



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação numérica do comportamento de vigas mistas aço-betão do tipo "Slim Floor"

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Francisco Mateus Carvalho Filipe

Orientador

Professor Doutor Rui António Duarte Simões

Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Coimbra, Janeiro, 2014

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer em especial aos meus orientadores: Professor Doutor Rui António Duarte Simões e Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva por toda a disponibilidade, tempo, dedicação, sugestões e por todo o apoio fornecido que possibilitou a realização desta dissertação.

Um especial obrigado ao Miguel Serra, por despende do seu tempo para fornecer ajuda e conhecimentos relativos ao complexo programa *Abaqus*.

Um especial obrigado à Francisca Antunes, que mesmo à distância, conseguiu fornecer uma ajuda fundamental para a realização desta dissertação.

Gostaria também de agradecer ao Emanuel Marques, Diogo el Santo, Marina Figueiró, Telmo Paula, Luís Girão e João Santos por todo o tempo passado juntos, companheirismo e incentivo durante todos os dias de trabalho nesta dissertação.

Gostaria de agradecer também a todos os que contribuíram de alguma forma para a realização deste documento.

Resumo

O uso de soluções estruturais com vigas mistas do tipo “*slim floor*” tem vindo a ser frequente em edifícios metálicos e mistos, pois conduzem a soluções mais leves e, portanto a um melhor aproveitamento da altura útil entre os pavimentos, quando comparadas com as soluções convencionais. Esta solução estrutural ainda não é contemplada diretamente no Eurocódigo 4 (CEN, 2004b), apesar de em alguns países (ex. Reino Unido) já existirem normas que permitem o enquadramento legal destas soluções.

A presente tese pretende levar a cabo um estudo sobre o comportamento, em termos de resistência e rigidez, de várias soluções estruturais de vigas mistas do tipo “*slim floor*”. Tendo em conta que foram considerados diferentes tipos de vigas de aço (perfis assimétricos H, T e perfis fechados), que dependerão do espectro de alturas dos pavimentos contemplados, podendo estes incorporar conectores ou outro tipo de conexão. É importante referir que na constituição de alguns pavimentos será incluída uma chapa perfilada colaborante, de forma a aprimorar os resultados.

A análise das diferentes tipologias de vigas mistas do tipo “*slim floor*” será realizada essencialmente por via numérica, recorrendo ao programa de cálculo “*Abaqus®*”. O referido programa permite efetuar um cálculo com base no método dos elementos finitos. Desta forma será estudada a influência de vários parâmetros, com especial destaque à variação da largura efetiva do banzo de betão. Em geral, as vigas mistas são modeladas com conexão total mas, apesar disso, foi também avaliada a possibilidade de os modelos numéricos desenvolvidos serem usados para a modelação de vigas mistas em conexão através de conectores.

Os resultados obtidos no âmbito da presente tese servirão não só de base a ensaios experimentais a realizar no futuro, como também abrirão portas a novos estudos sobre a influência de diversos parâmetros importantes neste domínio e de alargar o âmbito de estudo em termos de diferentes geometrias de vigas mistas.

Abstract

Through the ages, “*slim floor*” composite beam types begin to be used very often in mixed metal buildings as they lead to lighter solutions and improved utilization of the useful height between decks when compared with conventional solutions. Although some countries have already their own standards (eg. United Kingdom), this solution as not yet been addressed in Eurocode 4 (CEN, 2004b).

This thesis intends to undertake a study on the behavior, in terms of strength and stiffness of various structural solutions for composite beams such as “*slim floor*”, considering different types of steel beams (asymmetric profiles H,T and closed sections) which will depend on the height of the floors range considered, and these may incorporate connectors or any other type of connection. In the constitution of some floors, the cooperating profiled sheet will be included.

The analysis of different types of composite beams such as “*slim floor*” will be held mostly numerically, using the calculus program "Abaqus®". This software allows the utilization of the finite element method. The influence of various parameters will be studied, with particular emphasis in the variation of the effective width of the concrete flange. It will also be made a slightly comparison between numerical models using full connection and partial connection.

The results obtained in the framework of this thesis will serve not only as a basis for experimental trials to be conducted in the future, but will also open doors to new studies on the influence of several parameters and different geometries of composite beams.

Índice

1º	CAPÍTULO - INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivos da tese	3
1.3	Organização da tese	4
2º	CAPÍTULO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Enquadramento histórico	5
2.2	Principais características dos pavimentos mistos do tipo " <i>Slim Floor</i> "	9
3º	CAPÍTULO - TIPOLOGIAS E MODELAÇÃO	12
3.1	Largura efetiva	12
3.2	Tipologias de Vigas a Estudar.....	14
3.3	Método dos Elementos Finitos.....	16
3.4	Programa Abaqus®.....	18
3.5	Materiais usados.....	18
3.6	Metodologias da modelação - Viga SFB.....	19
3.6.1	Construção do modelo.....	19
3.6.2	Calibração do modelo.....	22
3.6.3	Viga ITB - <i>Integrated Floor Beam</i>	25
3.6.4	Viga ITB - <i>Inverted T Beam</i>	26
3.6.5	Viga HB - <i>HatBeam</i>	30
3.7	Vigas em conexão parcial	33
3.7.1	Viga ITB.....	33
3.7.2	Viga HB	35
4º	CAPÍTULO - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	37
4.1	Introdução aos resultados	37
4.2	Avaliação da resistência dos diferentes pavimentos de 30 centímetros	39
4.2.1	SFB - <i>Slimflor Beam</i>	39
4.2.2	IFB - <i>Integrated Floor Beam</i>	44
4.2.3	ITB - <i>Inverted T beam</i>	48
4.2.4	HB - <i>Hat beam</i>	53
4.3	Síntese.....	59
5º	CAPÍTULO - CONCLUSÕES	61
	BIBLIOGRAFIA.....	63
	ANEXO A.....	1
	SFB - <i>SlimFlor Beam</i>	1
	IFB - <i>Integrated Floor Beam</i>	2
	ITB - <i>Inverted T Beam</i>	4
	HB - <i>Hat Beam</i>	6

