trabalho foi de que o confinamento contribui na melhoria do comportamento dos materiais, embora não aumente significativamente a capacidade resistente da seção. O índice de ductilidade dos pilares à compressão também foi avaliado. A validação do trabalho foi feita ao comparar a capacidade resistente obtida experimentalmente com as recomendações teóricas previstas nas normas.

Um outro trabalho de De Nardin (2003), além de centrar-se no estudo de pilares preenchidos flexo-comprimidos, analisa algumas ligações viga-pilar. O método utilizado neste trabalho foi o do experimento com modelos físicos e numéricos. Foram analisados, neste trabalho, treze pilares preenchidos e quatro tipologias de ligações, sendo duas compostas por chapas de extremidade e parafusos e duas soldadas. Uma das ligações soldadas foi enrijecida por cantoneiras soldadas no interior do perfil tubular. Os modelos físicos foram comparados com os numéricos e a discussão dos resultados obtidos enfatiza o comportamento momento-rotação das ligações estudadas, na extremidade da viga.

O comportamento dos pilares mistos também foi estudado por Bianchi (2002), através de uma análise numérica baseada no método dos elementos finitos. A modelagem numérica dos pilares mistos foi realizada através do programa ANSYS. Foram modelados pilares considerando a utilização de conectores de cisalhamento e pilares sem a utilização dos conectores. Para analisar a importância dos conectores de cisalhamento nesses pilares foi aplicada uma carga centrada no modelo, e depois se variando a excentricidade, de maneira a obter uma curva de interação do momento fletor em função do esforço normal. A importância da utilização dos conectores de cisalhamento foi comparada, a partir das curvas de interação obtidas, com as curvas e os valores de tensão máxima de aderência, fornecidas pelo EUROCODE 4, validando a modelagem numérica.

2.1.7 Vigas mistas

As vigas mistas são elementos estruturais constituídas pela associação de um perfil de aço (normalmente tipo “I”) com uma laje de concreto, cuja ligação é feita

através de conectores de cisalhamento soldados à mesa do perfil de aço (PRESTES, 2005).

A figura 2.4 apresenta os principais tipos de sistemas de vigas mistas comumente encontradas nas edificações.

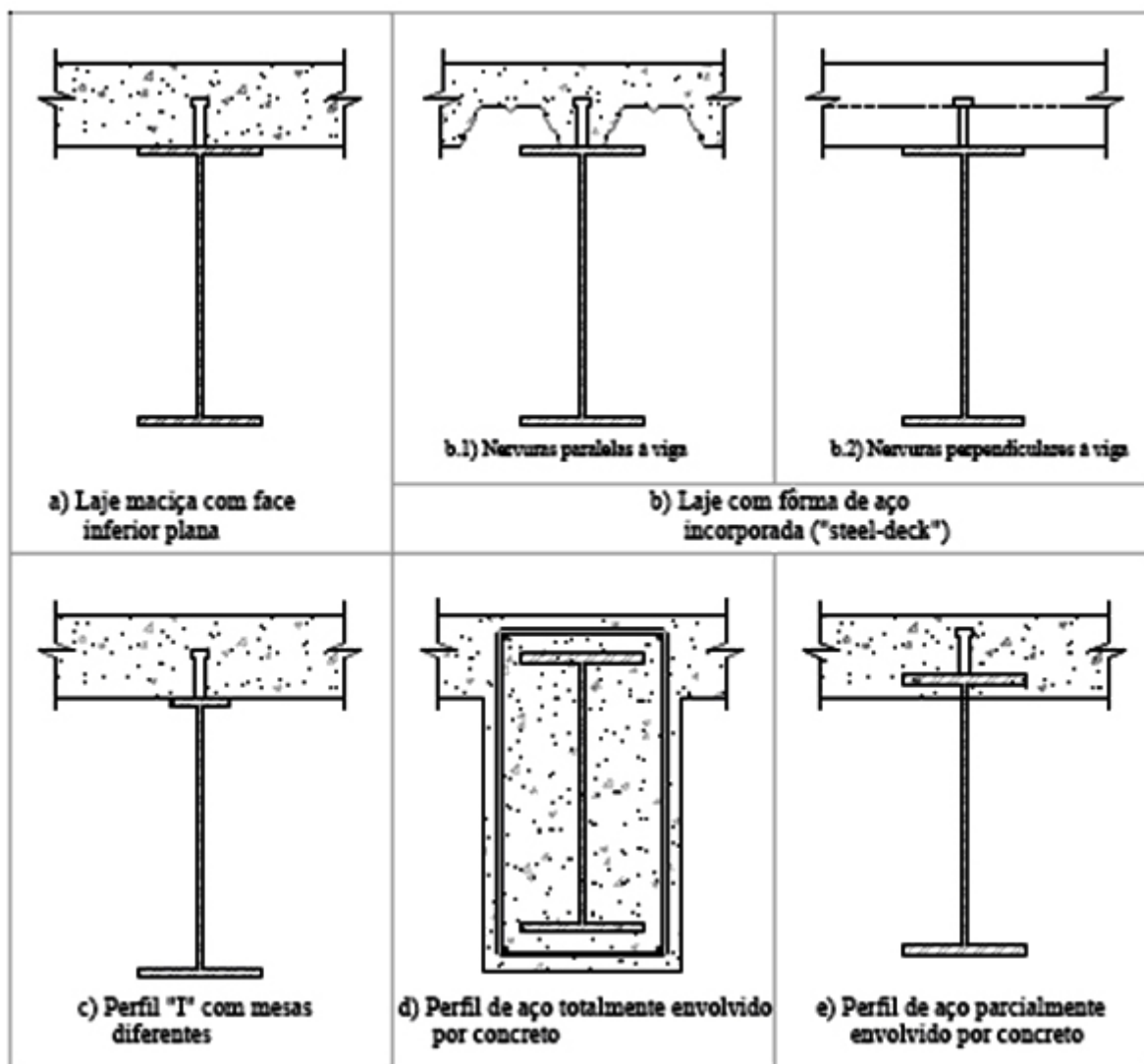


FIGURA 2.4 – VIGAS MISTAS COM LAJE MACIÇA
 FONTE: FABRIZZI (2007)

A finalidade do conector de cisalhamento é promover a ação mista de modo a garantir o trabalho conjunto da viga de aço com a laje de concreto, para resistir a esforços de flexão em torno do eixo perpendicular ao plano médio da alma, segundo Kirchhof (2004), impedir o afastamento vertical (*uplift*) entre a laje e a viga de aço e absorver os esforços de cisalhamento nas duas direções (ALVA E MALITE, 2005).

Quando não existir ligação na interface laje-viga, os elementos irão se deformar independentemente um do outro (figura 2.5 (a)), provocando um

deslizamento relativo entre as superfícies da interface destes, devido as diferentes deformações sofridas pelas mesmas (DAVID, 2007). Por outro lado, quando o elemento de aço está interligado ao elemento de concreto por meio de conectores de cisalhamento, os dois elementos tenderão a se deformar como um único elemento (figura 2.5 (b)), desde que a resistência dos mesmos seja suficiente para suportar o fluxo de cisalhamento gerado na interface (DAVID, 2007).

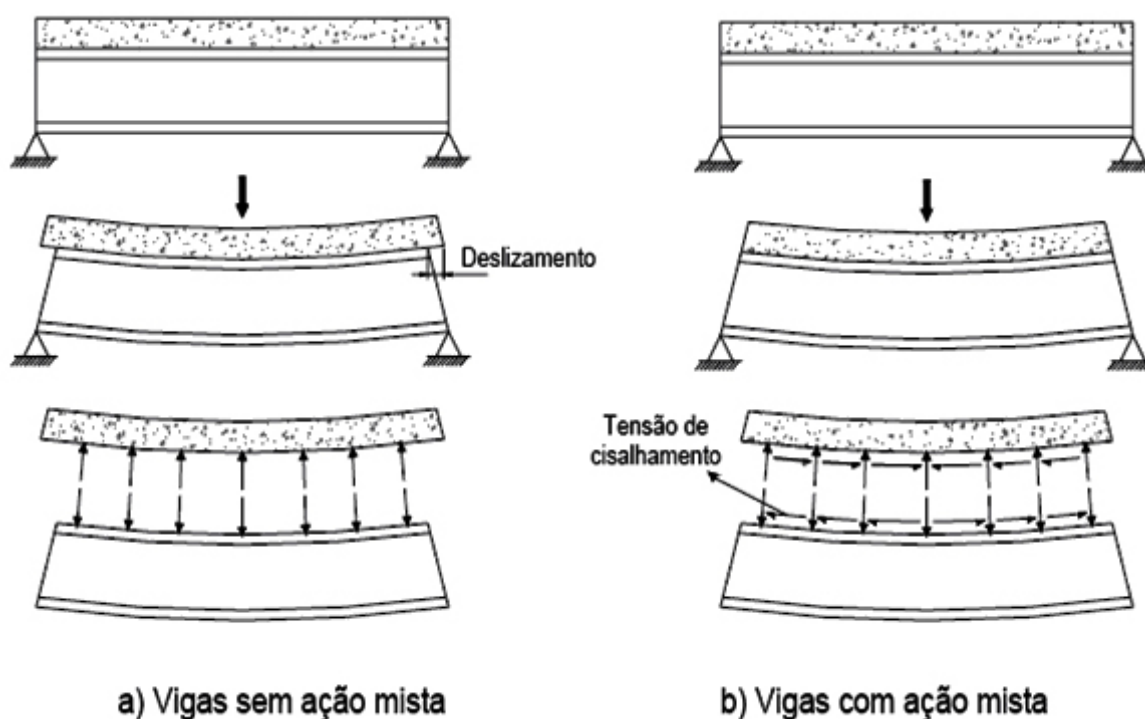


FIGURA 2.5 – VIGAS MISTAS FLETIDAS
FONTE: DAVID (2007)

Segundo Chapman (1964) as forças de afastamento (*uplift*) podem provocar o arrancamento dos conectores de cisalhamento da laje de concreto, dessa forma o Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) recomenda que altura (h) do conector tipo pino com cabeça, após a soldagem, seja igual ou superior a quatro vezes o diâmetro do corpo (d) do mesmo, conforme figura 2.6.

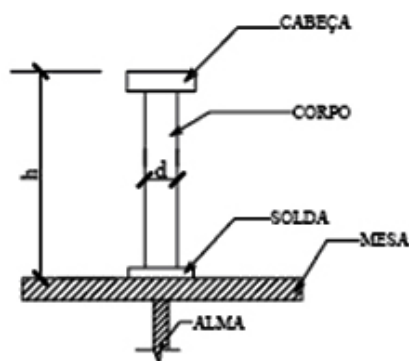


FIGURA 2.6 – ALTURA MÍNIMA DOS CONECTORES TIPO PINO COM CABEÇA
 FONTE: KIRCHHOF (2004)

De acordo com David (2007), em 1933, na Suíça, iniciaram-se os estudos a respeito dos conectores espirais, formados por barras redondas com formato de hélice. Já em 1943 outros conectores passaram a ser ensaiados, como os formados por perfis laminados “U”, cantoneiras e seções “H”, nas Universidades de Lehigh e Illinois (DAVID, 2007). As pesquisas a respeito de conectores em forma de gancho e conectores rígidos começaram na década de 50 e, os tipo pino com cabeça, por sua vez, começaram a ser estudados em 1954 (DAVID, 2007).

Os conectores de cisalhamento, de acordo com Kirchhof (2004), podem ser classificados em rígidos e flexíveis, de acordo com o comportamento estrutural, identificado pela relação existente entre a força de cisalhamento transmitida pelo conector e o escorregamento relativo entre as superfícies da viga e laje, conforme mostra a figura 2.7.

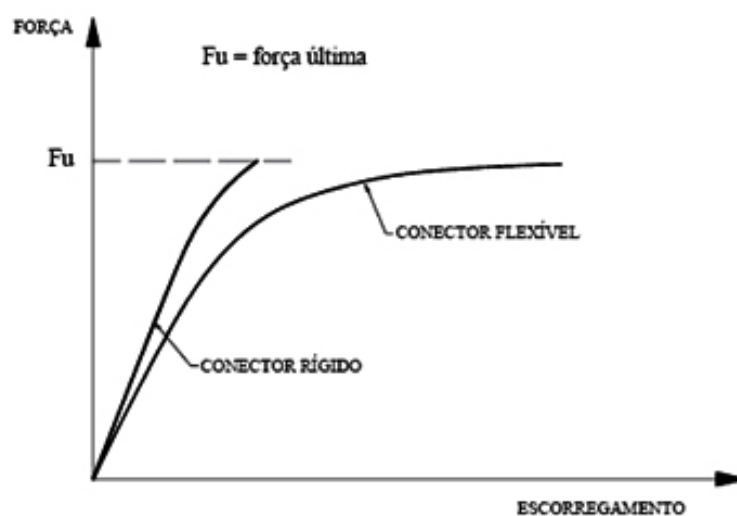


FIGURA 2.7 – RELAÇÃO FORÇA X DESLOCAMENTO NOS CONECTORES DE CISALHAMENTO
 FONTE: ALVA (2000)

A relação força *versus* deslizamento é menor nos conectores flexíveis, que apresentam menor rigidez (DAVID, 2007). De acordo com David (2007), os conectores rígidos e flexíveis podem ser considerados dúcteis, ou seja, eles são capazes de deslizar após terem atingido sua resistência máxima. Segundo Kotinda (2006), um conector flexível, sob carregamento crescente, continua a se deformar sem a ocorrência de ruptura, mesmo após atingir sua capacidade máxima, possibilitando que os conectores vizinhos também alcancem à resistência total. Esta característica dos conectores, segundo David (2007), é denominada ductilidade, definida como a capacidade de deslizamento dos conectores após terem atingido sua resistência máxima. Assim, devido à uniformidade do fluxo de cisalhamento longitudinal, é possível utilizar conectores igualmente espaçados sem a perda da resistência máxima da conexão (DAVID, 2007).

A figura 2.8 mostra os tipos usuais de conectores utilizados em vigas mistas.

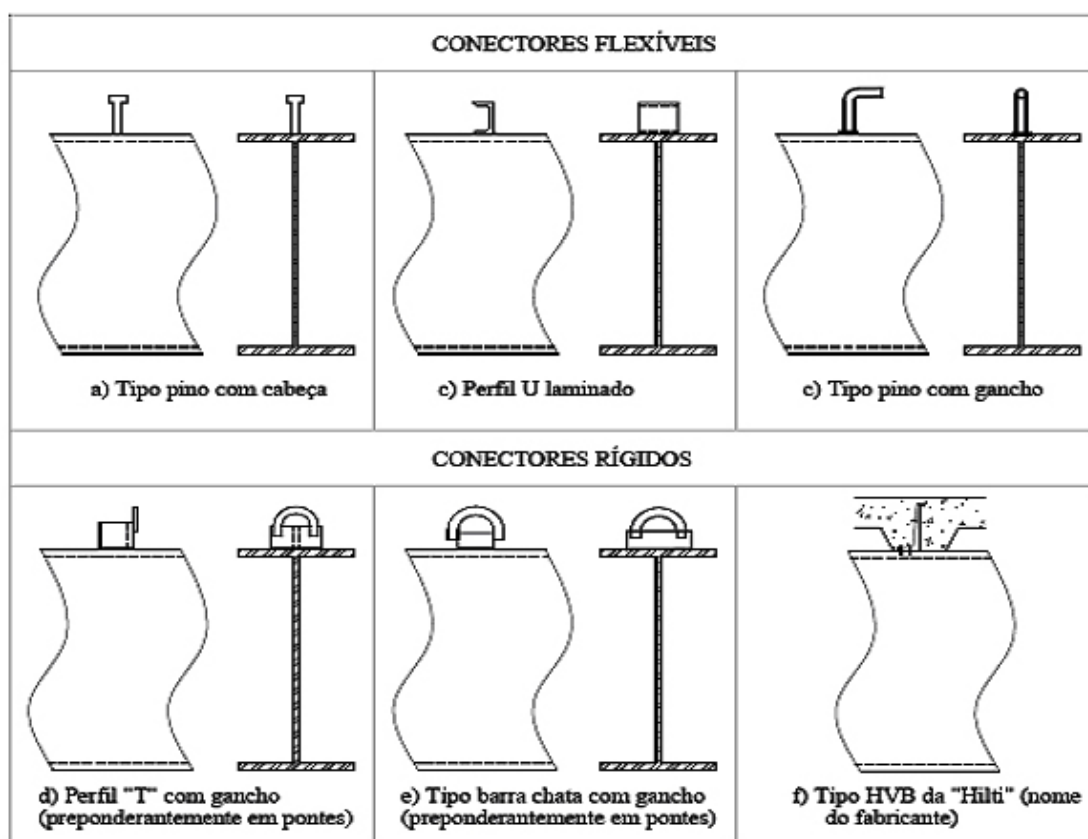


FIGURA 2.8 – TIPOS USUAIS DE CONECTORES
FONTE: FABRIZZI (2007)

Nesse contexto, Chapman (1964), após realizar experimentos em vigas mistas com carregamento uniformemente distribuído, verificou que as vigas com espaçamento uniforme entre conectores se comportam tão bem quanto as que

utilizam conectores distribuídos de forma não uniforme. Assim, para facilitar a execução de vigas mistas, adota-se espaçamento uniforme entre os conectores de cisalhamento ao longo do vão das vigas (KIRCHHOF, 2004).

A transferência das forças de cisalhamento longitudinal da laje para a viga, na ação dos conectores tipo pino com cabeça e a deformação sofrida pelos pinos são ilustradas na figura 2.9 (a) e 2.9 (b), que foram extraídas dos trabalhos de Tristão (2002) e Kotinda (2006), respectivamente.

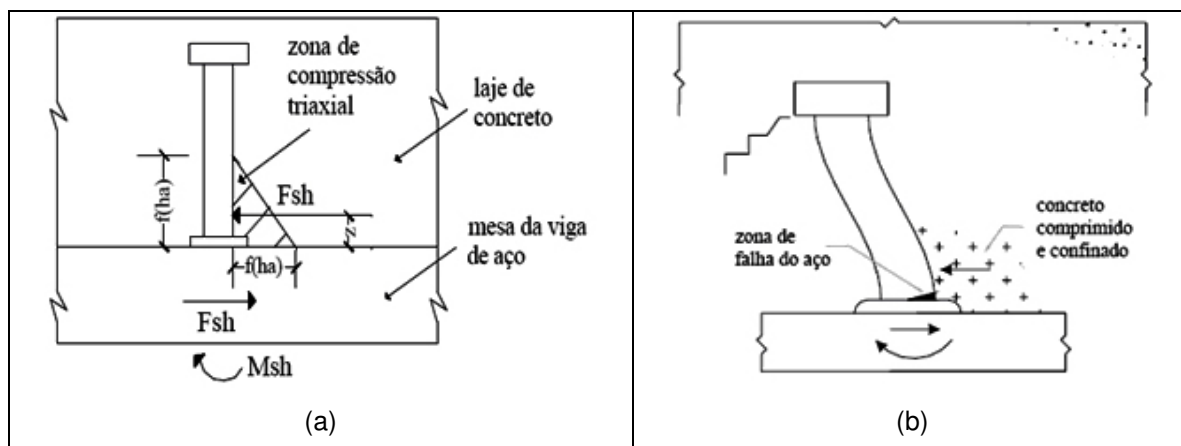


FIGURA 2.9 – TRANSFERÊNCIA DE FORÇAS DE CISALHAMENTO LONGITUDINAL E DEFORMAÇÃO DO CONECTOR TIPO PINO COM CABEÇA
FONTE: TRISTÃO (2002) e KOTINDA (2006)

De acordo com Oehlers e Park (1992), a força de cisalhamento (F_{sh}), distante z da mesa do perfil, a qual o fuste do conector é submetido gera um momento (M_{sh}) devido a excentricidade existente. Assim, o conector fica sujeito às tensões de cisalhamento e normal. A excentricidade z , que se dá em função da rigidez relativa do elemento de concreto e conector, tenderá a zero quando a rigidez do concreto (E_c) for muito maior que a rigidez do conector (E_a), caso contrário, z tenderá à metade da altura do pino com cabeça. Em frente ao conector surge uma área submetida a altas tensões de compressão. Essa área denomina-se zona de compressão triaxial e se dá em função ($f(h_a)$) da altura efetiva do conector (h_a), que é 1,8 vezes o diâmetro do mesmo (TRISTÃO, 2002).

Segundo Tristão (2002), a partir da transferência das forças de cisalhamento longitudinal da laje para a viga, dois mecanismos podem conduzir o conector tipo pino com cabeça à ruptura. Um deles ocorre quando o concreto é menos rígido que o conector e começa a fissurar antes da plastificação do conector, aumentando a excentricidade z e fazendo com que as tensões normais no pino aumentem mais

rapidamente que as tensões de cisalhamento. O outro ocorre quando o conector for menos rígido que o concreto. Isso reduz a dimensão z e o momento (M_{sh}) no conector. A zona de compressão triaxial também reduzirá, uma vez que a altura efetiva do conector diminuirá, provocando o aumento de z devido a diminuição da rigidez do concreto (E_c) que rompe nesta zona. A partir deste ponto o mecanismo de falha do conector recai no primeiro modo de ruptura descrito.

Portanto, na conexão de cisalhamento, a resistência do conector tipo pino com cabeça, depende da resistência e rigidez do conector e do concreto na zona de compressão triaxial (OEHLERS & PARK, 1992).

Associados à ruptura do conector de cisalhamento devem-se considerar os modos de fissuração que surgem na laje. Esses modos ocorrem devido a redução de resistência e rigidez do concreto na zona de compressão triaxial por consequência da fissuração do concreto provocada pelo conector, quando este aplica uma força concentrada na laje (KIRCHHOF, 2004).

Na figura 2.10 é possível verificar os três modos de fissuração que ocorrem na laje, segundo Oehlers (1989).

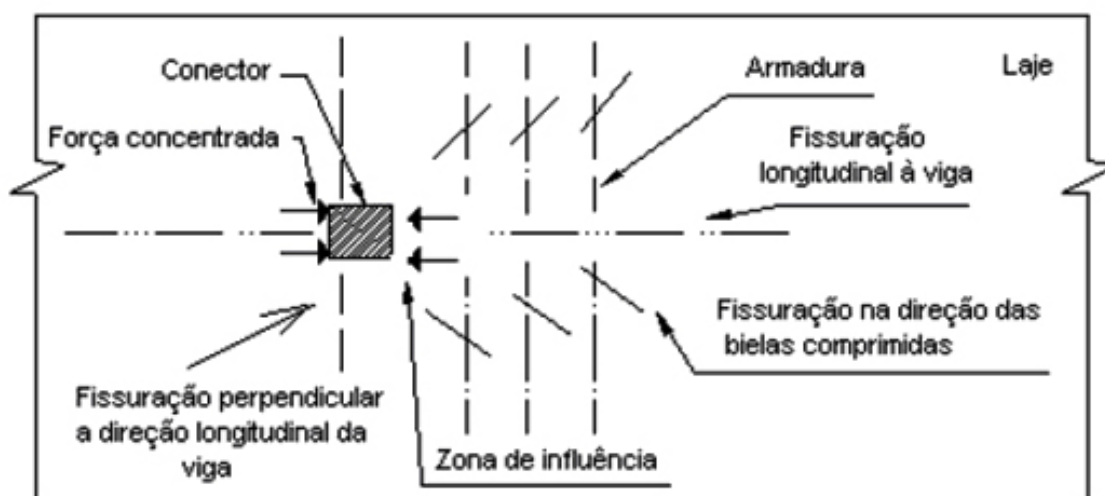


FIGURA 2.10 – TIPOS DE FISSURAÇÃO NA LAJE DEVIDO À FORÇA CONCENTRADA
FONTE: DAVID (2007)

As fissuras por rasgamento, perpendiculares a direção longitudinal da viga, dependem da força de compressão no plano da laje e se propagam transversalmente ao conector. O efeito dessas fissuras é pequeno na resistência do conector quando a propagação das mesmas ocorre fora da zona de influência (KIRCHHOF, 2004).

Já as fissuras por cisalhamento, segundo Kirchhof (2004) ocorrem na zona de influência, propagando-se na direção das bielas de compressão e podendo afetar a restrição triaxial. Esse tipo de fissuração pode ser prevenido com a colocação de armadura transversal na laje.

O outro tipo de fissuração é por fendilhamento, longitudinal a viga, e ocorre inicialmente em frente ao conector e, em seguida atrás do mesmo. Esse tipo de fissura reduz a restrição triaxial na zona de influência e conduz à falha do concreto na região do conector (KOTINDA, 2006). Nesse caso há ruptura do conector. A armadura transversal não evita o fendilhamento do concreto, mas limita a propagação das fissuras pelo confinamento do conector. De acordo com Tristão (2002) as fissuras na laje na região das linhas de conectores são limitadas pelo uso de armaduras transversais adicionais às utilizadas na laje de concreto, posicionadas na face inferior da laje e distribuídas uniformemente ao longo do vão da viga, conforme figura 2.11.

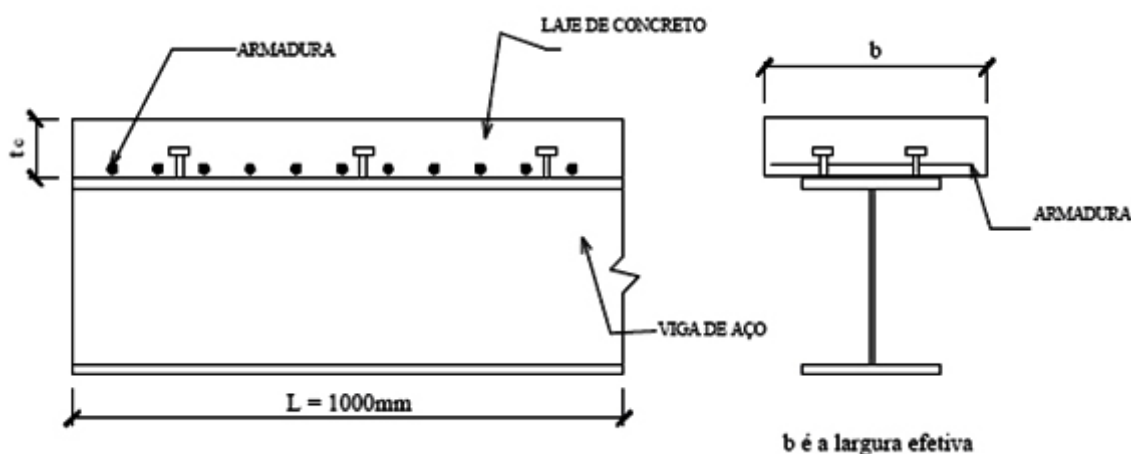


FIGURA 2.11 – DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS TRANSVERSAIS (ADICIONAIS) NA LAJE DE CONCRETO
FONTE: TRISTÃO (2002)

De acordo com Kirchhof (2004) a resistência à flexão de vigas mistas está associada a alguns fatores como a resistência à compressão do concreto e a espessura da laje, o tipo de aço da viga, a existência ou não de escoramento na concretagem das lajes, a interação entre a viga e a laje, entre outros.

Dentre os fatores citados, a interação na interface viga-laje, obtida pelo uso dos conectores de cisalhamento, é enfatizada na literatura. O comportamento estrutural da interface é entendido a partir dos conceitos de grau de conexão, que

pode ser completo ou parcial e grau de interação, que pode ser total, parcial ou nulo, quando viga e laje trabalham isoladamente.

O termo grau de conexão refere-se à resistência dos conectores de cisalhamento e das seções de aço e de concreto, através do equilíbrio longitudinal de forças, ilustrado na figura 2.12, com base na análise rígido-plástica através do equilíbrio das forças na seção da viga mista (KIRCHHOF, 2004). No procedimento da análise, de acordo com Oehlers e Sved (1995), considera-se que os materiais que compõem a viga mista apresentam ductilidade ilimitada, podendo, assim, alcançar e manter suas resistências plásticas ou de escoamento.

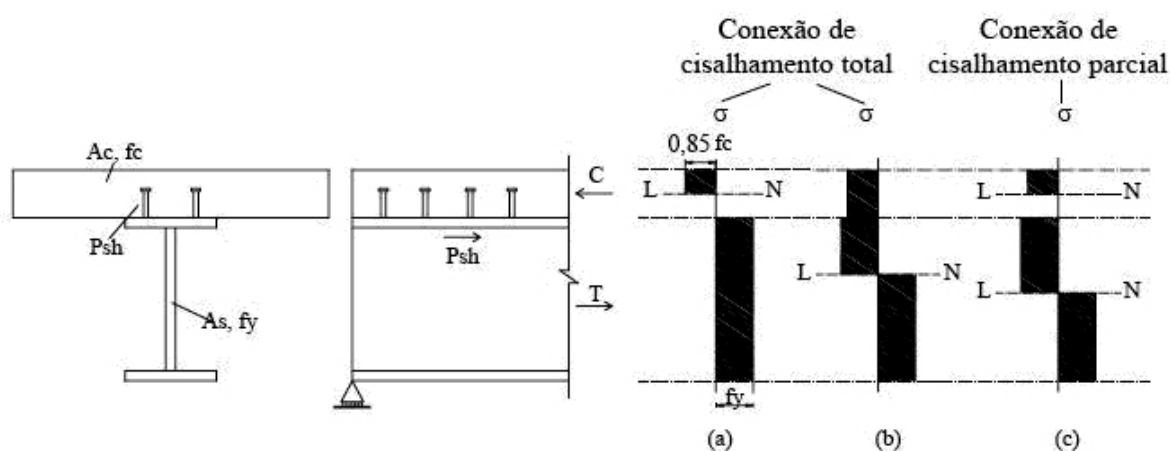


FIGURA 2.12 – EQUILÍBRIO LONGITUDINAL DE FORÇAS
 FONTE: OEHLERS et al, (1997)

Quando a resultante axial obtida no elemento de concreto ($P_c = 0,85f_c A_c$) for maior que a obtida no elemento de aço ($P_s = A_s f_y$), conforme ilustra a figura 2.12 (a), tem-se a conexão total onde o equilíbrio longitudinal de forças ocorre para a tração $T = P_s$ e, conseqüentemente, para a compressão $C = P_s$. Caso $P_s > P_c$, situação referente à figura 2.12 (b), a conexão total também é obtida, porém o equilíbrio longitudinal de forças é atingido quando a compressão, e conseqüentemente a tração, é igual a resultante no elemento de concreto $C = P_c$ e $T = P_c$. Ainda é possível obter a conexão total quando $P_c = P_s$, sendo o equilíbrio de forças verificado para a tração $T = P_s = P_c$, e conseqüentemente, para a compressão $C = P_s = P_c$.

Já quando a resistência da conexão de cisalhamento (P_{sh}) é menor que ambas as resultantes axiais das seções de aço ($P_s = A_s f_y$) e de concreto ($P_c = 0,85f_c A_c$), conforme representa a figura 2.12 (c), tem-se a conexão parcial cujo equilíbrio longitudinal de forças é obtido para a compressão $C = P_{sh}$ e, conseqüentemente, para a tração $T = P_{sh}$.

Segundo Vasconcellos (2005), na conexão completa o número de conectores é calculado para que a resistência nominal da viga de aço ao escoamento ou da laje de concreto à plastificação seja atingida antes da ruptura dos conectores. Assim, qualquer acréscimo na quantidade de conectores não implicará no aumento da resistência à flexão da viga mista. Em outras palavras, a capacidade máxima à flexão da seção da viga mista mais solicitada ocorre antes da falha na conexão (KIRCHHOF, 2004).

Na conexão parcial, por outro lado, se tem um número de conectores menor que o mínimo estabelecido para obter uma conexão completa, ou seja, a resistência da conexão de cisalhamento controla a capacidade de flexão da viga mista (KOTINDA, 2006).

O grau de conexão de cisalhamento é determinado pela expressão a seguir:

$$\eta = \frac{P_{sh}}{P_{shmin}} \quad (2.1)$$

onde:

P_{sh} = resistência da conexão de cisalhamento;

P_{shmin} = resistência mínima da conexão de cisalhamento para que se tenha conexão completa. É o menor valor entre a capacidade resistente da viga de aço (P_s) e da laje de concreto (P_c).

O Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) estabelece que o grau de conexão de cisalhamento será completo quando $\eta=1,0$ e parcial se $0,4^* < \eta < 1,0$.

Segundo Kirchof (2004), a eficiência do comportamento das vigas mistas na interface perfil de aço-laje de concreto é determinada pelo trabalho conjunto da viga metálica com a laje de concreto, segundo o grau de interação dos elementos, que se baseia no escorregamento relativo entre laje-vigta. Essa interação pode ser nula, total ou completa e parcial (figura 2.13).

A interação nula é verificada quando o perfil metálico e a laje de concreto se comportam independentemente, ou seja, não há ação mista, pois não existe ligação na interface dos materiais. Dessa forma, a laje pode deslizar livremente sobre a mesa superior da viga metálica.

* Na NBR 8800 (1986) esse valor é 0,5.

Na interação total ou completa considera-se ligação perfeita entre viga e laje, que se deformam como um único elemento. Dessa forma, pode-se desprezar o escorregamento longitudinal e afastamento vertical relativo entre os elementos, verificando-se a existência de uma linha neutra única (FABRIZZI, 2007).

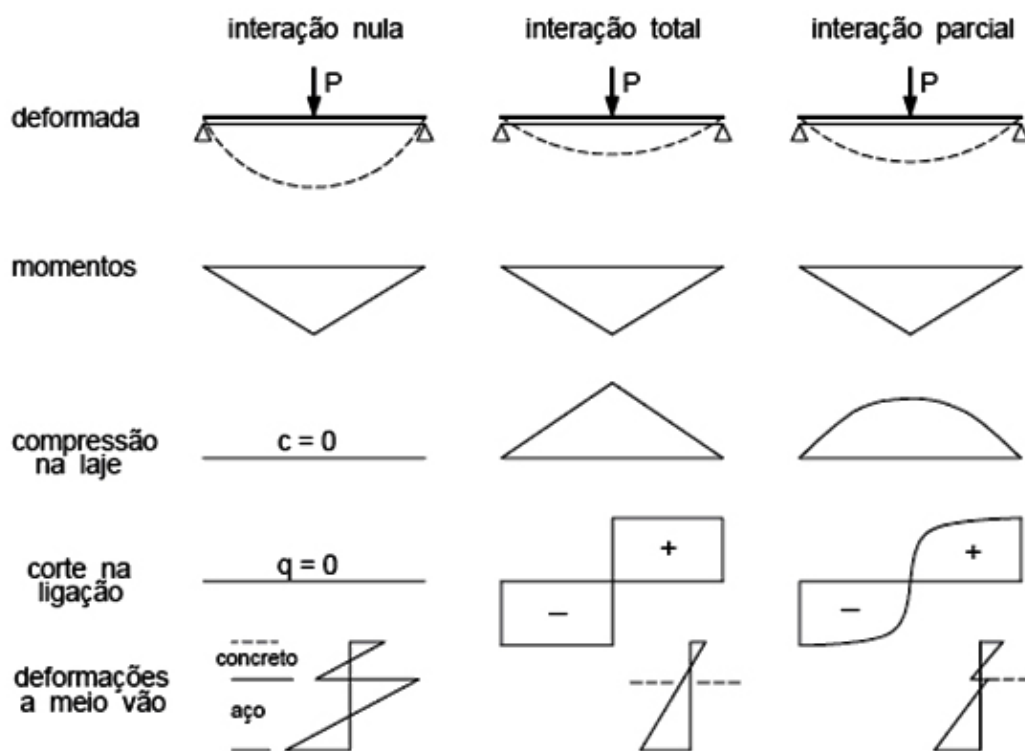


FIGURA 2.13 – INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO
 FONTE: ALVA (2000)

Considera-se a interação parcial quando for admitido escorregamento relativo entre a viga metálica e a laje de concreto. De acordo com Alva e Malite (2005), o efeito do escorregamento afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal e a deformabilidade das vigas. Nessa situação os deslocamentos provocados pelo efeito do escorregamento dos elementos devem ser considerados no estado limite de serviço. As vigas com interação parcial apresentam duas linhas neutras na seção transversal das vigas.

Segundo Oehlers *et al.* (1997), que estudaram o efeito da interação parcial na resistência de vigas mistas com conexão de cisalhamento total, a capacidade de resistência a esforços de flexão da viga mista de edifícios não é afetada na interação parcial, quando a resultante axial da seção de concreto for maior que a da seção de

aço. Caso contrário, em seções mais robustas, a interação parcial provocará uma redução da capacidade à flexão da viga mista.

Outro fator a ser considerado na resistência à flexão de vigas mistas é o método construtivo, que pode ser realizado pelo uso ou não de escoramento da viga e/ou laje. Na construção escorada (figura 2.14) apóia-se a viga e/ou a laje por escoras temporárias. Após a cura do concreto as escoras são removidas e os esforços que aparecem são resistidos pela seção mista. Neste método construtivo os deslocamentos e as tensões de serviço são menores em relação ao sistema não escorado, devido à rigidez e à resistência da seção mista (PRESTES, 2005).

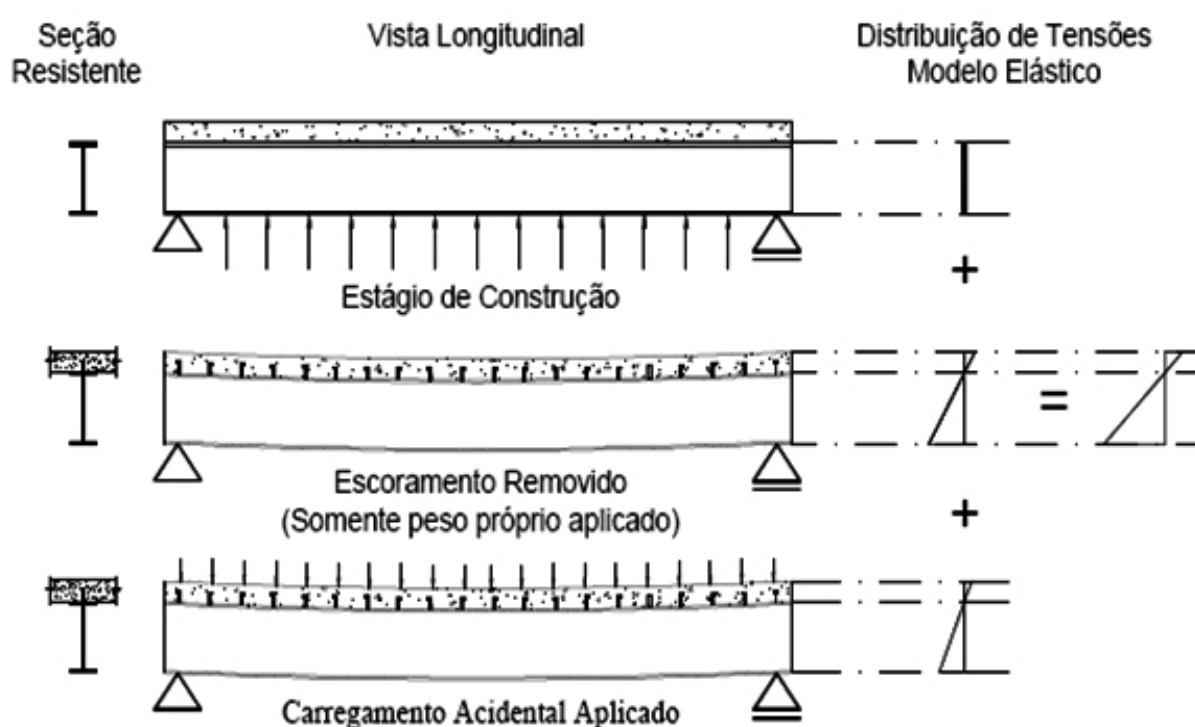


FIGURA 2.14 – VIGAS MISTAS ESCORADAS
FONTE: FABRIZZI (2007)

Na construção não escorada (figura 2.15), o perfil metálico isolado deve resistir às solicitações provenientes do peso próprio e das sobrecargas de construção, que atuam antes da cura do concreto. Após a cura do concreto, a seção mista resistirá ao carregamento acidental e haverá uma sobreposição das tensões aplicadas antes e depois da cura do concreto (FABRIZZI, 2007). Maiores deslocamentos e tensões no perfil de aço costumam aparecer neste método (PRESTES, 2005).

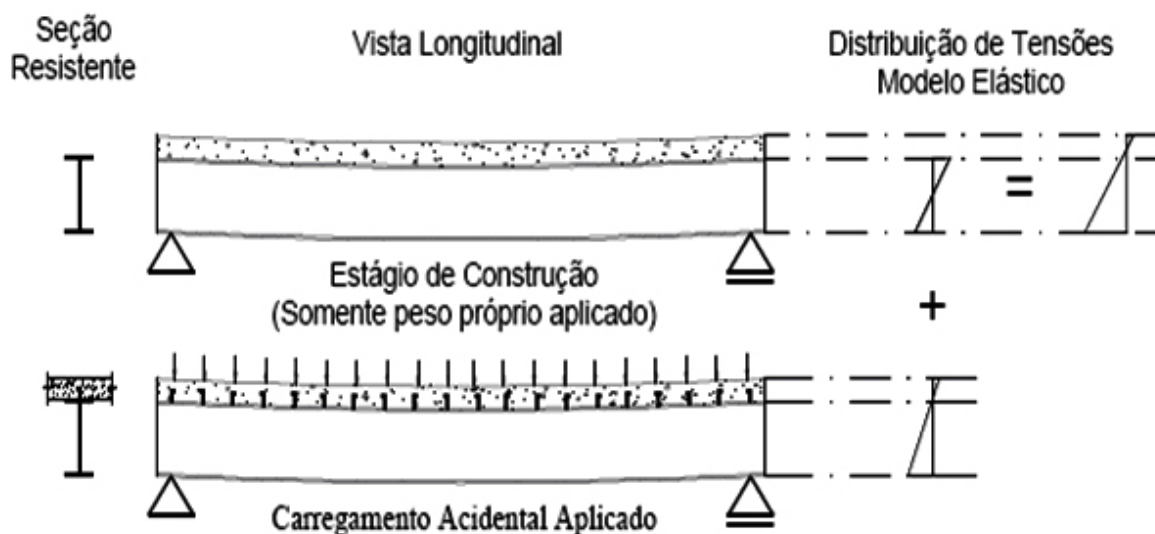


FIGURA 2.15 – VIGAS MISTAS NÃO ESCORADAS
 FONTE: FABRIZZI (2007)

De acordo com Prestes (2005), a resistência última da viga mista é a mesma para vigas escoradas e não escoradas, a diferença no comportamento das duas soluções está no deslocamento que ocorre para cargas de serviço e na deformação, que é maior nas vigas mistas não escoradas.

Partindo-se do princípio que pode ocorrer falha na conexão de cisalhamento, o comportamento da ductilidade dos conectores de cisalhamento em vigas mistas com laje de concreto de alto desempenho foi avaliado por Bullo e Di Marco (2004) que propuseram um método baseado nas regras e critérios de projeto do EUROCODE 4. Como a falta de ductilidade dos conectores pode reduzir a resistência à flexão dos elementos mistos de aço e concreto, o método desenvolvido permite avaliar a eficiência da ligação ao colapso das vigas mistas. Neste trabalho são identificadas as variáveis que afetam a exigência máxima ao deslizamento da viga de aço e da laje de concreto. A conclusão obtida foi que é necessário verificar a ductilidade dos conectores principalmente quando se faz uso de concreto de alta resistência. Nesse caso percebeu-se que existe uma mudança na relação entre a condição máxima ao deslizamento e a capacidade de deformação da conexão.

Oehlers e Coughlan (1986) preferiram estudar a rigidez ao cisalhamento de conectores experimentalmente. Assim, foram realizados 116 ensaios do tipo *push-out* sendo que em oito deles aplicou-se carga cíclica. Verificou-se na aplicação de cargas estáticas que os conectores embutidos em concreto mais resistente

apresentam maior rigidez do que os embutidos em concreto com resistência menor. Para esse carregamento ainda percebeu-se que a maior parte da deformação que ocorre na viga mista é permanente e que o escorregamento na falha é aproximadamente $1/3$ (um terço) do diâmetro do fuste do conector. Já a resposta dos conectores à carga cíclica é representada por uma trilha bi-linear de carga-deslizamento cuja tangente de rigidez cíclica é quase três vezes a secante de rigidez estática. Ainda percebeu-se que a cada ciclo de carga há um aumento permanente da fadiga dos conectores.

Em uma outra publicação Oehlers (1989) analisou as fissuras que aparecem na laje de concreto de vigas mistas devido à ação dos conectores de cisalhamento, que ao transferirem a força de cisalhamento na interface viga-laje provocam forças laterais de tração. Estas forças podem causar fissuração na laje e perda de interação e resistência ao cisalhamento. No desenvolvimento do trabalho foram realizados 50 testes do tipo *push-out* em lajes com e sem reforço de armadura e ainda um modelo, pelo método dos elementos finitos, para analisar o escorregamento em vigas mistas. A partir deste modelo foi possível prever a ocorrência de fissuração na laje devido à ação individual dos conectores e global de grupos de conectores. Com os resultados obtidos pode-se verificar que o reforço da laje com armaduras transversais não previne as fissuras, mas limita a extensão das mesmas e conseqüentemente a perda de interação da conexão de cisalhamento.

Já Oehlers e Sved (1995) procuraram desenvolver um procedimento para evitar a fratura do conector de cisalhamento, em vigas mistas com baixo grau de conexão de cisalhamento, determinando os principais parâmetros que afetam a fratura. O procedimento foi comparado com pesquisas existentes e é apresentado como recomendação de projeto, podendo ser aplicado para todas as condições de carregamento e seções geométricas de viga mista.

Outro trabalho que analisa conectores de cisalhamento é o desenvolvido por Tristão (2002). Nesta publicação são apresentadas simulações numéricas de ensaios do tipo *push-out*, baseadas no Método dos Elementos Finitos. O objetivo deste estudo é o de analisar o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*stud-bolt*) e perfil “U” formado a frio através do código ANSYS, que permite a análise dos modelos em regime de não-linearidade física e geométrica. Ainda está incluído neste trabalho, um estudo paramétrico para determinar a resistência última e a relação força-deslocamento dos conectores e,

avaliar a concentração de tensão e deformação nos elementos dos modelos. Os parâmetros utilizados nos modelos numéricos são representados pelo número, diâmetro ou espessura e posição de soldagem dos conectores e, pela resistência do concreto e quantidade de armadura inserida. Os resultados são comparados com valores obtidos experimentalmente.

Com o propósito de evitar altas densidades de conectores e longos tempos de soldagem, Shim *et al.* (2004) adotaram conectores maiores que os utilizados normalmente em vigas mistas (19 ou 22 mm de diâmetro), para pisos pré-moldados de pontes. Esses conectores, de 25, 27 e 30 mm de diâmetro, foram testados em vigas mistas com conexão parcial, por meio de ensaio do tipo *push-out* e os resultados foram comparados com equações empíricas para conectores normais. A rigidez ao cisalhamento obtida pelos ensaios foi maior do que a obtida pelas equações, porém a rigidez tem pequena influência no comportamento das vigas mistas, segundo o autor. Para a capacidade de escorregamento última, a equação está de acordo com o medido nos testes e a ductilidade obtida é suficiente para vigas mistas de pontes.

No trabalho de Jurkiewicz e Hottier (2005) estudou-se um novo tipo de conexão de cisalhamento em vigas mistas sujeitas a teste de flexão estática, a conexão horizontal. Este modelo foi proposto para evitar as soldas dos conectores, já que estas podem ser os pontos fracos das vigas mistas, no caso de cargas cíclicas. A proposta foi a de utilizar um perfil metálico “T” invertido, sem o flange superior, com entrâncias na parte da alma que fica embutida no concreto. A conexão da laje com a viga foi feita por seis barras de aço com 16 mm de diâmetro, colocadas em cada entrância no meio da altura da laje, conforme figura 2.16.

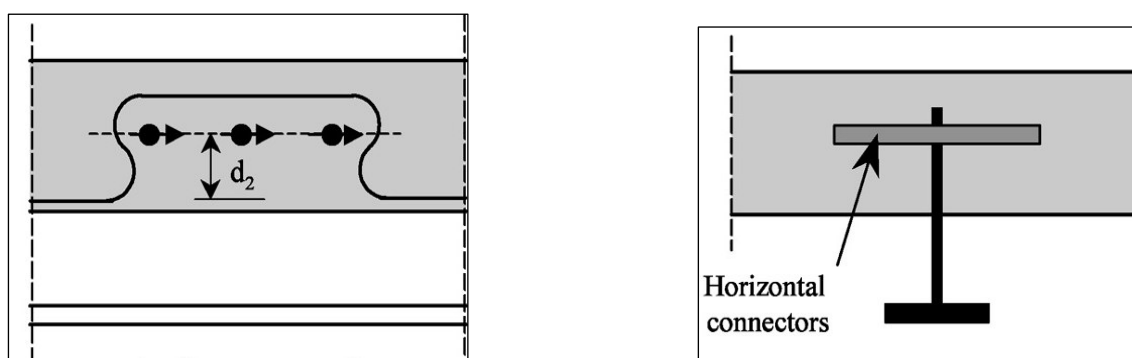


FIGURA 2.16 – VIGA MISTA PROPOSTA
FONTE: JURKIEWIEZ E HOTIER (2005)

Após ensaio do tipo *push-out*, percebeu-se que o comportamento das vigas mistas com conexão horizontal é similar às de conexão usual. A falha à flexão ocorreu no estado plástico, no meio da seção transversal, acompanhado por esmagamento do concreto e escoamento do aço. Portanto, a conexão não falhou durante os testes, ou seja, a conexão transmite eficientemente as forças de cisalhamento da laje para a viga. O escorregamento e o afastamento entre a laje e a viga foram pequenos. Conclui-se que a nova proposta de conexão para vigas mistas sob carregamento estático apresenta um comportamento à flexão satisfatório, de acordo com o requerido por códigos modernos.

Muitos pesquisadores estudam o comportamento de vigas mistas aço-concreto por meio de análises numéricas. Gattesco (1999), por exemplo, analisa quatro vigas mistas considerando o comportamento não linear do aço, do concreto e dos conectores de cisalhamento. Neste trabalho o elemento misto é dividido em dois elementos de viga, um deles representa o perfil metálico e o outro a laje de concreto (Figura 2.17).

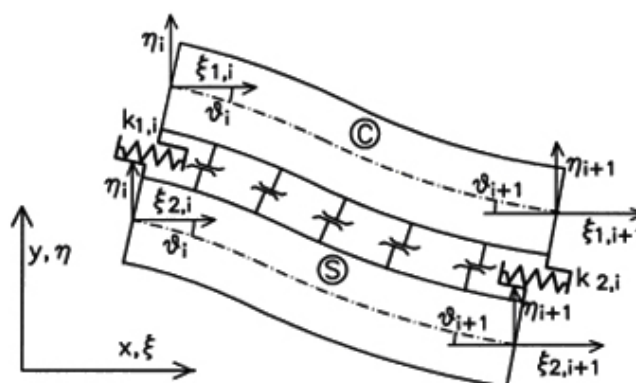


FIGURA 2.17 – ELEMENTO MISTO
FONTE: GATTESCO (1999)

Nas extremidades os elementos são ligados por molas horizontais que representam a ação dos conectores de cisalhamento. O procedimento para a análise da viga mista envolve uma relação empírica força-deslizamento para descrever o comportamento das molas e leva em consideração o atrito existente na interface viga-laje, através de elementos adicionais localizados nos nós intermediários do elemento misto. Neste trabalho o autor comprova que uma abordagem numérica é uma ferramenta válida para estudos de vigas mistas, tanto com interação completa

ou parcial, através da comparação entre os resultados analíticos obtidos com resultados experimentais.

Por outro lado, o estudo de Sapkás *et al.* (2002) utilizou expressões para a análise da estabilidade de vigas mistas ortotrópicas, de seção esbelta. As vigas simplesmente apoiadas ou em balanço estavam sujeitas a momentos devido a aplicação de cargas concentradas ou uniformemente distribuídas. Na primeira expressão obteve-se a flambagem lateral das vigas, enquanto que a outra mostrou a redução da flambagem devido à deformação ao cisalhamento. Como resultado, foi concluído que o efeito de deformação ao cisalhamento é significativo nas vigas mistas.

Alguns pesquisadores preferiram discorrer sobre as aberturas nas almas das vigas mistas, como é o caso de Fahmy (1996) que analisou a resistência última de vigas mistas com aberturas retangulares, não reforçadas, na alma. As aberturas podem ser concêntricas ou excêntricas à seção da viga de aço. O método utilizado considera a interação completa entre a viga de aço e a laje de concreto. Neste caso, a laje contribui na resistência ao cisalhamento da viga. O resultado dos efeitos da excentricidade, altura e comprimento da abertura na resistência das vigas mistas são apresentados e comparados com outros testes realizados por outros pesquisadores.

Para Chung e Lawson (2001) as grandes aberturas nas vigas mistas para a passagem de dutos de serviço representam um grande problema estrutural. Para minimizar os efeitos de cisalhamento e momento fletor nas vigas mistas com grandes aberturas na alma os autores elaboraram um método de projeto seguindo as regras do EUROCODE 4. São fornecidas informações gerais sobre medidas de aberturas em função do cisalhamento e momento fletor de vigas mistas. O efeito das deflexões nas aberturas é estimado pelo tamanho e posição das mesmas. Neste trabalho são apresentados projetos de vigas mistas com grandes aberturas retangulares e circulares. Para auxiliar os projetistas são também fornecidas regras detalhadas para vigas entalhadas.

A largura efetiva de vigas mistas no estado limite de serviço e no estado limite último foi estudada por Amadio e Fragiaco (2002). Neste trabalho os problemas relacionados à avaliação da largura efetiva das vigas foram analisados através de um estudo paramétrico com o código ABAQUS. Nos resultados foram indicados os parâmetros mais importantes que influenciam a largura efetiva das vigas mistas e alguns critérios preliminares para a execução de projeto das mesmas.

Num outro trabalho de Amadio *et al.* (2004) foram realizados testes experimentais para avaliar a largura efetiva de vigas mistas aço-concreto, nos estados elástico e plástico. Este estudo foi realizado na universidade de Trieste em quatro amostras submetidas a momentos positivos e negativos. Uma análise da influência da ligação viga-coluna também foi realizada. Os resultados mostram que em todas as amostras a largura efetiva aumenta com a carga, aproximando a largura inteira da laje ao colapso. A presença da ligação viga-coluna não afeta este resultado. Ao comparar os resultados obtidos com a formulação do EUROCODE 4 percebeu-se que tal aproximação é adequada para as análises elásticas. Para análises do colapso de vigas mistas sob momentos negativos foi apresentada uma modificação simples da proposta do EUROCODE 4.

Outro trabalho de caráter experimental foi o de Chapman e Balakrishnan (1964), que descreve o comportamento de dezessete vigas mistas, simplesmente apoiadas, sob carregamento estático concentrado no meio do vão e também uniformemente distribuído, considerando a variação do número de conectores ao longo do vão, suas distribuições: uniforme e triangular e diferentes alturas e diâmetros dos mesmos. A ênfase do trabalho está no comportamento da conexão de cisalhamento e no efeito do escorregamento na interface aço-concreto durante a aplicação do carregamento. Dentre as conclusões obtidas cita-se que: a utilização do diagrama retangular de tensões se mostrou adequada para cálculo do momento fletor resistente; durante a fase elástica o efeito do escorregamento relativo na interface aço concreto foi pequeno; devido à existência de forças axiais consideráveis nos conectores, estes devem ser devidamente ancorados na região comprimida da laje de concreto; a consideração da capacidade última dos conectores em projeto é razoável; a distribuição uniforme dos conectores se mostrou satisfatória para ambos os carregamentos.

Com a finalidade de calcular a resistência à flexão de vigas mistas contínuas Dekker *et al.* (1995) dividiu-as em duas regiões. Na região de momentos positivos a resistência à flexão é governada pela resistência do concreto e da viga de aço. O cálculo neste caso é baseado no estado plástico das tensões que fornece a capacidade última do momento fletor. Em regiões de momentos fletores negativos, entretanto, a instabilidade local e global da seção de aço e parte da seção de concreto influenciam na resistência última de flexão. Esta instabilidade também influencia na redistribuição do momento fletor da seção pela absorção inelástica das

rotações. Outros fatores que influenciam o comportamento de vigas mistas e suas relações com a geometria da seção e vão das vigas mistas também são discutidos. Para fornecer uma base para avaliar a influência do efeito de torção da laje na viga de aço, foi apresentado um modelo teórico. Este modelo também considera a flambagem do flange e da alma da viga. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de testes experimentais.

Já Li *et al.* (1995) apresenta um método, que usa fórmulas algébricas, para calcular a capacidade de rotação das ligações necessárias na redistribuição dos momentos nas vigas de aço e vigas mistas semi-contínuas. O método é baseado no uso das relações do momento-deformação obtidos da consideração das curvas de tensão-deformação do aço e do concreto. Diversas situações de carga são consideradas junto com as propriedades da viga. Com este método é possível determinar as rotações das ligações requeridas para a redistribuição das porcentagens do momento nos apoios, no meio da seção e em toda a seção longitudinal das vigas. O EUROCODE é utilizado considerando as vigas nos estados elástico e plástico. Por último são ilustrados exemplos através de gráficos.

Loh^a *et al.* (2004) utilizaram testes experimentais para investigar o comportamento de oito vigas mistas sujeitas a momento negativo. O teste foi feito na Austrália para ligações internas principais de vigas mistas, em construções de baixa e de média altura. Neste teste foram considerados os efeitos do carregamento que simulam o vento ou condições moderadas de um terremoto. Três das vigas foram submetidas a um carregamento estático unidirecional. Para as restantes foram considerados ciclos semi-estáticos variando a escala de carregamentos. Os parâmetros utilizados também consideraram a variação do grau da conexão de cisalhamento e a porcentagem de armadura de reforço. Os resultados mostraram que é possível utilizar a conexão de cisalhamento parcial nas regiões de momento negativo de estruturas mistas contínuas e semi-contínuas, válidas para o estado plástico. Não foram percebidas diferenças significativas na capacidade última da carga em vigas projetadas com interações de conexão de cisalhamento mais baixas. Entretanto foi observada uma maior ductilidade pelo aumento na capacidade de rotação. Notou-se também que o desempenho das vigas à fadiga devido à ação das cargas repetidas não foi prejudicado.

Num outro trabalho, Loh^b *et al.* (2004) preferiram desenvolver um modelo analítico interativo para estudar o comportamento das vigas mistas sujeitas a

momento negativo. Os conceitos da interação parcial, que permitem o deslizamento na interface aço-concreto, foram considerados em conjunto com os princípios de equilíbrio. Os resultados analíticos foram comparados com os experimentais relatados anteriormente. A resposta à flexão completa das vigas, incluindo o deslizamento pela falha do conector de cisalhamento foi verificada. Os dados obtidos também foram comparados com dados experimentais publicados na literatura. Essas comparações permitem que se verifique a confiabilidade do modelo. Além disso, foi proposta uma modificação do método rígido-plástico para melhorar a aproximação usada atualmente na prática e facilitar a inclusão da conexão de cisalhamento parcial nas regiões de momento negativo de estruturas mistas.

Já o trabalho de Sapountzakis e Katsikadelis (2003) apresenta uma solução para o problema da flexão em vigas mistas com conexão parcial, incluindo efeitos da deformação lenta e retração do concreto. O modelo adotado leva em conta forças e deformações da placa da laje e da viga metálica, permitindo qualquer distribuição dos conectores ao longo da interface laje-viga. A análise considera a hipótese de que a laje e a viga podem deslizar ao longo da conexão, mas não podem se separar e, a não linearidade do conjunto laje-viga, que é resolvida no Estado Plano de Tensões, pelo Método de Equação Análoga (AEM). Nos exemplos numéricos desenvolvidos pode-se verificar que quanto menor a rigidez do conector maior é a flexão do conjunto misto e, que os valores das forças de cisalhamento na interface laje-viga reduzem significativamente com o decremento da rigidez do conector, ou seja, com o incremento do deslizamento. Ainda verificou-se que a retração nas primeiras idades do concreto predomina para baixos valores de rigidez dos conectores. Já para valores altos de rigidez dos conectores a ação da deformação lenta predominou sobre a retração.

Catai (2005), por outro lado, discorre sobre vigas mistas, enfatizado a aplicação das mesmas em pontes. Neste trabalho estudaram-se as ações e combinações que podem ocorrer nestas vigas e foram apresentadas as principais características das vigas mistas, tabuleiros e conectores de cisalhamento utilizados. Ainda foram observados, para estas vigas, os efeitos da retração e fluência do concreto através de uma análise elástica. O método das tensões admissíveis foi utilizado para obter as tensões atuantes na seção mista, considerando interação completa entre o perfil de aço e o tabuleiro de concreto. Foi possível verificar neste

trabalho, um aumento do deslocamento ao longo do tempo e uma redistribuição de tensões na seção mista devido os efeitos da retração e fluência.

Dall'Asta (2001) define um modelo para análise de vigas mistas com fraca conexão de cisalhamento, submetidas a cargas tridimensionais, considerando não apenas flexão no plano de simetria, mas também flexão transversal e torção. O problema adota o modelo cinemático assumindo que cada componente da seção transversal é rígido em seu plano e apenas escorregamento relativo pode acontecer na interface da laje e viga, enquanto o contato é preservado, ou seja, não há deslocamento vertical entre a viga e a laje. O modelo analisa a torção em seções caixão mistas, apresentando resultados para seção caixão mista retangular. Observou-se que a rotação ao redor do eixo de torção da viga provoca tensão e deformação na seção transversal dos componentes da viga e que a deformação total é a soma da rotação e empenamento, enquanto a força de escorregamento na interface é controlada apenas pelo empenamento da seção.

Fabbrocino *et al.* (2002) desenvolveu no seu trabalho aspectos computacionais da modelagem de membros mistos à flexão, de sistemas estruturais contínuos e semi-contínuos. O objetivo da análise foi o de avaliar a ductilidade, a capacidade de rotação e o comportamento estrutural de vigas mistas e colunas, sob carga cíclica. O foco do trabalho está na transferência de cargas e desenvolvimento da rotação em regiões das ligações das estruturas mistas. O modelo cinemático clássico de Newmark foi utilizado para simplificar a seção transversal dos elementos mistos (Figura 2.18). O estudo ainda utiliza a técnica de diferenças finitas e uma relação generalizada de momento-curvatura para o escorregamento.

Numa outra publicação, Dall'Asta e Zona (2002) abordaram alguns aspectos para a convergência da solução não linear de vigas mistas quando se utiliza a técnica de elementos finitos. A análise do elemento finito está baseada no método dos deslocamentos de acordo com o modelo cinemático de Newmark (Figura 2.18).

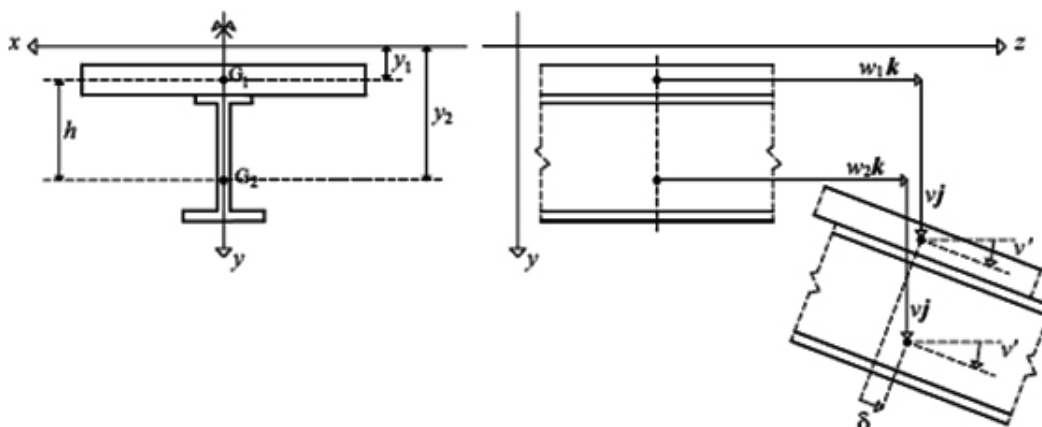


FIGURA 2.18 – MODELO CINEMÁTICO DE NEWMARK
 FONTE: DALL'ASTA E ZONA (2002)

A força no conector de cisalhamento é calculada pelo escorregamento, assumindo-se a relação constitutiva da conexão e, a tensão normal foi calculada pela deformação axial considerando-se as relações constitutivas dos materiais da viga mista. Foram comparadas soluções dos elementos com oito, dez e dezesseis graus de liberdade. A aplicação numérica se deu a partir da análise de uma viga contínua com dois vãos onde aparecem fissuras e esmagamento no concreto, escoamento do aço e a conexão trabalhando no limite não linear constante de baixos níveis de carga. Para evitar o colapso da conexão antes da viga ou da laje alcançarem o estado limite último, utilizou-se conexão total. Observou-se que a obtenção de boas soluções não lineares requer que um grande número de graus de liberdade e grande esforço computacional.

A proposta de um elemento finito misto de três campos, para análise de vigas mistas em balanço, com conexões de cisalhamento deformáveis, foi apresentada por Dall'Asta e Zona^a (2004). A formulação considera o comportamento não linear dos materiais e compara o elemento proposto com um elemento de deslocamento livre e outro de deslocamento livre mais refinado. O modelo cinemático adotado, o modelo de Newmark (Figura 2.18), considera apenas descontinuidades paralelas ao eixo da viga, ou seja, o deslocamento ortogonal ao eixo da viga é o mesmo tanto para a viga quanto para a laje. Ainda se considera apenas a flexão no plano da viga, não há torção. Os efeitos da deformação da conexão são considerados pelo uso de um modelo de interface que preserva o contato entre os componentes da viga. De acordo com os autores, elementos finitos baseados no método dos deslocamentos apresentam uma formulação simples,

porém o elemento é afetado pelo travamento ao deslocamento quando a rigidez da conexão aumenta. Pelos resultados obtidos observa-se que o elemento misto fornece distribuições de força axial e momento fletor mais regulares na análise não linear, porém requer mais formulações e tempo computacional. Além disso, a convergência é lenta para altas não linearidades. Quando comparado com o elemento de deslocamento livre refinado, o elemento misto apresenta pequenas vantagens na descrição de forças axiais e distribuição de momentos fletores. Já o elemento refinado fornece maior precisão na descrição do escorregamento e força de cisalhamento, tem simples formulação e convergência e, o estado não linear é obtido com boa confiança.

Dall'Asta e Zona^b (2004), numa outra publicação, discutiram o problema que aparece na análise por elementos finitos de vigas mistas com conexão deformável, que é o deslizamento entre os componentes da viga. Neste trabalho também foi utilizado o modelo cinemático de Newmark (Figura 2.18). Segundo os autores, para altos valores de rigidez da conexão ocorrem problemas de travamento ao deslizamento. Para evitar o travamento ao deslizamento propõe-se a estratégia de calibrar a escolha das funções de forma do deslocamento e comparar diferentes elementos baseados no deslocamento, com relação aos erros local e global, taxa de convergência e efeitos do travamento ao deslizamento. Pelos resultados dos testes numéricos observou-se que os elementos mistos podem ser afetados pelo travamento ao deslizamento. Os autores afirmam que é possível reduzir o travamento ao deslizamento através do uso de baixos graus de liberdade das funções de forma do escorregamento e força na interface laje-viga, porém a utilização destas entidades fornece resultados com pouca precisão. Por outro lado, elementos de deslocamento livre, formulados de acordo com a compatibilidade entre os campos axial e de flexão e, elementos mistos baseados nas funções de forma de deslocamento livre permitem obter resultados mais precisos tanto na análise linear quanto na não linear.

Outro trabalho desenvolvido por Dall'Asta e Zona^c (2004) apresentou análises não lineares de vigas mistas contínuas com baixo grau de conexão de cisalhamento, usando um elemento misto de três campos. O objetivo deste artigo é avaliar a eficiência do elemento proposto em comparação com dois elementos de deslocamento livre cujos nós internos foram previamente testados. O método utilizado, que introduz aproximações polinomiais para os campos de deformação e

de tensão no interior de cada elemento, também faz uso do modelo cinemático de Newmark (Figura 2.18). As aplicações numéricas foram realizadas com vigas contínuas de dois vãos com interação total. Pelos resultados notou-se que o elemento proposto e o de deslocamento livre apresentam comportamento similar global, na descrição dos campos de deslocamento e deformação local. Verificou-se que os resultados numéricos apresentaram boa aproximação com resultados experimentais. Em relação às malhas adotadas, observou-se que os resultados numéricos da viga no colapso são influenciados pelas mesmas. Malhas pouco refinadas resultam em uma superestimação das pesquisas estruturais, enquanto malhas muito refinadas requerem grande esforço computacional. Verificou-se ainda que os melhores resultados dos modelos, levando em conta a carga de colapso e a deflexão última, foram obtidos quando a razão entre o comprimento e a altura da seção foi próxima de dois.

O trabalho de Faella *et al.* (2002) apresenta um modelo exato de elemento finito para análise de viga mista com conexão flexível. Este modelo está baseado no deslocamento e é considerado exato porque a matriz de rigidez (K) e o vetor de forças nodais equivalente (Q_c) derivam da solução da equação diferencial exata proposta pela teoria de Newmark, ou seja, não são utilizadas funções de forma aproximadas para o campo de deslocamentos. O modelo pode ser utilizado para analisar vigas mistas contínuas com conexões flexíveis e também em análises ao longo do tempo como retração e deformação lenta, utilizando métodos algébricos viscosos simples. Pelas aplicações do modelo verificou-se que: as fissuras da laje de concreto aumentam a redistribuição do momento em relação à situação não fissurada; a deflexão é maior para vigas mistas com interação parcial devido o decréscimo de rigidez à flexão da conexão flexível e, a redistribuição de momento fletor em vigas contínuas é influenciada pela interação de cisalhamento parcial. Conclui-se que o modelo pode ser empregado para avaliar diversas situações como: situação de serviço de vigas mistas, efeitos de fissuras, comportamento não linear da conexão de cisalhamento e comportamento do concreto ao longo do tempo.

Ranzi e Bradford (2006) apresentam um modelo algébrico para análise de efeitos dependentes do tempo que ocorrem em vigas mistas com interação parcial, devido à deformação da conexão. Os efeitos são: a fluência e a retração da laje de concreto. A análise é feita para cargas de serviço. O modelo pode ser aplicado para análise de vigas mistas sujeitas à condições genéricas de carregamento e diversos

tipos de apoio, inclusive vigas contínuas e, usa solução de forma fechada que, segundo os autores, requerem apenas uma discretização que é no domínio do tempo. O perfil metálico, a armadura da laje e a conexão de cisalhamento são considerados com comportamento elástico linear. Já o concreto depende do tempo. Seu comportamento é modelado algebricamente pelo método módulo de ajuste de idade (AEMM) e pelo método de tensões (MS), que são modelos viscoelásticos para deformação do concreto. Após a aplicação do modelo em vigas mistas pode-se observar que os resultados obtidos com o uso de soluções de forma fechada são iguais aos encontrados pelo método de rigidez direto.

Oven *et al.* (1997) também desenvolveu um modelo para estudar o comportamento de vigas mistas com interação parcial. Este modelo utiliza o programa INSTAF e está baseado em uma análise não linear por elementos finitos em 2D, conforme figura 2.19.

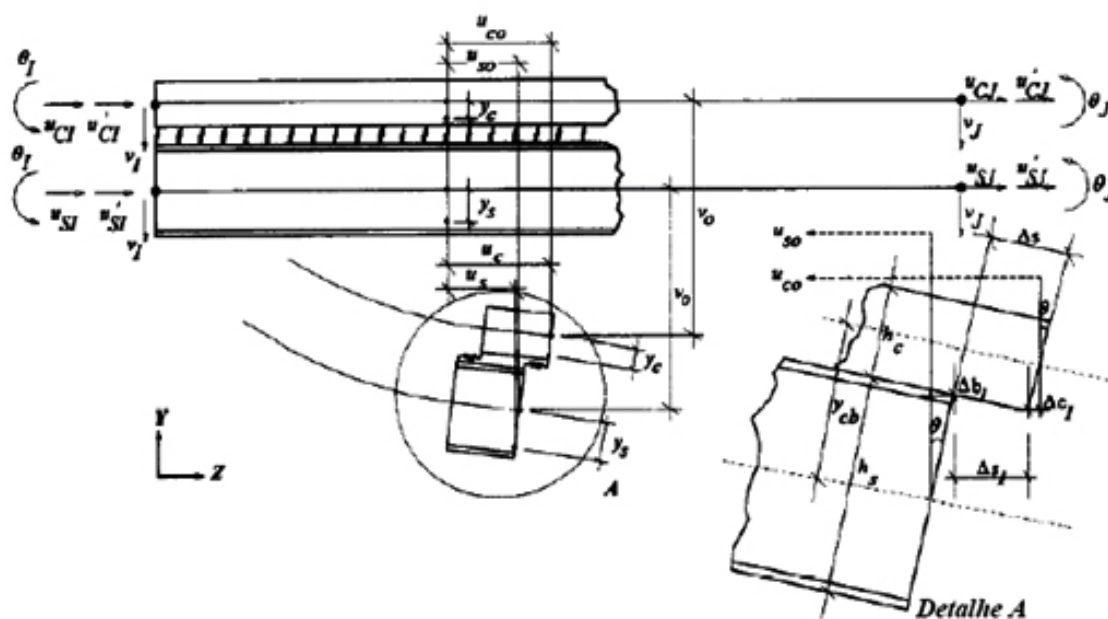


FIGURA 2.19 – ELEMENTO FINITO
FONTE: OVEN *et al.* (1997)

No modelo matemático adotado por Oven *et al.* (1997), a distribuição das deformações axiais na laje e no perfil metálico é linear, com valores diferentes para a laje e perfil; assume-se um cisalhamento médio contínuo para os conectores ao longo do comprimento da viga e, que o deslocamento vertical, a rotação e a flexão da laje e da viga metálica são idênticos no final do elemento, que tem seis graus de liberdade. São verificados os efeitos do escorregamento entre o perfil metálico e a

laje de concreto ao longo do comprimento da viga e o comportamento carga-deflexão das vigas mistas. Segundo o autor, o processo analítico representa uma ferramenta poderosa para a predição do comportamento de vigas mistas com interação parcial e, quando comparado com dados experimentais e analíticos o modelo computacional fornece resultados consistentes.

O trabalho realizado por Jurkiewiez e Braymand (2007) trata-se de um experimento realizado com vigas mistas. Os testes experimentais foram realizados com a aplicação lenta de cargas, aumentando-as até a falha da viga mista, após ciclos de descarregamento e carregamento, no domínio elástico. Durante os testes foram medidos: a flexão, o deslocamento vertical, a aplicação da carga, a deflexão da viga, a deformação longitudinal na laje de concreto e na viga, o escorregamento, a deformação axial dos conectores e a largura das fissuras da laje de concreto. Dividiu-se o comportamento geral da viga em: domínio elástico, de escoamento e de falha. Verificou-se que a viga apresenta boa ductilidade nos domínios elástico e de escoamento. Para altas compressões aparecem falhas e esmagamento na laje, acompanhada por deformações plásticas na viga de aço. A deflexão horizontal dos conectores muda significativamente durante o carregamento. Pode-se notar no estado de tensão-deformação da viga que os conectores parecem estar embutidos na laje somente quando as fissuras estão quase fechadas. Conclui-se que o efeito das fissuras não influencia significativamente as principais variáveis do comportamento à flexão da viga, porém o escorregamento e deformações nos conectores dependem das fissuras.

Bradford e Kemp (2000) procuraram revisar os trabalhos encontrados na literatura que tratam de flambagem local, lateral e torcional, que ocorrem em regiões de momento negativo de vigas mistas contínuas (Figura 2.20). Segundo os autores, nestas regiões o perfil metálico está sujeito a combinação de esforços de tração e compressão e, portanto, propenso à flambagem. Os modos de flambagem verificados em vigas mistas sob flexão negativa podem ser local ou global e, os modos de falhas mais importantes são: a flambagem local do flange do perfil, local da alma e lateral-torcional. Quando estas flambagens são controladas pode-se obter grande capacidade de rotação, valor que fica além da resistência do momento plástico.

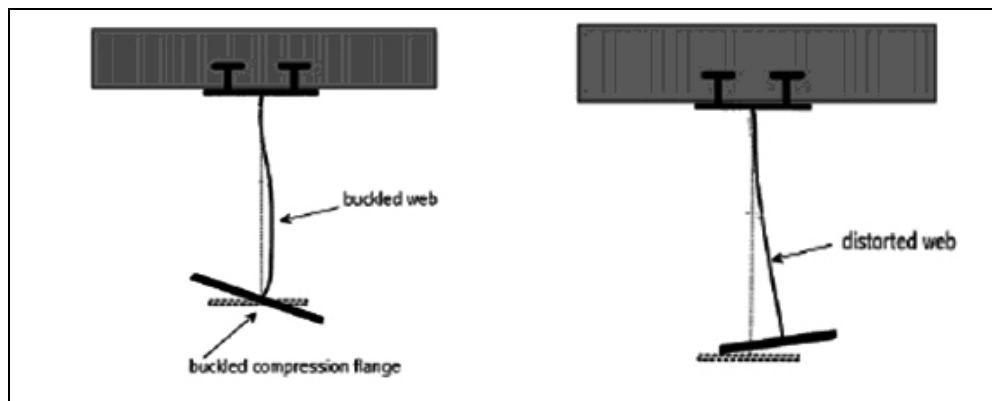


FIGURA 2.20 – FLAMBAGEM LOCAL E TORSIONAL DE VIGA MISTA EM FLEXÃO NEGATIVA
 FONTE: BRADFORD E KEMP (2000)

Já o trabalho de Wendel (2003) apresenta uma análise, por elementos finitos, da ductilidade requerida da conexão viga metálica-laje de concreto sob cargas externas, cuja resposta estrutural foi dividida em três fases. A primeira considera que as conexões se comportam elasticamente. A segunda é definida por escoamentos seqüenciais das conexões. E na terceira todas as conexões apresentam deformações plásticas até a carga última da viga. Na primeira fase a distribuição da força de cisalhamento nas conexões é irregular. Quando inicia o escoamento das conexões ocorre à redistribuição da força e, a deformação plástica, na segunda fase, acontece com o aumento da carga. Na terceira fase todas as conexões continuam se deformando. Verificou-se, neste trabalho, que quando a carga última da viga mista é obtida a ductilidade requerida das conexões aumenta com a redução da concordância das conexões. Por outro lado, antes da viga mista atingir a carga última, a ductilidade requerida no escoamento de todas as conexões reduz com a redução da concordância das conexões.

Baskar e Shanmugam (2003) investigaram experimentalmente placas de vigas mistas sujeitas a ação combinada de cisalhamento e flexão, procurando analisar o comportamento das placas de vigas mistas sob carga última. O foco do estudo foi à variação da ação do campo de tensões na alma das vigas, devida à ação mista entre o perfil metálico e a laje de concreto. Além dos resultados experimentais, apresentou-se uma análise das vigas mistas por elementos finitos, através do código ABAQUS. No ABAQUS utilizou-se um modelo de elemento 3D. Verificou-se que o comportamento tanto de vigas mistas submetidas à flexão negativa quanto das submetidas à flexão positiva é similar na falha por

cisalhamento, porém na ação combinada de flexão e cisalhamento, verificou-se maior eficiência da ação mista em vigas com flexão positiva do que nas com flexão negativa. Ainda observou-se, na análise por elementos finitos, que o modelo de concreto, que considera fissuras na laje, é capaz de prever o comportamento e carga última com precisão razoável.