Índice de Figuras

FIGURA 1.1- VIGA MISTA CONVENCIONAL.....	FIGURA 1.2 - VIGA MISTA TIPO "SLIM FLOOR".2
FIGURA 2.1 - PAVIMENTO JACK-ARCH.	5
FIGURA 2.2 - PAVIMENTO FILLER JOIST.....	5
FIGURA 2.3 - VIGA MISTA "SLIM FLOOR" COM DENOMINADA "HATBEAM" (SCHLEICH, 2000).....	6
FIGURA 2.4 - VIGA MISTA <i>DELTABEAM</i>	7
FIGURA 2.5 - VIGA <i>SLIMFLOR BEAM</i>	7
FIGURA 2.6 - <i>HATBEAM</i> COM CONECTORES NO TOPO.	10
FIGURA 2.7 - PORMENOR DO PAVIMENTO "SLIM FLOOR" (TS@, 2010).	10
FIGURA 2.8 - PORMENOR DAS ARMADURAS NUMA VIGA SEM ABERTURAS (JURADO, 2008).	11
FIGURA 2.9 - ARMADURAS QUE ATRAVESSAM A <i>DELTABEAM</i> (HAUF, 1996).....	11
FIGURA 3.1 - VARIAÇÃO DE TENSÕES LONGITUDINAIS NO BANZO DE BETÃO DEVIDO AO EFEITO <i>SHEAR LAG</i> (CALADO ET AL., 2010).	12
FIGURA 3.2 - LARGURA EFETIVA DO BANZO DE BETÃO PARA UM DIAGRAMA DE TENSÕES UNIFORMES (CALADO ET AL., 2010).....	13
FIGURA 3.3 - SECÇÃO DE UMA VIGA MISTA DO TIPO <i>SLIMFLOR BEAM</i>	14
FIGURA 3.4 - SECÇÃO DE UMA VIGA MISTA DO TIPO <i>INTEGRATED FLOOR BEAM</i>	15
FIGURA 3.5 - SECÇÃO DE UMA VIGA MISTA DO TIPO <i>INVERTED T BEAM</i>	15
FIGURA 3.6 - SECÇÃO DE UMA VIGA MISTA DO TIPO <i>HATBEAM</i>	16
FIGURA 3.7 - TIPO DE ELEMENTOS FINITOS (GERIN, 2013).....	17
FIGURA 3.8 - DESLOCAMENTOS DOS ELEMENTOS SÓLIDOS (RAMOS, 2010).....	17
FIGURA 3.9 - CURVA TENSÃO-EXTENSÃO DO AÇO.	18
FIGURA 3.10 - COMPORTAMENTO DO BETÃO PARA TENSÕES DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO (CEN, 2004A).	19
FIGURA 3.11 - SKETCH DA SECÇÃO DA VIGA SFB E LAJE DE BETÃO DO PAVIMENTO DE 30 CM.	20
FIGURA 3.12 - SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA COM UM <i>REFERENCE POINT</i> RESTRINGIDO EM <i>X</i> E EM <i>Y</i>	20
FIGURA 3.13 - CARGA APLICADA NA VIGA SFB DO PAVIMENTO COM 30 CM DE ESPESSURA.	21
FIGURA 3.14 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PRÉ-DEFINIDA SEM PARTIÇÕES E MALHA RESULTANTE (AZUL).	22

FIGURA 3.15 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS COM PARTIÇÕES E MALHA RESULTANTE (AZUL).....	22
FIGURA 3.16 - MODELO DA VIGA TOTAL E MEIA SECÇÃO.	23
FIGURA 3.17 - CURVAS FORÇA DESLOCAMENTO DOS MODELOS DE SECÇÃO TOTAL E MEIA SECÇÃO.	23
FIGURA 3.18 - DISCRETIZAÇÕES DE MEIA SECÇÃO TRANSVERSAL COM ESPESSURAS DOS ELEMENTOS DE 0,5%, 1%, 2%, 3% E 5% DO VÃO RESPETIVAMENTE.	24
FIGURA 3.19 - DISCRETIZAÇÕES DA SECÇÃO LONGITUDINAL COM ESPESSURAS DOS ELEMENTOS DE 0,5%, 1%, 2%, 3% E 5% DO VÃO RESPETIVAMENTE.	24
FIGURA 3.20 - CURVAS FORÇA DESLOCAMENTO PARA AS DIFERENTES DISCRETIZAÇÕES.	24
FIGURA 3.21 - LARGURAS EFETIVAS A ESTUDAR (0%, 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% E 175%).....	25
FIGURA 3.22 - SKETCH DA VIGA MISTA IFB DO PAVIMENTO COM 30CM DE ESPESSURA E RESPETIVA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	26
FIGURA 3.23 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO DA CALIBRAÇÃO DA SIMETRIA DA SECÇÃO E DE CONVERGÊNCIA DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	26
FIGURA 3.24 - SKETCH DA VIGA MISTA ITB DO PAVIMENTO COM 30CM DE ESPESSURA E RESPETIVA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	27
FIGURA 3.25- CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO DA CALIBRAÇÃO DA SIMETRIA DA SECÇÃO E DE CONVERGÊNCIA DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	27
FIGURA 3.26 - DEFORMAÇÃO DA VIGA ITB PARA UM B_{eff} DE 100% DO EUROCÓDIGO.	28
FIGURA 3.27 - SKETCH DA CHAPA COLABORANTE.	28
FIGURA 3.28 - MODELO SEM PARTIÇÕES E RESPETIVA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	29
FIGURA 3.29 - MODELO COM PARTIÇÕES E RESPETIVA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	29
FIGURA 3.30 - DEFORMAÇÃO DA VIGA ITB COM CHAPA COLABORANTE PARA UM B_{eff} DE 100%.	30
FIGURA 3.31 - COMPARAÇÃO DOS MODELOS COM E SEM CHAPA COLABORANTE.	30
FIGURA 3.32 - SKETCH E MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DE MEIA SECÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA HB.	31
FIGURA 3.33 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A VIGA "HATBEAM"	31
FIGURA 3.34 - DEFORMAÇÃO DA VIGA HB PARA UM B_{eff} DE 100% DO EUROCÓDIGO.....	32
FIGURA 3.35 - SKETCH DA CHAPA COLABORANTE E RESPETIVA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	32
FIGURA 3.36 - DEFORMAÇÃO DA VIGA HB COM CHAPA COLABORANTE PARA UM B_{eff} DE 100%.....	32
FIGURA 3.37 - COMPARAÇÃO DOS MODELOS COM E SEM CHAPA COLABORANTE.	33
FIGURA 3.38 - PART DA VIGA METÁLICA COM CONECTORES.	34
FIGURA 3.39 - PART DA LÂMINA DE BETÃO COM CUTS PARA OS CONECTORES.	34
FIGURA 3.40 - REFINAMENTO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DE UM CONECTOR.	35