Virtuoso e Vieira (2004) utilizaram o Método dos Elementos Finitos para analisar os efeitos da fluência e retração do flange do concreto no comportamento de vigas mistas aço-concreto com interação parcial. Neste trabalho são avaliadas a tensão, a redistribuição e a evolução das forças internas, bem como os deslocamentos correspondentes. O comportamento não linear do concreto é considerado examinando a fissura do flange em momentos negativos. O comportamento não linear da conexão entre a viga de aço e o flange do concreto é considerado a fim de simular resultados experimentais. A análise foi feita levando-se em consideração o equilíbrio interno das forças. O comportamento visco-elástico do concreto é considerado através de um processo incremental no tempo por um método numérico baseado na aproximação da deformação lenta com um número finito de termos da série complexa. Ainda neste trabalho são apresentados alguns exemplos numéricos.

Segundo Liang *et al.* (2004) as normas atuais de projeto são conservadoras, pois estas ignoram as contribuições da laje de concreto e a ação mista da resistência ao cisalhamento vertical em vigas mistas contínuas aço-concreto. Por isso os autores desenvolveram um modelo tridimensional baseado no Método dos Elementos Finitos para investigar a resistência última de vigas mistas contínuas na combinação de flambagem e cisalhamento. Este método analisou o comportamento não-linear da geometria e material de vigas mistas contínuas. Após a verificação do modelo de elementos finitos por resultados experimentais, foram estudados os efeitos da laje de concreto e da conexão de cisalhamento na resistência ao esforço cortante. Os resultados mostraram que a laje de concreto e a ação mista aumentam significativamente a resistência última das vigas mistas contínuas. Com base nos resultados numéricos foi proposto um modelo de projeto para verificar a resistência de cisalhamento vertical e a interação momento-cortante. Este modelo incorporou os efeitos da laje de concreto, da ação mista, da falha do conector e da flambagem ao cortante na alma da viga mistas contínuas. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais.

O modelo numérico tridimensional elaborado por Kirchhof (2004) também tomou como base o Método dos Elementos Finitos. O objetivo deste trabalho foi o de simular, através do código de cálculo ABAQUS, o comportamento estrutural de vigas mistas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. A validação dos resultados foi realizada comparando-se com os valores obtidos numérica e experimentalmente por outros pesquisadores.

Fatmi e Zenzri (2004) utilizaram o Método dos Elementos Finitos para simplificar a implementação numérica da teoria da viga elástica. O método numérico proposto foi desenvolvido a partir de uma caracterização tridimensional de operações de cálculo de vigas mistas homogêneas feitas com materiais isotrópicos e laminadas, simétricas e assimétricas, feitas de materiais transversalmente isotrópicos. Este método consiste em resolver sete problemas da elasticidade definida para uma parte longitudinal da viga. Os resultados foram obtidos pelo uso de softwares que fazem a triangulação dos nós de elementos espaciais. Com a obtenção dos dados relativos a rigidez estrutural das vigas mistas, ligações elásticas, deformações e tensões tridimensionais foi possível validar o modelo, comparando os resultados obtidos com os disponíveis de outros pesquisadores.

Com a intenção de avaliar a fadiga nas vigas mistas de pontes, Seracino *et al.* (2004) desenvolveu um procedimento simplificado. Foi dada atenção à resistência ou a força residual da conexão de cisalhamento. Também foi considerado o aumento das tensões nos componentes do aço e concreto devido à interação parcial. Este trabalho foi baseado na teoria elástica linear da interação parcial. O fluxo das tensões da interação parcial nos componentes do aço e concreto foi determinado e utilizado para prever mais exatamente a força ou a resistência residual da seção mista. Esta pesquisa é aplicável para vigas mistas com qualquer seção transversal, comprimento, e distribuição de conectores de cisalhamento. A técnica é validada por uma modelagem baseada no método de elementos finitos.

A título de simular o comportamento estrutural de vigas mistas, Kotinda (2006) apresenta modelos numéricos tridimensionais enfatizando a interface entre a viga de aço e a laje de concreto. As simulações tomaram como base o Método dos Elementos Finitos e foram realizadas por meio do código de cálculo ANSYS versão 8.0. Os modelos simulados se constituem por vigas mistas simplesmente apoiadas com laje de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça. Neste trabalho procurou-se gerar um modelo capaz de representar o comportamento

estrutural global de vigas mistas aço-concreto, e alguns aspectos localizados, como a concentração de tensões nos conectores de cisalhamento e na região da laje próxima aos conectores. A validação das simulações foi feita por comparação dos modelos com valores experimentais de outros pesquisadores.

O escopo do trabalho de David (2007) também foi a análise do comportamento de vigas mistas simplesmente apoiadas, através de análise experimental e numérica. Neste estudo utilizou-se para a viga metálica um perfil formado a frio e para a laje vigotas pré-moldadas treliçadas. Já os conectores utilizados foram perfis “U” formados a frio. A modelagem numérica foi realizada com o auxílio do código ANSYS versão 8.0. Verificou-se neste estudo que a taxa de armadura transversal interfere na fissuração da laje e tem pequena influência na resistência da viga mista; a posição dos conectores em relação às vigotas não influencia a resistência da viga mista; o deslizamento relativo na interface viga laje é nulo, enquanto existe aderência química entre os elementos e a força para a qual a aderência é rompida varia de viga para viga e, que o modelo de plastificação total para as vigas em perfis formados a frio de seção compacta é satisfatório na representação das mesmas.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta pesquisa, foram adotados modelos de vigas mistas extraídos dos trabalhos: experimental de Chapman e Balakrishnan (1964) e numérico de KOTINDA (2006), que disponibilizou um roteiro (script) para a geração dos mesmos. Dessa forma, foram utilizados para os modelos simulados nesta dissertação, a mesma geometria, parâmetros, propriedades dos materiais e nomenclatura das vigas mistas, definidos nos trabalhos referenciados.

Os modelados simulados contemplam vigas mistas simplesmente apoiadas (figura 3.1), de alma compacta, com interação total, laje plana de concreto armado com armadura nas duas direções (transversal e longitudinal), sujeitas a dois tipos de carregamentos: concentrado no meio do vão e uniformemente distribuído entre os apoios das vigas. Os conectores de cisalhamento utilizados nesses modelos são do

tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e apresentam três valores distintos de alturas e diâmetros.

A modelagem numérica foi iniciada com a definição da geometria das vigas mistas (figura 3.1). Depois, foram escolhidos os elementos finitos, disponíveis na biblioteca do programa ANSYS, para discretizar as peças. Em seguida, foram introduzidas, no código adotado, as propriedades e relações constitutivas dos materiais. Posteriormente, definiu-se a malha, os acoplamentos e vinculações entre os elementos, considerando a condição de simetria e conseqüente restrição dos graus de liberdade, bem como a vinculação no apoio da viga e o carregamento.

A seguir serão apresentadas algumas características do Método dos Elementos Finitos (MEF) e a descrição das etapas da modelagem das vigas mistas.

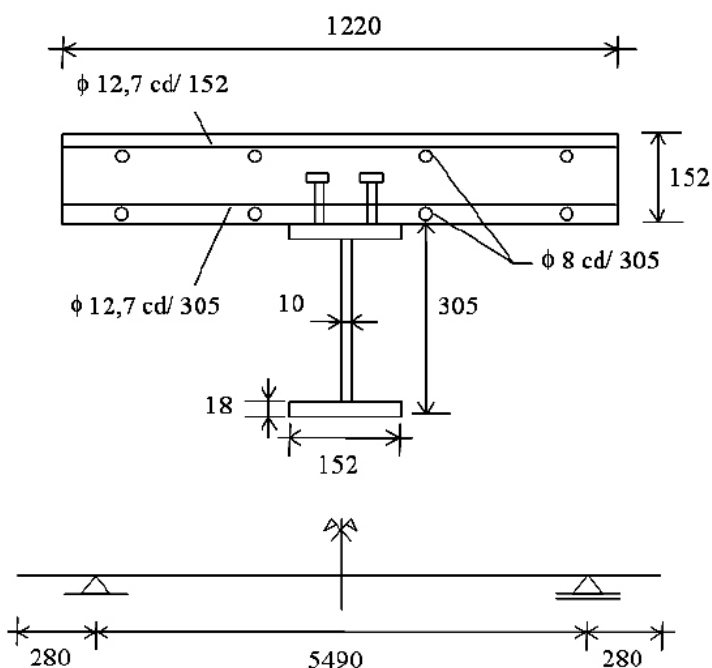


FIGURA 3.1 – DIMENSÕES (MM) DOS MODELOS SIMULADOS
FONTE: KOTINDA (2006)

3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A origem do Método dos Elementos Finitos (MEF), de acordo com Oliveira *apud* Lotti *et al.* (2007), ocorreu no final do século XVIII, com a proposta da utilização de funções de aproximação, por Gauss, para a solução de problemas matemáticos.

Porém o grande impulso para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do MEF ocorreu a partir do avanço tecnológico dos equipamentos computacionais, por volta de 1950, cuja aplicação se deu especialmente na indústria aeroespacial (PEREIRA, 2007).

Segundo Pereira (2007) o MEF é um método matemático utilizado para a solução de equações diferenciais parciais, definidas sob domínios complexos, que consiste numa adaptação de métodos de aproximação conhecidos.

De acordo com o Thorus Scisoft Web Presence (2007), o MEF pode ser entendido como uma aproximação discreta, que possui um número finito de incógnitas, para um problema contínuo, com número infinito de incógnitas. No MEF a região do espaço que delimita o problema é modelada por uma aproximação polinomial local controlada por coeficientes. Esta região é dividida em um número finito de elementos geométricos cujo campo contínuo dos mesmos contém as variáveis da equação diferencial parcial. A partir das conexões nodais compartilhadas dos elementos é possível obter um conjunto de equações algébricas que pode ser solucionado numericamente por métodos de otimização e algoritmos matriciais (THORUS SCISOFT WEB PRESENCE, 2007).

A modelagem através do MEF possui etapas operacionais que são descritas a seguir, conforme a Thorus Scisoft Web Presence (2007):

- Descrição geométrica da região do espaço que será considerada na modelagem;
- Geração de uma malha de elementos interconectados por nós;
- Definição das equações e condições de contorno que regem o problema;
- Solução numérica do sistema algébrico resultante;
- Resultados visualizados no pós-processamento.

3.2 ELEMENTOS FINITOS ADOTADOS NA MODELAGEM NUMÉRICA

Para a discretização das peças componentes da viga mista, foram escolhidos elementos finitos, disponíveis na biblioteca do programa ANSYS, idênticos aos definidos por Kotinda (2006). As características dos elementos são apresentadas a seguir.

3.2.1 Elemento SOLID 65

O elemento tridimensional SOLID 65, utilizado na discretização da laje de concreto, é constituído por oito nós (figura 3.2), em que cada nó possui três graus de liberdade, no caso, translações em x , y e z .

O SOLID 65 é capaz de simular o comportamento de materiais como o concreto, ou seja, fissuração na tração (nas três direções ortogonais) e esmagamento na compressão, bem como um comportamento de não linearidade física para análise de deformações plásticas, por exemplo.

O elemento também possibilita a inclusão das barras de armadura de forma discreta ou na forma de taxas, denominada armadura dispersa, as quais são resistentes apenas à esforços de tração e de compressão. Essas barras de armaduras são orientadas no elemento segundo os ângulos ϕ e θ (figura 3.2).

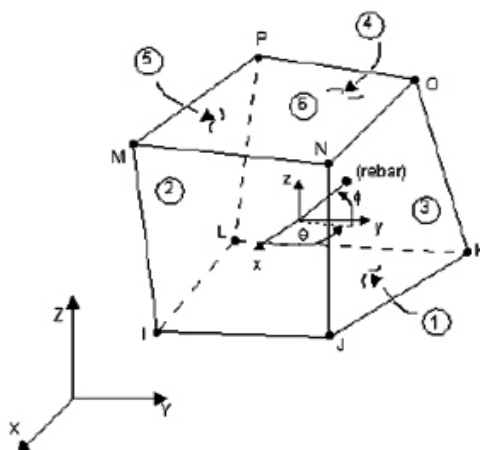


FIGURA 3.2 – ELEMENTO SOLID 65
FONTE: BIBLIOTECA DO ANSYS

3.2.2 Elemento SHELL 43

O elemento SHELL 43 (figura 3.3), utilizado na discretização do perfil de aço, é um elemento plano, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. Esse elemento permite a consideração de não-linearidade do material e apresenta deformação linear no plano em que está contido.

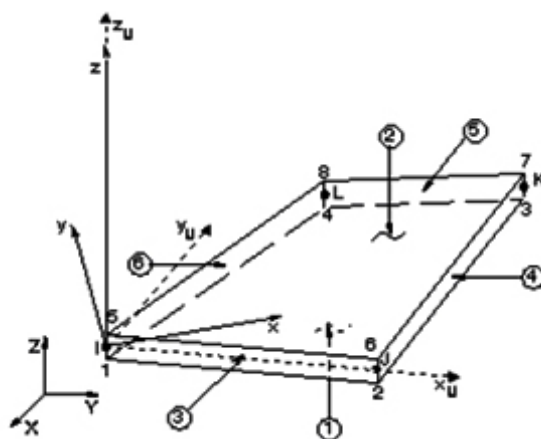


FIGURA 3.3 – ELEMENTO SHELL 43
 FONTE: BIBLIOTECA DO ANSYS

3.2.3 Elemento BEAM 189

A modelagem dos conectores de cisalhamento foi feita com o elemento BEAM189 (figura 3.4), ou seja, com elemento de viga com três nós (I, J e K) e seis graus de liberdade por nó incluindo as translações e as rotações segundo os eixos x , y e z . Esse elemento foi escolhido por proporcionar uma modelagem mais simples, uma vez que evita a utilização de elementos finitos do tipo mola, que requerem dados experimentais para a definição dos parâmetros utilizados no ANSYS. Além disso, o elemento BEAM 189 permite a configuração da forma da seção transversal, possibilita a consideração da não linearidade física do material e responde a esforços de flexão.

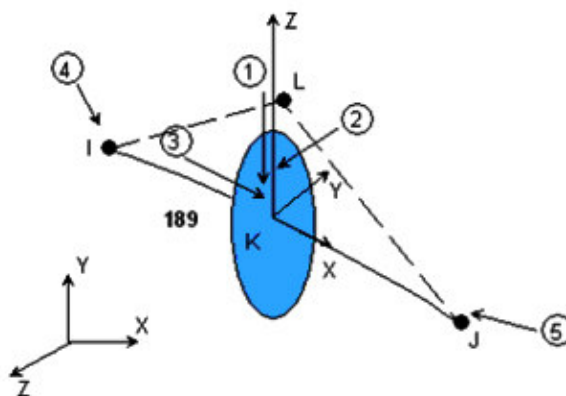


FIGURA 3.4 – ELEMENTO BEAM 189
 FONTE: BIBLIOTECA DO ANSYS

3.2.4 Elemento TARGE 170 e CONTA 173

Os elementos TARGE 170 e CONTA 173 (figura 3.5) são definidos pelo ANSYS como elementos de contato, os quais possuem três graus de liberdade em cada nó, com translações segundo x , y e z . Os elementos trabalham associados para dar origem ao par de contato.

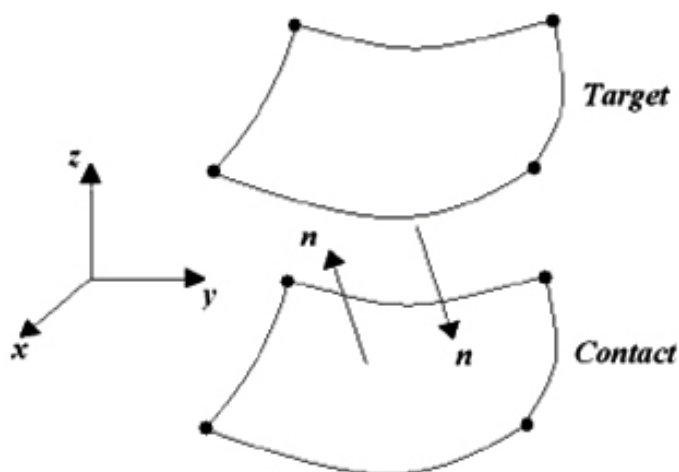


FIGURA 3.5 – ELEMENTO TARGE 170 E CONTA 173
FONTE: BIBLIOTECA DO ANSYS

Ambos os elementos representam o contato existente na interface entre laje de concreto e viga de aço. Esses elementos, utilizados em análises tridimensionais com contato do tipo superfície-superfície, são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e a separação entre os mesmos, quando não há contato. O par de contato ainda permite a consideração de atrito e coesão (adesão) entre as partes. As características geométricas dos elementos variam com o tipo de elemento sobre o qual eles são aplicados.

O elemento TARGE 170 é definido para a superfície alvo e o elemento CONTA 173 para a superfície de contato. A superfície alvo é a mais rígida e a superfície de contato a mais deformável, não levando em consideração, neste caso, o tipo de material.

O elemento de contato trabalha quando ocorre a transferência de tensões de compressão no contato e nenhuma força de tração é transferida quando ocorre

separação entre as superfícies, ou seja, quando a superfície de contato penetra na superfície alvo inicia-se o trabalho do elemento de contato.

Para que se possa controlar a intensidade de penetração e de afastamento entre as duas superfícies é necessário estabelecer o fator de rigidez de contato normal (FKN) entre as superfícies (alvo e contato), o fator de rigidez de contato tangencial (FKT), que é proporcional à rigidez normal e ao coeficiente de atrito e , a tolerância de penetração entre as duas superfícies, denominada de FTOLN. Essa tolerância juntamente com o FKN tem grande influência na convergência durante o processamento do modelo.

3.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As características e propriedades dos materiais das vigas mistas utilizadas nas simulações, adotadas em concordância com os modelos experimentais de Chapman e Balakrishnan (1964) e numéricos desenvolvido por Kotinda (2006), são apresentadas no quadro 3.1. Nesse quadro, a viga mista A3 representa o modelo com carregamento concentrado no meio do vão e a viga mista U3, o modelo com carga distribuída uniformemente ao longo do vão.

VIGA		A3	U3
Tipo de carregamento		Concentrado no meio do vão	Uniformemente distribuído
Número de conectores		68	56
Diâmetro do corpo do conector (mm)		19	19
Altura total do conector (mm)		102	102
f_{cm} cilíndrico (kN/cm ²)		1,84	2,99
E_{cm} (kN/cm ²)		2.642	3.055
E (kN/cm ²)	Alma	19.456	20.064
	Mesa	20.064	19.912
f_y (kN/cm ²)	Alma	30,2	23,0
	Mesa	25,2	23,2
f_u (kN/cm ²)	Alma	44,4	41,5
	Mesa	44,7	42,0
ϵ_h/ϵ_y	Alma	1,0	8,2
	Mesa	1,0	5,2
E (kN/cm ²)	Conectores	20.500	20.500
f_u (Kn/cm ²)		51,4	51,4
f_y (Kn/cm ²)		42,1	42,1
E (kN/cm ²)	Armadura	20.500	20.500
f_y (kN/cm ²)		32,0	32,0

QUADRO 3.1 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Quanto as variáveis têm-se:

f_{cm} = valor médio da resistência à compressão do concreto para corpo de prova cilíndrico;

E_{cm} = módulo secante de elasticidade do concreto;

E = módulo de elasticidade do aço;

f_y = tensão de escoamento do aço;

f_u = tensão última do aço;

ε_y = deformação elástica;

ε_h = deformação de início de encruamento.

3.4 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

O comportamento estrutural dos elementos da viga mista foi definido a partir de relações constitutivas, implementadas por Kotinda (2006) e descritas a seguir.

3.4.1 Aço do Perfil

A simulação do comportamento estrutural do aço do perfil foi feita por meio de uma relação elasto-plástica multilinear com encruamento isótropo, associada ao critério de plastificação de von Mises. A curva tensão (σ) deformação (ε) segue o modelo constitutivo apresentado por Gattesco (1999), conforme ilustra a figura 3.6.

Até a tensão de escoamento (f_y) o modelo adotado é elástico linear, entre o limite de deformação elástica (ε_y) e deformação de início de encruamento (ε_h) é perfeitamente plástico e a partir deste ponto até a tensão de ruptura (f_u) é descrito pela equação 3.1.

$$\sigma = f_y + E_h \cdot (\varepsilon - \varepsilon_h) \cdot \left[1 - E_h \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_h}{4(f_u - f_y)} \right], \text{ com } E_h = 350 \text{ kN/cm}^2 \quad (3.1)$$

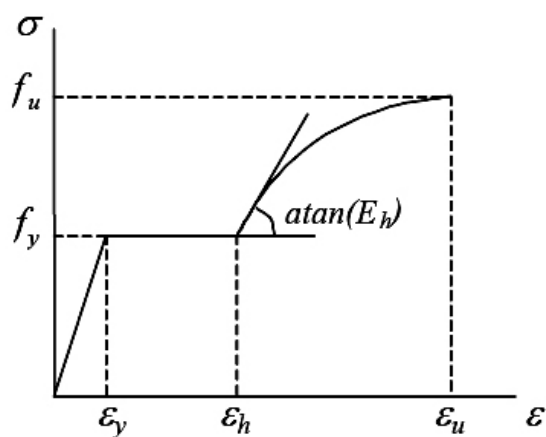


FIGURA 3.6 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DO PERFIL
 FONTE: KOTINDA (1999)

3.4.2 Aço dos Conectores

O modelo adotado para o aço dos conectores é do tipo bilinear com encruamento isótropo, também associado ao critério de plastificação de von Mises.

A curva da figura 3.7 mostra o diagrama tensão-deformação para o aço dos conectores.

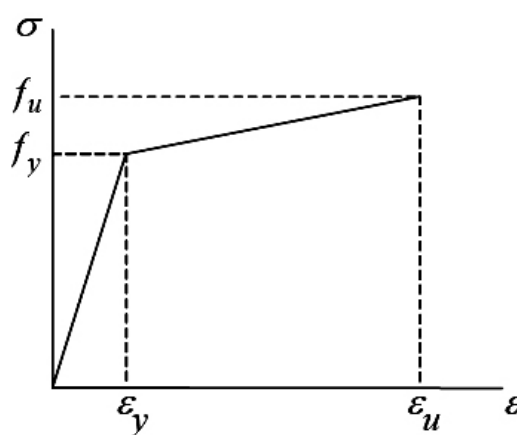


FIGURA 3.7 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DOS CONECTORES*
 FONTE: KOTINDA (2006)

* $\epsilon_u = 2\%$

3.4.3 Aço da Armadura

A relação constitutiva para o aço da armadura segue um modelo elasto-plástico perfeito e também está associada ao critério de plastificação de von Mises, com base na relação entre as tensões uniaxiais e suas respectivas deformações plásticas equivalentes, conforme indica o diagrama de tensão-deformação apresentado na figura 3.8.

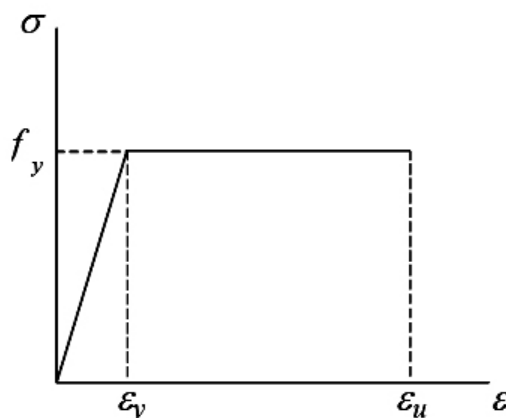


FIGURA 3.8 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O AÇO DA ARMADURA*
 FONTE: KOTINDA (2006)

3.4.4 Concreto

A relação constitutiva adotada para a laje de concreto na tração segue o modelo CONCRETE, disponibilizado pelo ANSYS, que tem como base o critério de ruptura para o estado multiaxial de tensões, de acordo com o modelo de Willan-Warnke e permite simular o esmagamento do concreto na compressão e a fissuração na tração do concreto.

Para a utilização do modelo CONCRETE foi necessário definir alguns parâmetros. Estes parâmetros foram os mesmos adotados por Kotinda (2006) e estão apresentados no quadro 3.2, no qual se observa que o valor adotado para a

* $\epsilon_u = 1\text{‰}$

resistência última uniaxial à compressão, que indica a resposta do concreto ao esmagamento, foi desabilitada para evitar instabilidades numéricas, admitindo-se o critério de plastificação de von Mises para o concreto à compressão. Já para os cinco últimos parâmetros utilizaram-se valores pré-estabelecidos pelo ANSYS.

Descrição dos Parâmetros	Valores Adotados
Coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta	0,2
Coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada	0,6
Resistência última uniaxial à tração (f_t)	0,184* e 0,299**
Resistência última uniaxial à compressão (f_c)	-1
Resistência última biaxial à compressão (f_{cb})	Pré-estabelecidos pelo ANSYS
Estado de tensão hidrostática ambiente (σ_{ha})	
Resistência última biaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostática ambiente (f_1)	
Resistência última uniaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostática ambiente (f_2)	
Coeficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração	

QUADRO 3.2 – PARÂMETROS DO MODELO *CONCRETE*

O comportamento do concreto na compressão foi representado por um modelo constitutivo multilinear com encruamento isótropo apresentado pelo diagrama de tensão-deformação na figura 3.9. Este comportamento segue a relação apresentada pela equação 3.2, de acordo com o Eurocode 2 *apud* Kotinda (2006).

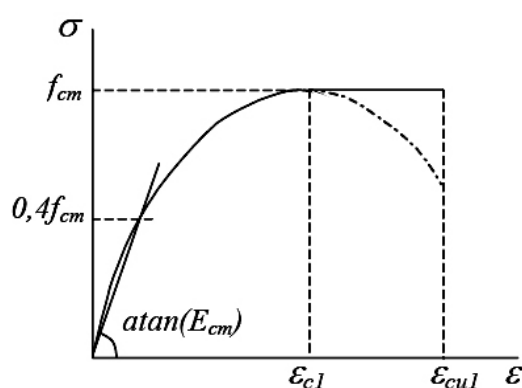


FIGURA 3.9 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O CONCRETO
FONTE: KOTINDA (2006)

* Igual a 1/10 da resistência à compressão do concreto (f_{cm}) do modelo A3

** Igual a 1/10 da resistência à compressão do concreto (f_{cm}) do modelo U3

$$\sigma = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2 \cdot \eta)}, \text{ para } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{c1} \quad (3.2)$$

sendo:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}$$

$$\varepsilon_{c1}(\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$$

$$k = 1,1 \cdot \frac{(E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|)}{f_{cm}}$$

Onde η é o grau de conexão, f_{cm} é o valor médio da resistência à compressão do concreto para corpo de prova cilíndrico, ε_{c1} é a deformação correspondente à tensão máxima de compressão, ε_{cu1} é a deformação última à compressão e E_{cm} é o módulo secante de elasticidade do concreto.

3.5 CONTATO ENTRE LAJE E VIGA

Para os elementos CONTA 173 e TARGE 170, que representam o contato entre a laje e a viga, foram definidos parâmetros, em concordância com os modelos de Kotinda (2006). Esses elementos, que formam um par de contato, possibilitam o surgimento de tensões normais de compressão e permitem a separação entre os elementos, quando o contato é estabelecido.

Para esse par de contato foram estabelecidos valores de atrito e coesão, com escorregamento regido pela Lei de Coulomb, conforme as equações 3.3 e 3.4:

$$\tau_{lim} = \mu \cdot P + c \quad (3.3)$$

$$|\tau| \leq \tau_{lim} \quad (3.4)$$

onde:

τ_{lim} = tensão cisalhante limite;

τ = tensão cisalhante equivalente;

μ = o coeficiente de atrito;

P = pressão normal,

c = coesão, resistência ao escorregamento.

Quando a tensão cisalhante limite é excedida, as superfícies de contato passam a deslizar entre si.

O valor estabelecido para o coeficiente de atrito entre aço e concreto foi 0,4 e para a coesão foi estimado um valor de 0,18 kN/cm² a partir de valores médios de tensão de adesão correspondentes ao surgimento de escorregamento na interface.

O método de solução para o contato foi o “Pure Lagrange Multiplier”, disponibilizado pelo ANSYS. Esse método, de acordo com Kotinda (2006), impõe penetração nula quando existe o contato entre as partes, ou seja, quando o contato está fechado e escorregamento nulo enquanto não se atinge a tensão cisalhante limite.

Os parâmetros que definem se o contato está fechado ou aberto é estabelecido por FTOLN, que se refere a um valor mínimo de penetração para que o contato seja considerado como fechado e por TNOP, que se refere a uma valor mínimo de tração, normal à superfície de contato, para que o status se altere para aberto.

O valor absoluto adotado para o FTOLN foi de -0,01 cm. Já para o TNOP adotou-se 0,18 kN/cm², o mesmo utilizado para a coesão, pois segundo Kotinda (2006) não foi encontrado um valor mais adequado para este parâmetro nos trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores.

3.6 DISCRETIZAÇÃO E MALHA DOS ELEMENTOS FINITOS ADOTADOS

Os modelos construídos para a análise numérica são constituídos por quatro elementos que formam a laje de concreto com armaduras incluídas sob a forma de

taxa, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o par de contato na interface laje-viga. Cada elemento foi gerado separadamente, malhado e acoplado um com outro, na interface de contato entre eles, seguindo a mesma metodologia adotada por Kotinda (2006).

A discretização de cada conector se deu através de três elementos do tipo BEAM 189 devido a diferença de diâmetro da cabeça e corpo dos conectores. Um dos elementos foi utilizado para representar a cabeça do pino e os outros dois o corpo do mesmo, uma vez que a transferência de forças de cisalhamento ocorre principalmente na metade inferior do corpo do conector.

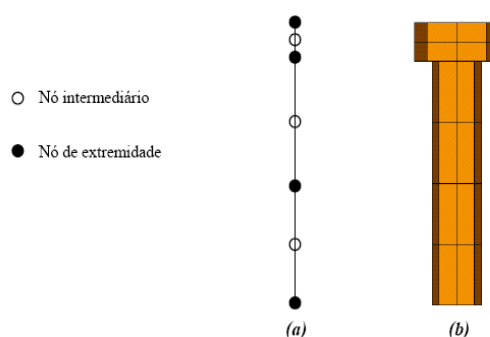


FIGURA 3.10 – DISCRETIZAÇÃO DO CONECTOR DE CISALHAMENTO
FONTE: KOTINDA (2006)

Na figura 3.10 está ilustrada a discretização do conector, onde a letra (a) corresponde a representação unifilar dos elementos BEAM 189 e os seus respectivos nós e, a letra (b) a seção transversal do conector.

Com o objetivo de recuperar a variação de tensões na laje, devido ao fluxo de transferência de cisalhamento pelos conectores, utilizaram-se na discretização da laje dois elementos do tipo SOLID 65 entre cada linha de conectores, no sentido longitudinal da mesma, que corresponde ao eixo x do modelo desenvolvido.

Já no sentido do eixo y (vertical), a discretização da laje foi tal que os nós dos conectores, com exceção do intermediário da cabeça do mesmo, coincidiram com os nós da laje. Ainda nessa direção foram inseridas as armaduras em forma de taxa, ou seja, armaduras dispersas, na face inferior e superior da laje.

Ainda discretizou-se a laje na direção z, ou seja, no sentido transversal, de forma que os nós da laje acoplados aos dos conectores coincidiram com os nós do perfil de aço.

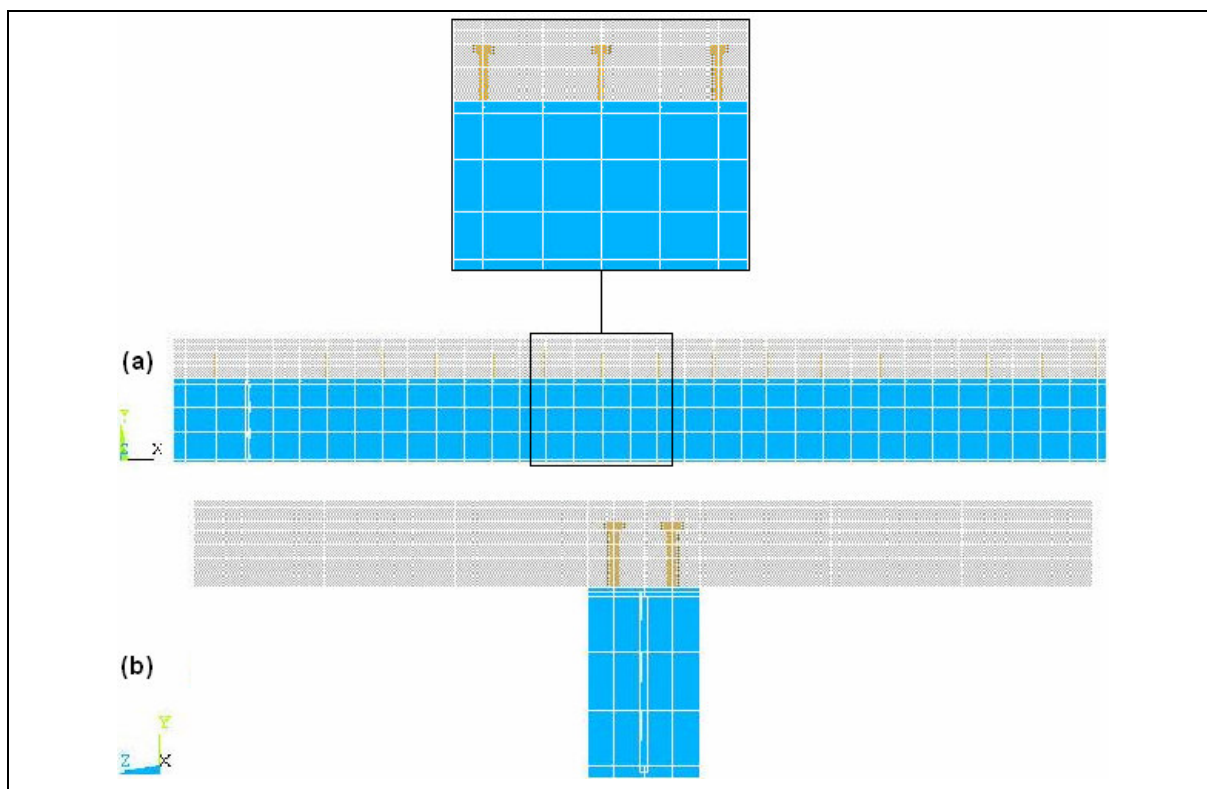


FIGURA 3.11 – DISCRETIZAÇÃO DA LAJE DE CONCRETO E DA VIGA DE AÇO

A figura 3.11 mostra na letra (a) a discretização da laje no sentido longitudinal (eixo x) e na letra (b) a discretização da laje no sentido transversal (eixo z). Essa figura também corresponde a discretização do perfil metálico que foi feita em concordância com a malha adotada para a laje de concreto.

A malha de elementos finitos, gerada para todos os elementos, seguiu a mesma metodologia e grau de refinamento apresentado por Kotinda (2006).

A figura 3.12 mostra a malha de elementos finitos para os componentes citados, onde a letra (a) corresponde à laje de concreto, a (b) a viga de aço, a (c) os conectores de cisalhamento e a (d) o par de contato.

Na modelagem considerou-se apenas metade do vão da viga mista para reduzir o esforço computacional. Isso só foi possível devido à simetria da estrutura.

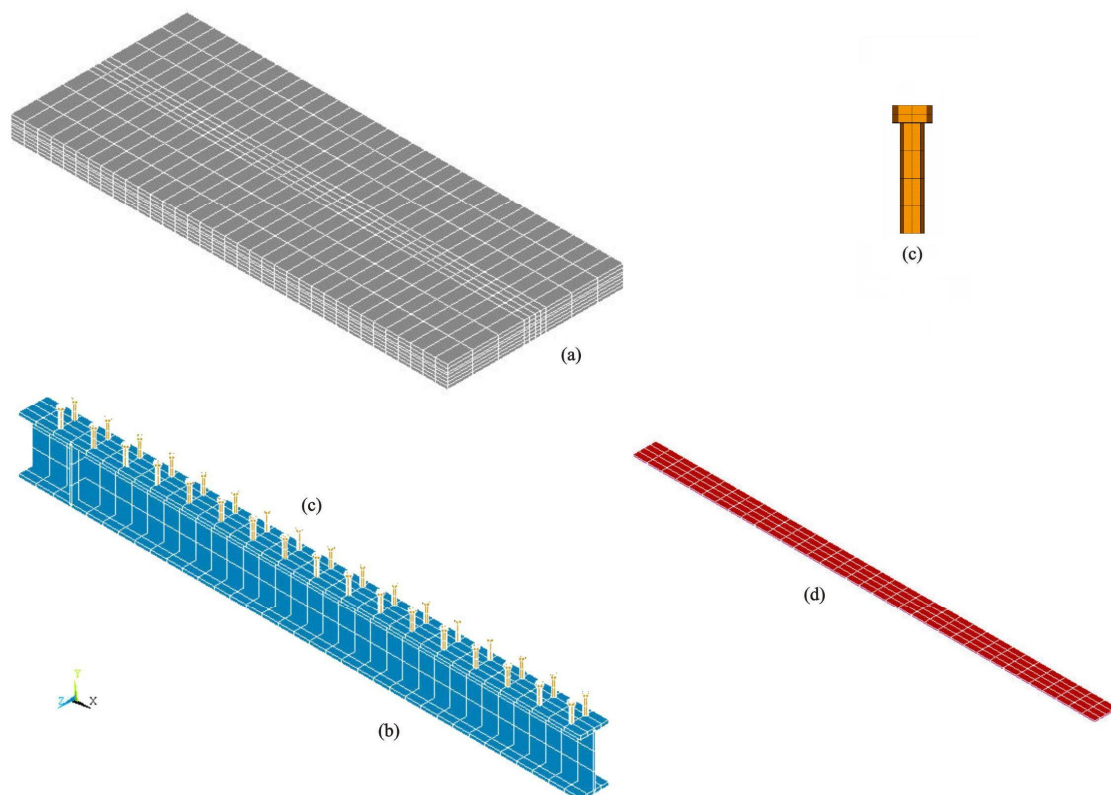


FIGURA 3.12 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

3.7 ACOPLAMENTOS E VINCULAÇÕES

Nos acoplamentos entre os elementos, realizados através dos nós coincidentes, todos os graus de liberdade foram compatibilizados, conforme ilustra a figura 3.13.

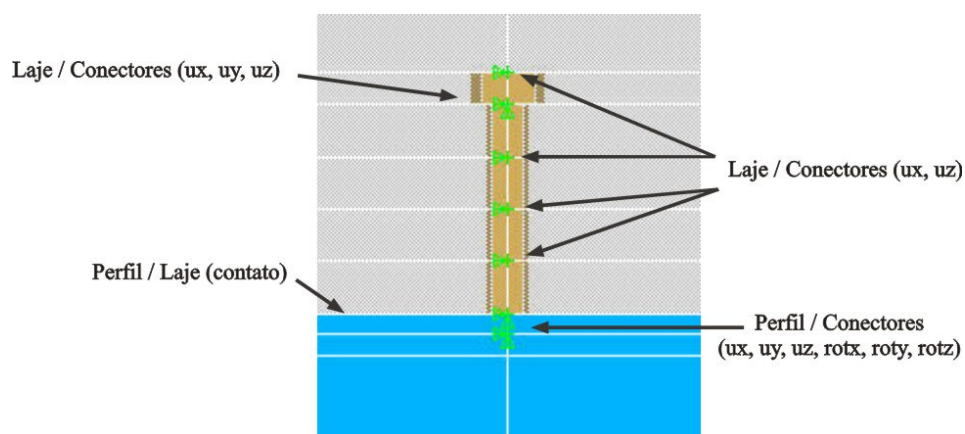


FIGURA 3.13 – ACOPLAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS

O contato laje-viga foi estabelecido pelos elementos CONTA 173, ligado à mesa do perfil e TARGE 170, ligado à face inferior da laje.