FIGURA 3.41 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA <i>PART</i> DA VIGA METÁLICA E DE BETÃO RESPETIVAMENTE.	35
FIGURA 3.42 - <i>PART</i> DA VIGA METÁLICA COM CONECTORES.	36
FIGURA 3.43 - <i>PART</i> DA LÂMINA DE BETÃO COM <i>CUTS</i> PARA OS CONECTORES.	36
FIGURA 3.44 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA <i>PART</i> DA VIGA METÁLICA E DE BETÃO RESPETIVAMENTE.	36
FIGURA 4.1 - PONTOS DE REFERÊNCIA NAS EXTREMIDADES E PONTO A MEIO VÃO.	39
FIGURA 4.2 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 6 METROS.	40
FIGURA 4.3 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 3 METROS.	41
FIGURA 4.4 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 9 METROS.	42
FIGURA 4.5 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 6 METROS.	43
FIGURA 4.6 - DEFORMADA DA VIGA MISTA IFB DE 30 CM.	44
FIGURA 4.7 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 METROS.	44
FIGURA 4.8 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 3 METROS.	45
FIGURA 4.9 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA COM 9 METROS.	46
FIGURA 4.10 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 METROS.	47
FIGURA 4.11 - DEFORMADA DA VIGA MISTA ITB DE 30 CM.	48
FIGURA 4.12 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 M.	49
FIGURA 4.13 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 3 M.	50
FIGURA 4.14 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 9 M.	50
FIGURA 4.15 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 METROS.	51
FIGURA 4.16 - DEFORMADA DA VIGA ITB COM O USO DE CONECTORES.	52
FIGURA 4.17 - ESPIGA DO CONECTOR NA FASE DE ELÁSTICA E PLÁSTICA RESPETIVAMENTE.	53
FIGURA 4.18 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS MODELOS COM CONEXÃO TOTAL E PARCIAL.	53
FIGURA 4.19 - DEFORMADA DA VIGA MISTA HB DE 30 CM.	54
FIGURA 4.20 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 METROS.	55
FIGURA 4.21 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 3 METROS.	55
FIGURA 4.22 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 9 METROS.	56
FIGURA 4.23 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DIFERENTES <i>Beff</i> DA VIGA MISTA COM 6 METROS.	57
FIGURA 4.24 - DEFORMADA DA VIGA HB COM CONEXÃO PARCIAL.	58
FIGURA 4.25 - CONECTOR NA FASE DE ELÁSTICA E PLÁSTICA RESPETIVAMENTE.	58
FIGURA 4.26 - CURVA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS MODELOS COM CONEXÃO TOTAL E PARCIAL.	59

SIMBOLOGIA

b	Distância entre vigas
B_{eff}	Largura efetiva da laje de betão
D_c	Distância entre o topo do perfil metálico e o topo da secção mista
D_s	Distância entre o topo da chapa perfilada e o topo da secção mista
D_d	Altura da chapa perfilada
R_d	Força Resistente da chapa inferior da secção metálica
R_b	Força resistente do banzo inferior da secção metálica
R_w	Força resistente da alma da secção metálica
R_t	Força resistente do banzo superior da secção metálica
R_c	Força resistente do betão
t_b	Espessura do banzo superior
t_p	Espessura da chapa ou do banzo inferior em caso de perfis assimétricos
t_w	Espessura da alma
y_c	Distância entre o eixo neutro plástico e o topo da secção mista

1º CAPÍTULO - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

As estruturas mistas têm vindo a desempenhar um papel importante na área da construção civil pois, estas são compostas por dois ou mais materiais distintos que funcionam como um só com o objetivo de retirar maior partido das suas principais qualidades (Wang et al., 2008). Este tipo de estruturas têm como propósito o uso de menor volume de elementos, menor peso total e maior rapidez de construção. Esta dissertação focará apenas estruturas mistas aço-betão, que apresentam um grande desenvolvimento em relação às restantes estruturas mistas.

As primeiras estruturas mistas do tipo aço-betão apareceram nas vigas, em que o papel do betão era apenas revestir o perfil metálico de modo a protegê-lo contra ações do fogo e corrosão (Mullet, 1992). No entanto, verificou-se que o uso do betão nas vigas metálicas aumentava significativamente a resistência destas, portanto, após aprimorar a qualidade do betão, este passou a ser incluído no cálculo estrutural usando conectores para amplificar a interação. Assim apareceram diversos tipos de elementos mistos, tais como: pilares, vigas, lajes e ligações.

Atualmente este tipo de elementos mistos é usado em praticamente todo o tipo de construções estruturais, o que se deve a diversos fatores, tais como (Almeida, 2011):

- Rapidez e facilidade de construção o que permite reduzir os prazos de entrega sem aumento do orçamento final.
- Redução do consumo de aço estrutural, usando o betão para resistir a certas ações por questões económicas.
- Crescimento do uso de grandes áreas livres de pavimento, o que implica grandes vãos tanto para vigas como para lajes, o que leva a um acréscimo de esforços na estrutura.
- Redução significativa do peso próprio e volume da estrutura assim como o aumento da sua precisão dimensional.
- Aumento da resistência à corrosão e ao fogo.