A vinculação viga-conector foi considerada como um engastamento do pino no perfil metálico, ou seja, rotações e translações foram compatibilizadas.

Já na interface laje-conector, compatibilizaram-se as translações referentes aos eixos x e z e, no nó abaixo da cabeça do pino considerou-se um acoplamento na direção y para a representação da ancoragem mecânica existente. Nos nós da seção central da viga mista foi aplicada a condição de simetria, disponibilizada pelo ANSYS e conseqüente restrição dos graus de liberdade, conforme figura 3.14.

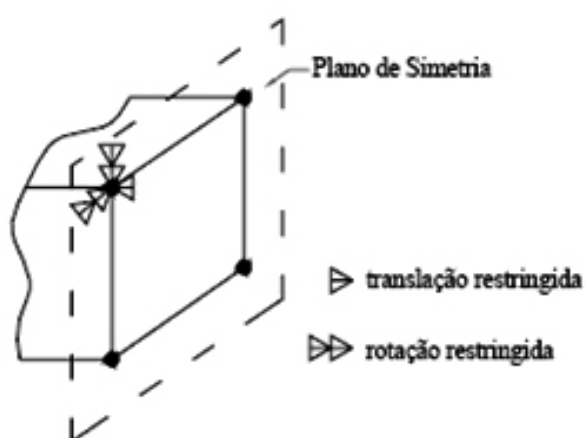


FIGURA 3.14 – RESTRIÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE PELA CONDIÇÃO DE SIMETRIA
FONTE: BIBLIOTECA DO ANSYS

Com objetivo de reproduzir um apoio do tipo móvel, os graus de liberdade referentes a translação em x e rotação em z não foram restringidos nos nós referentes ao apoio da viga mista.

Na figura 3.15 é mostrada a condição de simetria e a vinculação do apoio da viga mista, definidas de acordo com a modelagem adotada por Kotinda (2006).

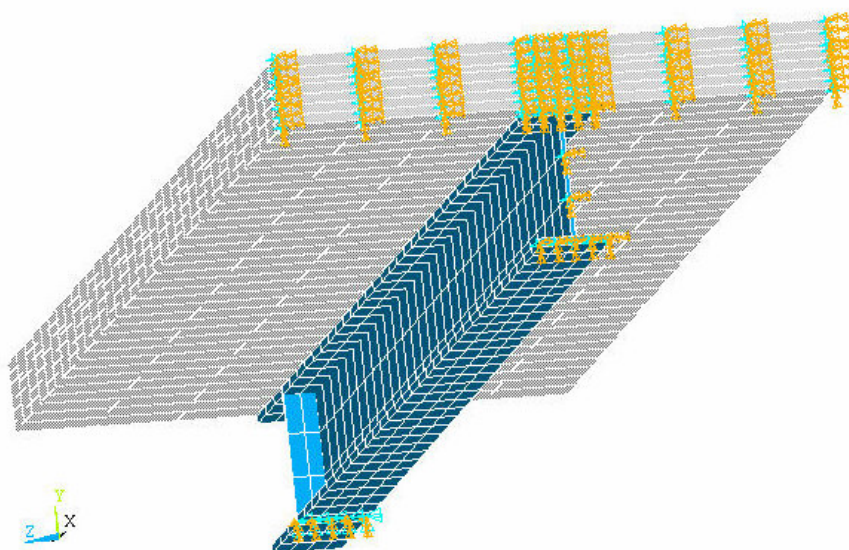


FIGURA 3.15 – CONDIÇÃO DE SIMETRIA E VINCULAÇÃO NO APOIO

3.8 CARREGAMENTO

Para a aplicação do carregamento na viga mista, considerou-se o escoramento da mesma durante sua execução, embora Chapman e Balakrishnan (1964) tenham utilizado nos experimentos vigas mistas não escoradas. Dessa forma, a estrutura foi submetida inicialmente ao peso seu próprio, distribuído ao longo do vão da viga mista e inserido na modelagem pela imposição da ação gravitacional sobre o valor do peso específico do concreto, definido como 24 kN/m^3 e do aço da viga, conectores e armadura, cujo valor é de 77 kN/m^3 . Posteriormente, aplicou-se o carregamento externo de modo crescente e monotônico, seguindo a metodologia de Kotinda (2006).

A aplicação do carregamento concentrado no meio do vão, para a viga A3, conforme a figura 3.16 (a), foi realizada nos nós pertencentes à face superior da laje de concreto e distribuída em uma pequena área de forma centralizada em relação ao eixo da viga, para ficar de acordo com o modelo experimental, de Chapman e Balakrishnan (1964), segundo a figura 3.17 (a).

Para a viga U3 o carregamento externo foi uniformemente distribuído entre os apoios da viga mista, segundo a figura 3.16 (b). Esse carregamento, no modelo

experimental de Chapman e Balakrishnan (1964), foi aplicado entre os apoios da viga mista através de dezoito macacos hidráulicos, de acordo com figura 3.17 (b).

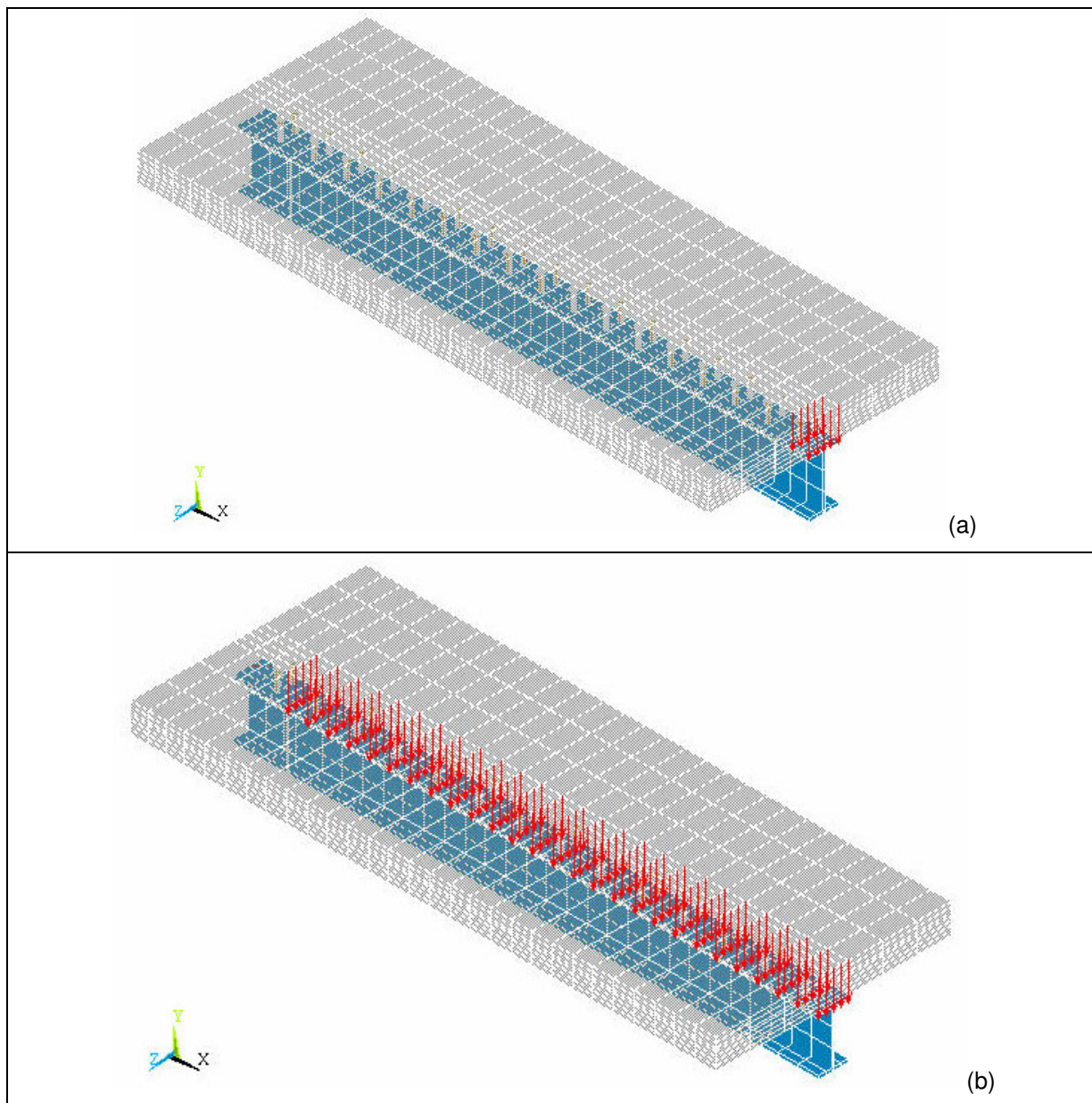


FIGURA 3.16 – CARREGAMENTO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

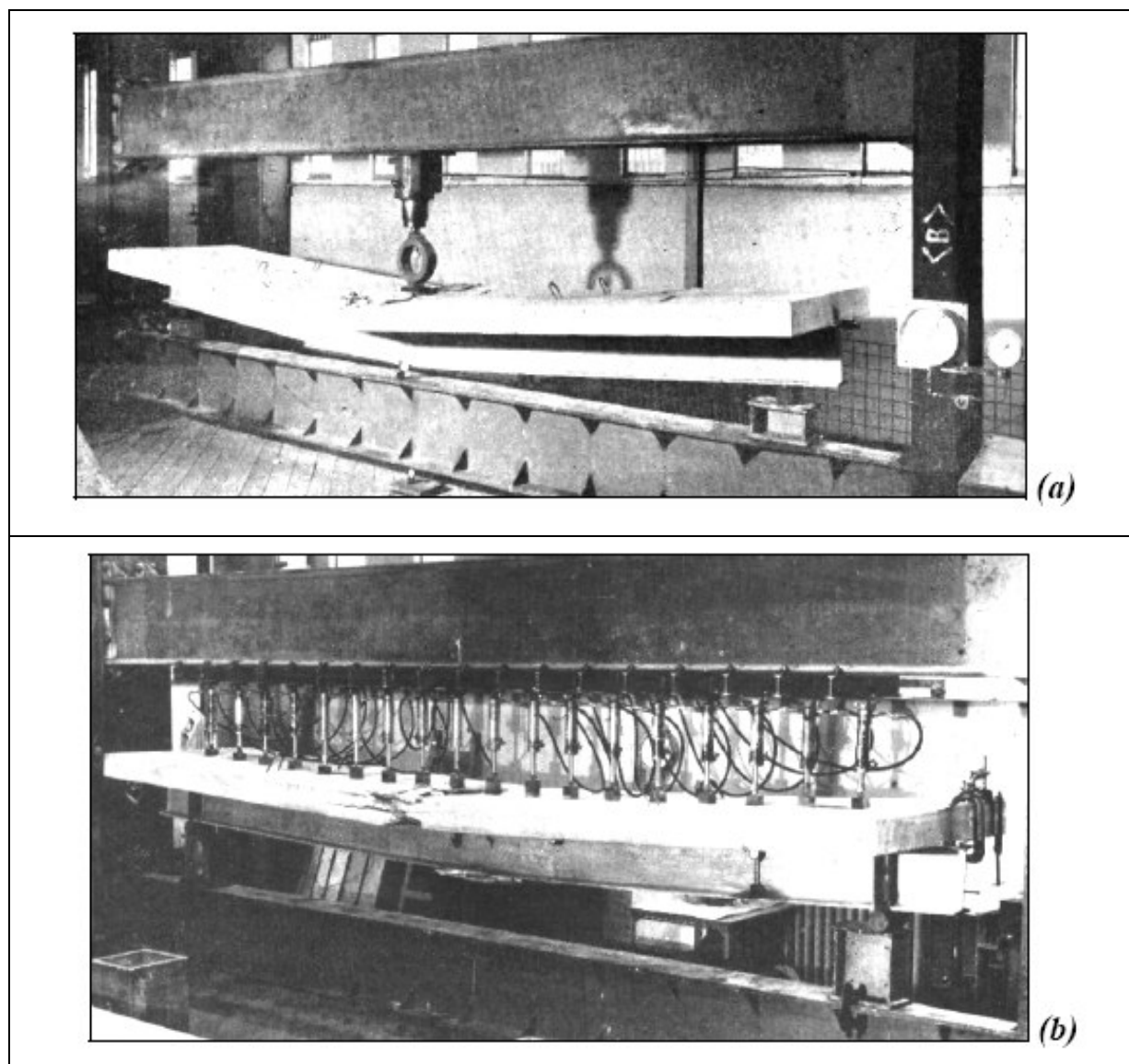


FIGURA 3.17 – CARREGAMENTO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS
FONTE: CHAPMAN E BALAKRISHNAN (1964)

3.9 ANÁLISE NÃO LINEAR

Considerando-se a não linearidade física dos materiais constituintes da viga mista, aplicou-se o carregamento de forma incremental cujo incremento foi controlado pelo recurso do ANSYS denominado “Automatic Load Stepping”.

Esse recurso, também utilizado por Kotinda (2006), reduz o valor do incremento quando o número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se

obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15% ou deslocamentos excessivos. Caso o processo venha a convergir na primeira iteração, o valor do incremento pode aumentar.

Na resolução do sistema não linear, a cada iteração, a matriz de rigidez tangente foi atualizada pelo método Newton Raphson Pleno.

Já o critério de convergência foi estabelecido com base no vetor de resíduo de forças e momentos $\{R\}$. Quando a norma deste vetor, $\|\{R\}\|$, atinge valores menores ou iguais à tolerância estabelecida, no caso um por cento da norma do vetor de forças e momentos aplicados ($0,01\|\{F_a\}\|$), o critério é satisfeito. A norma utilizada foi quadrática, $\|\{R\}\|_2 = (\sum R_j^2)^{1/2}$, idêntica ao trabalho de Kotinda (2006).

Para solução dos sistemas de equações lineares o método utilizado foi o “Direct Sparse”. Esse método, que envolve a decomposição da matriz de rigidez em matrizes triangulares superior e inferior ($K=LU$), consiste em um processo de eliminação direta. De acordo com Kotinda (2006), é realizada uma reordenação das linhas da matriz K antes de sua decomposição em LU , para minimizar o número de operações e otimizar o processo, uma vez que a matriz de rigidez é do tipo esparsa.

Ainda foi aplicado, em paralelo ao processo de Newton Raphson Pleno, um recurso do ANSYS denominado “Adaptive Descent”, que alterna a configuração da matriz de rigidez entre secante e tangente, segundo a equação 3.5, caso seja identificada, respectivamente, divergência ou convergência no processo.

$$[k_{n,i}^T] = \xi[k_n^S] + (1+\xi)[k_n^T] \quad (3.5)$$

onde:

$[k_n^S]$ = matriz de rigidez secante para o incremento n ;

$[k_n^T]$ = matriz de rigidez tangente para o incremento n ;

ξ = parâmetro do método “Adaptive Descent”, ajustado automaticamente durante as interações de equilíbrio.

Também foi habilitado o procedimento “Line Search” para melhorar a convergência do processo. Esse procedimento consiste em multiplicar o vetor de incremento de deslocamentos $\{\Delta u_i\}$ (equação 3.6), obtido no método de “Newton Raphson”, por um fator s ($0,05 < s < 1,0$).

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + s\{\Delta u_i\} \quad (3.6)$$

O fator s é determinado pela minimização da energia do sistema, ao encontrar o zero da função não linear, representada na equação 3.7.

$$g_s = \{\Delta u_i\}^T (\{F^a\} - \{F^{nr}(s\{\Delta u_i\})\}) \quad (3.7)$$

onde:

g_s = gradiente de energia potencial com relação à s ;

$\{F^a\}$ = vetor de forças aplicadas;

$\{F^{nr}\}$ = vetor de forças obtido pelo método de Newton Raphson.

Todos os parâmetros e ferramentas utilizadas para análise não linear das vigas mistas seguiram o modelo proposto por Kotinda (2006).

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações numéricas foram realizadas em três etapas. Na primeira delas foram simuladas duas vigas mistas, uma A3 e outra U3, cujas características e propriedades dos materiais estão descritas no quadro 3.1, para comparar os resultados obtidos com os apresentados por Chapman e Balakrishnan (1964) e Kotinda (2006) e, conseqüentemente, validar os modelos construídos.

Após a validação dos modelos desenvolvidos, uma segunda etapa de simulações foi realizada. Neste estágio, variaram-se os diâmetros e alturas dos conectores de cisalhamento, porém as demais características e propriedades dos materiais, apresentadas no quadro 3.1, foram mantidas. Foram adotados três valores de diâmetros dos conectores: 16 mm, 19 mm e 22 mm, para cada modelo de viga e, ainda, para cada diâmetro dos conectores foram realizadas três simulações considerando três valores de alturas: 76 mm, 88 mm e 102 mm. Ou seja, foram simuladas 9 vigas mistas A3 e 9 vigas mistas U3, totalizando nesta etapa 18 simulações numéricas.

Na terceira etapa de simulações, foram utilizadas, para os modelos A3 e U3, as mesmas propriedades de materiais e variações de diâmetros e alturas dos conectores adotadas na segunda etapa de testes. O que variou desta vez foi a quantidade e espaçamento de conectores. Esta variação foi definida segundo as recomendações do Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003), cujo procedimento de cálculo é apresentado nos anexos A e B, para os conectores com 19 mm diâmetro e, engloba, além do número e espaçamento de conectores, o cálculo do carregamento máximo dos modelos, valores de momento, cortante e flecha. O resumo dos resultados obtidos para os demais conectores são apresentados no anexo C.

O objetivo desta etapa foi verificar se os valores obtidos nas simulações numéricas correspondem aos normatizados. Para fazer tal comparação, todos os coeficientes de majoração de cargas e minoração de resistências foram excluídos do procedimento de cálculo, uma vez que os mesmos não foram introduzidos no modelo computacional.

Nesta etapa também foram simuladas 18 vigas mistas, 9 do modelo A3 e 9 do modelo U3. E, ainda nesta etapa, procurou-se comparar os resultados dos modelos simulados na segunda etapa com os simulados nesta última.

Embora o Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) recomende que altura do conector tipo pino com cabeça, após a soldagem, seja igual ou superior a quatro vezes o diâmetro do corpo do mesmo, para assegurar a ancoragem do pino, evitando seu arrancamento, adotaram-se neste trabalho, conectores com 22 mm de diâmetro e 76 mm de altura, para fins de comparação com os outros conectores utilizados, que por apresentarem menor diâmetro estão dentro dos parâmetros estabelecidos por norma.

4.1 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos em cada etapa de simulações. Estes resultados foram coletados para o último passo de carga alcançado pelas vigas mistas, seguindo a metodologia adotada por Kotinda (2006).

4.1.1 Primeira etapa de simulações

Nas figuras 4.1 à 4.5 são apresentados gráficos comparativos dos resultados obtidos na primeira etapa deste trabalho e dos apresentados por Chapman e Balakrishnan (1964) e por Kotinda (2006), para as vigas A3 e U3. Cabe ressaltar que os ensaios experimentais de Chapman e Balakrishnan (1964) foram executados com vigas sem escoramento, situação não observada nos modelos computacionais do presente trabalho e do de Kotinda (2006).

A figura 4.1 mostra os resultados comparativos do deslocamento vertical no meio do vão com a evolução da carga aplicada, para a viga A3.

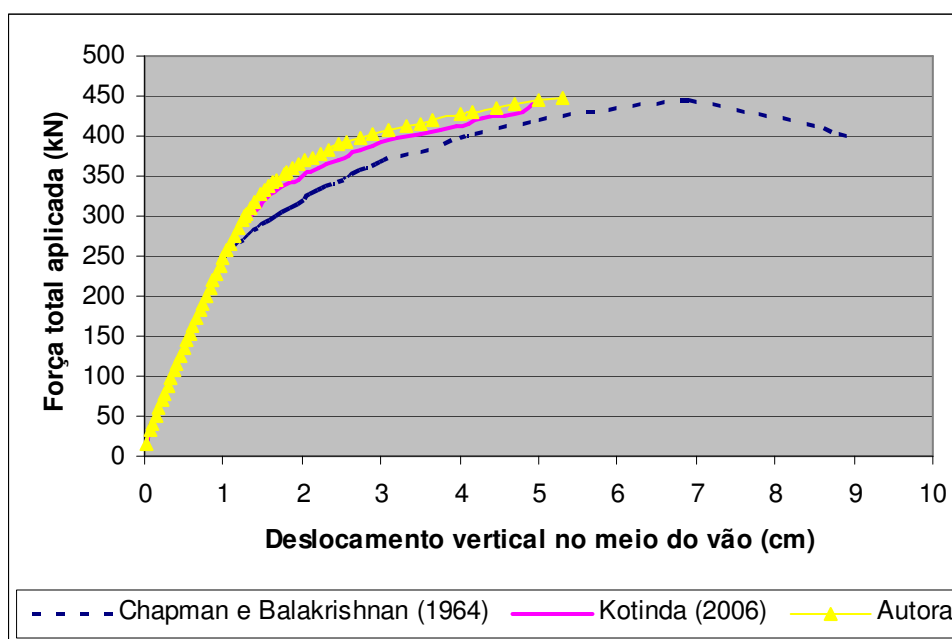


FIGURA 4.1 – GRÁFICO FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A VIGA A3

Pela figura 4.2 verifica-se o resultado comparativo da evolução do deslizamento longitudinal relativo médio (entre a laje e a viga) na extremidade da viga mista com o carregamento aplicado, para a viga A3.

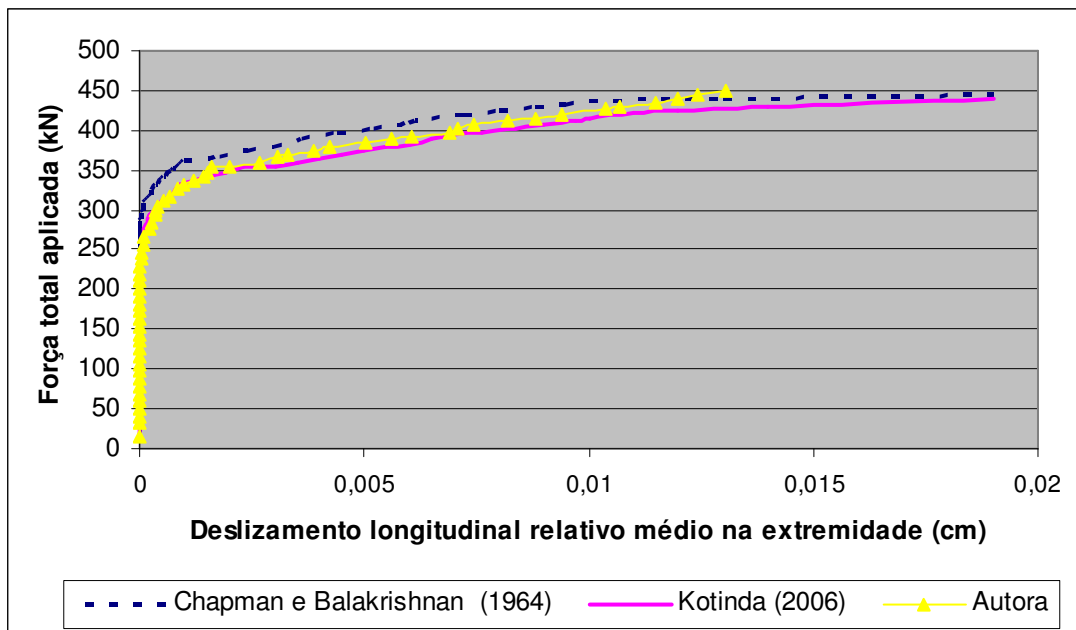


FIGURA 4.2 – GRÁFICO FORÇA-DESLIZAMENTO PARA A VIGA A3

Os resultados comparativos do deslocamento vertical no meio do vão com a evolução da carga aplicada, para a viga U3, são mostrados na figura 4.3.

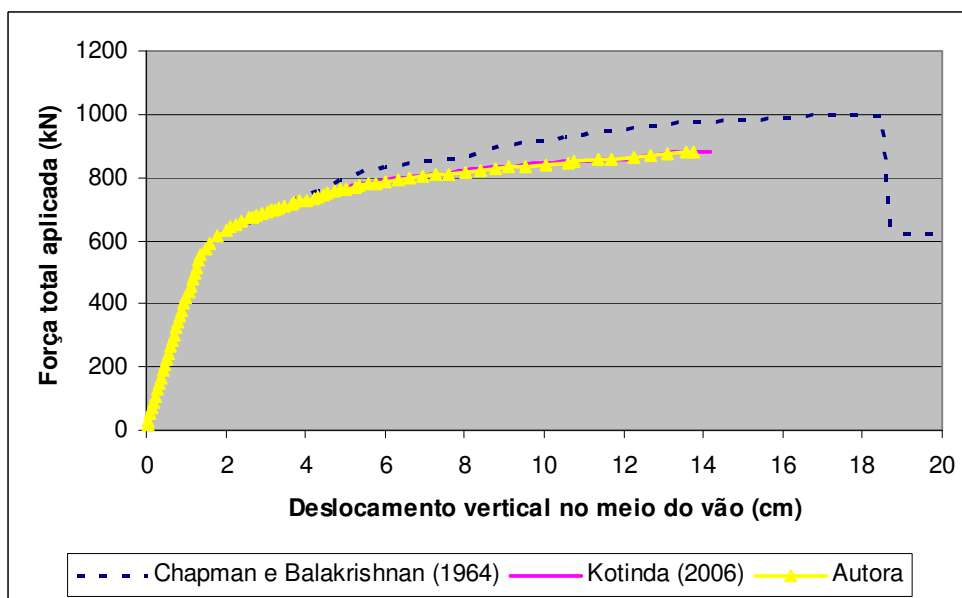


FIGURA 4.3 – GRÁFICO FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A VIGA U3

A figura 4.4 ilustra os diagramas de variação da distribuição das tensões normais à seção transversal pertencente ao meio do vão da viga mista A3, mais

especificamente, ao longo da linha que coincide com o eixo do perfil metálico. Os valores foram tomados para um nível de carregamento de 392 kN.

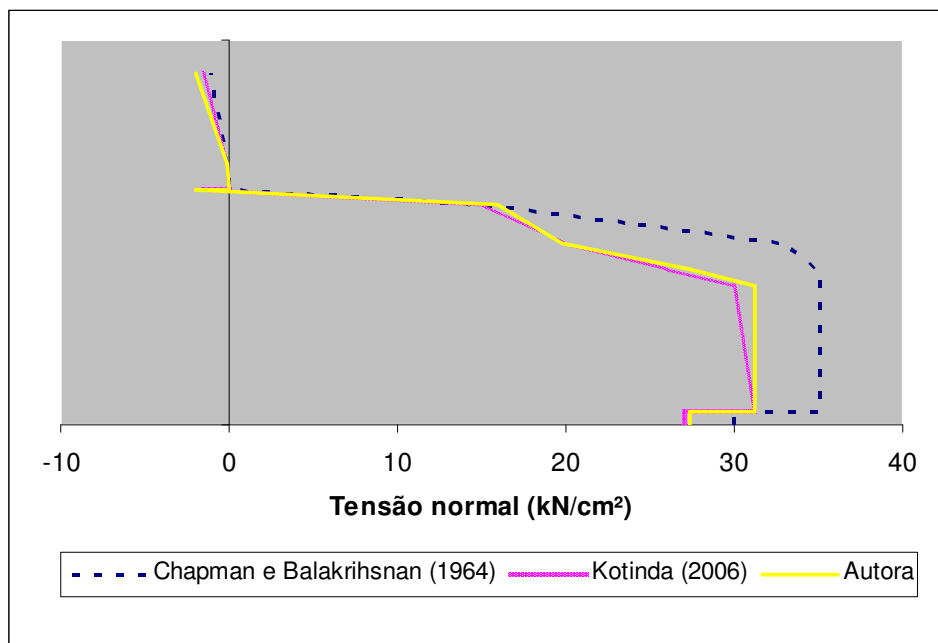


FIGURA 4.4 – GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS DA VIGA A3

Os diagramas de variação da distribuição das tensões normais à seção transversal pertencente ao meio do vão da viga mista U3, tomadas ao longo da linha que coincide com o eixo do perfil metálico, para um nível de carregamento de 750 kN, são apresentados na figura 4.5.

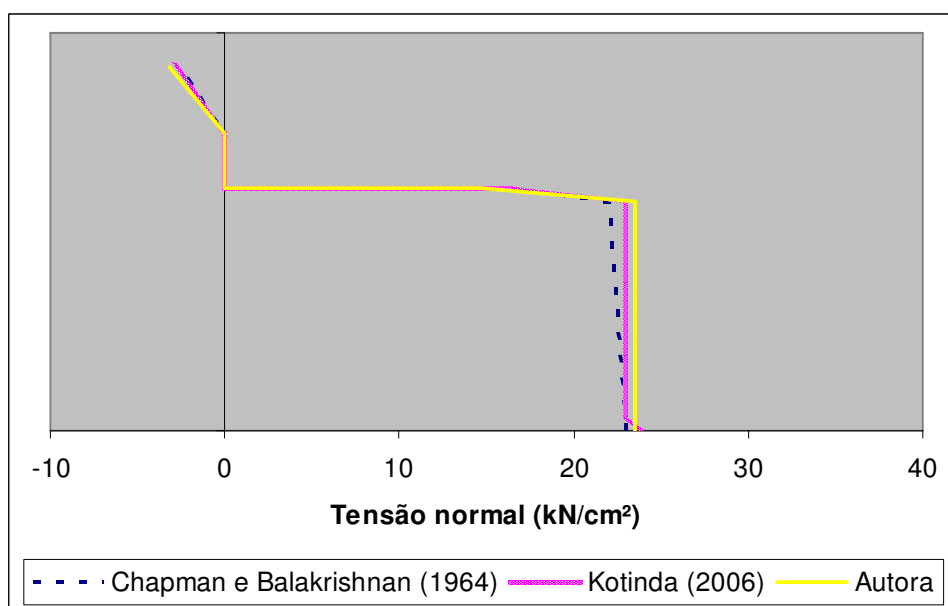


FIGURA 4.5 – GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NORMAIS DA VIGA U3

As tensões de von Mises, obtidas para a laje de concreto da viga A3 são apresentadas na figura 4.6, onde a letra (a) corresponde ao modelo de Kotinda (2006) e a (b) ao deste trabalho. Essas tensões servem como indicativo da ruptura da laje por compressão excessiva.

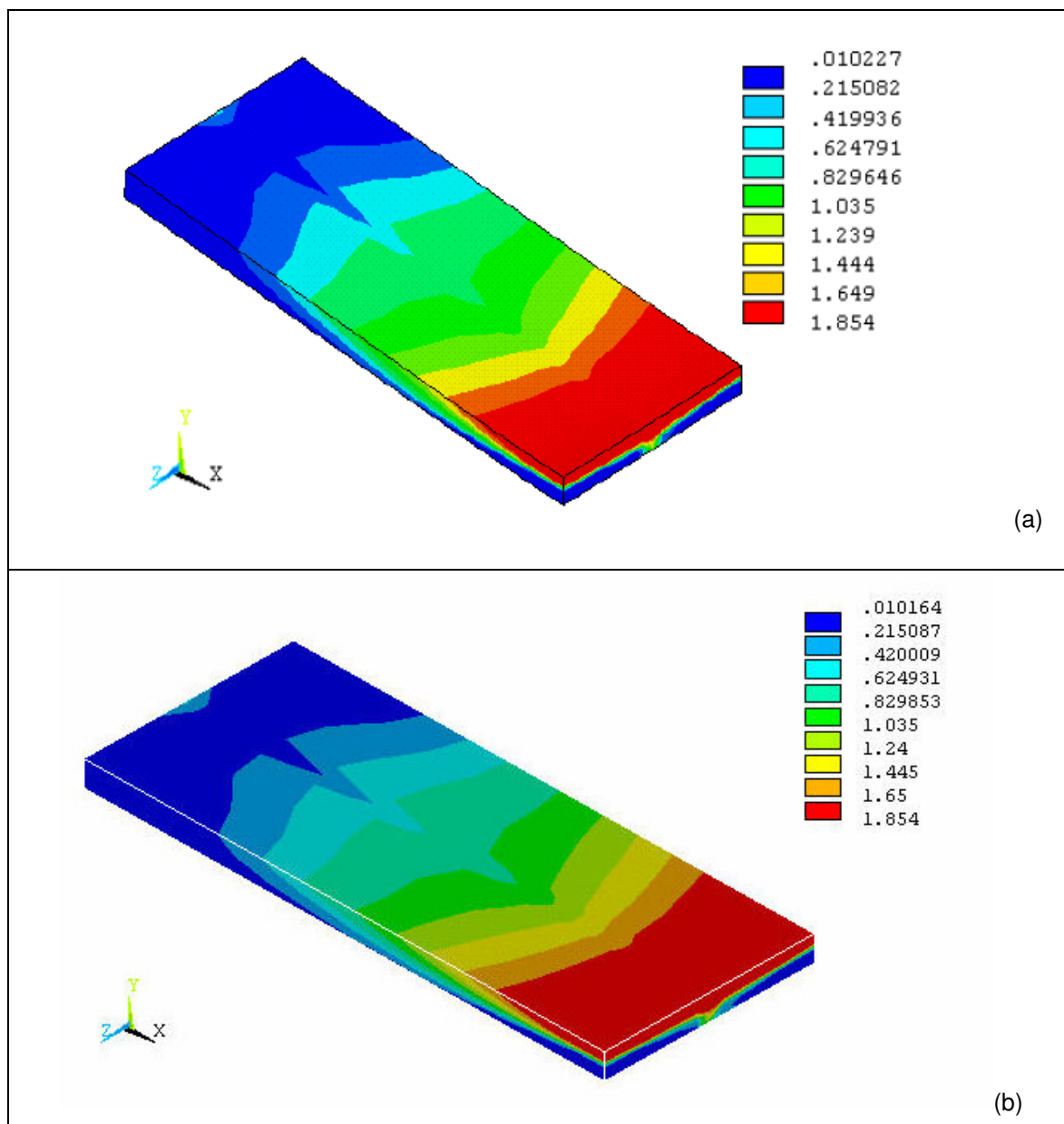


FIGURA 4.6 – TENSÕES DE VON MISES PARA A LAJE DA VIGA A3

A figura 4.7 mostra as tensões de von Mises, obtidas para a laje de concreto da viga U3, onde a letra (a) corresponde ao modelo de Kotinda (2006) e a (b) ao deste trabalho.

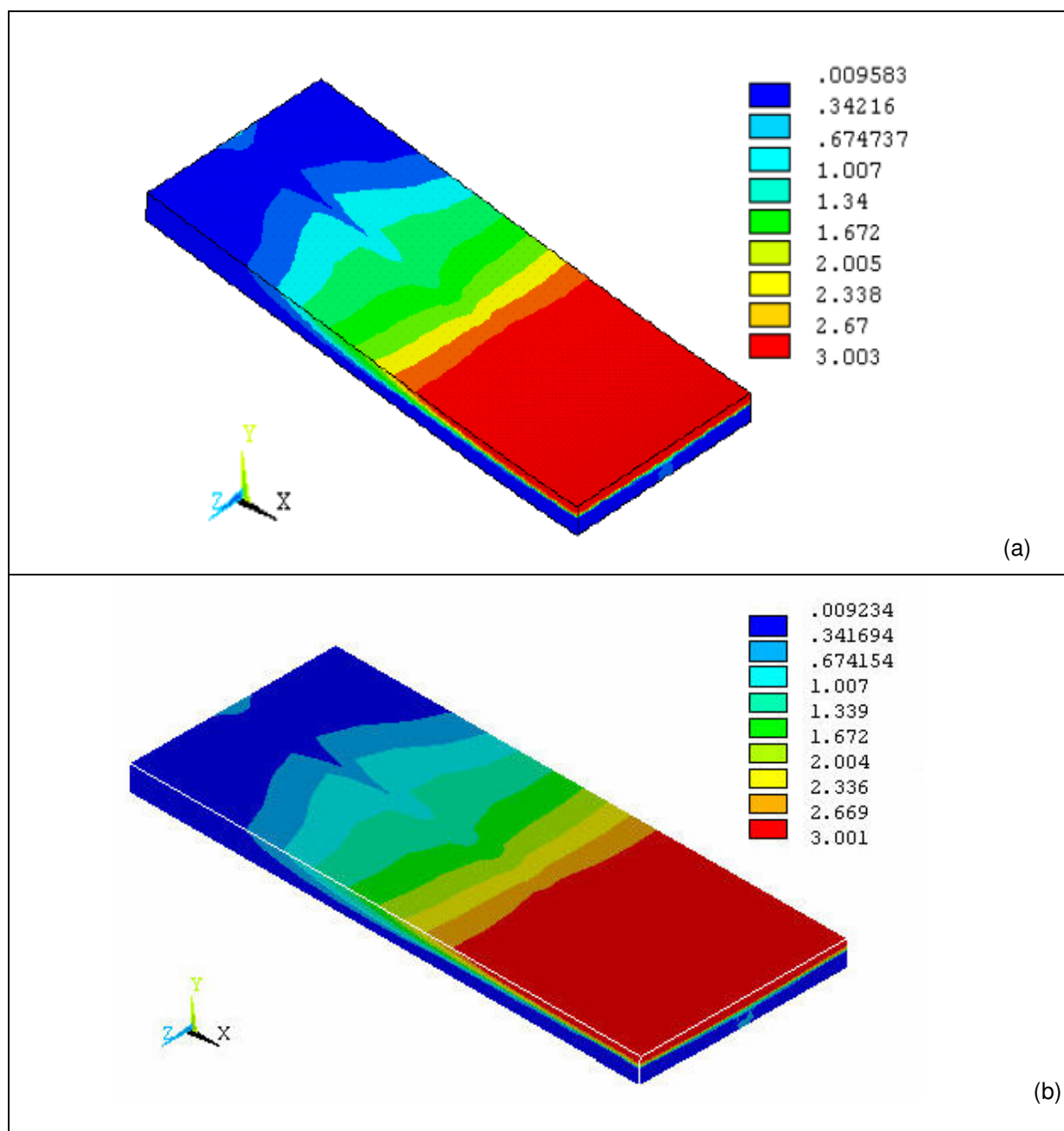


FIGURA 4.7 – TENSÕES DE VON MISES PARA A LAJE DA VIGA U3

As deformações em um dos conectores de cisalhamento da viga A3, distante 145,83 cm do centro do vão da viga, são mostradas na figura 4.8, onde a letra (a) corresponde ao modelo de Kotinda (2006) e a (b) ao deste trabalho.

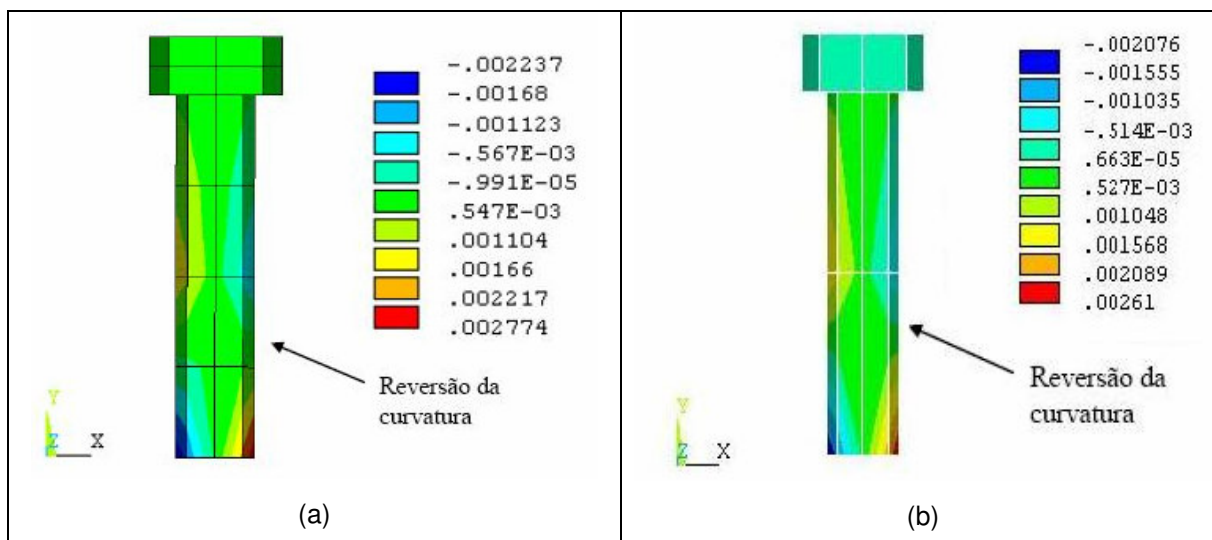


FIGURA 4.8 – DEFORMAÇÕES NO CONECTOR A 145,83 CM DO CENTRO DA VIGA A3

4.1.2 Segunda etapa de simulações

Os resultados obtidos na segunda etapa de simulações são expostos a seguir.

No quadro 4.1 são apresentados os resultados obtidos para as vigas A3 com a utilização de conectores de cisalhamento com 16 mm de diâmetro.

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 16 mm de diâmetro (\emptyset)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16	17,16
Número de conectores	68	68	68
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	2,23	5,24	1,84
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0040	0,0167	0,0048
Força vertical total aplicada (kN)	377,32	443,78	354,52

QUADRO 4.1 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES $\emptyset=16$ MM

O quadro 4.2 se refere aos resultados obtidos para as vigas A3 com conectores de cisalhamento de diâmetro 19 mm.

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 19 mm de diâmetro (\emptyset)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16	17,16
Número de conectores	68	68	68
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,05	6,49	5,32
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0100	0,0147	0,0131
Força vertical total aplicada (kN)	444,32	460,50	448,64

QUADRO 4.2 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES $\emptyset=19$ MM

No quadro 4.3 constam os resultados obtidos para as vigas A3 com conectores de cisalhamento de 22 mm de diâmetro.

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 22 mm de diâmetro (\emptyset)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	17,16	17,16
Número de conectores	68	68	68
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,57	4,94	5,61
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0103	0,0086	0,0120
Força vertical total aplicada (kN)	453,18	444,92	453,76

QUADRO 4.3 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES $\emptyset=22$ MM

Nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 estão apresentados os gráficos da evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas A3.

Os gráficos da figura 4.9 representam as vigas A3 com conectores de 16 mm de diâmetro.

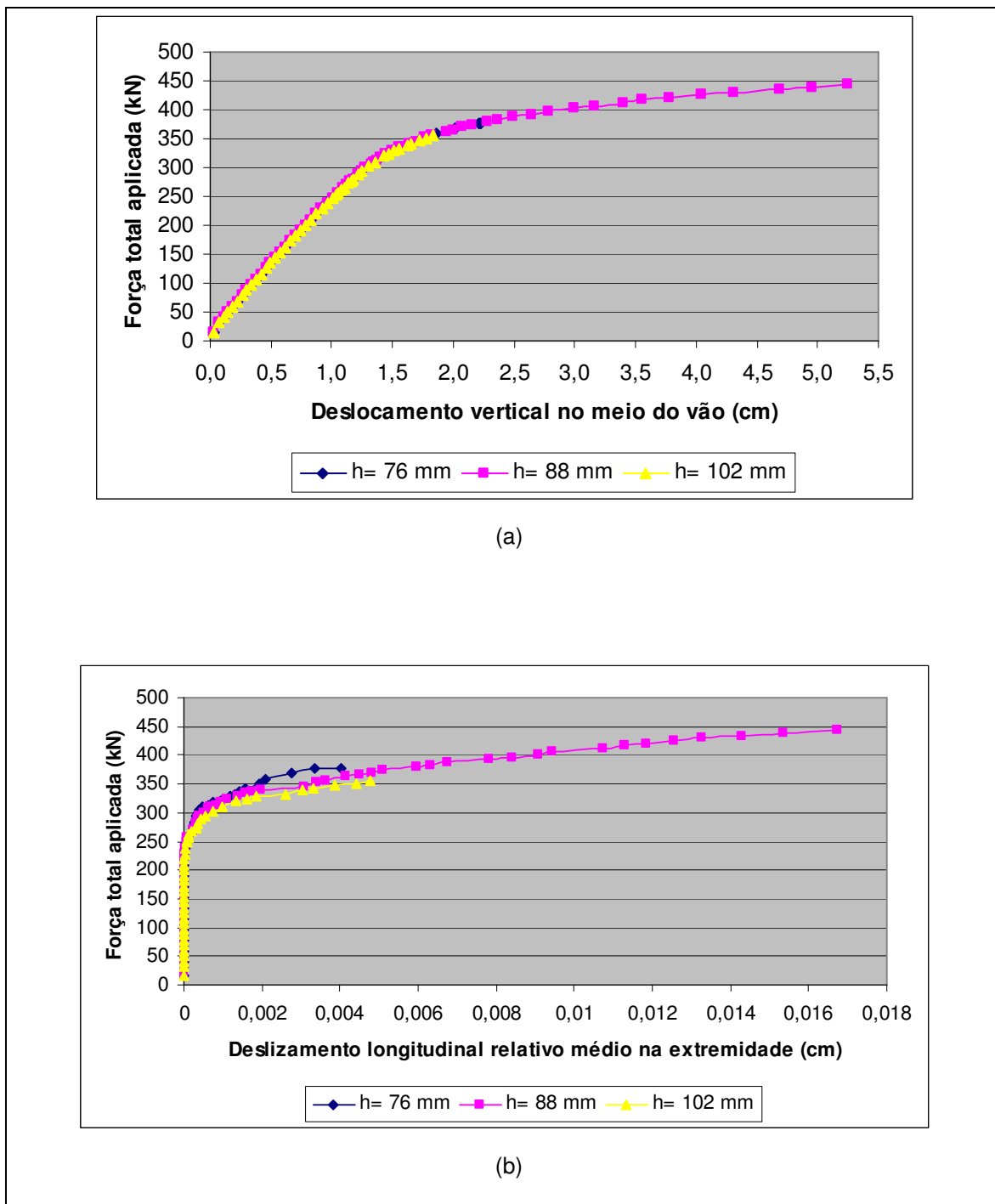
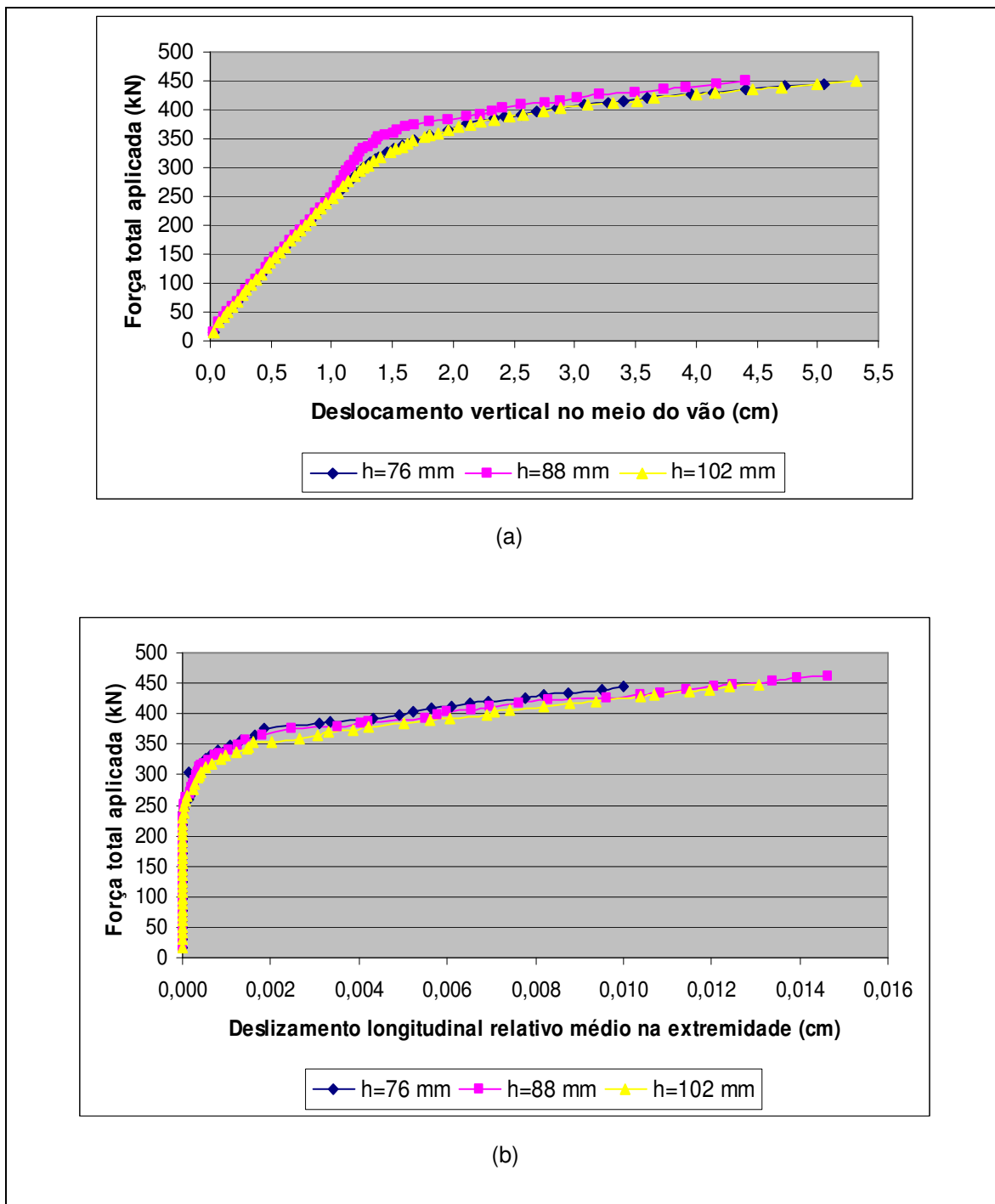


FIGURA 4.9 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM

A figura 4.10 mostra os gráficos das vigas A3 com conectores de 19 mm de diâmetro.



Na figura 4.11 ilustram-se os gráficos das vigas A3 com conectores de 22 mm de diâmetro.

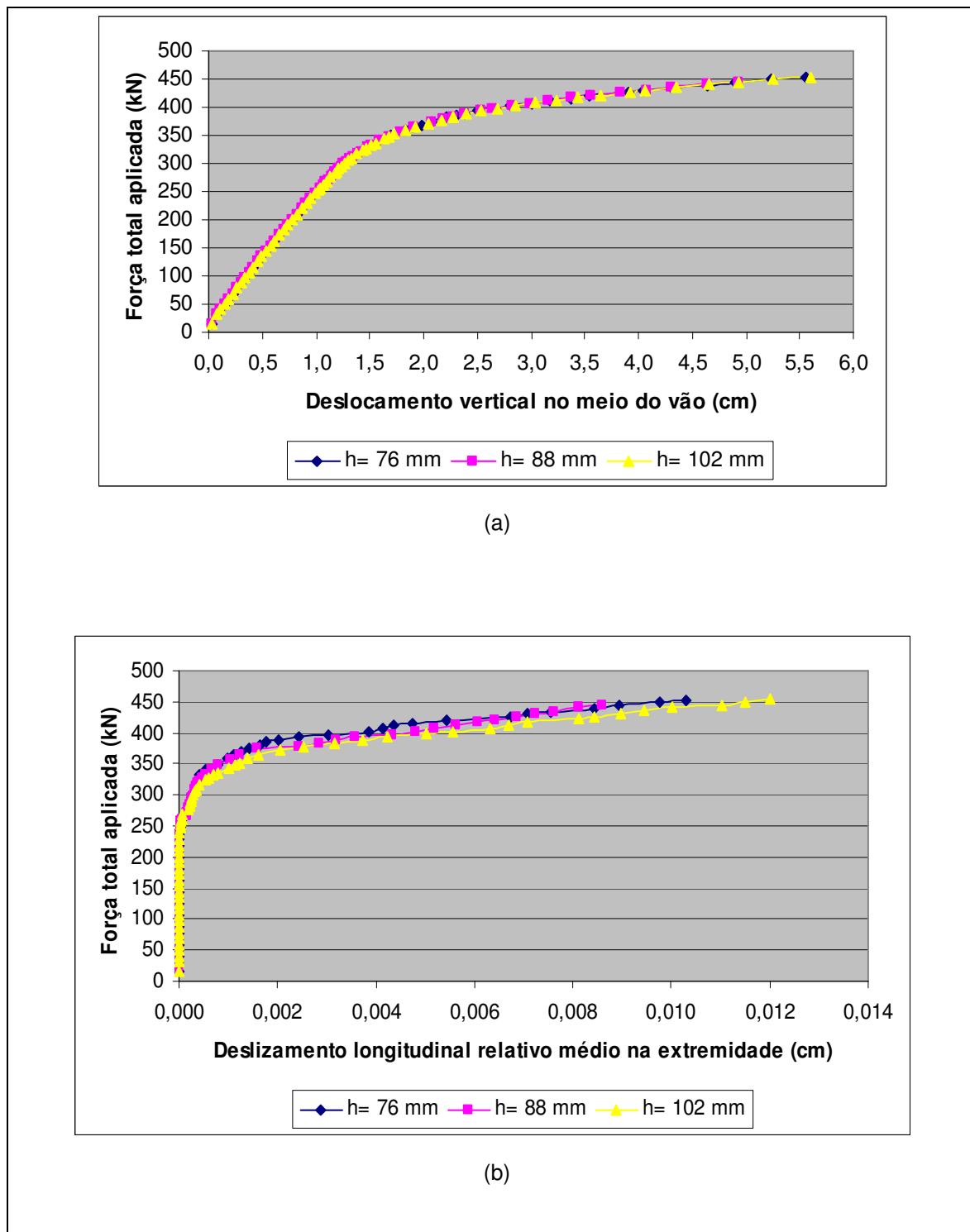


FIGURA 4.11 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM

As figuras a seguir mostram as fissuras nos elementos da laje de concreto da viga A3 com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura, para vários níveis de carga. De acordo com as configurações do ANSYS, a primeira fissura que ocorre no elemento é representada por um círculo vermelho, a segunda por um círculo verde e a terceira por um círculo azul. Estes círculos aparecem no centróide de cada elemento e estão inclinados segundo o plano que contém a fissura.

A figura 4.12 indica as primeiras fissuras nos elementos da laje de concreto foram identificadas para um nível de carregamento igual a 106,56 kN.

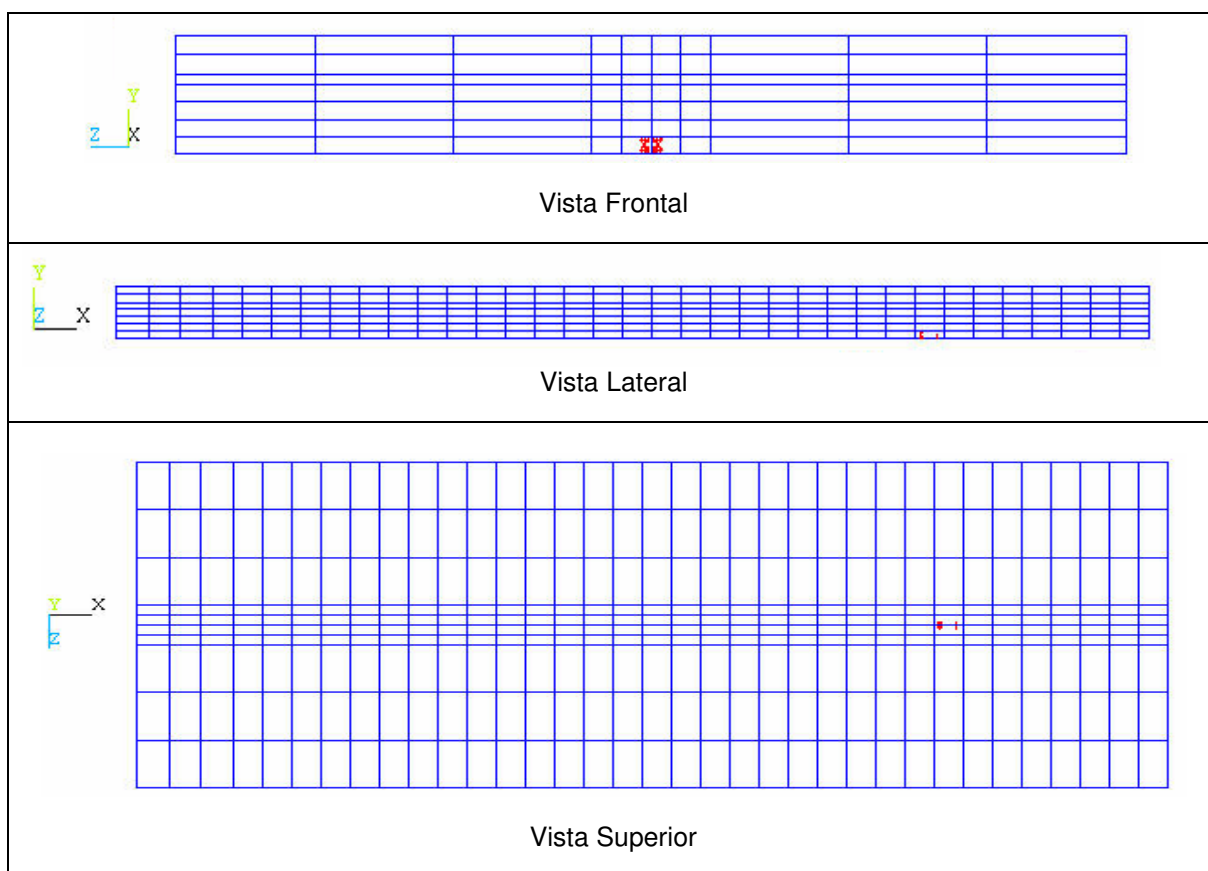


FIGURA 4.12 – PRIMEIRAS FISSURAS IDENTIFICADAS NOS ELEMENTOS DA LAJE DE CONCRETO DA VIGA A3 – CARGA DE 106,56 KN

A figura 4.13 apresenta as primeiras fissuras por fendilhamento e por cisalhamento nos elementos da laje de concreto, que foram sinalizadas para um nível de carregamento igual a 106,56 kN. Além destas fissuras, também é possível visualizar na figura citada fissuras transversais (direção z) no meio do vão.

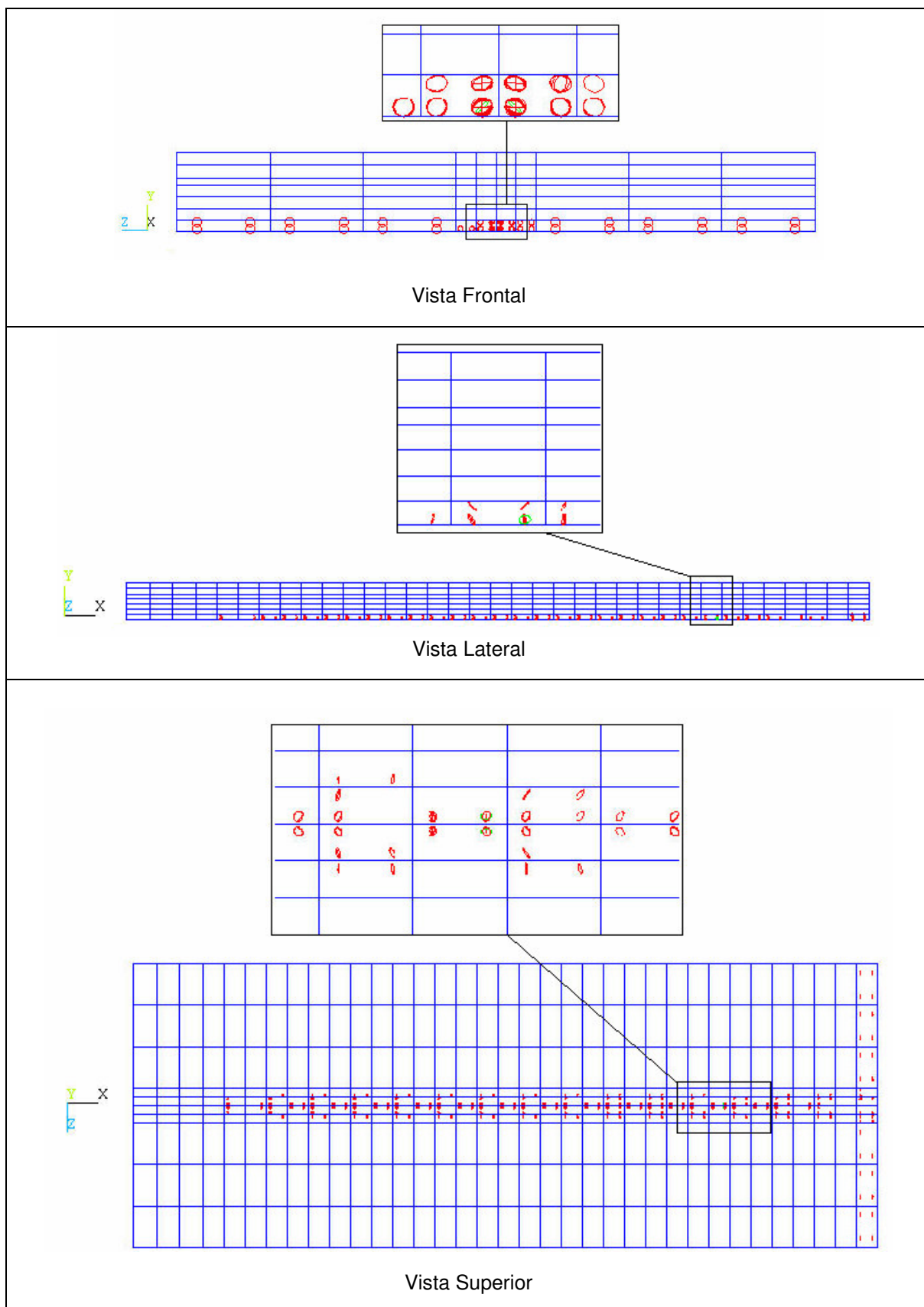


FIGURA 4.13 – FISSURAS TRANSVERSAIS (DIREÇÃO Z), POR FENDILHAMENTO E POR CISCALHAMENTO NA LAJE DA VIGA A3 – CARGA DE 134,72 KN

A fissuração da laje de concreto para o último passo de carga (448,64 kN) é apresentada na figura 4.14.

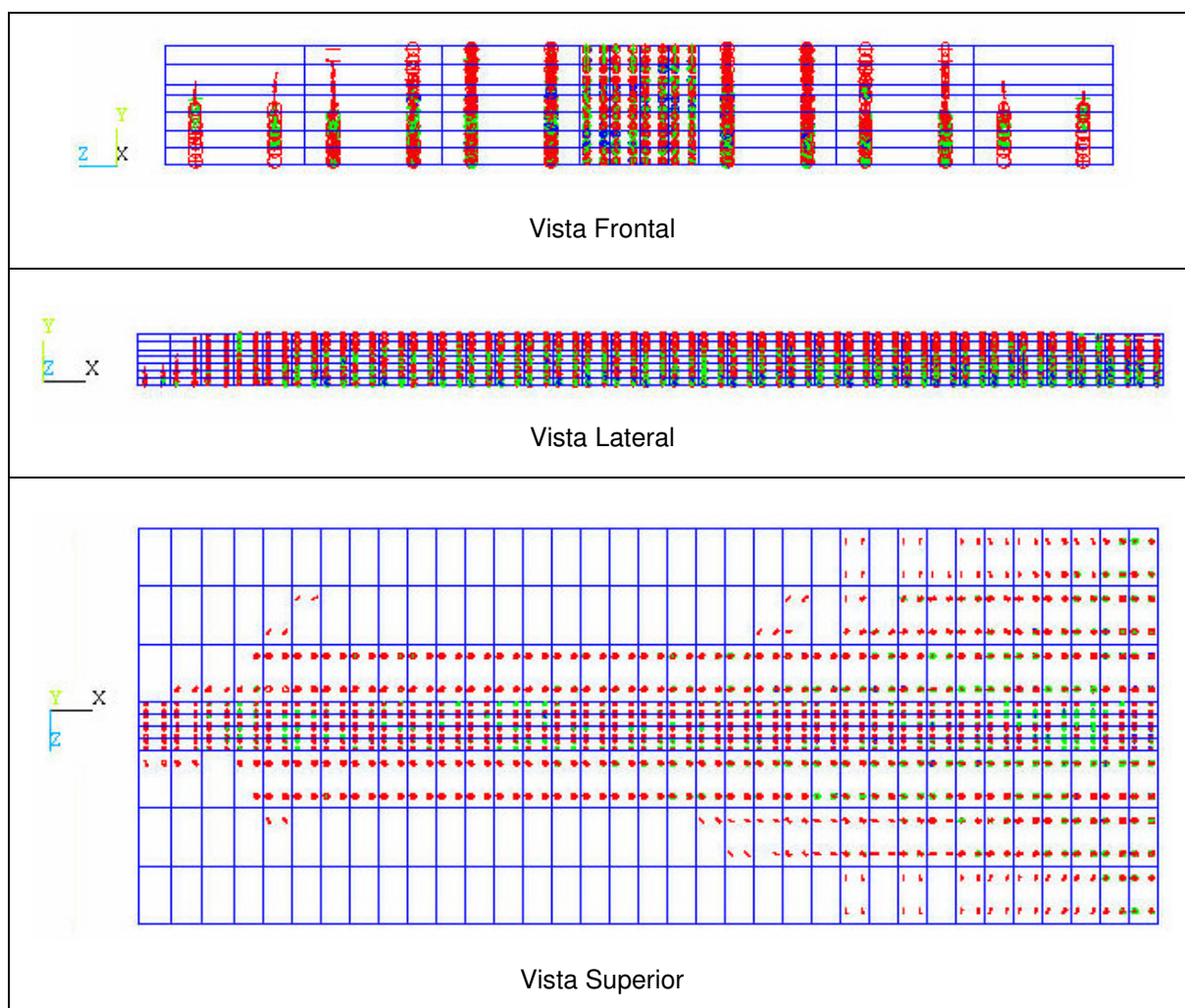


FIGURA 4.14 – FISSURAS PARA O ÚLTIMO PASSO DE CARGA ALCANÇADO PELA VIGA A3 – CARGA DE 448,64 KN

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as vigas U3 com a utilização de conectores de cisalhamento com diâmetros iguais a 16 mm, 19 mm e 22 mm, segundo os quadros 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente.

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 16 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	20,33	20,33
Número de conectores	56	56	56
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	1,17	13,56	10,55
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0021	0,0660	0,0544
Força vertical total aplicada (kN)	481,80	874,08	840,22

QUADRO 4.4 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 19 mm de diâmetro (\emptyset)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	20,33	20,33
Número de conectores	56	56	56
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,47	21,22	13,76
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0126	0,0432	0,0320
Força vertical total aplicada (kN)	777,36	956,56	880,94

QUADRO 4.5 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES $\emptyset=19$ MM

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 22 mm de diâmetro (\emptyset)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	20,33	20,33
Número de conectores	56	56	56
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	14,80	15,97	22,33
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0205	0,0227	0,0307
Força vertical total aplicada (kN)	898,58	904,98	966,24

QUADRO 4.6 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES $\emptyset=22$ MM

As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram a evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas U3.

Na figura 4.15 ilustram-se os gráficos das vigas U3 com conectores de 16 mm de diâmetro.

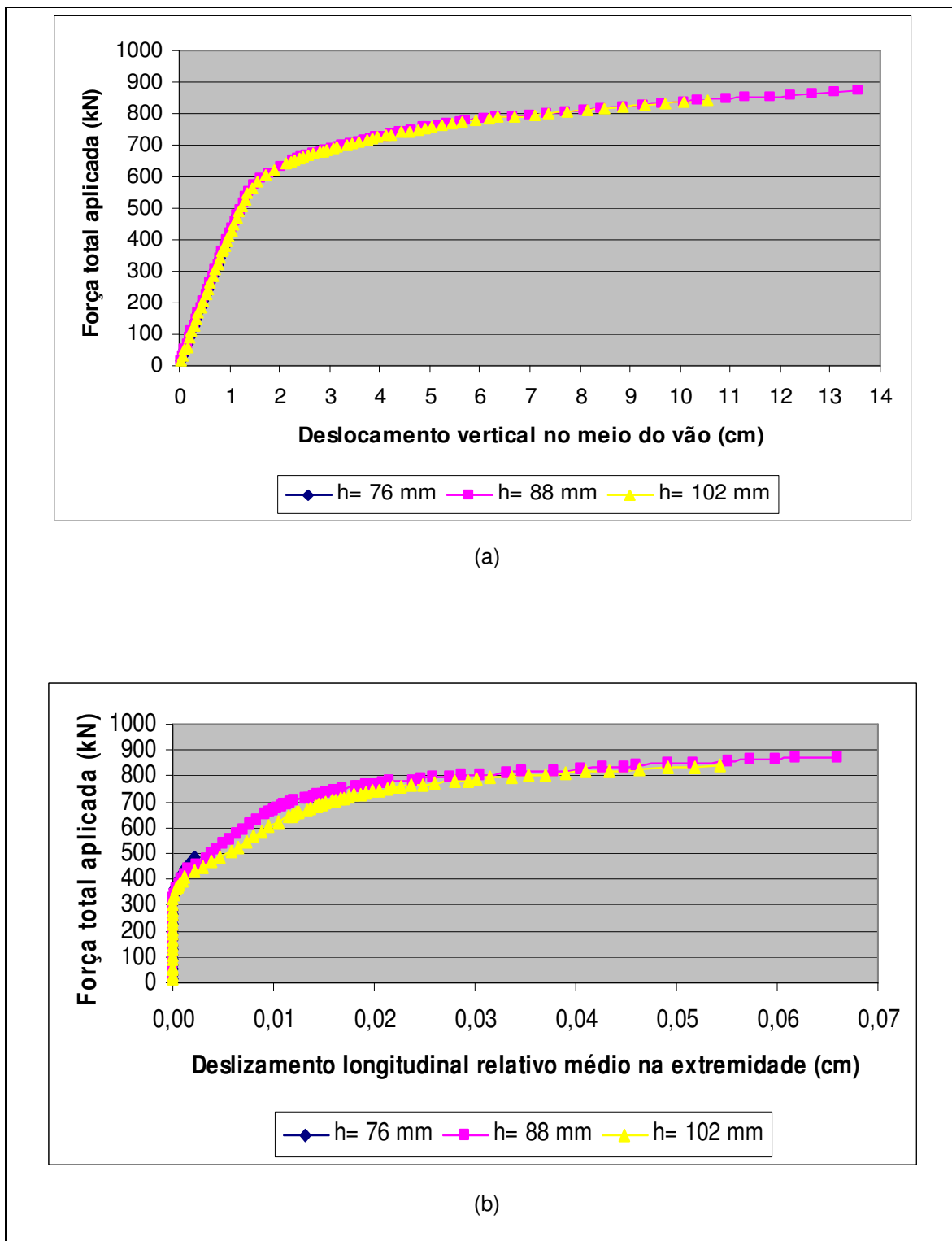


FIGURA 4.15 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM

A figura 4.16 mostra os gráficos das vigas U3 com conectores de 19 mm de diâmetro.

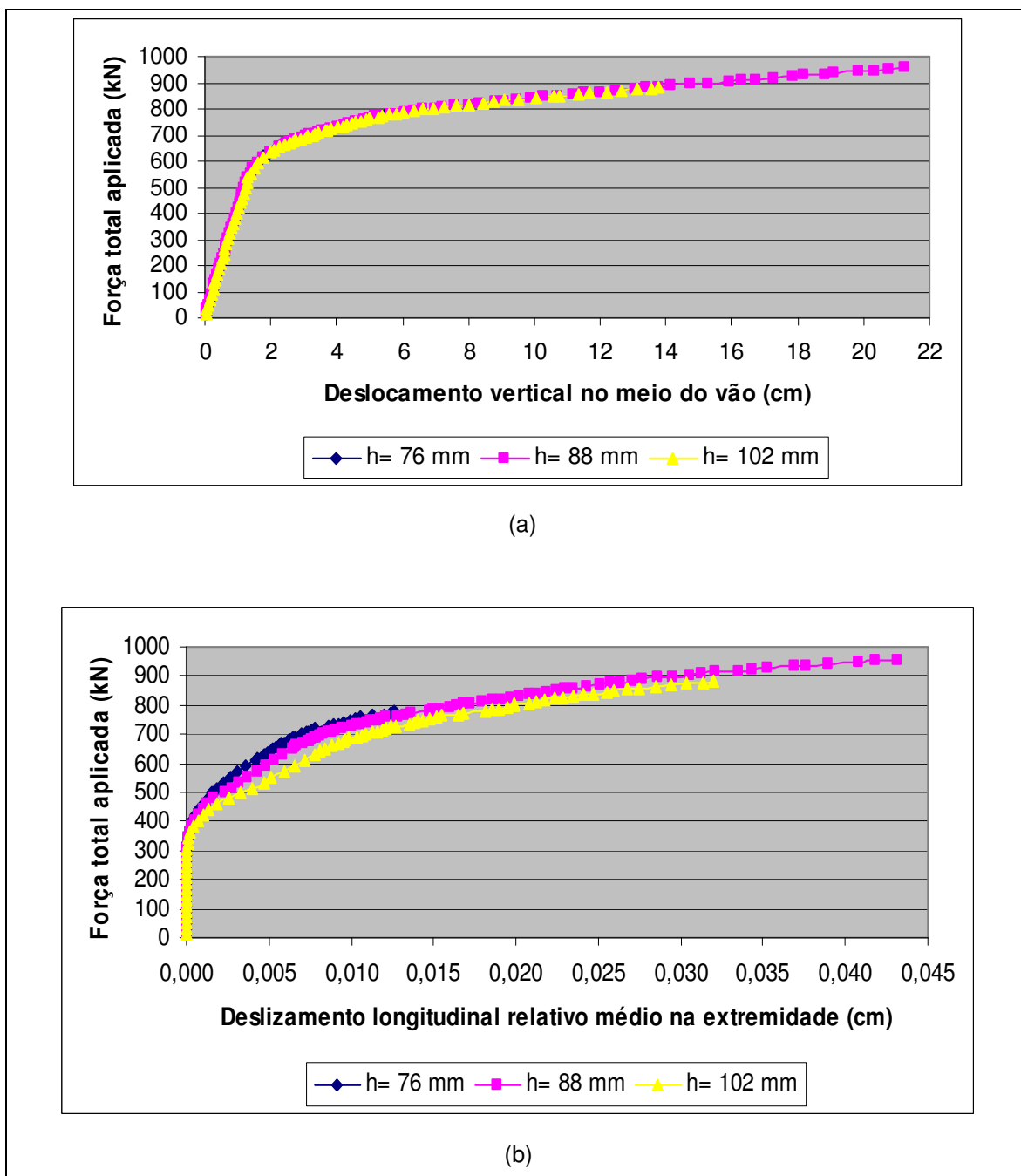


FIGURA 4.16 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM

Os gráficos da figura 4.17 representam as vigas U3 com conectores de 22 mm de diâmetro.

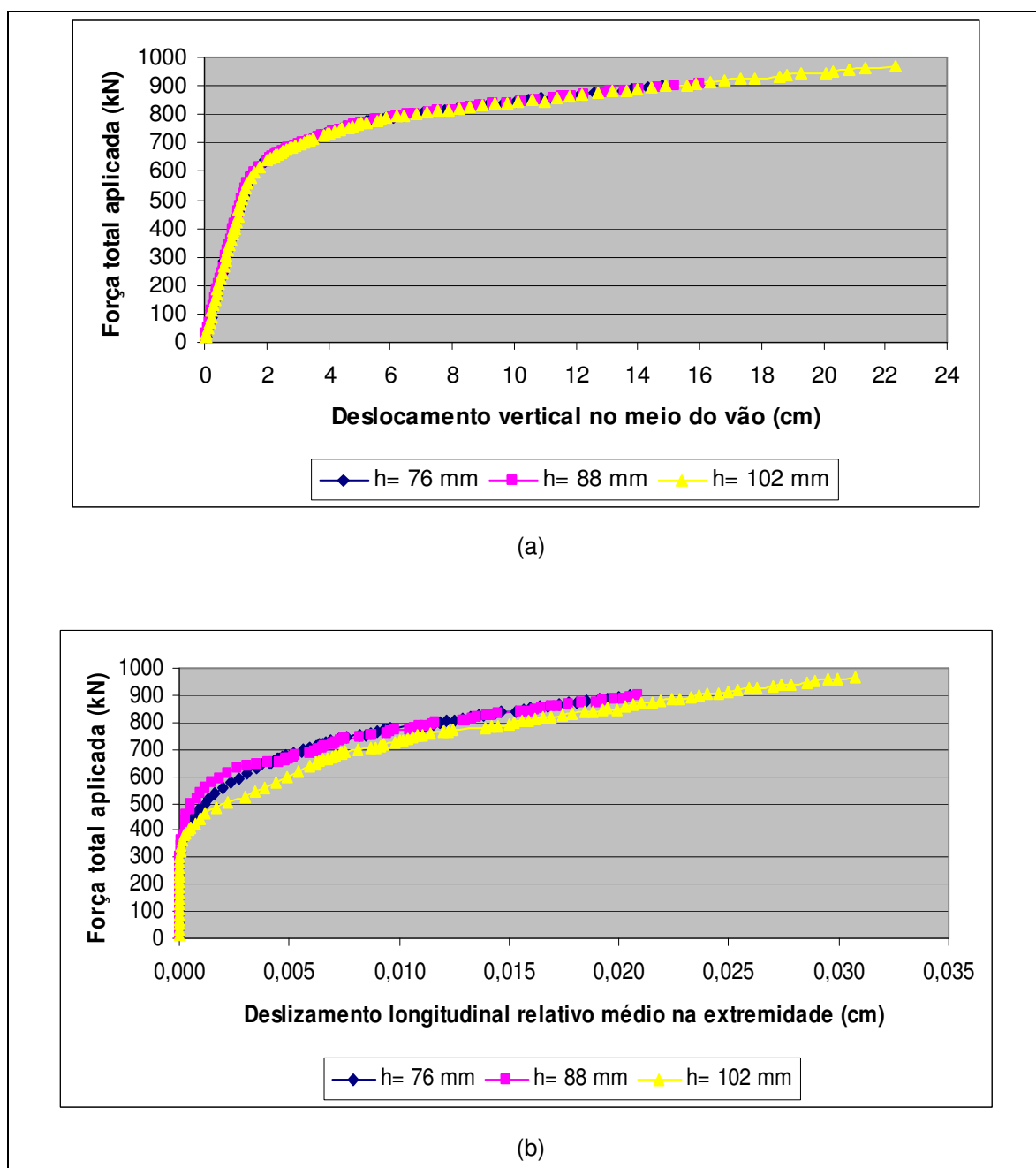


FIGURA 4.17 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM

As fissuras nos elementos da laje de concreto da viga U3 com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura, para vários níveis de carga, são apresentadas nas figuras a seguir.

A figura 4.18 indica as primeiras fissuras nos elementos da laje de concreto foram identificadas para um nível de carregamento igual a 205,92 kN.