Nesta dissertação serão abordadas várias secções de vigas mistas (viga metálica e laje de betão) que fazem parte de um tipo de pavimento denominado por "*slim floor*" (Figura 1.1) que, como o próprio nome indica, é um pavimento com espessura reduzida, sendo esta a

principal característica que o diferencia dos tipos de pavimentos mais convencionais (Figura 1.2).

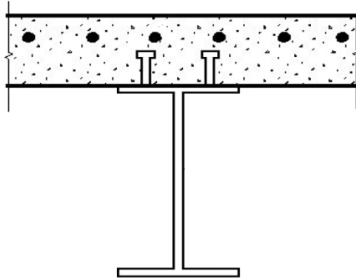


Figura 1.1- Viga mista convencional.

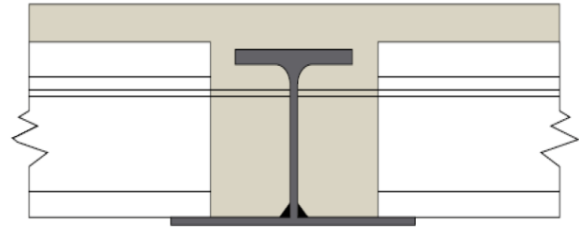


Figura 1.2 - Viga mista tipo "slim floor".

As vigas mistas são compostas por uma viga metálica, que serve de apoio à laje de betão, com uma chapa colaborante e conectores soldados no banzo superior, sendo que estes servem para ligar e transmitir esforços longitudinais da laje à viga e a chapa serve de cofragem ao betão reduzindo assim a mão de obra e os custos materiais (Calado et al., 2010). Neste tipo de pavimento é necessário ter vários cuidados e colocar proteções na viga metálica devido à corrosão e ao fogo. A altura total do pavimento é dada pela soma da altura da viga metálica com a espessura da laje de betão.

As secções do tipo "slim floor" têm geralmente o banzo inferior maior do que o superior para servir de apoio à laje de betão. Nestas condições a altura total do pavimento será apenas a soma da espessura da laje com a espessura do banzo inferior da viga metálica. Nas últimas décadas, o "slim floor" tem vindo a crescer no mundo da construção civil, sendo em alguns países o principal tipo de vigas mistas em uso na edificação corrente. A comunidade construtora portuguesa ainda não aderiu totalmente a este tipo de pavimento, sendo apenas usado em raros casos. Relativamente ao referido método tradicional usado na construção, o "slim floor" destaca-se nos seguintes aspetos:

- Redução do peso e do volume estrutural permitindo baixar os orçamentos.
- Pé direito maior e espessura de pavimento menor, permitindo assim um maior número de pisos mantendo a altura total do edifício.
- As lajes com chapas colaborantes perfiladas podem ser pré-fabricadas de forma a reduzir de forma significativa o tempo e a mão de obra de construção.
- Como o perfil metálico está envolvido no betão, este não necessitará de proteção contra a corrosão e incêndio e o betão terá uma contribuição significativa para o seu confinamento evitando assim vários tipos de instabilidade na viga tais como a encurvadura lateral (Mullet, 1992).
- A solução com chapa perfilada permite integrar dentro da altura do pavimento diversas instalações de serviços reduzindo assim o espaço e custos para a sua acomodação usual.

No entanto, esta redução de altura do pavimento conduz a uma diminuição de rigidez da laje e portanto a um aumento de flexibilidade que, se não for devidamente antevisto no dimensionamento, pode levar a grandes deformações (Barros, 2011).

Como este se trata de um tema recente, não existem muitas normas que contemplem o dimensionamento de vigas do tipo "*slim floor*". O Eurocódigo 4 (CEN, 2004b) apenas retrata os elementos mistos mais convencionais, mas eventualmente espera-se que este tipo de vigas desfrute o seu merecido lugar nesta norma.

1.2 Objetivos da tese

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento de vigas mistas do tipo "*slim floor*" em termos de resistência e rigidez considerando diferentes tipos de secções de vigas de aço. Serão considerados vários espectros de alturas de pavimentos para cada secção metálica, podendo esta conter conectores soldados.

As secções escolhidas foram previamente estudadas com base em hipóteses de cálculo analítico, sendo o estudo constante deste documento fundamentalmente focalizado na simulação numérica utilizando o programa "*Abaqus*". Este programa permite a formulação de modelos numéricos por meio do método dos elementos finitos.

Para cada secção será estudada e analisada a influência de vários parâmetros, com especial destaque à largura efetiva da laje de betão acima do banzo superior da viga a considerar no cálculo para a sua resistência. Todos os valores obtidos serão devidamente apresentados e será feita uma comparação com os resultados analíticos provenientes da tese "Estudo do comportamento de vigas aço-betão em pavimentos do tipo "*slim floor*" escrita por José Almeida (Almeida, 2011).

Todos os resultados obtidos no âmbito da presente tese servirão de base a ensaios experimentais a realizar no futuro pois, para este tipo de vigas mistas não existem muitos estudos efetuados. Portanto, estes servirão para conhecer um pouco melhor o comportamento de vigas mistas e dar fiabilidade ao seu estudo numérico

1.3 Organização da tese

Esta dissertação é composta por cinco capítulos onde se apresenta e desenvolve o estudo em causa, assim como se analisa os resultados deste, de forma a cumprir os objectivos inicialmente propostos.

O segundo capítulo será essencialmente referente ao estado do conhecimento do tema da presente dissertação sendo que este engloba o enquadramento histórico do objeto em estudo, as diferentes tipologias de vigas mistas e uma caracterização mais aprofundada do tipo de pavimento "*slim floor*". Este capítulo tem como objetivo enquadrar o leitor temporalmente e tecnicamente no assunto em causa.