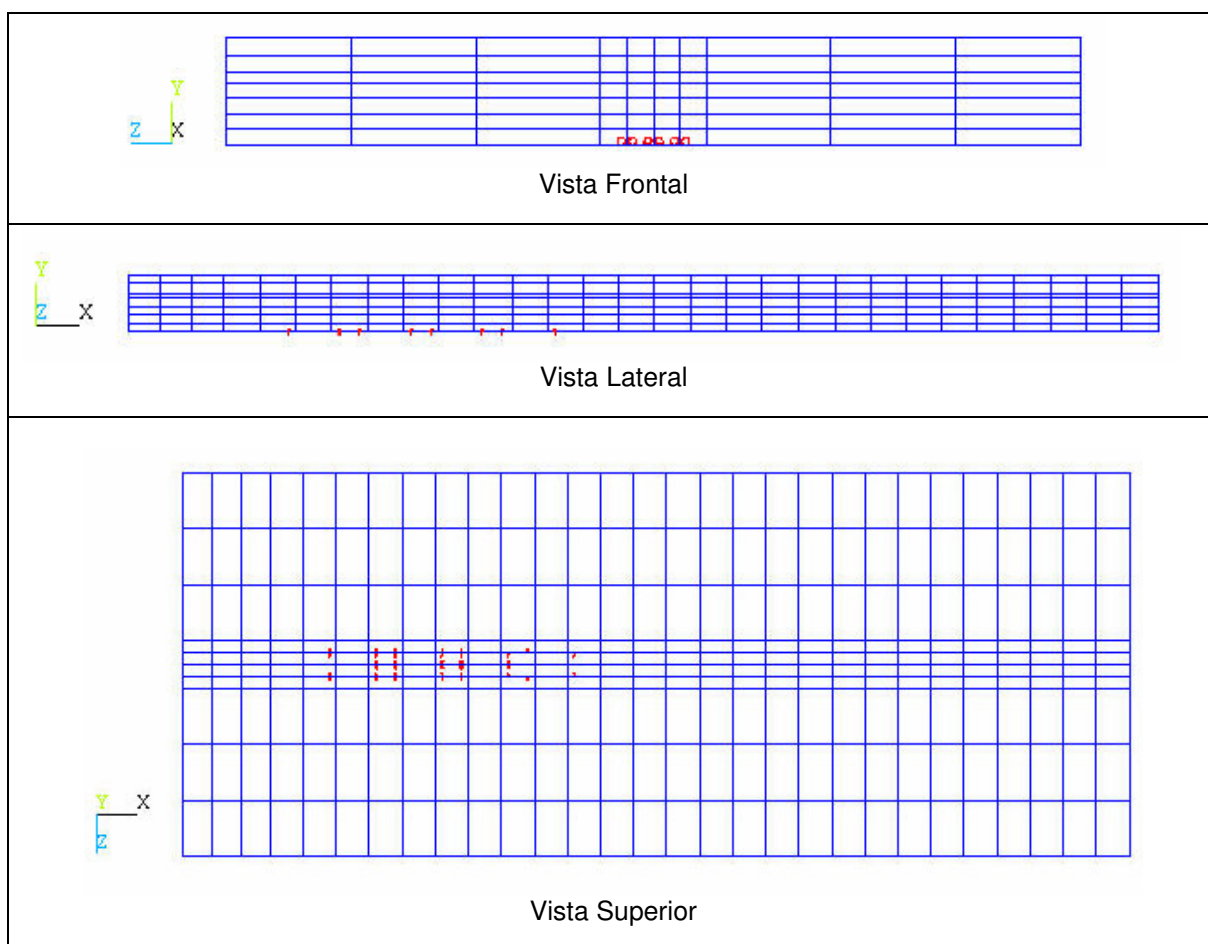


FIGURA 4.18 – PRIMEIRAS FISSURAS IDENTIFICADAS NOS ELEMENTOS DA LAJE DE CONCRETO DA VIGA U3 – CARGA DE 205,92 KN

As primeiras fissuras por fendilhamento nos elementos da laje de concreto foram sinalizadas para um nível de carregamento igual a 477,38 kN, conforme figura 4.19. Ainda nesta figura podem-se identificar fissuras transversais (direção z) e fissuras por cisalhamento, inclinadas 45°.

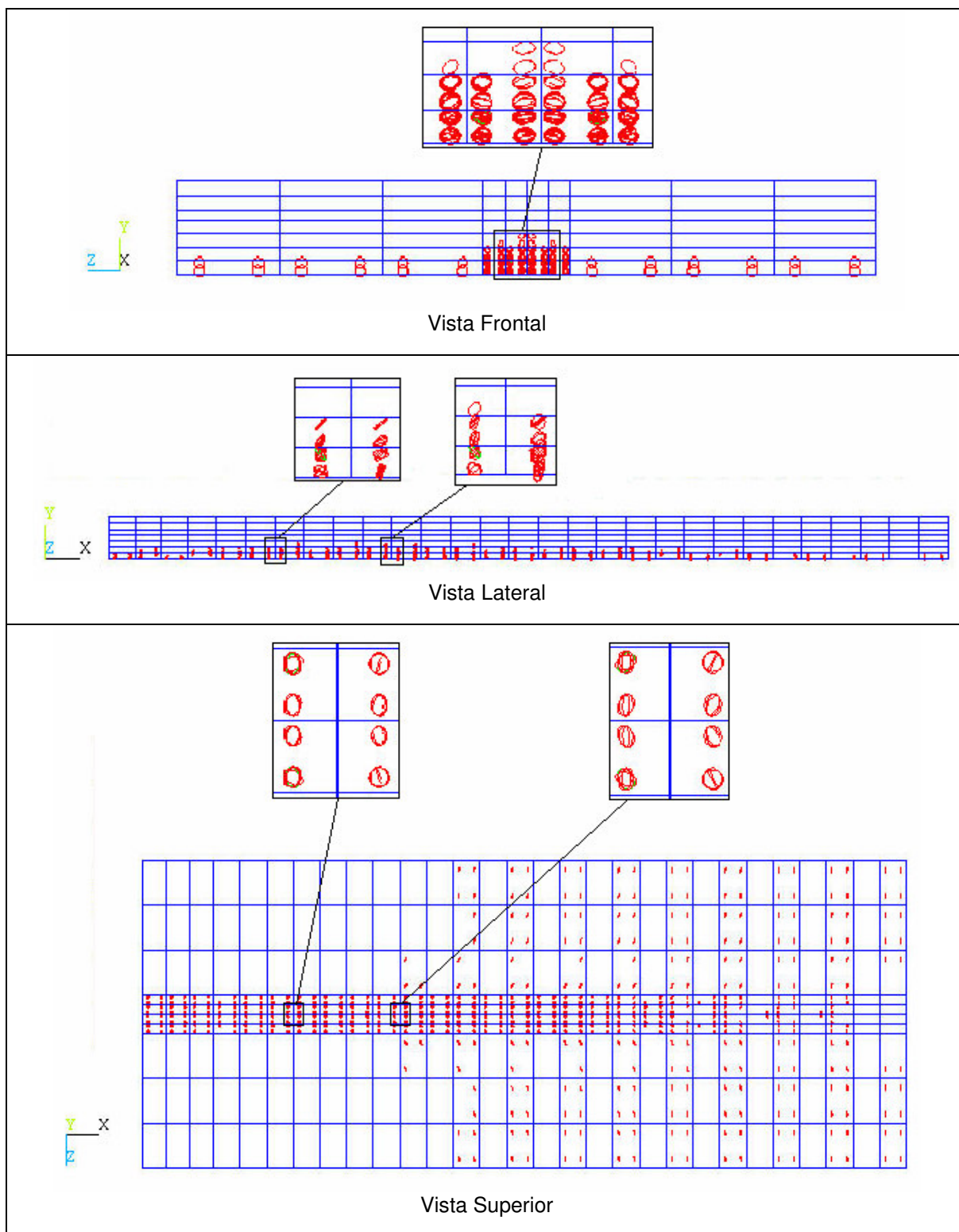


FIGURA 4.19 – FISSURAS TRANSVERSAIS (DIREÇÃO Z), POR FENDILHAMENTO E POR CISALHAMENTO NA LAJE DA VIGA U3 – CARGA DE 477,38 KN

A figura 4.20 mostra a fissuração da laje de concreto para o último passo de carga (880,94 kN).

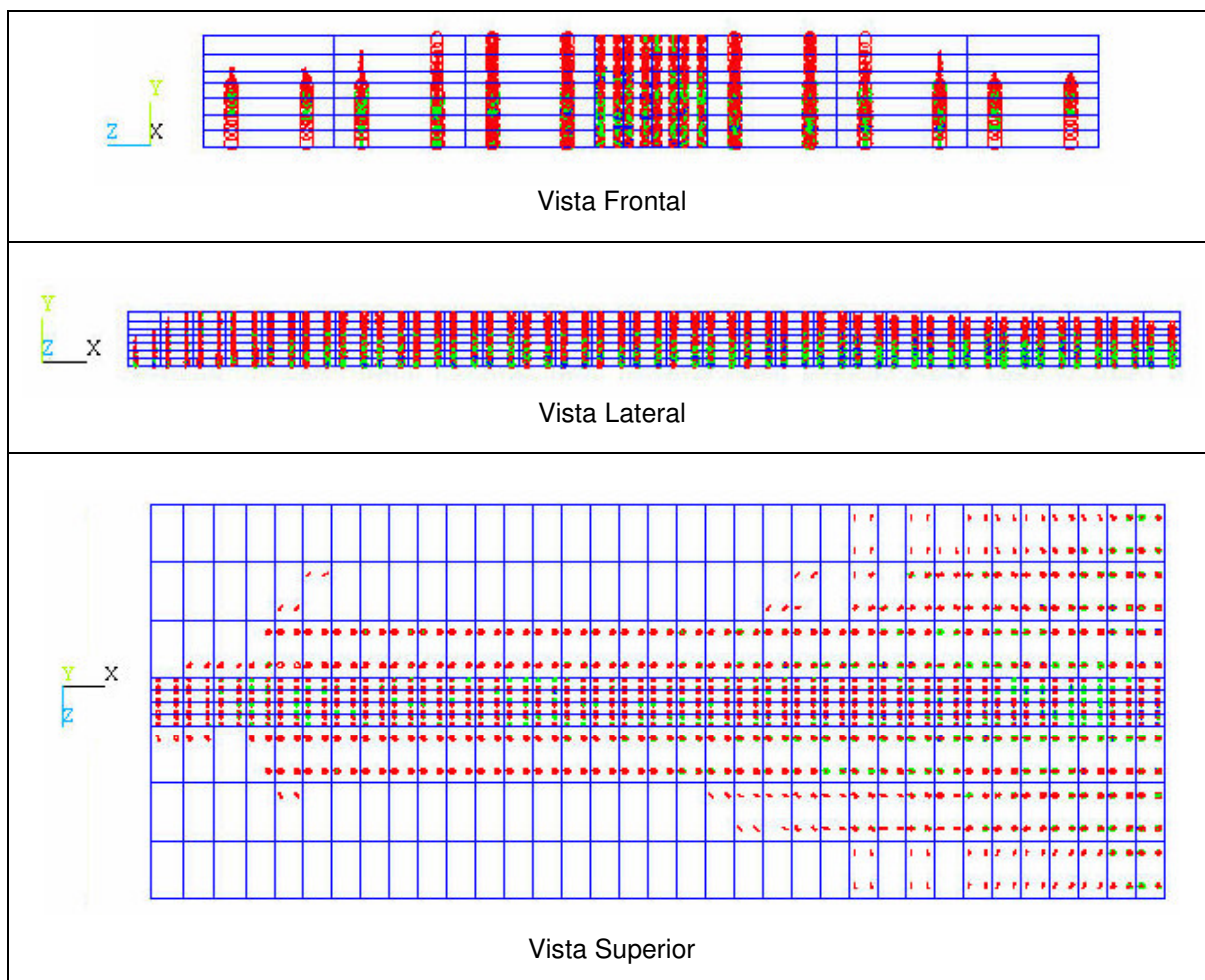


FIGURA 4.20 – FISSURAS PARA O ÚLTIMO PASSO DE CARGA ALCANÇADO PELA VIGA U3 – CARGA DE 880,94 KN

4.1.3 Terceira etapa de simulações

Os resultados obtidos na terceira etapa de simulações estão apresentados nos quadros 4.7, 4.8 e 4.9, para as vigas A3 com conectores de cisalhamento de diâmetros 16 mm, 19 mm e 22 mm, respectivamente.

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 16 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	18,30	18,30	18,30
Número de conectores	64	64	64
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,25	4,98	3,87
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0169	0,0175	0,0149
Força vertical total aplicada (kN)	443,92	439,62	421,30

QUADRO 4.7 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800*

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 19 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	24,95	24,95	24,95
Número de conectores	46	46	46
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	2,74	1,20	1,95
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0138	0,0031	0,0108
Força vertical total aplicada (kN)	411,10	312,62	377,84

QUADRO 4.8 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800*

VIGAS A3 – Carga concentrada	Conectores com 22 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	32,29	32,29	32,29
Número de conectores	34	34	34
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	2,76	6,48	9,80
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0127	0,0379	0,0557
Força vertical total aplicada (kN)	395,42	458,06	496,88

QUADRO 4.9 – RESULTADOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800*

Nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23 estão apresentados os gráficos da evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas A3.

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Os gráficos da figura 4.21 representam as vigas A3 com conectores de 16 mm de diâmetro.

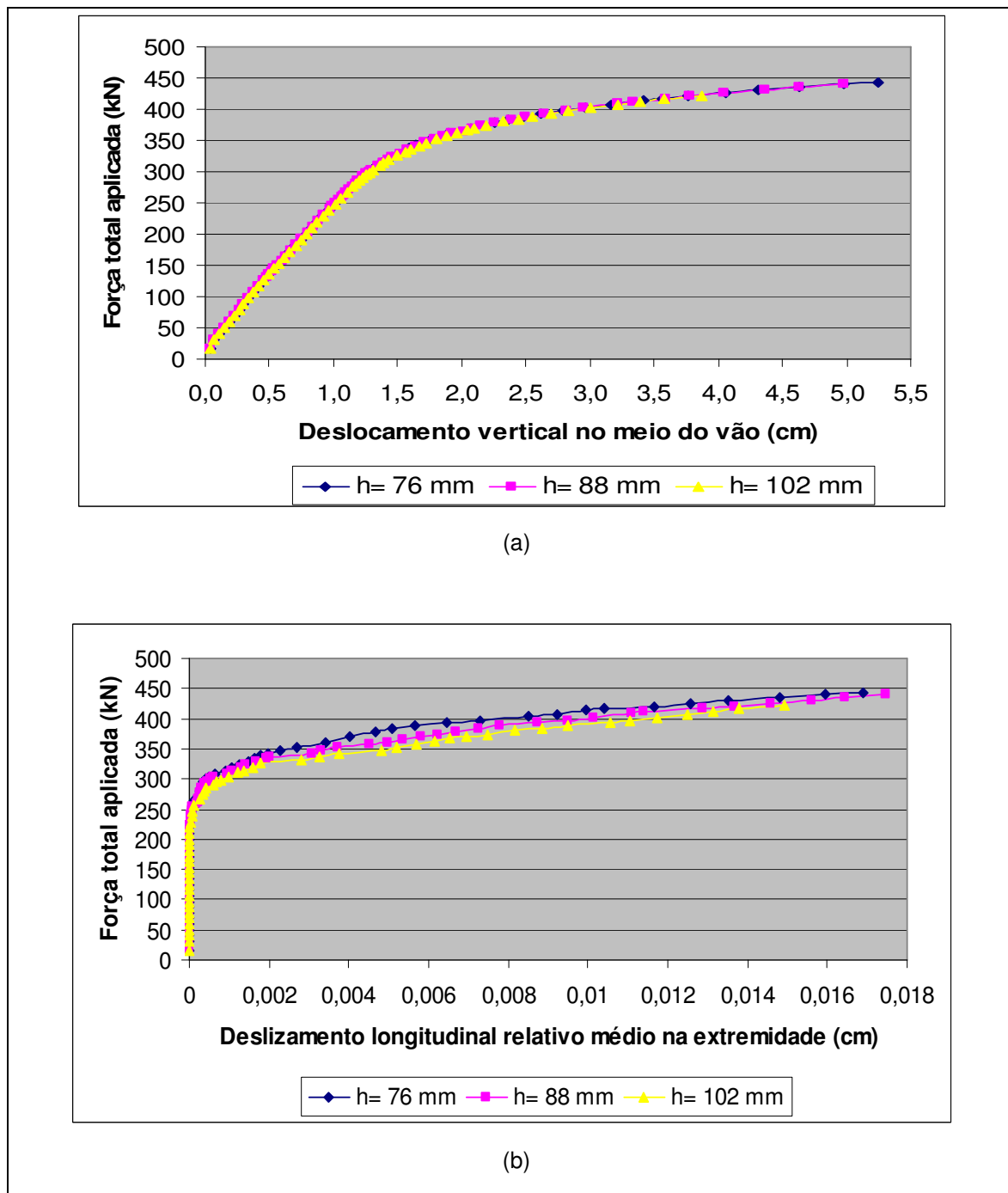


FIGURA 4.21 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM – NBR 8800

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

A figura 4.22 mostra os gráficos das vigas A3 com conectores de 19 mm de diâmetro.

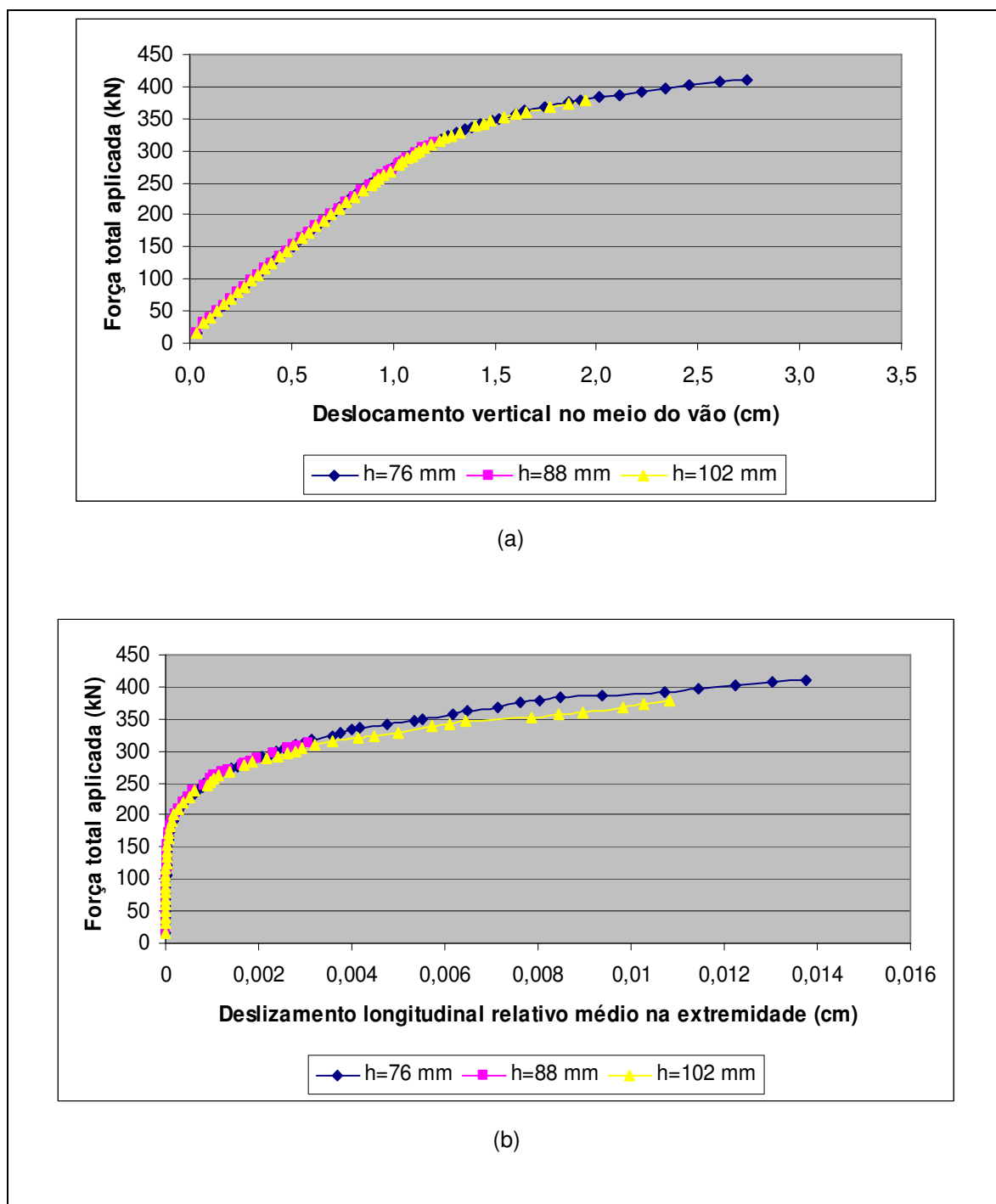


FIGURA 4.22 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM – NBR 8800^{*}

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Na figura 4.23 ilustram-se os gráficos das vigas A3 com conectores de 22 mm de diâmetro.

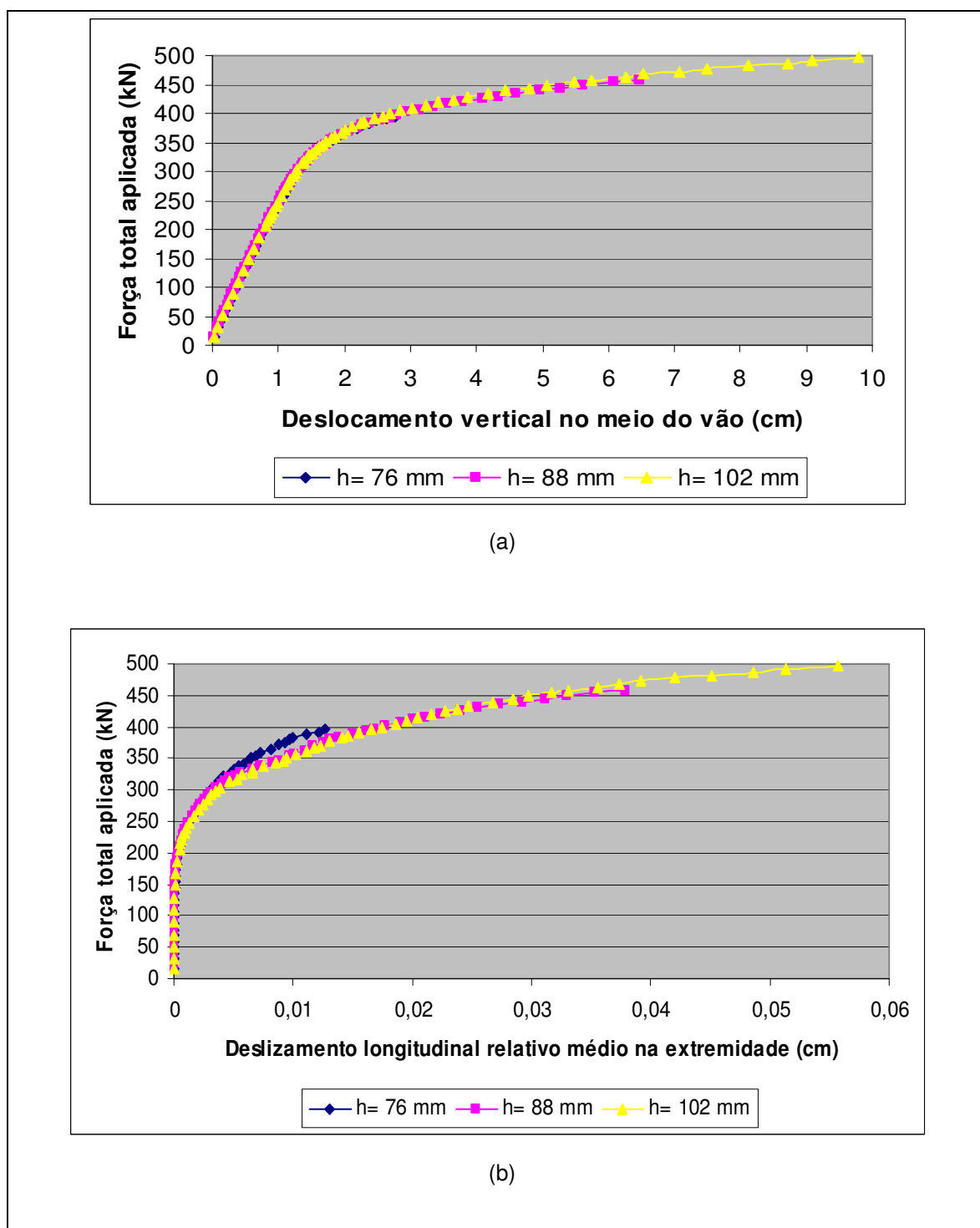


FIGURA 4.23 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as vigas U3 com a utilização de conectores de cisalhamento com diâmetros iguais a 16 mm, 19 mm e 22 mm, segundo os quadros 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente.

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 16 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	27,45	27,45	27,45
Número de conectores	40	40	40
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,31	6,23	10,29
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0602	0,0852	0,1802
Força vertical total aplicada (kN)	753,14	767,34	824,06

QUADRO 4.10 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16 MM – NBR 8800*

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 19 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	36,60	36,60	36,60
Número de conectores	28	28	28
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	6,26	9,58	9,24
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,1202	0,2267	0,2451
Força vertical total aplicada (kN)	768,36	811,26	807,02

QUADRO 4.11 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19 MM – NBR 8800*

VIGAS U3 – Carga distribuída	Conectores com 22 mm de diâmetro (Ø)		
Altura dos conectores (mm)	76	88	102
Espaçamento entre conectores (cm)	49,91	49,91	49,91
Número de conectores	22	22	22
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	7,58	5,98	10,43
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,1685	0,0816	0,1924
Força vertical total aplicada (kN)	840,24	767,72	827,06

QUADRO 4.12 – RESULTADOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22 MM – NBR 8800*

Nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26 estão apresentados os gráficos da evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas U3.

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Na figura 4.24 ilustram-se os gráficos das vigas U3 com conectores de 16 mm de diâmetro.

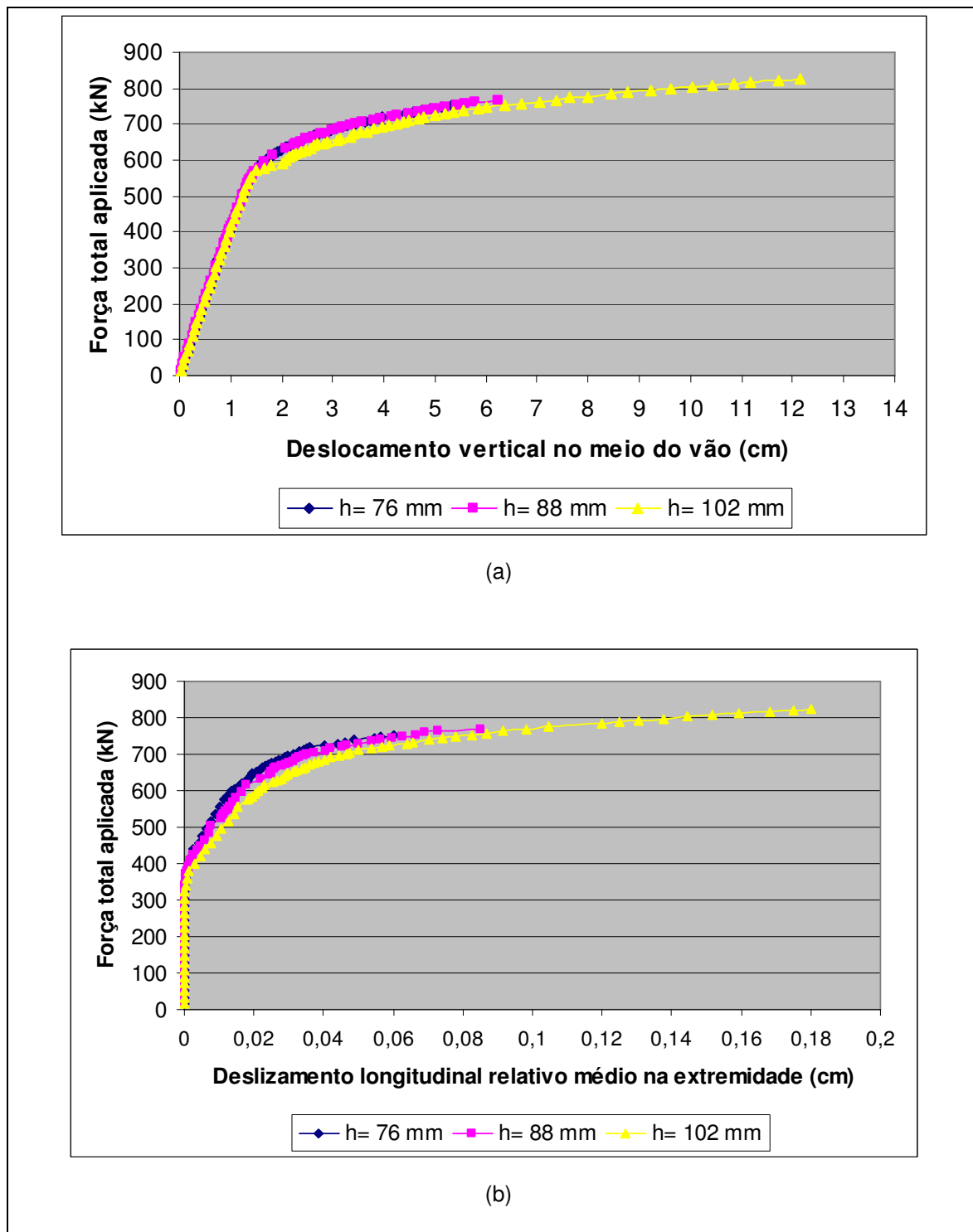


FIGURA 4.24 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

A figura 4.25 mostra os gráficos das vigas U3 com conectores de 19 mm de diâmetro.

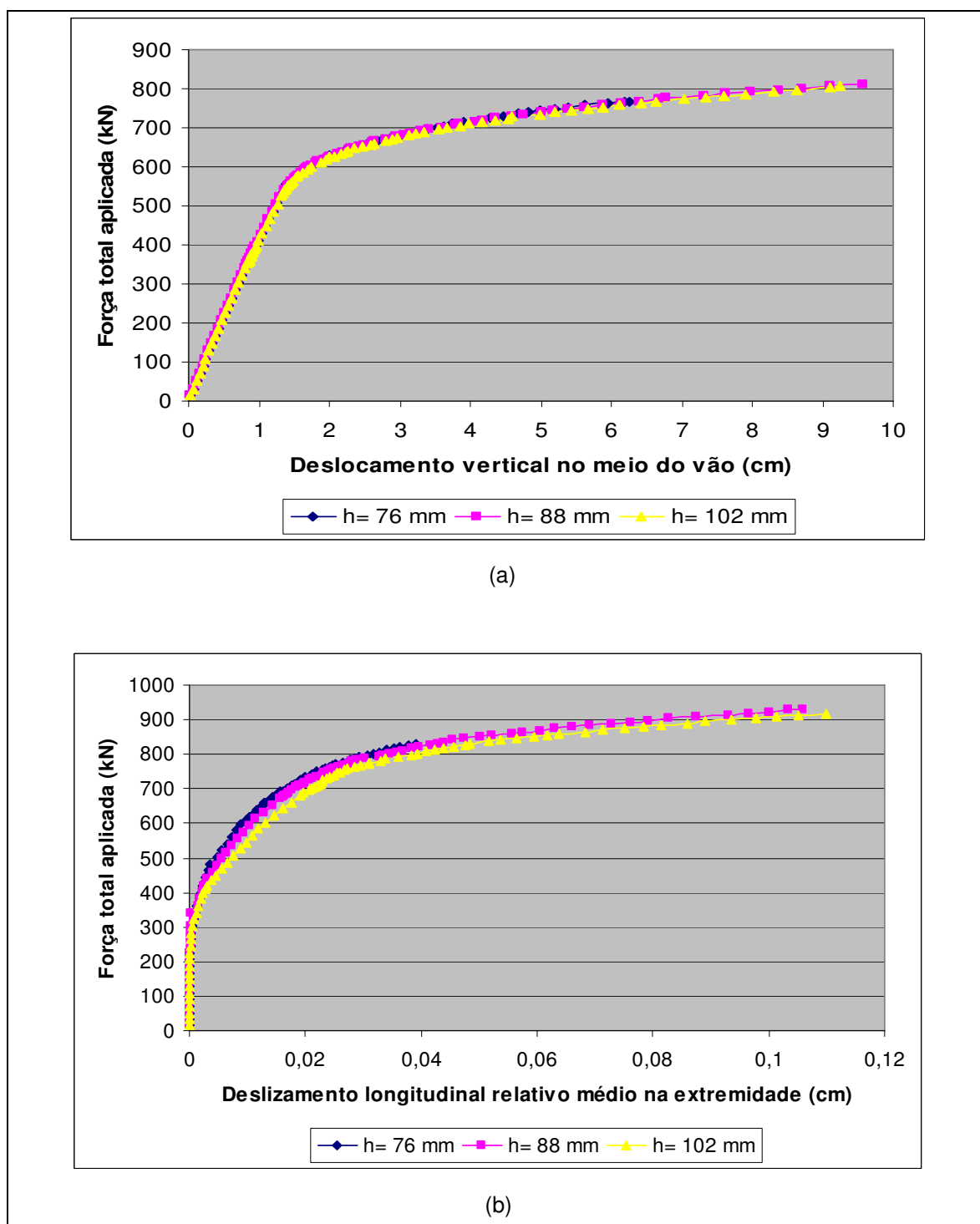


FIGURA 4.25 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Os gráficos da figura 4.26 representam as vigas U3 com conectores de 22 mm de diâmetro.

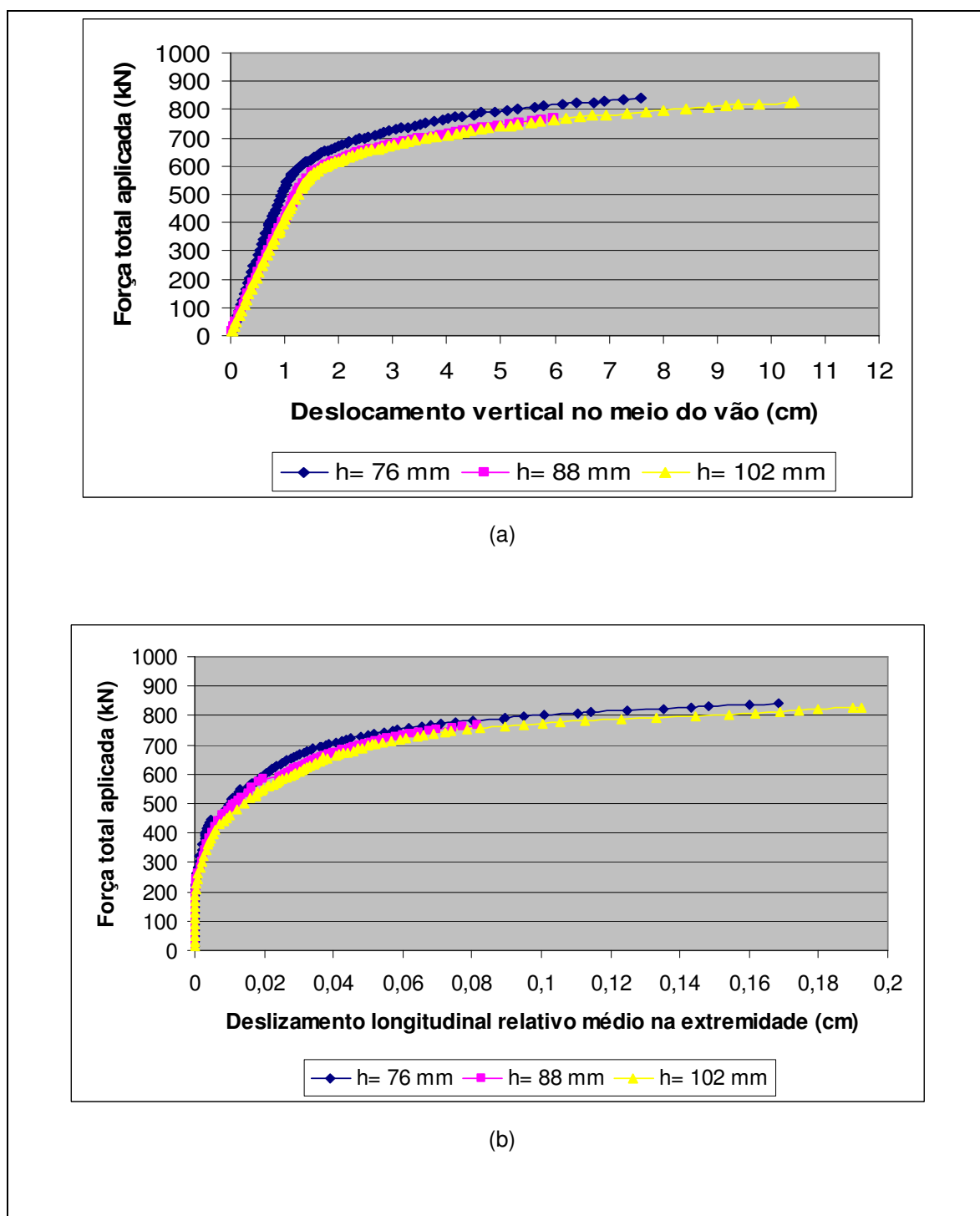


FIGURA 4.26 – GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Nos quadros a seguir, apresentam-se os resultados obtidos na terceira etapa de simulações e no cálculo de vigas mistas, segundo as recomendações do Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003), cujo procedimento encontra-se nos anexos A e B, para os conectores de cisalhamento com 19 mm de diâmetro e, no anexo C, para os demais conectores de cisalhamento.

Os quadros 4.13, 4.14 e 4.15 mostram os resultados da carga limite (F_{max}) e do deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}), obtidos para os modelos de viga A3 com conectores de diâmetros: 16 mm, 19 mm e 22 mm, respectivamente, em função da altura dos conectores (H).

VIGAS A3 – Ø=16 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	443,92	5,25
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	88	439,62	4,98
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	102	421,30	3,87
Valores Calculados		394,29	14,38

QUADRO 4.13 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=16MM – NBR 8800*

VIGAS A3 – Ø=19 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	411,10	2,74
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	88	312,62	1,20
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	102	377,84	1,95
Valores Calculados		394,29	14,38

QUADRO 4.14 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=19MM – NBR 8800*

VIGAS A3 – Ø=22 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	395,42	2,76
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	88	458,06	6,48
Valores Calculados		394,29	14,38
Valores da Simulação	102	496,88	9,80
Valores Calculados		394,29	14,38

QUADRO 4.15 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS A3 COM CONECTORES Ø=22MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

Os resultados da carga limite (F_{max}) e do deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}), obtidos para os modelos de viga U3 com conectores de diâmetros: 16 mm, 19 mm e 22 mm, em função da altura dos conectores (H), são apresentados nos quadros 4.16, 4.17 e 4.18, respectivamente.

VIGAS U3 – Ø=16 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	753,14	5,31
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	88	767,34	6,23
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	102	824,06	10,29
Valores Calculados		738,73	16,08

QUADRO 4.16 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=16MM – NBR 8800*

VIGAS U3 – Ø=19 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	768,36	6,26
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	88	811,26	9,58
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	102	807,02	9,24
Valores Calculados		738,73	16,08

QUADRO 4.17 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=19MM – NBR 8800*

VIGA U3 – Ø=22 mm	H (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)
Valores da Simulação	76	840,24	7,58
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	88	767,72	5,98
Valores Calculados		738,73	16,08
Valores da Simulação	102	827,06	10,43
Valores Calculados		738,73	16,08

QUADRO 4.18 – RESULTADOS COMPARATIVOS DAS VIGAS U3 COM CONECTORES Ø=22MM – NBR 8800*

* Projeto de Revisão (texto base 2003)

4.2 DISCUSSÃO

Na primeira etapa de simulações, verificou-se que no regime elástico as respostas das vigas mistas são semelhantes, tanto para os modelos experimentais quanto para os numéricos.

No regime não linear, o limite de carregamento das vigas A3 também foi semelhante para todos os modelos. Isso, porém, não ocorreu para as vigas U3. Neste caso, o modelo experimental atingiu um valor superior de carregamento, valor este 10% maior que os dos modelos numéricos.

Em relação ao deslocamento vertical no centro do vão das vigas, no limite de carregamento, os valores dos modelos numéricos são semelhantes e cerca de 30% menores que os experimentais. Isso sugere um comportamento mais dúctil dos modelos experimentais.