No terceiro capítulo verifica-se uma breve introdução ao método dos elementos finitos e ao programa "*Abaqus*", que é a principal ferramenta usada no cálculo numérico das vigas mistas. Neste ponto também são apresentadas as diferentes metodologias e considerações usadas nos modelos numéricos e de que forma estas podem afetar os resultados.

No quarto capítulo serão apresentados os modelos efetuados de cada viga, os valores obtidos e a sua autenticidade, assim como a comparação destes resultados com os resultados analíticos obtidos por José Almeida (Almeida, 2011).

No quinto e último capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas dos modelos numéricos apresentados no capítulo 3 para cada objetivo expresso no primeiro capítulo. Por fim serão apresentados casos de estudo possíveis para serem realizados num futuro.

2º CAPÍTULO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento histórico

O conceito de "*slim floor*" consiste da inserção das vigas estruturais na laje de forma a adquirir uma menor espessura total de pavimento. Não se conhece ao certo a sua primeira aparição temporal. No entanto, na década de 1790-1800 esta técnica foi usada implicitamente no pavimento *jack-arch* (Bailey, 1999) que consistia no uso de blocos cerâmicos dispostos em arco que apoiavam diretamente no banzo inferior de uma viga de ferro fundido (Figura 2.1).

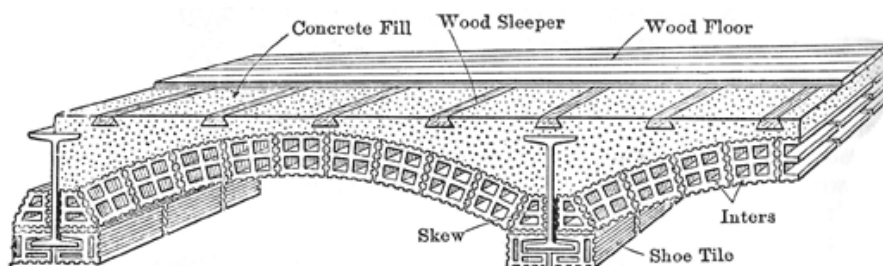


Figura 2.1 - Pavimento Jack-Arch.

Alguns anos mais tarde aparece outra forma de pavimento com a mesma ideologia do "*slim floor*" com o nome de *filler joist* (Figura 2.2). Embora não seja uma solução tão inteligente como o *jack-arch*, esta cumpre o seu objetivo através da colocação de vigas metálicas espaçadas entre 60 a 90 centímetros umas das outras sendo posteriormente colocado o betão de modo a que o nível inferior do pavimento permanecesse ao nível abaixo do banzo inferior da viga. Como já anteriormente referido, o betão servia apenas para proteger a viga de aço, no entanto com esta técnica constatou-se um aumento de rigidez em 25%.

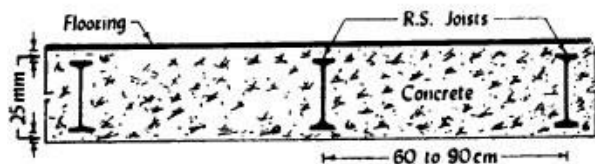


Figura 2.2 - Pavimento filler joist.

Pode-se dizer que o verdadeiro conceito de "*slim floor*" apareceu nos meados do século XX com o crescimento da construção mista. Como se pretendia construir edifícios mais altos,

mais amplos e de maneira mais acelerada, as características do "slim floor" saltavam à vista devido às suas vantagens relativamente ao pavimento misto tradicional. O facto de este ter uma espessura de laje, um tempo de execução e uma mão de obra reduzida, proporcionavam um aumento do número de pisos e uma velocidade de construção significativa. Optou-se então pelo uso de vigas em que o banzo inferior era maior do que o banzo superior de modo a que a laje se pudesse apoiar neste. Geralmente este tipo de pavimento consiste na ligação contínua entre vãos, mobilizando os momentos negativos nos apoios e consequentemente o momento máximo positivo a meio vão (Lars, 1978).

Em meados da década de 80 os investigadores da *Swedish Institute of Steel Construction* depararam-se com uma solução aceitável para as vigas mistas e então registou-se uma grande utilização deste tipo de pavimentos nos países nórdicos (Suécia e Finlândia). O sistema estrutural optado nestes países chamou a atenção aos mais curiosos devido ao tipo de vigas utilizadas denominadas de "Hatbeam" (Figura 2.3), pois estas consistiam na soldadura de quatro chapas metálicas, duas verticais e duas horizontais que conferiam à viga a forma de um "chapéu".

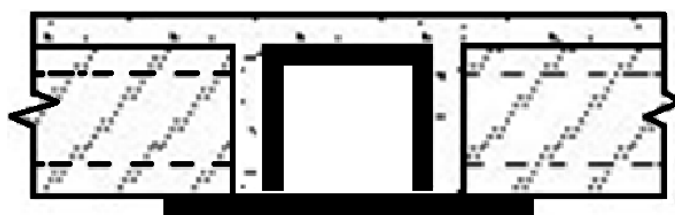


Figura 2.3 - Viga mista "Slim Floor" com denominada "HatBeam" (Schleich, 2000).

O uso deste tipo de pavimento levou a um aumento de cerca 80% na utilização de estruturas de aço na Suécia o que desencadeou algum interesse por parte de alguns países europeus neste tipo de solução tais como o Reino Unido (Lawson et al., 1998). Esta curiosidade da *British Steel* proveniente do Reino Unido levou ao desenvolvimento do "slim floor" e na década de 90 já eram produzidas vigas mistas que na fase de construção conseguiam atingir os 6 metros de vão sem precisar de qualquer tipo de escoramento (Mullet et al., 1993).

A partir do "hatbeam" nasceram vários tipos de vigas mistas para o pavimento "slim floor" que, através da imaginação, consistia experimentar diferentes combinações de perfis laminados e chapas soldadas. A viga mista *DeltaBeam*, (Figura 2.4) que deriva da *HatBeam*, apareceu nos anos 90 e para além de ter também uma secção fechada e conter uma resistência à torção considerada, esta contém ainda aberturas em ambas as almas que permite a betonagem *in situ* e a propagação de armaduras na direção perpendicular à viga.



Figura 2.4 - Viga mista *DeltaBeam*.

A *British Steel* e a *Steel Construction Institute* desenvolveram um tipo de viga que consistia num perfil universal (usualmente IPE ou HE) com uma chapa horizontal soldada na base deste (Figura 2.5). Ironicamente os autores desta secção usaram a designação "*slimflor beam*" como o nome da marca em que registaram a viga. O facto de ser um perfil padrão com uma chapa soldada apenas numa das extremidades (não requer a viragem da peça na sua construção) faz com que a viga *slimflor beam* seja das secções mais utilizadas nos pavimentos mistos. A proteção ao fogo deste perfil é também menor do que o habitual visto não haver nenhuma abertura na sua direção transversal o que retarda a propagação deste (Mullet et al., 1993).

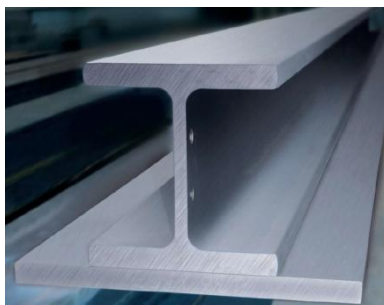
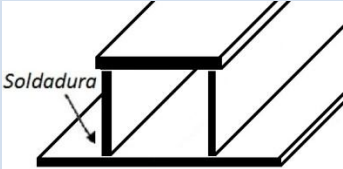
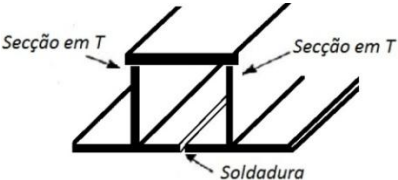
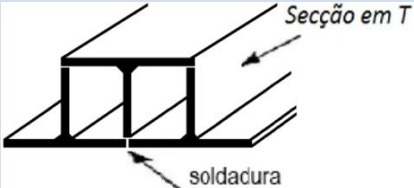
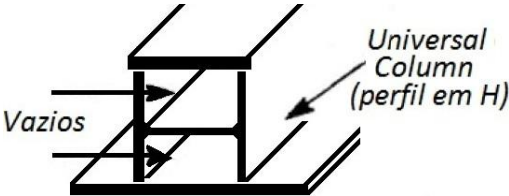
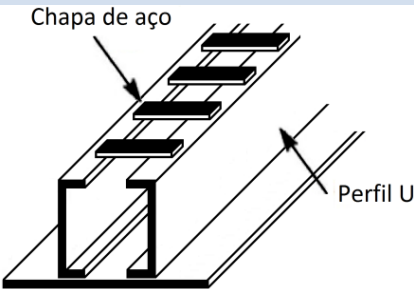
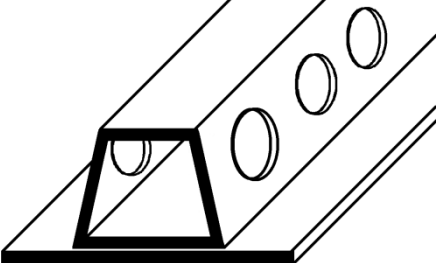


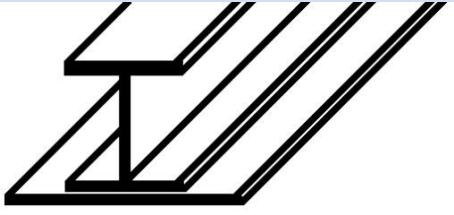
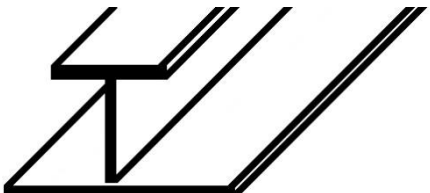
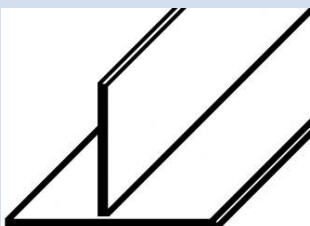
Figura 2.5 - Viga *slimflor beam*.

No Quadro 2.1 e 2.2 encontram-se várias tipologias de vigas mistas usadas a partir desta época até à atualidade.

Quadro 2.1 - Diferentes Tipologias de vigas mistas em uso (secções fechadas) (Jurado, 2008).

Viga Slim Floor	Descrição
	<p>Viga constituída por quatro placas de aço soldada que formam um "chapéu". Esta viga designa-se de <i>HatBeam</i>.</p>
	<p>Viga constituída por dois perfis do tipo T invertidos e uma chapa de aço soldada no topo. As juntas deste perfil são compostas por soldaduras.</p>
	<p>Viga constituída por três perfis T, sendo dois destes perfis invertidos. As juntas deste perfil são compostas por soldaduras. O interior da viga será apenas constituído por ar.</p>
	<p>Viga constituída por um perfil laminado H com os banzos na direcção vertical e duas chapas soldadas na horizontal, uma no topo e outra na parte inferior do perfil. O interior da viga será apenas constituído por ar.</p>
	<p>Viga constituída por dois perfis U laminados e uma chapa de aço soldada na parte inferior dos perfis. Ao longo do perfil longitudinal são soldadas placas de aço no topo dos perfis em U. Esta tipologia de viga "slim floor" usa-se nos países nórdicos e denomina-se de <i>ThorBeam</i>.</p>
	<p>Viga constituída por quatro placas de aço soldadas formando uma viga em caixão. As almas da secção são inclinadas e possuem aberturas circulares ao longo da secção para transição de armaduras transversais à viga. Este tipo de viga é conhecido por <i>DeltaBeam</i>.</p>

Quadro 2.2 - Diferentes Tipologias de vigas mistas em uso (secções abertas) (Jurado, 2008).