O deslizamento observado para a viga A3, por outro lado, não apresentou o mesmo comportamento. No limite de carregamento, os modelos de Kotinda (2006) e Chapman e Balakrishnan (1964) apresentaram deslizamentos semelhantes, enquanto o modelo construído resultou em um deslizamento 30% menor.

Na avaliação da distribuição de tensões na seção transversal localizada no meio do vão das vigas mistas (figuras 4.4 e 4.5), verificou-se a plastificação da seção mista, tanto nos modelos numéricos quanto nos experimentais.

As tensões de von Mises, critério adotado para a plastificação do concreto à compressão, foram semelhantes para os modelos numéricos. Estas tensões sinalizam a ruptura da laje por compressão excessiva, uma vez que não foi identificada a força correspondente à ruptura da laje, devido à desconsideração do trecho decrescente do modelo constitutivo do concreto à compressão nas simulações.

As deformações nos conectores de cisalhamento também foram semelhantes para os modelos numéricos. Através da figura 4.8, observa-se a reversão na curvatura dos conectores, prevista na literatura, quando ocorre o processo de transferência de tensões de cisalhamento longitudinal da laje para a viga. Tal reversão ocorre no fim da zona de compressão triaxial.

De modo geral, os resultados obtidos neste trabalho foram semelhantes aos apresentados por Chapman e Balakrishnan (1964) e por Kotinda (2006). É provável,

que as diferenças encontradas entre os modelos experimentais e numéricos estejam relacionadas a instabilidades numéricas, provenientes da calibração dos modelos construídos, em função dos parâmetros adotados na modelagem, e ao método construtivo da viga mista. Como o trabalho experimental de Chapman e Balakrishnan (1964) utilizou viga mista não escorada, maiores deslocamentos e tensões no perfil metálico são previstos, de acordo com a literatura. Já na construção escorada, considerada nas simulações deste trabalho e de Kotinda (2006), a viga mista é mais rígida e, portanto, os deslocamentos e tensões são menores.

Na segunda etapa de simulações, as respostas das vigas mistas no regime elástico foram semelhantes para todos os conectores, independentemente dos diâmetros e alturas dos mesmos. No entanto, no regime não linear, esses parâmetros afetam o comportamento da estrutura de diferentes modos.

Para as vigas A3, no limite de carregamento, foram feitas as observações abaixo relacionadas:

- a) Influência da altura do conector (H) na carga limite (F_{max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{max}) e deslizamento (d_{max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga (quadro 4.19):

VIGAS A3 PARÂMETROS	\varnothing (mm)	F_{max} (kN)	u_{max} (cm)	d_{max} (cm)
H = 76 mm	16	377,32	2,23	0,0040
	19	444,32	5,05	0,0100
	22	453,18	5,57	0,0103
H = 88 mm	16	443,78	5,24	0,0167
	19	460,50	6,49	0,0147
	22	444,92	4,94	0,0086
H = 102 mm	16	354,52	1,84	0,0048
	19	448,64	5,32	0,0131
	22	453,76	5,61	0,0120

QUADRO 4.19 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA AS VIGAS A3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ALTURA (H) DOS CONECTORES

- b) Influência do diâmetro do conector (\emptyset) na carga limite (F_{\max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{\max}) e deslizamento (d_{\max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga (quadro 4.20):

VIGAS A3	H	F_{max}	u_{max}	d_{max}
PARÂMETROS	(mm)	(kN)	(cm)	(cm)
$\emptyset = 16$ mm	76	377,32	2,23	0,0040
	88	443,78	5,24	0,0167
	102	354,52	1,84	0,0048
$\emptyset = 19$ mm	76	444,32	5,05	0,0100
	88	460,50	6,49	0,0147
	102	448,64	5,32	0,0131
$\emptyset = 22$ mm	76	453,18	5,57	0,0103
	88	444,92	4,94	0,0086
	102	453,76	5,61	0,0120

QUADRO 4.20 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA AS VIGAS A3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO (\emptyset) DOS CONECTORES

Percebe-se através dos quadros 4.19 e 4.20 que o carregamento máximo ocorre para o conector com $H=88$ mm e $\emptyset=19$ mm. Essa solução foi também a que apresentou o maior deslocamento vertical, o que sugere um comportamento mais dúctil que as demais. Ainda observa-se que o aumento da altura e diâmetro do conector não necessariamente incrementa a carga limite e o deslizamento, cujo maior valor corresponde ao conector com $H=88$ mm e $\emptyset=16$ mm.

As observações, para as vigas U3, no limite de carregamento, são as relacionadas a seguir:

- a) Influência da altura do conector (H) na carga limite (F_{\max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{\max}) e deslizamento (d_{\max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga (quadro 4.21):

VIGAS U3	\emptyset	F_{max}	u_{max}	d_{max}
PARÂMETROS	(mm)	(kN)	(cm)	(cm)
H= 76 mm	16	481,80	1,17	0,0021
	19	777,36	5,47	0,0126
	22	898,58	14,80	0,0205
H = 88 mm	16	874,08	13,56	0,0660
	19	956,56	21,22	0,0432
	22	904,98	15,97	0,0227
H = 102 mm	16	840,22	10,55	0,0544
	19	880,94	13,76	0,0320
	22	966,24	22,33	0,0307

QUADRO 4.21 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A VIGA U3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ALTURA (H) DOS CONECTORES

- b) Influência do diâmetro do conector (\emptyset) na carga limite (F_{\max}), deslocamento vertical no meio do vão (u_{\max}) e deslizamento (d_{\max}) relativo (entre laje e perfil de aço) médio na extremidade da viga (quadro 4.22):

VIGAS U3 PARÂMETROS	H (mm)	F_{\max} (kN)	u_{\max} (cm)	d_{\max} (cm)
$\emptyset = 16$ mm	76	481,80	1,17	0,0021
	88	874,08	13,56	0,0660
	102	840,22	10,55	0,0544
$\emptyset = 19$ mm	76	777,36	5,47	0,0126
	88	956,56	21,22	0,0432
	102	880,94	13,76	0,0320
$\emptyset = 22$ mm	76	898,58	14,80	0,0205
	88	904,98	15,97	0,0227
	102	966,24	22,33	0,0307

QUADRO 4.22 – SÍNTESE DOS RESULTADOS PARA A VIGA U3 CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO (\emptyset) DOS CONECTORES

Nota-se nos quadros 4.21 e 4.22 que o carregamento máximo ocorre para o conector com $H=102$ mm e $\emptyset=22$ mm. Essa solução sugere um comportamento mais dúctil que as demais, por apresentar o maior deslocamento vertical. Observa-se ainda que o aumento da altura do conector não necessariamente incrementa a carga limite. Quanto ao deslizamento, verifica-se que o maior valor corresponde ao conector com $H=88$ mm e $\emptyset=16$ mm e, portanto, não aumenta com o acréscimo de altura ou diâmetro do conector.

Na fissuração da laje de concreto da viga A3 com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura, verificou-se que as primeiras fissuras (Figura 4.12) localizam-se na interface laje-viga e surgem para o carregamento de 106,56 kN em decorrência da adesão estabelecida para os materiais. Para a carga de 134,72 kN (Figura 4.13) identificam-se fissuras transversais (direção z) na interface laje-viga provenientes de tensões longitudinais de tração. Também se verificam para este nível de carga fissuras longitudinais (direção x) que ocorrem inicialmente em frente ao conector e em seguida atrás do mesmo. Estas fissuras correspondem às fissuras por fendilhamento. Ainda é possível identificar fissuras por cisalhamento, inclinadas a 45° nos elementos da laje de concreto. A Figura 4.14 mostra o estado de fissuração da laje para um carregamento de 448,64 kN, que corresponde ao último passo de carga alcançado na simulação numérica.

Verificou-se, na laje de concreto da viga U3 com conectores de 19 mm de diâmetro e 102 mm de altura, que as primeiras fissuras ocorrem para um carregamento de 205,92 (Figura 4.18). Como no modelo A3, observou-se no modelo U3 que as fissuras localizam-se na interface laje-viga e surgem provavelmente em decorrência da adesão estabelecida para os materiais. Para o carregamento de 477,38 kN foram identificadas fissuras longitudinais (direção x), por fendilhamento, que ocorrem inicialmente em frente ao conector e em seguida atrás do mesmo (Figura 4.19). Para este nível de carregamento também estão sinalizadas fissuras por cisalhamento, inclinadas a 45° nos elementos da laje de concreto e fissuras transversais (direção z), provenientes de tensões longitudinais de tração. A Figura 4.20 mostra o estado de fissuração da laje para o último passo de carga alcançado na simulação numérica, correspondente ao carregamento de 880,94 kN.

Na terceira etapa de simulações, verificou-se que, de acordo com os procedimentos de cálculo de vigas mistas do Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003), apresentados nos anexos A e B, a resistência dos conectores de cisalhamento depende do menor valor entre a resistência à ruína do concreto e à ruptura do pino, que é calculada em função do diâmetro do mesmo. E, tanto o número de conectores de cisalhamento quanto os demais parâmetros (força, flecha) são definidos em função da menor capacidade de resistência entre a laje de concreto, ao esmagamento, e o perfil metálico, ao escoamento. Ou seja, pelas recomendações normativas, o número de conectores, do tipo pino com cabeça, independe do seu comprimento. Portanto, como a seção da viga mista adotada foi a mesma para todos os modelos simulados, os valores obtidos para os deslocamentos verticais (flechas) e forças também foram, independentemente do diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento.

Percebe-se através dos quadros 4.13, 4.14 e 4.15, que força máxima calculada pelo Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003) é, em geral, conservadora, por apresentar valores inferiores aos obtidos na simulação numérica das vigas A3, embora não atenda da mesma forma as vigas com $\varnothing=19$ mm e H=88 mm e H=102 mm. Já os deslocamentos verticais calculados foram bem maiores que os obtidos nas simulações numéricas, indicando um comportamento mais rígido dos modelos simulados e mais dúctil dos calculados.

Para as vigas U3, nota-se pelos quadros 4.16, 4.17 e 4.18, que a força máxima calculada pelo Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003), por ser

menor que a obtida nos modelos simulados, também é conservadora. Em relação aos deslocamentos verticais, percebe-se que os modelos simulados são mais rígidos que calculados pelas recomendações normativas, pois apresentam menores valores de deslocamento.

As respostas das vigas mistas A3 obtidas na terceira etapa de simulações, são confrontadas com as da segunda etapa, nos quadros 4.23, 4.24 e 4.25 para os conectores com diâmetros de 16 mm, 19 mm e 22 mm, respectivamente, no intuito de verificar a influência da redução do número de conectores no comportamento estrutural das vigas mistas.

VIGAS A3 - CONECTORES COM Ø= 16 MM	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	18,30	17,16	18,30	17,16	18,30
Número de conectores	68	64	68	64	68	64
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	2,23	5,25	5,24	4,98	1,84	3,87
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0040	0,0169	0,0167	0,0175	0,0048	0,0149
Força vertical total aplicada (kN)	377,32	443,93	443,78	439,62	354,52	421,30

QUADRO 4.23 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES Ø=16 MM

VIGAS A3 - CONECTORES COM Ø= 19 MM	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	24,95	17,16	24,95	17,16	24,95
Número de conectores	68	46	68	46	68	46
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,05	2,74	6,49	1,20	5,32	1,95
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0100	0,0138	0,0147	0,0031	0,0131	0,0108
Força vertical total aplicada (kN)	444,32	411,10	460,50	312,62	448,64	377,84

QUADRO 4.24 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES Ø=19 MM

VIGAS A3 - CONECTORES COM $\varnothing = 22$ MM	2ª Etapa	3ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	17,16	32,29	17,16	32,29	17,16	32,29
Número de conectores	68	34	68	34	68	34
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,57	2,76	4,94	6,48	5,61	9,80
Deslizamento longitudinal relativo (laje-vinga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0414	0,0127	0,0515	0,0379	0,0811	0,0557
Força vertical total aplicada (kN)	453,18	395,42	444,92	458,06	453,76	496,88

QUADRO 4.25 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS A3 - CONECTORES $\varnothing = 22$ MM

As figuras a seguir mostram os gráficos comparativos das simulações realizadas na segunda e terceira etapas, apresentando a evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas A3.

A figura 4.27 se refere aos conectores de cisalhamento com 16 mm de diâmetro das vigas A3.

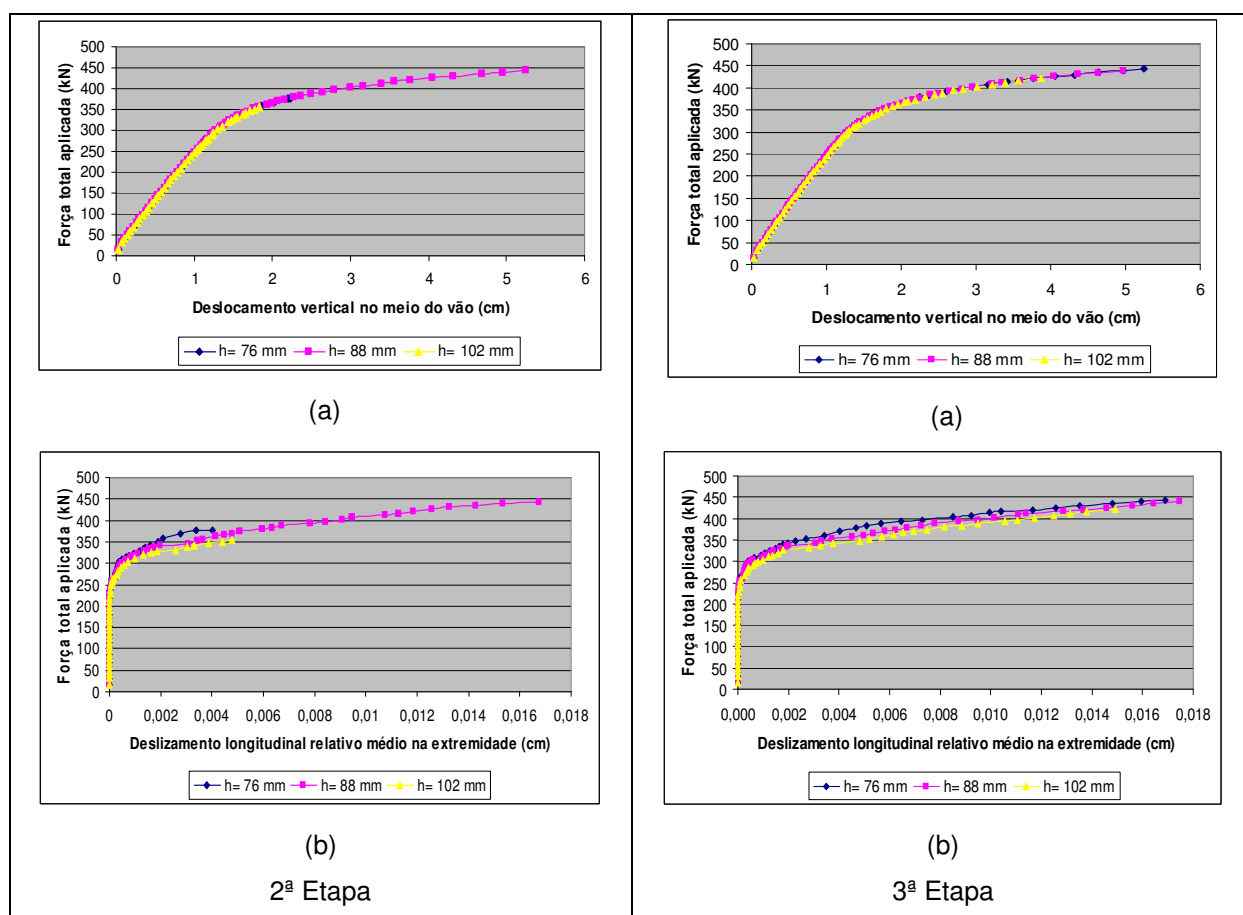


FIGURA 4.27 – GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing = 16$ MM

Na figura 4.28 estão os gráficos para os conectores de cisalhamento com 19mm de diâmetro das vigas A3.

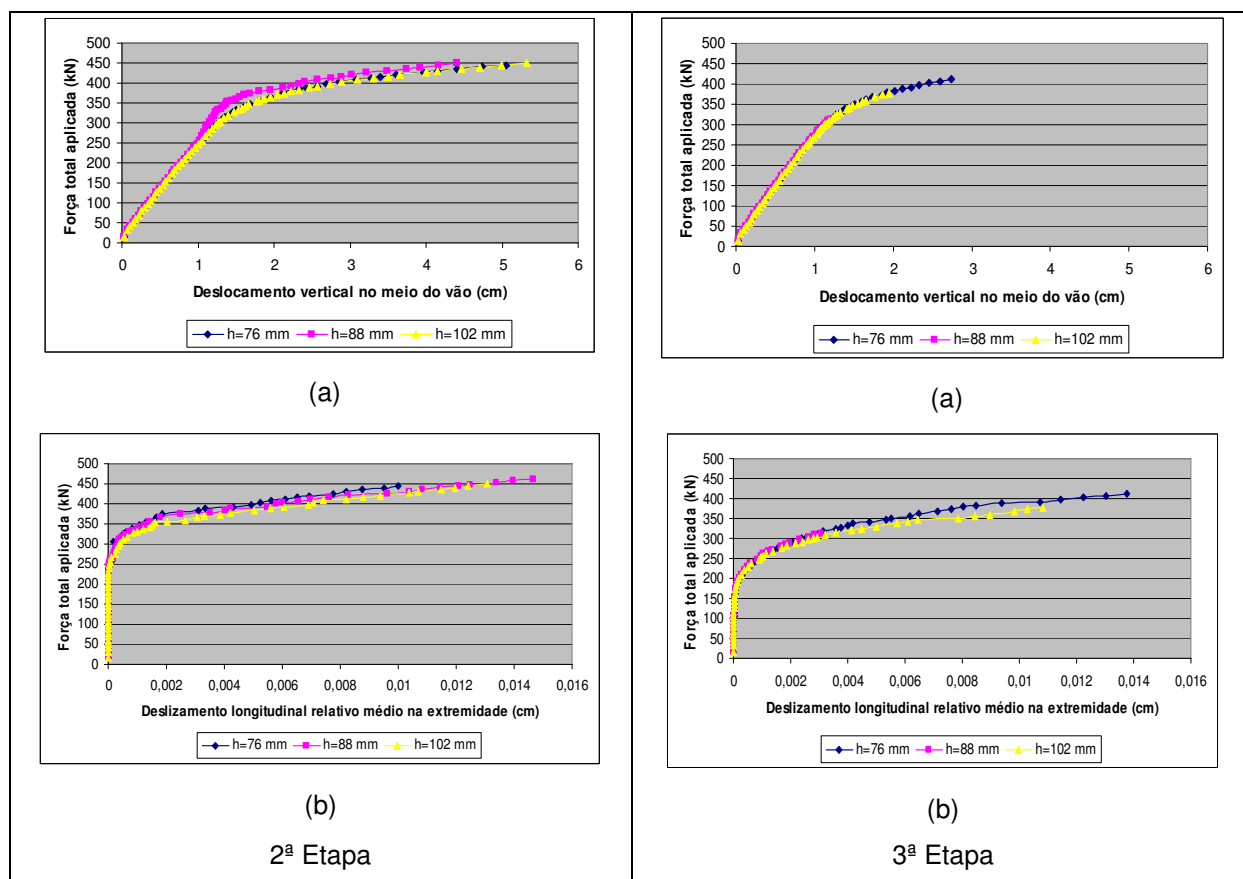


FIGURA 4.28– GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM

A figura 4.29 apresenta os gráficos para os conectores de cisalhamento com 22 mm de diâmetro das vigas A3.

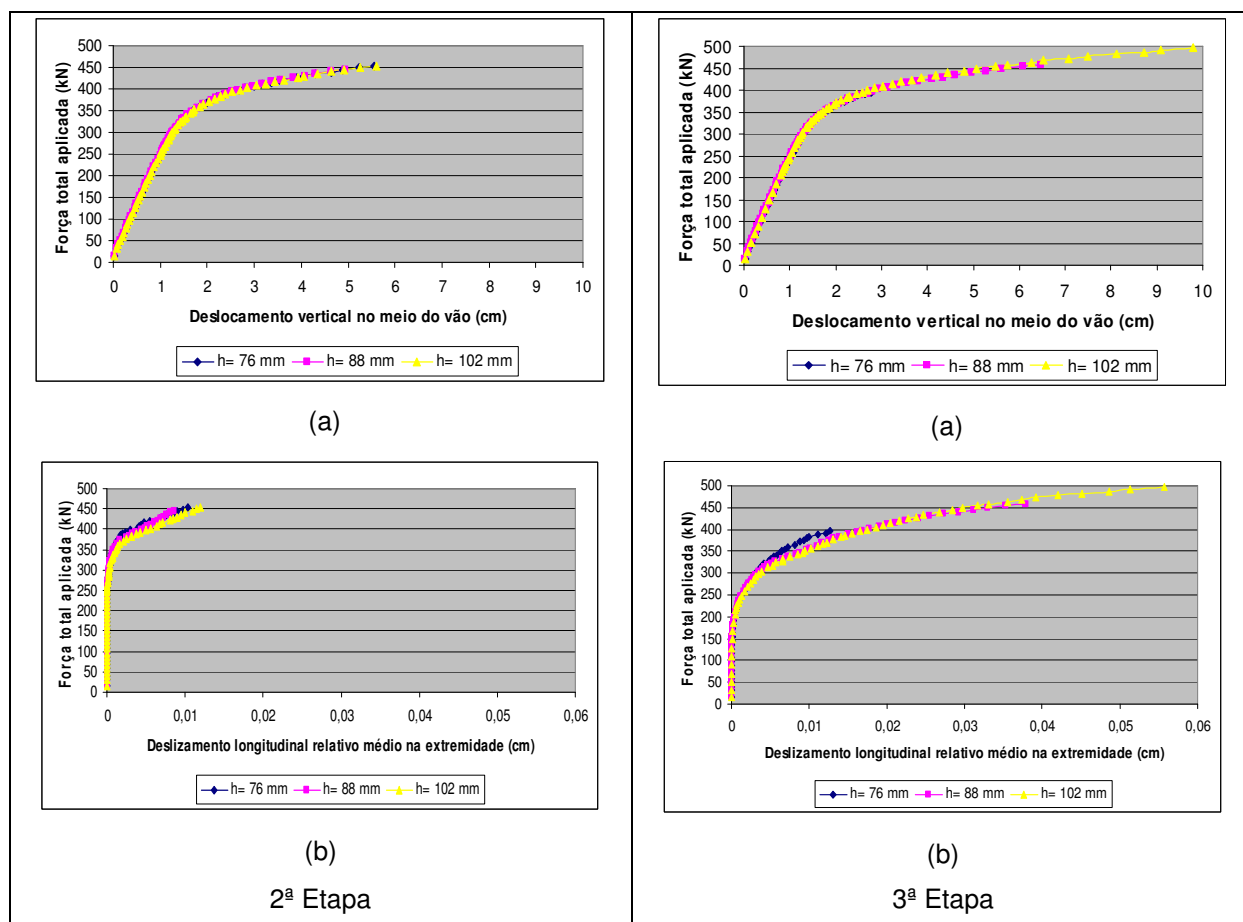


FIGURA 4.29 – GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS A3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM

Nota-se pelos resultados obtidos para os modelos A3, que no regime elástico, a quantidade de conectores não afeta as respostas das vigas mistas. No regime não linear nota-se que para 55% das simulações a redução do número de conectores implica na diminuição da força máxima, do deslocamento e deslizamento.

As respostas das vigas mistas U3 obtidas na terceira etapa de simulações, são confrontadas com as da segunda etapa, nos quadros 4.26, 4.27 e 4.28, para os conectores com diâmetros: 16 mm, 19 mm e 22 mm, respectivamente.

VIGAS U3 - CONECTORES COM Ø= 16 MM	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	27,45	20,33	27,45	20,33	27,45
Número de conectores	56	40	56	40	56	40
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	1,17	5,31	13,56	6,23	10,55	10,29
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0021	0,0602	0,0660	0,0852	0,0544	0,1802
Força vertical total aplicada (kN)	481,80	753,14	874,08	767,34	840,22	824,06

QUADRO 4.26 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS U3 - CONECTORES Ø=16 MM

VIGAS U3 - CONECTORES COM Ø= 19 MM	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	36,60	20,33	36,60	20,33	36,60
Número de conectores	56	28	56	28	56	28
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	5,47	6,26	21,22	9,58	13,76	9,24
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0126	0,1202	0,0432	0,2267	0,0320	0,2451
Força vertical total aplicada (kN)	777,36	768,36	956,56	811,26	880,94	807,02

QUADRO 4.27 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA AS VIGAS U3 - CONECTORES Ø=19 MM

VIGAS U3 - CONECTORES COM Ø= 22 MM	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa	2ªEtapa	3ªEtapa
Altura dos conectores (mm)	76	76	88	88	102	102
Espaçamento entre conectores (cm)	20,33	49,91	20,33	49,91	20,33	49,91
Número de conectores	56	22	56	22	56	22
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)	14,80	7,58	15,97	5,98	22,33	10,43
Deslizamento longitudinal relativo (laje-viga) médio na extremidade da viga (cm)	0,0205	0,1685	0,0227	0,0816	0,0307	0,1924
Força vertical total aplicada (kN)	898,58	840,24	904,98	767,72	966,24	827,06

QUADRO 4.28 – RESULTADOS COMPARATIVOS PARA A VIGA U3 - CONECTORES Ø=22 MM

As figuras a seguir mostram os gráficos comparativos das simulações realizadas na segunda e terceira etapas, apresentando a evolução dos deslocamentos verticais no meio do vão (a) e dos deslizamentos longitudinais relativos (entre laje e perfil metálico) médios na extremidade da viga mista (b), com a força total aplicada nas vigas mistas U3.

A figura 4.30 se refere aos conectores de cisalhamento com 16 mm de diâmetro das vigas U3.

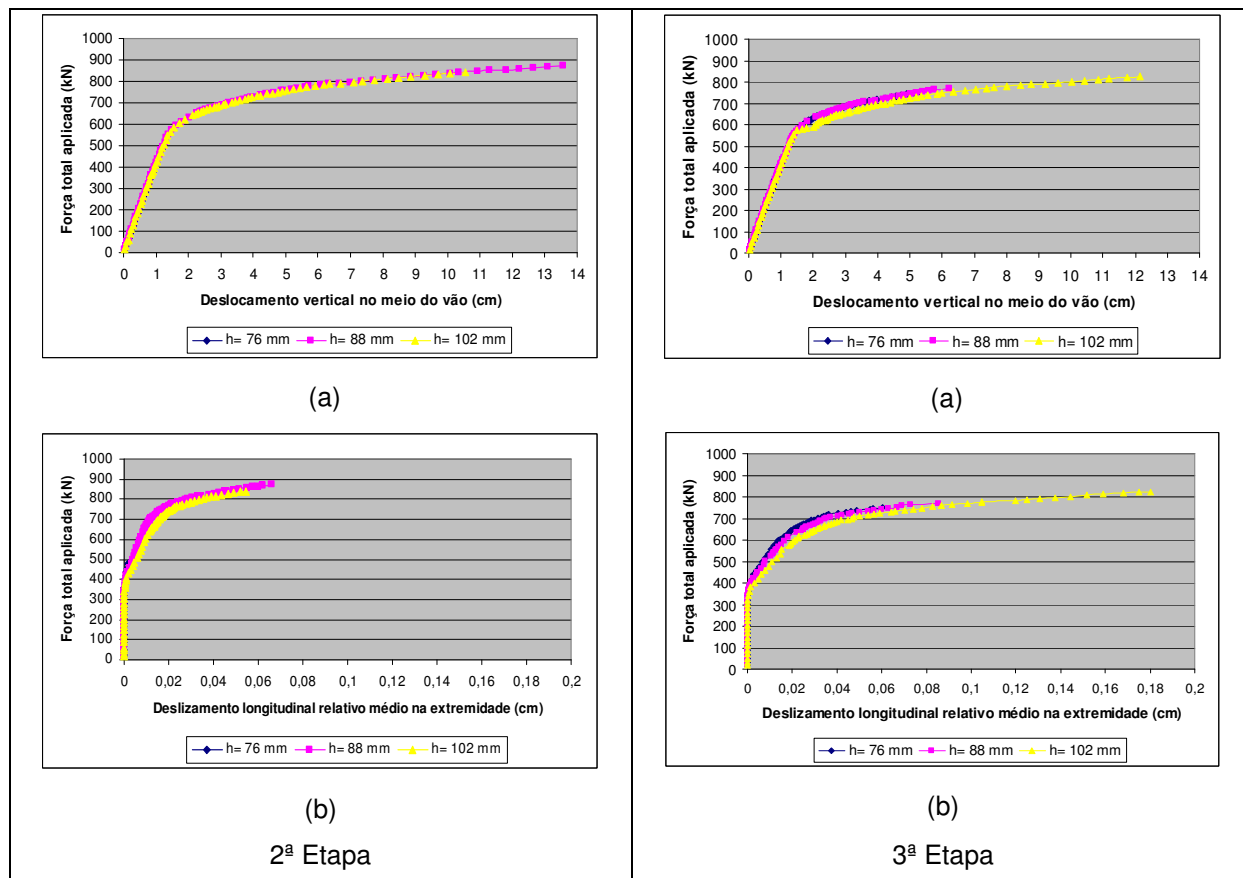


FIGURA 4.30 – GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=16$ MM

Na figura 4.31 estão os gráficos para os conectores de cisalhamento com 19mm de diâmetro para as vigas U3.

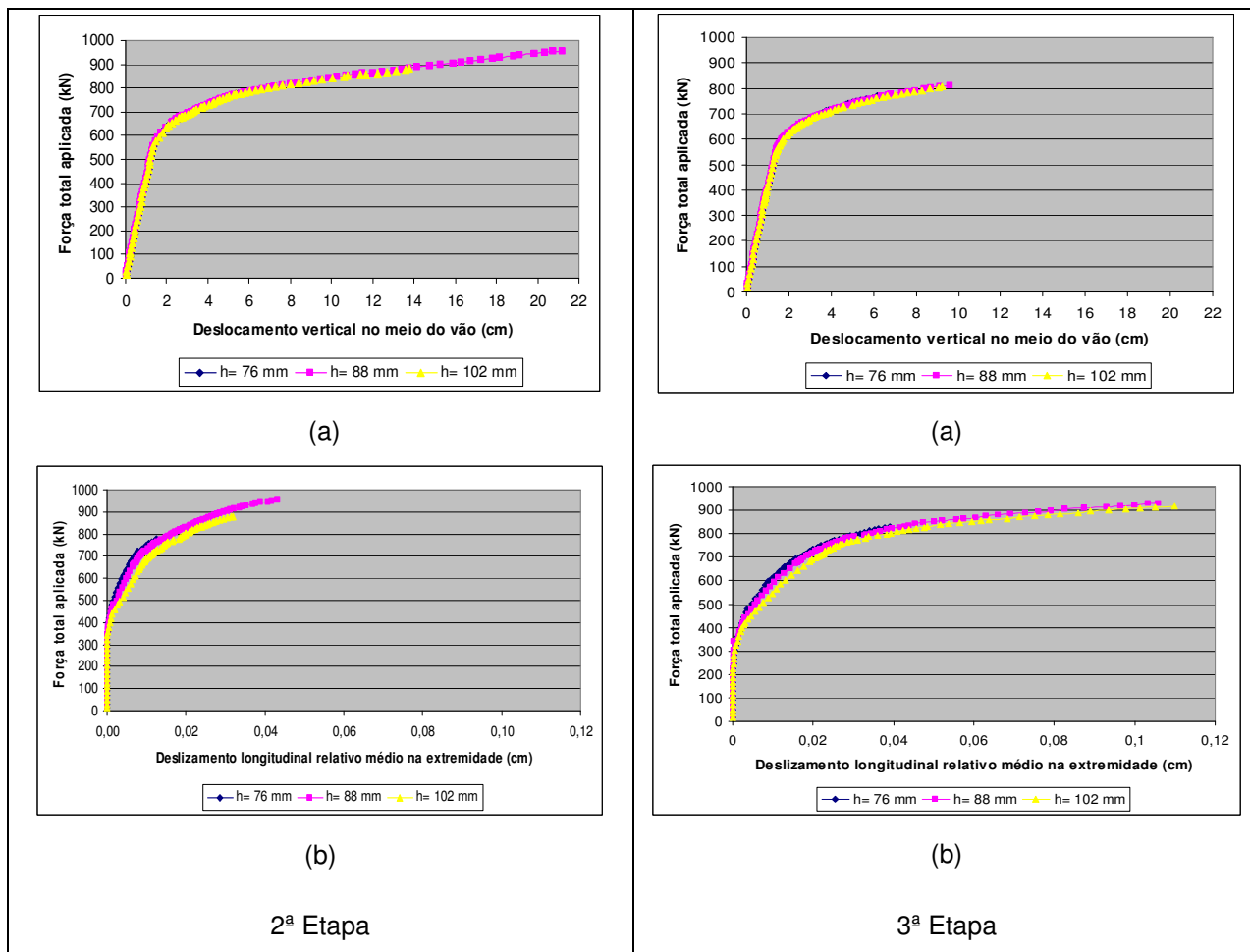


FIGURA 4.31– GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=19$ MM

A figura 4.32 apresenta os gráficos para os conectores de cisalhamento com 22 mm de diâmetro das vigas U3.

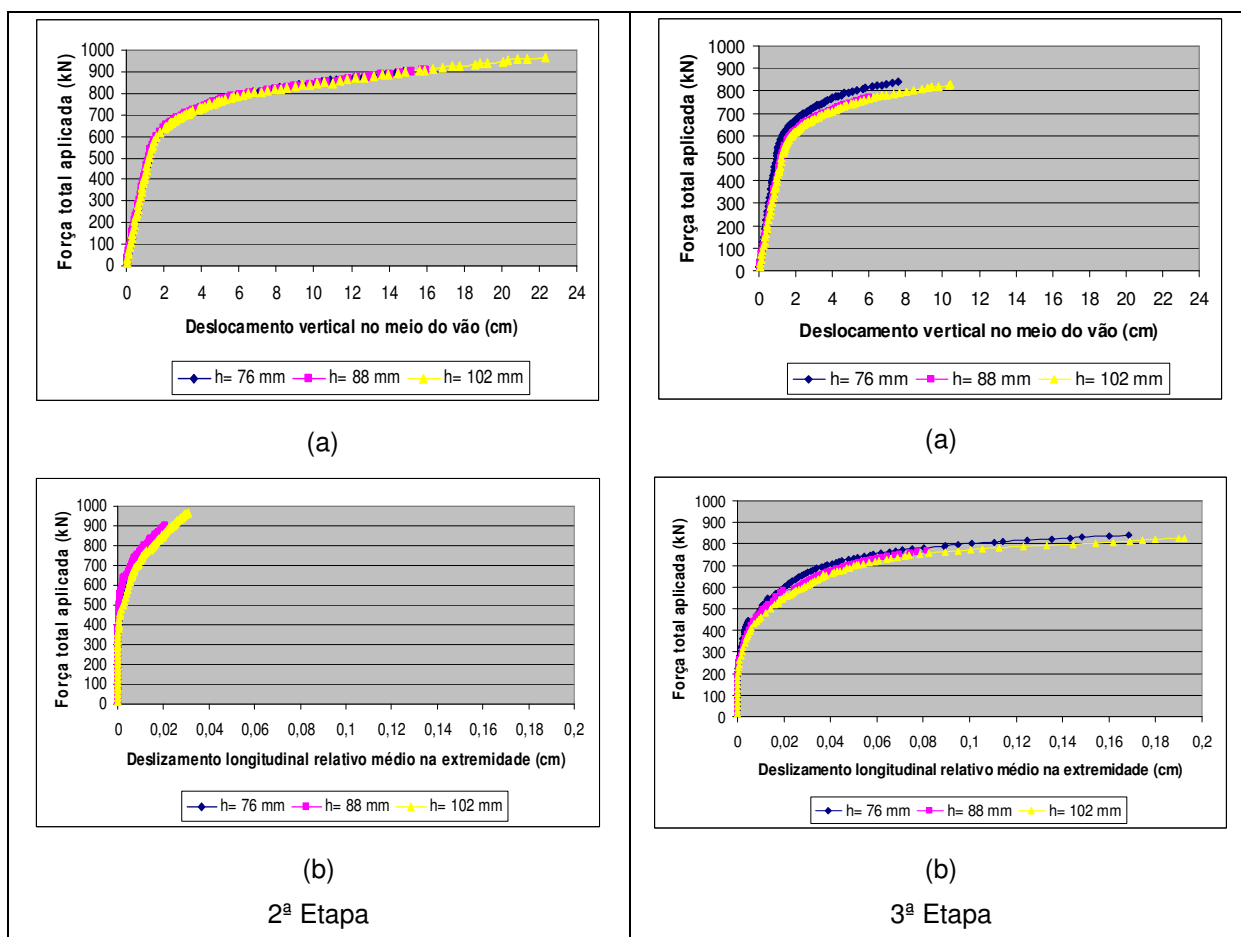


FIGURA 4.32 – GRÁFICOS COMPARATIVOS - FORÇA X DESLOCAMENTO (A) E FORÇA X DESLIZAMENTO (B) PARA VIGAS U3 COM CONECTORES $\varnothing=22$ MM

Pelos resultados obtidos para os modelos U3, percebe-se que no regime elástico, a quantidade de conectores não afeta as respostas das vigas mistas. Já no regime não linear, nota-se que com a redução do número de conectores o deslizamento aumenta, enquanto a força máxima diminui, exceto para os conectores com $\varnothing=16$ mm e $H=76$ mm, e o deslocamento reduz para 55% das vigas simuladas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi a análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto, levando-se em consideração a interface laje-viga, através de modelagem numérica. Especificamente, procurou-se verificar a influência do número, diâmetro e altura dos conectores de cisalhamento no comportamento das vigas, comparando os resultados obtidos com os previstos por norma e com os de outras referências encontradas na revisão bibliográfica.

Os modelos adotados foram extraídos da literatura e contemplaram vigas mistas simplesmente apoiadas, de alma compacta, com interação total, laje plana de concreto armado com armadura nas duas direções (transversal e longitudinal) e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça.

A modelagem numérica iniciou com a definição da geometria das vigas mistas. Depois, foram escolhidos os elementos finitos, disponíveis na biblioteca do programa ANSYS, para discretizar as peças. Em seguida, foram introduzidas, no aplicativo adotado, as propriedades e relações constitutivas dos materiais. Posteriormente, definiu-se a malha, os acoplamentos e vinculações entre os elementos, considerando a condição de simetria e conseqüente restrição dos graus de liberdade, bem como a vinculação no apoio da viga e os carregamentos: concentrado no centro do vão e uniformemente distribuído entre os apoios, ao longo do vão da viga mista.

A primeira etapa de simulações teve como objetivo a validação dos modelos desenvolvidos no presente trabalho, pela comparação com os resultados experimentais de Chapman e Balakrishnan (1964) e numéricos de Kotinda (2006). Dessa comparação, concluiu-se que a modelagem computacional desenvolvida representa de forma satisfatória o comportamento das vigas mistas.

Posteriormente, na segunda etapa de simulações, trabalhou-se com três valores de diâmetros e três valores de alturas para os conectores de cisalhamento, verificando-se que as respostas das vigas mistas no regime elástico foram

semelhantes, independentemente do diâmetro e altura dos conectores. No entanto, no regime não linear, verificou-se que os acréscimos de altura e diâmetro dos conectores, não necessariamente incrementam a carga limite e os deslizamentos na superfície de contato laje-viga. Ainda nesta etapa foi possível visualizar e analisar o estado de fissuração da laje de concreto devido a utilização do elemento SOLID 65.

Na terceira etapa de simulações, variaram-se a quantidade e espaçamento dos conectores de cisalhamento, mantendo-se, para os modelos A3 e U3, as mesmas propriedades de materiais e variações de diâmetros e alturas dos conectores adotadas na segunda etapa de testes. O objetivo desta etapa foi verificar a influência do número de conectores nos modelos, pela comparação dos resultados com os obtidos na segunda etapa de simulações, e a correspondência dos resultados numéricos com os normatizados. Dessa forma, o número de conectores e conseqüente espaçamento entre eles, foram definidos segundo as recomendações do Projeto de Revisão da NBR 8800 (texto base 2003), cujo procedimento de cálculo é apresentado nos anexos A e B, para os conectores com 19 mm diâmetro das vigas A3 e U3, respectivamente, englobando o cálculo do carregamento máximo dos modelos, valores de momento, cortante e flecha. O resumo dos resultados obtidos para os demais conectores são apresentados no anexo C. No procedimento de cálculo todos os coeficientes de majoração de cargas e minoração de resistências foram desconsiderados, uma vez que os mesmos não foram introduzidos nos modelos computacionais. Mesmo excluindo os coeficientes do procedimento de cálculo, percebeu-se que as recomendações normativas são, em geral, conservadoras, pois fornecem valores menores que os obtidos nas simulações.

Pela comparação dos resultados obtidos na segunda e terceira etapas, verificou-se que, no regime elástico, as respostas são semelhantes, independentemente da quantidade de conectores. No entanto, no regime não linear, não se verifica uma influência preponderante no comportamento das vigas A3 e no deslocamento vertical das vigas U3, com a redução do número de conectores. Já a força máxima das vigas U3 reduz com a diminuição do número de conectores, enquanto o deslizamento cresce.

Percebe-se ainda que, para os exemplos estudados, a solução de conector com altura inferior a quatro vezes seu diâmetro (portanto, não respeitando as exigências de norma), teve comportamento semelhante aos demais casos analisados. A análise de novos modelos poderá clarear a questão.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que o escopo deste trabalho foi o estudo do comportamento de vigas mistas simplesmente apoiadas, com laje de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, sugere-se para trabalhos futuros, novas modelagens utilizando:

- Vigas mistas contínuas e semicontínuas;
- Outros tipos de conectores de cisalhamento;
- Vigas mistas em situação de incêndio;
- Vigas mistas com diferentes tipos de laje, como as com fôrma de aço incorporada (*steel deck*);
- Vigas mistas com aberturas na alma;
- Vigas com e sem escoramento;
- Outros critérios de plastificação do concreto;
- Outros critérios de modelagem para analisar convergência e colapso dos modelos de vigas mistas.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de Revisão da NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios**. Rio de Janeiro, 2003, em andamento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios**. Rio de Janeiro, 1986.

ALVA, G.M.S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. Dissertação (Mestrado) 277p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ALVA, G. M. S.; MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto**. Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas. Vol. 7, n. 25, p. 51-84. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

AMADIO, C.; FRAGIACOMO, M. Effective width evaluation for steel–concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, p. 373-388, 2002.

AMADIO, C.; FEDRIGO, C.; FRAGIACOMO, M.; Macorini, L. Experimental evaluation of effective width in steel–concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 2, p. 199-220, 2004.

BASKAR, K.; SHANMUGAM, N. E. Steel-concrete composite plate girders subject to combined shear and bending. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, p. 531-557, 2003.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2004.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; Pinho, M. O. **Edifícios de múltiplos andares**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2004.

BIANCHI, F. R. **Análise do comportamento dos pilares mistos considerando a utilização de conectores de cisalhamento.** Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

BRADFORD, M. A.; KEMP, A. R. Buckling in continuous composite beams. **Composite Construction – Prog. Struct. Engng Mater**, v. 2, p. 169-178, 2000.

BULLO, S.; DI MARCO, R. A simplified method for assessing the ductile behaviour of stud connectors in composite beams with high strength concrete slab. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 9, p. 1387-1408, 2004.

CATAI, E. **Análise dos efeitos da retração e fluência em vigas mistas.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CHAPMAN, J. C. Composite construction in steel and concrete – the behaviour of composite beams. **The Structural Engineer**, v. 4, p. 115–125, 1964.

CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. **The Structural Engineer**, v. 42, p. 369–383, 1964.

CHUNG, K.F.; LAWSON, R.M. Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 57, p. 135–163, 2001.

CODEME ENGENHARIA S.A. Steel deck CE-75: noções de utilização e dimensionamento. Betim, 1997.

DALL’ASTA, A. Composite beams with weak shear connection. **International Journal of Solid and Structures**, v. 38, p. 5605-5624, 2001.

DALL’ASTA, A.; ZONA, A. Non-linear analysis of composite beams by a displacement approach. **Computers and Structures**, v. 80, p. 2217-2228, 2002.

DALL’ASTA, A.; ZONA, A^a. Three field mixed formulation for the non-linear of composite beams with deformable shear connection. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 40, p. 425-448, 2004.

DALL’ASTA, A.; ZONA, A^b. Slip locking in finite elements for composite beams with deformable shear connection. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 40, p. 1907-1930, 2004.

DALL'ASTA, A.; ZONA, A^c. Comparison and validation of displacement and mixed elements for the non-linear analysis of continuous composite beams. **Computers and Structures**, v. 82, p. 2117-2130, 2004.

DAVID, D. L. **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas**. Tese. 250 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DEKKER, N. W.; KEMP, A. R.; TRINCHERO, P. Factors influencing the strength of continuous composite beams in negative bending. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 34, p. 161-185, 1995.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço, preenchidos com concreto de alta resistência**. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DE NARDIN, S. **Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar**. Tese. 323 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DIAS, L. A. de M. **Aço e arquitetura: estudo de edificações no Brasil**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

DIAS, L. A. de M. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 4. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2002.

FABRIZZI, M. A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto**. Dissertação. 233 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FABBROCINO, G.; MANFREDI, G.; COSENZA, E. Modeling of continuous steel-concrete beams: computational aspects. **Computers and Structures**, v. 80, p. 2241-2251, 2002.

FAELLA, C.; MARTINELLO, E.; NIGRO, E. Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: "exact" analytical expression of stiffness matrix and applications. **Computers and Structures**, v. 80, p. 1001-1009, 2002.

FAHMY, E. H. Analysis of Composite Beams with Rectangular Web Openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 37, n. 1, p. 47-62, 1996

FATMI, R. E.; ZENZRI, H.. A numerical method for the exact elastic beam theory. Applications to homogeneous and composite beams. **International Journal of Solids and Structures**, v. 41, p. 2521–2537, 2004.

FIGUEIREDO, L. M. B. **Ligações mistas viga-pilar – Análise teórica e experimental**. Tese. 253p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GATTESCO, N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 52, p. 195-218, 1999.

JURKIEWIEZ, B.; BRAYMAND, S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 63, p. 135-144, 2007.

JURKIEWIEZ, B.; HOTTIER, J. M. Static behaviour of a steel-concrete composite beam with an innovative horizontal connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, p. 1286-1300, 2005.

KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. Dissertação. 143p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação. 116 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LI, T. Q.; CHOO, B. S.; NETHERCO, D. A. Determination of Rotation Capacity Requirements for Steel and Composite Beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 32, p. 303-332, 1995.

LIANG, Q. Q.; UY, B.; BRADFORD, M. A.; RONAGH, H. R. Ultimate strength of continuous composite beams in combined bending and shear. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, p. 1109-1128, 2004.

LOH^a, H.Y.; UY, B.; BRADFORD, M.A. The effects of partial shear connection in the hogging moment regions of composite beams Part I: Experimental study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, p. 897–919, 2004.

LOH^b, H.Y.; UY, B.; BRADFORD, M.A. The effects of partial shear connection in the hogging moment regions of composite beams Part II: Analytical study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, p. 921–962, 2004.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE JÚNIOR, J. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/dpress/v11n2/a06v11n2.pdf>>. Acesso em 04 Agosto 2007.

METÁLICA TÉCNICA. Cronologia do uso dos metais. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=107>. Acesso em 01 Março 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

OEHLERS, D.J. Splitting induced by shear connectors in composite beams. **Journal of Structural Engineering**, v.115, p.341-362, 1989.

OEHLERS, D.J.; COUGHLAN, C.G. The shear stiffness of stud shear connections in composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v.6, p.273-284, 1986.

OEHLERS, D.J.; NGUYEN, N. T.; AHMED, M.; BRADFORD, M. A. Partial interaction in composite steel and concrete beams with full shear connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v.41, p.235-248, 1997.

OEHLERS, D.J.; PARK, S.M. Shear connectors in composite beams with longitudinally cracked slabs. **Journal of Structural Engineering**, v.118, p.2004-2022, 1992.

OEHLERS, D.J.; SVED, G. Composite beams with limited-slip-capacity shear connectors. **Journal of Structural Engineering**, v.121, p.932-938, 1995.

OVEN, V. A.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J.; ABDUL WALI, A. A. An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction. **Computers & Structures**, v. 62, n. 3, p. 493-504, 1997.

PFEIL, W. **Concreto armado**. Vol. 1. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1985.

PFEIL, W.; PFEIL M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2000.

PEREIRA, L. A. **Aspectos fundamentais do método dos elementos finitos**. Disponível em: <http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM_introducao.pdf>. Acesso em 04 Agosto 2007.

PRESTES, J. A. **Projeto de estruturas mistas**. Publicação interna: Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba, 2005.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. da. **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2001.

RANZI, G.; BRADFORD, M. A. Analytical solutions for the time-dependent behaviour of composite beams with partial interaction. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, p. 3770-3793, 2006.

SAPKÁS, Ákos; KOLLÁR, László P. Lateral-torsional buckling of composite beams. **International Journal of Solids and Structures**, v. 39, p. 2939–2963, 2002.

SAPOUNTZAKIS, E. J.; KATSIKADELIS, J. T. A new model for the analysis of composite steel-concrete slab and beam structures with deformable connection. **Computational Mechanics**, v. 31, p. 340-349, 2003.

SEBASTIAN, W. M. Ductility requirements in connections of composite flexural structures. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 45, p. 235-251, 2003.

SERACINO, R.; LEE, C. T.; LIM, T. C.; LIM, J. Y. Partial interaction stresses in continuous composite beams under serviceability loads. **Journal of Constructional Steel Research**, v.60, p. 1525-1543, 2004.

SHIM, C. S.; LEE, P. G.; YOON, T. Y. Static behaviour os large stud shear connectors. **Engineering Structures**, v. 26, p. 1853-1860, 2004.

THORUS SCISOFT WEB PRESENCE. O método dos elementos finitos. Disponível em: <<http://www.thorus-scisoft.com.br/?q=pt/node/47>>. Acesso em 04 Agosto 2007.

TRISTÃO, G. A. **Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica**. Dissertação. 125p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

VASCONCELOS, A. C. de. **O concreto no Brasil**. Vol. 1. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

VASCONCELLOS, A. L. **Edifícios multiandares estruturados em aço**. Publicação interna: Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba, 2005.

VIRTUOSO, F; VIEIRA, R. Time dependent behaviour of continuous composite beams with flexible connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v.60, p. 451-463, 2004.

YAMAMOTO, W; OLIVEIRA NETO, L. **Automatização do dimensionamento de elementos estruturais de aço segundo a norma brasileira NBR 8800/1986**. Construção Metálica ed. 69, 2005.

ANEXOS

ANEXO A -	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800 PARA O MODELO A3 COM CONECTORES DE CISALHAMENTO DE 19 MM DE DIÂMETRO.....	132
ANEXO B -	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800 PARA O MODELO U3 COM CONECTORES DE CISALHAMENTO DE 19 MM DE DIÂMETRO.....	143
ANEXO C -	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800 PARA OS MODELOS A3 E U3 COM CONECTORES DE CISALHAMENTO DE 16 MM E 22 MM DE DIÂMETRO.....	154

ANEXO A – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800* PARA O MODELO A3 COM CONECTORES DE CISALHAMENTO DE 19 MM DE DIÂMETRO

1. Dados Gerais:

1.1. Dados da Viga:

Vão da Viga:

$$L_v = 5490\text{mm}$$

Perfil da Viga:

Altura do Perfil:

$$d = 305\text{mm}$$

Altura da Alma:

$$h = 269\text{mm}$$

Largura da Mesa:

$$b_f = 152\text{mm}$$

Espessura da Mesa Superior:

$$t_{fs} = 18\text{mm}$$

Espessura da Mesa Inferior:

$$t_{fi} = 18\text{mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_w = 10\text{mm}$$

Área do Perfil de Aço:

Área das Mesas:

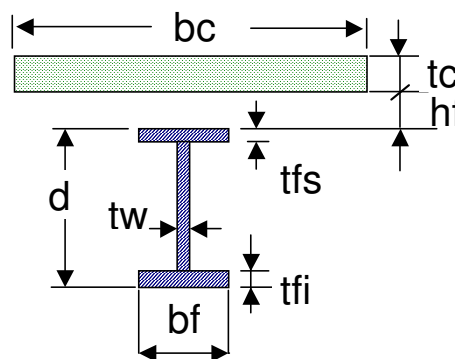
$$A_m = (t_{fs} + t_{fi}) \cdot b_f$$

$$A_m = 54.72\text{cm}^2$$

Área da Alma:

$$A_{al} = t_w \cdot h$$

$$A_{al} = 26.9\text{cm}^2$$



* Texto base 2003

Área Total do Perfil de Aço:

$$A_a = A_m + A_{al}$$

$$A_a = 81.62 \text{ cm}^2$$

Posição do Centro de Gravidade do Perfil (em relação à base):

$$y_{ia} = 152.5 \text{ mm}$$

Posição do Centro de Gravidade do Perfil (em relação ao topo):

$$y_{sa} = 152.5 \text{ mm}$$

Momento de Inércia do Perfil:

$$I_a = \frac{[t_w \cdot h^3 + b_f \cdot (d^3 - h^3)]}{12}$$

$$I_a = 12904.95 \text{ cm}^4$$

Módulo de Resistência Plástico do Perfil:

$$Z_x = \frac{[b_f \cdot (d^2 - h^2) + t_w \cdot h^2]}{4}$$

$$Z_x = 966.13 \text{ cm}^3$$

Distância do Topo do Perfil até a Face Inferior da Capa de Concreto:

$$h_f = 0 \text{ mm}$$

Aço do Perfil Metálico:

Limite de escoamento do Aço:

Mesas:

$$f_{ym} = 252 \text{ MPa}$$

Alma:

$$f_{ya} = 302 \text{ MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$f_y = \frac{f_{ym} \cdot A_m + f_{ya} \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$f_y = 268.48 \text{ MPa}$$

Limite de Resistência à Tração do Aço:

Mesas:

$$f_{wm} = 447\text{MPa}$$

Alma:

$$f_{wa} = 444\text{MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$f_w = \frac{f_{wm} \cdot A_m + f_{wa} \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$f_w = 446.01\text{ MPa}$$

Tensão Residual do Aço:

$$f_r = 115\text{MPa}$$

Módulo de Elasticidade do Aço:

Mesas:

$$E_m = 200640\text{MPa}$$

Alma:

$$E_a = 194560\text{MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$E = \frac{E_m \cdot A_m + E_a \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$E = 198636.18\text{MPa}$$

Peso específico do Aço:

$$\gamma_a = 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

1.2. Dados da Laje:

Espessura da Laje de Concreto:

$$t_c = 152\text{mm}$$

Largura da Laje de Concreto:

$$b_c = 1220\text{mm}$$

Resistência Característica à Compressão do Concreto:

$$f_{ck} = 18.40\text{MPa}$$

Módulo de Elasticidade do Concreto:

$$E_c = 26420\text{MPa}$$

Peso específico do Concreto:

$$\gamma_c = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Largura Efetiva da Laje de Concreto:

$$b = \min\left(b_c, \frac{L_v}{4}\right)$$

$$b = 1220 \text{ mm}$$

1.3. Dados dos Conectores de Cisalhamento:

Pino com Cabeça:

Diâmetro do Conector:

$$d_{cs} = \frac{3}{4} \text{ in}$$

Limite de ruptura do Aço do Conector de Cisalhamento:

$$f_{uc} = 514\text{MPa}$$

2. Propriedades Geométricas da Seção Mista:

2.1. Seção Mista - seção transformada:

Como não foram considerados os efeitos de retração, fluência e deformação lenta do concreto nas simulações numéricas, o módulo de elasticidade do concreto (E_c) não será dividido por 3 (três).

Relação Modular:

$$n = \frac{E}{E_c}$$

$$n = 7.52$$

Largura Equivalente de Aço:

$$b_e = \frac{b}{n}$$

$$b_e = 162.27 \text{ mm}$$

Área Equivalente de Aço:

$$A_e = b_e \cdot t_c$$

$$A_e = 246.65 \text{ cm}^2$$

Posição da Linha Neutra Elástica (em relação à face inferior da mesa inferior do perfil metálico):

$$y_{tr} = \frac{A_a \cdot y_{ia} + A_e \cdot \left(\frac{t_c}{2} + d \right)}{A_a + A_e}$$

$$y_{tr} = 324.19 \text{ mm}$$

Momento de Inércia na Seção Transformada:

$$I_{tr} = I_a + A_a \cdot (y_{tr} - y_{ia})^2 + \frac{b_e \cdot t_c^3}{12} + A_e \cdot \left(d + \frac{t_c}{2} - y_{tr} \right)^2$$

$$I_{tr} = 49673.51 \text{ cm}^4$$

3. Cargas e Esforços Atuantes:

Cargas Permanentes:

Peso Próprio do Vigamento:

$$q_{viga} = \gamma_a \cdot A_a$$

$$q_{viga} = 0.63 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Peso Próprio da Laje:

$$q_{laje} = \gamma_c \cdot t_c \cdot b_c$$

$$q_{laje} = 4.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Carregamento Externo:

Carga Concentrada no Meio do Vão:

$$q_{ce} = \blacksquare \quad \text{kN}$$

3.1 Esforços na Viga Mista:

Carga Permanente:

$$q_p = q_{viga} + q_{laje}$$

$$q_p = 5.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Carga Externa:

Carga Concentrada no Meio do Vão:

$$q_c = q_{ce} \quad \text{kN}$$

Momento Nominal na Viga Mista com Carga Concentrada:

$$M_{n_c} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_c \cdot \frac{L_v}{4} \quad (1)$$

$$M_{n_c} = \blacksquare \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Cortante Nominal Total na Viga Mista com Carga Concentrada:

$$V_{n_c} = q_p \cdot \frac{L_v}{2} + \frac{q_c}{2} \quad (2)$$

$$V_{n_c} = \blacksquare \text{ kN}$$

4. Verificação do Esforço Cortante:

Classificação da Seção da Viga:

$$S_v = \begin{cases} \text{"Seção Compacta"} & \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Seção Semicompacta"} & \text{if } 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5.7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Seção Esbelta"} & \text{if } \frac{h}{t_w} > 5.7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$S_v = \text{"Seção Compacta"}$$

Como a seção da viga é compacta considera-se a distribuição plástica de tensões.

Área da Alma:

$$A_w = h \cdot t_w$$

$$A_w = 26.90 \text{ cm}^2$$

Esbeltez da Alma:

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_w = 26.90$$

Limite Plástico de Esbeltez da Alma:

Como a viga não possui enrijecedores transversais:

$$k_v = 5$$

$$\lambda_p = 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 66.9$$

Cortante de Plastificação da Alma:

$$V_{pl} = f_y \cdot A_w$$

$$V_{pl} = 722.21 \text{ kN}$$

Resistência Nominal ao Cortante:

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 722.21 \text{ kN}$$

Verificação do Esforço Cortante - Carga Concentrada:

$$V_{n_c} \leq V_n$$

$$V_{n_c} \leq 722.21 \text{ kN} \quad (3)$$

5. Verificação da Viga Mista:

5.1 Resistência dos Conectores de Cisalhamento (CC):

Área do Pino com Cabeça:

$$A_{cs} = \frac{\pi \cdot d_{cs}^2}{4}$$

$$A_{cs} = 2.85 \text{ cm}^2$$

Resistência do Pino com Cabeça:

Ruína do Concreto:

$$q_{nc} = 0.5 \cdot A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}$$

$$q_{nc} = 99.36 \text{ kN}$$

Ruptura do Conector:

$$q_{na} = A_{cs} \cdot f_{uc}$$

$$q_{na} = 146.5 \text{ kN}$$

Resistência do Pino com Cabeça:

$$q_n = \min(q_{nc}, q_{na})$$

$$q_n = 99.36 \text{ kN}$$

5.2 Resistência Final da Viga Mista:

Carga de Esmagamento da Laje de Concreto:

$$C = f_{ck} \cdot b \cdot t_c$$

$$C = 3412.1 \text{ kN}$$

Carga de Escoamento do Perfil Metálico:

$$T = A_a \cdot f_y$$

$$T = 2191.32 \text{ kN}$$

Como $C > T$ a linha neutra plástica (LNP) está na laje de concreto:

Número de Conectores de Cisalhamento para Toda a Viga - Interação Completa:

Pino com Cabeça:

$$n_{cc} = \frac{2(A_a \cdot f_y)}{q_n}$$

$$n_{cc} = 44.11$$

$$n_{cc \text{ adotado}} = 46$$

Posição da Linha Neutra Plástica em Relação ao Topo da Laje:

$$a = \frac{(A_a \cdot f_y)}{f_{ck} \cdot b}$$

$$a = 97.62 \text{ mm}$$

Resistência Nominal à Flexão:

$$M_n = A_a \cdot f_y \cdot \left(y_{sa} + t_c + h_f - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = 560.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Verificação do Momento Fletor - Carga Concentrada:

$$M_{n_c} \leq M_n$$

$$M_{n_c} \leq 560.30 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

6 - Verificação dos Deslocamentos:

Flecha Total da Viga Mista - Carga Concentrada:

$$\Delta_{vm_c} = \frac{5 \cdot q_p \cdot L_v^4}{384 \cdot E \cdot I_{tr}} + q_c \cdot \frac{L_v^3}{48 \cdot E \cdot I_{tr}}$$

$$\Delta_{vm_c} = \blacksquare \text{ mm}$$

Verificação da Flecha - Carga Concentrada:

$$\Delta_{vm_c} \leq \frac{L_v}{250} \quad (5)$$

A flecha, além de ser verificada por análise elástica, não está sendo limitada nas simulações numéricas, dessa forma, a equação (5) não será utilizada na determinação da carga externa máxima suportada pela viga mista.

7 - Carga Externa Máxima Suportada pela Viga Mista:

Viga Mista com Carga Concentrada:

Das equações 1 e 4 se obtém:

$$M_{n_c} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_c \cdot \frac{L_v}{4}$$

$$M_{n_c} = 560.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$q_c = \left(M_{n_c} - q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} \right) \cdot \frac{4}{L_v}$$

$$q_c = 394.29 \text{ kN}$$

7.1 - Verificações para Viga Mista com Carga Concentrada:

Momento Nominal Total na Viga Mista:

$$M_{n_c} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_c \cdot \frac{L_v}{4}$$

$$M_{n_c} = 560.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Verificação do Momento Fletor:

$$\text{Ver}_M(M_{n_c}, M_n) = "560.3 \text{ kNm} = 560.3 \text{ kNm} - \text{OK}"$$

Cortante Nominal Total na Viga Mista:

$$V_{n_c} = q_p \cdot \frac{L_v}{2} + \frac{q_c}{2}$$

$$V_{n_c} = 211.09 \text{ kN}$$

Verificação do Cortante:

$$\text{Ver}(V_{n_c}, V_n) = "211.09 \text{ kN} < 722.21 \text{ kN} - \text{OK}"$$

Flecha Total da Viga Mista (análise elástica):

$$\Delta_{vm_c} = \frac{5 \cdot q_p \cdot L_v^4}{384 \cdot E \cdot I_{tr}} + q_c \cdot \frac{L_v^3}{48 \cdot E \cdot I_{tr}}$$

$$\Delta_{vm_c} = 14.38 \text{ mm}$$

Verificação da Flecha:

$$\text{Ver}_d \left(\Delta_{vm_c}, \frac{L_v}{250} \right) = "14.38 \text{ mm} < 21.96 \text{ mm} - \text{OK}"$$

8 - Distribuição dos Conectores de Cisalhamento:

Espaçamento Mínimo ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_{c_min} = 6 \cdot d_{cs}$$

$$e_{c_min} = 114 \cdot \text{mm}$$

Espaçamento Máximo ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_{c_max} = 8 \cdot t_c$$

$$e_{c_max} = 1216 \text{ mm}$$

Espaçamento Adotado ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_c = 249.5 \text{ mm}$$

Diâmetro Máximo do Conector (para que possa ser instalado em qualquer posição da mesa):

$$d_{cs_max} = 2.5 \cdot t_{fs}$$

$$d_{cs_max} = 45 \text{ mm}$$

Comprimento Mínimo do Conector de Cisalhamento:

$$L_{cs_min} = 4 \cdot d_{cs}$$

$$L_{cs_min} = 76 \cdot \text{mm}$$

Comprimento Máximo do Conector de Cisalhamento:

$$L_{cs_max} = t_c + h_f - 10\text{mm}$$

$$L_{cs_max} = 142\text{mm}$$

ANEXO B – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800* PARA O MODELO U3 COM CONECTORES DE CISALHAMENTO DE 19 MM DE DIÂMETRO

1. Dados Gerais:

1.1. Dados da Viga:

Vão da Viga:

$$L_V = 5490\text{mm}$$

Perfil da Viga:

Altura do Perfil:

$$d = 305\text{mm}$$

Altura da Alma:

$$h = 269\text{mm}$$

Largura da Mesa:

$$b_f = 152\text{mm}$$

Espessura da Mesa Superior:

$$t_{fs} = 18\text{mm}$$

Espessura da Mesa Inferior:

$$t_{fi} = 18\text{mm}$$

Espessura da Alma:

$$t_w = 10\text{mm}$$

Área do Perfil de Aço:

Área das Mesas:

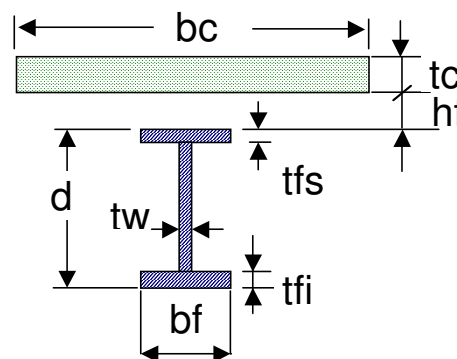
$$A_m = (t_{fs} + t_{fi}) \cdot b_f$$

$$A_m = 54.72\text{cm}^2$$

Área da Alma:

$$A_{al} = t_w \cdot h$$

$$A_{al} = 26.9\text{cm}^2$$



* Texto base 2003

Área Total do Perfil de Aço:

$$A_a = A_m + A_{al}$$

$$A_a = 81.62 \text{ cm}^2$$

Posição do Centro de Gravidade do Perfil (em relação à base):

$$y_{ia} = 152.5 \text{ mm}$$

Posição do Centro de Gravidade do Perfil (em relação ao topo):

$$y_{sa} = 152.5 \text{ mm}$$

Momento de Inércia do Perfil:

$$I_a = \frac{[t_w \cdot h^3 + b_f \cdot (d^3 - h^3)]}{12}$$

$$I_a = 12904.95 \text{ cm}^4$$

Módulo de Resistência Plástico do Perfil:

$$Z_x = \frac{[b_f \cdot (d^2 - h^2) + t_w \cdot h^2]}{4}$$

$$Z_x = 966.13 \text{ cm}^3$$

Distância do Topo do Perfil até a Face Inferior da Capa de Concreto:

$$h_f = 0 \text{ mm}$$

Aço do Perfil Metálico:

Limite de escoamento do Aço:

Mesas:

$$f_{ym} = 232 \text{ MPa}$$

Alma:

$$f_{ya} = 230 \text{ MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$f_y = \frac{f_{ym} \cdot A_m + f_{ya} \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$f_y = 231.34 \text{ MPa}$$

Limite de Resistência à Tração do Aço:

Mesas:

$$f_{wm} = 420\text{MPa}$$

Alma:

$$f_{wa} = 415\text{MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$f_w = \frac{f_{wm} \cdot A_m + f_{wa} \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$f_w = 418.35\text{MPa}$$

Tensão Residual do Aço:

$$f_r = 115\text{MPa}$$

Módulo de Elasticidade do Aço:

Mesas:

$$E_m = 199120\text{MPa}$$

Alma:

$$E_a = 200640\text{MPa}$$

Proporcional às Áreas das Mesas e Alma:

$$E = \frac{E_m \cdot A_m + E_a \cdot A_{al}}{A_a}$$

$$E = 199620.96\text{MPa}$$

Peso específico do Aço:

$$\gamma_a = 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

1.2. Dados da Laje:

Espessura da Laje de Concreto:

$$t_c = 152\text{mm}$$

Largura da Laje de Concreto:

$$b_c = 1220\text{mm}$$

Resistência Característica à Compressão do Concreto:

$$f_{ck} = 29.90\text{MPa}$$

Módulo de Elasticidade do Concreto:

$$E_c = 30550\text{MPa}$$

Peso específico do Concreto:

$$\gamma_c = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Largura Efetiva da Laje de Concreto:

$$b = \min\left(b_c, \frac{L_v}{4}\right)$$

$$b = 1220 \text{ mm}$$

1.3. Dados dos Conectores de Cisalhamento:

Pino com Cabeça:

Diâmetro do Conector:

$$d_{cs} = \frac{3}{4} \text{ in}$$

Limite de ruptura do Aço do Conector de Cisalhamento:

$$f_{uc} = 514\text{MPa}$$

2. Propriedades Geométricas da Seção Mista:

2.1. Seção Mista - seção transformada:

Como não foram considerados os efeitos de retração, fluência e deformação lenta do concreto nas simulações numéricas, o módulo de elasticidade do concreto (E_c) não será dividido por 3 (três).

Relação Modular:

$$n = \frac{E}{E_c}$$

$$n = 6.53$$

Largura Equivalente de Aço:

$$b_e = \frac{b}{n}$$

$$b_e = 186.71 \text{ mm}$$

Área Equivalente de Aço:

$$A_e = b_e \cdot t_c$$

$$A_e = 283.8 \text{ cm}^2$$

Posição da Linha Neutra Elástica (em relação à face inferior da mesa inferior do perfil metálico):

$$y_{tr} = \frac{A_a \cdot y_{ia} + A_e \cdot \left(\frac{t_c}{2} + d \right)}{A_a + A_e}$$

$$y_{tr} = 329.96 \text{ mm}$$

Momento de Inércia na Seção Transformada:

$$I_{tr} = I_a + A_a \cdot (y_{tr} - y_{ia})^2 + \frac{b_e \cdot t_c^3}{12} + A_e \cdot \left(d + \frac{t_c}{2} - y_{tr} \right)^2$$

$$I_{tr} = 51465.96 \text{ cm}^4$$

3. Cargas e Esforços Atuantes:

Cargas Permanentes:

Peso Próprio do Vigamento:

$$q_{viga} = \gamma_a \cdot A_a$$

$$q_{viga} = 0.63 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Peso Próprio da Laje:

$$q_{laje} = \gamma_c \cdot t_c \cdot b_c$$

$$q_{laje} = 4.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Carregamento Externo:

Carga Distribuída Entre os Apoios:

$$q_{de} = \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.1 Esforços na Viga Mista:

Carga Permanente:

$$q_p = q_{viga} + q_{laje}$$

$$q_p = 5.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Carga Externa:

Carga Distribuída Entre os Apoios:

$$q_d = q_{de} \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Momento Nominal na Viga Mista com Carga Distribuída:

$$M_{n_d} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_d \cdot \frac{L_v^2}{8} \quad (1)$$

$$M_{n_d} = \quad \text{kN} \cdot \text{m}$$

Cortante Nominal Total na Viga Mista com Carga Distribuída:

$$V_{n_d} = q_p \cdot \frac{L_v}{2} + q_d \cdot \frac{L_v}{2} \quad (2)$$

$$V_{n_d} = \quad \text{kN}$$

4. Verificação do Esforço Cortante:

Classificação da Seção da Viga:

$$S_V = \begin{cases} \text{"Seção Compacta"} & \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Seção Semicompacta"} & \text{if } 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Seção Esbelta"} & \text{if } \frac{h}{t_w} > 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$S_V = \text{"Seção Compacta"}$$

Como a seção da viga é compacta considera-se a distribuição plástica de tensões.

Área da Alma:

$$A_w = h \cdot t_w$$

$$A_w = 26.90 \text{ cm}^2$$

Esbeltez da Alma:

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_w = 26.90$$

Limite Plástico de Esbeltez da Alma:

Como a viga não possui enrijecedores transversais:

$$k_v = 5$$

$$\lambda_p = 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 72.25$$

Cortante de Plastificação da Alma:

$$V_{pl} = f_y \cdot A_w$$

$$V_{pl} = 622.31 \text{ kN}$$

Resistência Nominal ao Cortante:

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 622.31 \text{ kN}$$

Verificação do Esforço Cortante - Carga Distribuída:

$$V_{n_d} \leq V_n$$

$$V_{n_d} \leq 622.31 \text{ kN} \quad (3)$$

5. Verificação da Viga Mista:

5.1 Resistência dos Conectores de Cisalhamento (CC):

Área do Pino com Cabeça:

$$A_{cs} = \frac{\pi \cdot d_{cs}^2}{4}$$

$$A_{cs} = 2.85 \text{ cm}^2$$

Resistência do Pino com Cabeça:

Ruína do Concreto:

$$q_{nc} = 0.5 \cdot A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}$$

$$q_{nc} = 136.2 \text{ kN}$$

Ruptura do Conector:

$$q_{na} = A_{cs} \cdot f_{uc}$$

$$q_{na} = 146.5 \text{ kN}$$

Resistência do Pino com Cabeça:

$$q_n = \min(q_{nc}, q_{na})$$

$$q_n = 136.2 \text{ kN}$$

5.2 Resistência Final da Viga Mista:

Carga de Esmagamento da Laje de Concreto:

$$C = f_{ck} \cdot b \cdot t_c$$

$$C = 5544.66 \text{ kN}$$

Carga de Escoamento do Perfil Metálico:

$$T = A_a \cdot f_y$$

$$T = 1888.2 \text{ kN}$$

Como $C > T$ a linha neutra plástica (LNP) está na laje de concreto:

Número de Conectores de Cisalhamento para Toda a Viga - Interação Completa:

Pino com Cabeça:

$$n_{cc} = \frac{2(A_a \cdot f_y)}{q_n}$$

$$n_{cc} = 27.73$$

$$n_{cc \text{ adotado}} = 28$$

Posição da Linha Neutra Plástica em Relação ao Topo da Laje:

$$a = \frac{(A_a \cdot f_y)}{f_{ck} \cdot b}$$

$$a = 51.76 \text{ mm}$$

Resistência Nominal à Flexão:

$$M_n = A_a \cdot f_y \cdot \left(y_{sa} + t_c + h_f - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = 526.09 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Verificação do Momento Fletor - Carga Distribuída:

$$M_{n_d} \leq M_n$$

$$M_{n_d} \leq 526.09 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

6 - Verificação dos Deslocamentos:

Flecha Total da Viga Mista - Carga Distribuída:

$$\Delta_{vm_d} = \frac{5 \cdot M_{n_d} \cdot L_v^2}{48 \cdot E \cdot I_{tr}}$$

$$\Delta_{vm_d} = \blacksquare \text{ mm}$$

Verificação da Flecha - Carga Distribuída:

$$\Delta_{vm_d} \leq \frac{L_v}{250}$$

A flecha, além de ser verificada por análise elástica, não está sendo limitada nas simulações numéricas, dessa forma, a equação (5) não será utilizada na determinação da carga externa máxima suportada pela viga mista.

7 - Carga Externa Máxima Suportada pela Viga Mista:

Viga Mista com Carga Distribuída:

As equações 1 e 4 resultam:

$$M_{n_d} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_d \cdot \frac{L_v^2}{8}$$

$$M_{n_d} = 526.09 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$q_d = \left(M_{n_d} \cdot \frac{8}{L_v^2} \right) - q_p$$

$$q_d = 134.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ao multiplicar a carga distribuída (q_d) pelo comprimento do vão da viga (L_v), obtém-se a carga total aplicada correspondente a uma carga concentrada:

$$q_t = q_d \cdot L_v$$

$$q_t = 738.73 \text{ kN}$$

7.1 - Verificações para Viga Mista com Carga Distribuída:

Momento Nominal Total na Viga Mista:

$$M_{n_d} = q_p \cdot \frac{L_v^2}{8} + q_d \cdot \frac{L_v^2}{8}$$

$$M_{n_d} = 526.09 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Verificação do Momento Fletor:

$$\text{Ver}_M(M_{n_d}, M_n) = "526.09 \text{ kNm} = 526.09 \text{ kNm} - \text{OK}"$$

Cortante Nominal Total na Viga Mista:

$$V_{n_d} = q_p \cdot \frac{L_v}{2} + q_d \cdot \frac{L_v}{2}$$

$$V_{n_d} = 383.31 \text{ kN}$$

Verificação do Cortante:

$$\text{Ver}(V_{n_d}, V_n) = "383.31 \text{ kN} < 622.31 \text{ kN} - \text{OK}"$$

Flecha Total da Viga Mista (análise elástica):

$$\Delta_{vm_c} = \frac{5 \cdot M_{n_d} \cdot L_v^2}{48 \cdot E \cdot I_{tr}}$$

$$\Delta_{vm_c} = 16.08 \text{ mm}$$

Verificação da Flecha:

$$\text{Ver}_d\left(\Delta_{vm_c}, \frac{L_v}{250}\right) = "16.08 \text{ mm} < 21.96 \text{ mm} - \text{OK}"$$

8 - Distribuição dos Conectores de Cisalhamento:

Espaçamento Mínimo ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_{c_min} = 6 \cdot d_{cs}$$

$$e_{c_min} = 114 \cdot \text{mm}$$

Espaçamento Máximo ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_{c_max} = 8 \cdot t_c$$

$$e_{c_max} = 1216 \text{ mm}$$

Espaçamento Adotado ente Linhas de Centro de Conectores:

$$e_c = 366 \text{ mm}$$

Diâmetro Máximo do Conector (para que possa ser instalado em qualquer posição da mesa):

$$d_{cs_max} = 2.5 \cdot t_{fs}$$

$$d_{cs_max} = 45 \text{ mm}$$

Comprimento Mínimo do Conector de Cisalhamento:

$$L_{cs_min} = 4 \cdot d_{cs}$$

$$L_{cs_min} = 76 \cdot \text{mm}$$

Comprimento Máximo do Conector de Cisalhamento:

$$L_{cs_max} = t_c + h_f - 10 \text{ mm}$$

$$L_{cs_max} = 142 \text{ mm}$$

ANEXO C - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SEGUNDO O PROJETO DE REVISÃO DA NBR 8800 PARA OS MODELOS A3 E U3 COM CONECTORES DE CISCALHAMENTO DE 16 MM E 22 MM DE DIÂMETRO

VIGA A3		Ø=16mm	Ø=22mm
Número de conectores		64	34
Altura dos conectores (mm)	Mínima	64	88
	Máxima	142	142
	Adotada	76 / 88 / 102	76 / 88 / 102
Espaçamento entre conectores (cm)	Mínimo	9,60	13,20
	Máximo	121,60	121,60
	Adotado	18,30	32,29
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)		14,39	14,39
Força vertical máxima (kN)		394,29	394,29
Momento nominal total (kNm)		560,30	560,30
Cortante nominal total (kN)		211,09	211,08

VIGA U3		Ø=16mm	Ø=22mm
Número de conectores		40	22
Altura dos conectores (mm)	Mínima	64	88
	Máxima	142	142
	Adotada	76 / 88 / 102	76 / 88 / 102
Espaçamento entre conectores (cm)	Mínimo	9,60	13,20
	Máximo	121,60	121,60
	Adotado	27,45	49,91
Deslocamento vertical no meio do vão (cm)		16,16	16,16
Força vertical total aplicada (kN)		738,73	738,73
Momento nominal total (kNm)		525,39	525,39
Cortante nominal total (kN)		385,71	385,71