Viga <i>Slim Floor</i>	Descrição
	Viga constituída por um perfil laminado I e uma placa de aço soldada na sua base. Esta é das vigas mais comuns usadas actualmente no " <i>slim floor</i> ", sendo esta uma marca registada da <i>BritishSteel</i> .
	Viga constituída por um perfil laminado, podendo este ser de secção T ou meia secção H e I. Na base coloca-se uma chapa soldada. Este tipo de viga tem o nome de <i>Integrated Floor Beam</i> .
	Viga constituída por duas chapas soldadas, uma vertical e outra horizontal. A este tipo de secção chama-se <i>Inverted T beam</i> .

2.2 Principais características dos pavimentos mistos do tipo "*Slim Floor*"

Como anteriormente referido, a resistência dos pavimentos mistos deve-se maioritariamente ao desempenho do aço e do betão como um elemento só. De forma a melhorar o atrito entre o aço e o betão é corrente o uso de conectores soldados às vigas metálicas (Figura 2.6). O desempenho descrito deve-se essencialmente à conexão entre estes dois materiais e, devido a problemas de betonagem *in situ* ou aderência, a conexão entre os conectores e o betão pode ser insuficiente. A disposição e o número destes conectores varia entre o tipo de secção mas é usual a sua colocação no topo do perfil, pois é onde se encontra o betão à compressão. Por vezes as vigas podem necessitar de um número superior a 1 conector por fiada, dependendo do dimensionamento e da resistência pretendida.

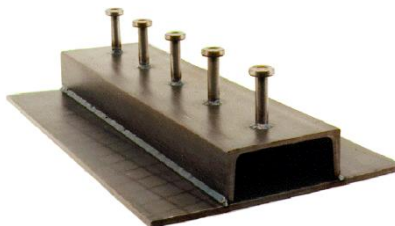


Figura 2.6 - *HatBeam* com conectores no topo.

Tal como o pavimento misto tradicional, o "*slim floor*" dispõe de uma chapa nervurada colaborante soldada entre vigas. Geralmente esta chapa contém uma espessura que varia entre os 0,5 mm e os 1,2 mm e, para além de servir de cofragem para o betão, esta pode substituir parcialmente a armadura de tração da laje. As nervuras podem atingir grandes profundidades, o que permite por vezes obter vãos de 6 metros sem qualquer escoramento na fase de betonagem e a passagem de equipamentos e serviços sem aumentar a espessura total do pavimento (Figura 2.7) (Jurado, 2008).

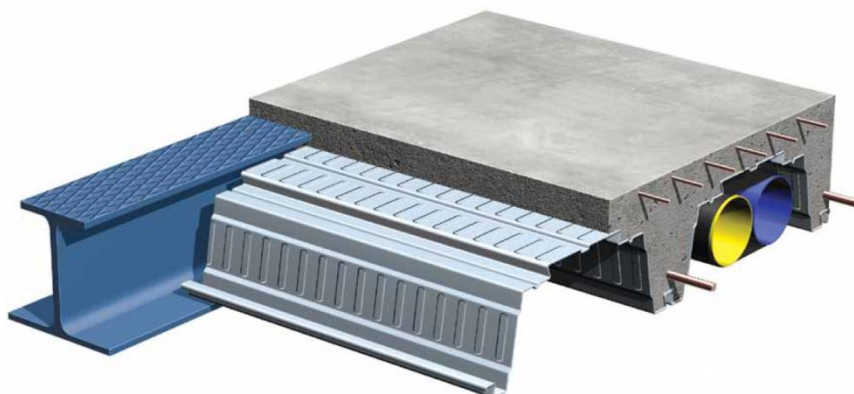


Figura 2.7 - Pormenor do pavimento "*slim floor*" (TS@, 2010).

Quanto às armaduras, todos os pavimentos necessitam de armaduras construtivas tal como está representado na Figura 2.7. As armaduras de momento negativo e positivo terão de ser colocadas à parte e podem ser contínuas na direção transversal à viga caso esta seja aberta (Figura 2.9), caso contrário, as armaduras serão soldadas nos banzos ou na alma dos perfis (Figura 2.8).

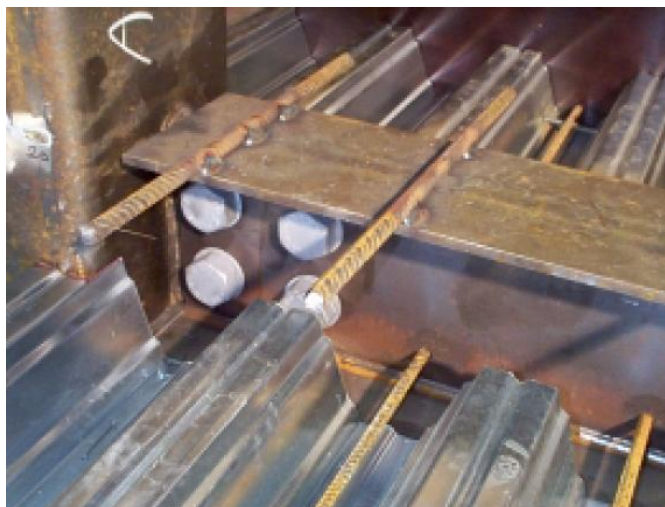


Figura 2.8 - Pormenor das armaduras numa viga sem aberturas (Jurado, 2008).



Figura 2.9 - Armaduras que atravessam a *Deltabeam* (Hauf, 1996).

Para além de ser uma solução mais económica do que o habitual, o "*slim floor*" permite uma considerável velocidade de construção devido ao facto de ser um pavimento "semi-industrializado" pois as vigas, chapas colaborantes e por vezes as lajes podem ser pré-fabricadas. O facto de a viga metálica estar praticamente toda envolvida em betão, esta dispõe de uma maior resistência ao fogo e portanto um menor requisito de proteção, especialmente se a secção transversal da viga for fechada, pois não há transmissão de calor pelo betão. O mesmo acontece nas ligações viga pilar, que são totalmente envolvidas em betão. A Figura 2.8 retrata também um pormenor de uma ligação aparafusada através de uma placa soldada ao pilar. Nesta secção a viga apresenta conectores de corte soldados no banzo superior que aumentam significativamente a resistência ao esforço transversal (Malaska, 2000).

Neste tipo de pavimento existe uma continuidade parcial da laje na zona de ligação à viga que permite uma redução de deformações em cerca de 20% (TS@, 2010). No entanto esta continuidade é ignorada na verificação da resistência da viga (CEN, 2004b).

3º CAPÍTULO - TIPOLOGIAS E MODELAÇÃO

3.1 Largura efetiva

Segundo Kuhlmann e Hauf (Kuhlmann et al., s.d.) o dimensionamento das primeiras vigas mistas derivou do estudo do dimensionamento de vigas de betão em que este funcionava apenas como uma membrana impossibilitada de fendilhar, o que alimentava a ideia errada de considerar a rigidez de flexão da viga como desprezável. Assim, parâmetros como a largura efetiva e a rigidez das vigas é altamente subestimada no dimensionamento de vigas do tipo "slim floor".

O conceito de largura efetiva provém do fenómeno denominado de *shear lag* que ocorre maioritariamente em vigas de vãos reduzidos e com banzos largos. A hipótese de *Bernoulli* admite que após a flexão de uma peça, as secções transversais desta mantêm-se planas. No entanto, esta teoria apresenta alguns erros para vigas com banzos largos, pois a distribuição de tensões ao longo do banzo no plano transversal à viga é variável. (Figura 3.1).

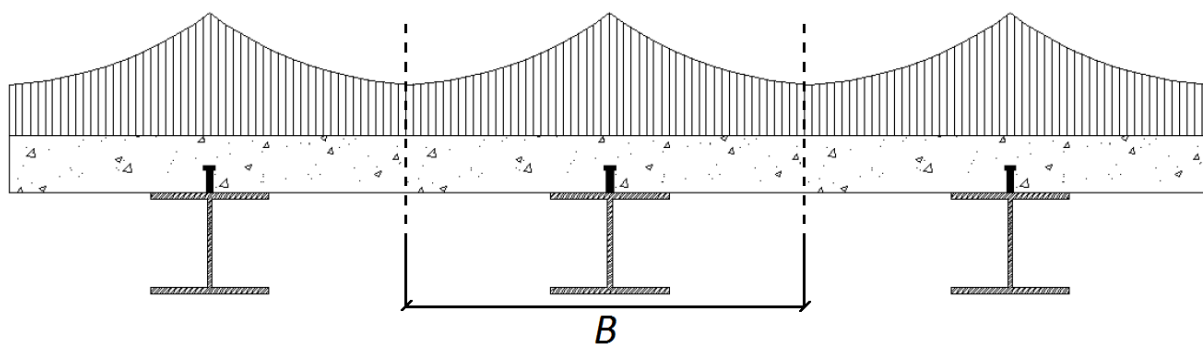


Figura 3.1 - Variação de tensões longitudinais no banzo de betão devido ao efeito *shear lag* (Calado et al., 2010).

Para o cálculo das tensões através da teoria geral da flexão é necessário recorrer a um diagrama uniforme de tensões e portanto recorre-se geralmente ao conceito de largura efetiva (B_{eff}). Não se está longe da realidade ao considerar um retângulo com largura B_{eff} , em que a sua área é idêntica à área do diagrama de tensões com largura B (Calado et al., 2010). Portanto, tal como representado na Figura 3.2, o diagrama de tensões ABCDE tem a mesma área do retângulo de tensões FGHI.

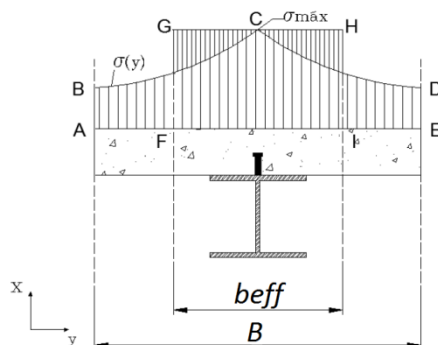


Figura 3.2 - Largura efetiva do banzo de betão para um diagrama de tensões uniformes (Calado et al., 2010).

No que toca ao momento máximo resistente para estados limites últimos (ULS), a largura efetiva da viga não é muito decisiva, mas para os estados limites de serviço (SLS), este parâmetro assinala uma grande importância pois este aumenta significativamente a rigidez da secção. Como consequência desta subvalorização da rigidez das vigas mistas à flexão, normalmente a verificação dos ELS é mais condicionante do que os ULS e portanto é necessário uma maior secção transversal. De modo a existir um dimensionamento eficiente, é necessário estudar a influência desta largura efetiva (Kuhlmann et al., s.d.).

A comunidade científica ainda não chegou a um consenso sobre a largura efetiva ideal a considerar no dimensionamento de vigas mistas. Nas publicações do *Steel Construction Institute* existem várias hipóteses de cálculo para a largura efetiva, no entanto nenhuma é conclusiva. Nas publicações mais antigas ((Mullet, 1992) e (Mullet et al., 1993)) o cálculo da largura efetiva variava para os estados limites últimos e para os estados limites de serviço mas o valor considerado era geralmente $L/8$ em que L é o comprimento da viga. Mais tarde, numa outra publicação de Mullet (Mullet, 1997), a largura efetiva já era tomada por $L/8 + B/2$ ou apenas por $L/4$, em que B é a largura da viga.

Segundo a norma europeia (CEN, 2004b), no que toca vigas mistas convencionais, a largura efetiva é calculada com base nas distâncias de momento fletor nulo e é dada pela expressão $B_{eff} \leq b_0 + \sum b_{ei}$, sendo b_0 a distância entre os centros dos conectores das vigas e b_{ei} a largura efetiva de metade do banzo de betão de cada lado da alma que é dada por $L/8$. Como a distância b_0 é bastante inferior a $2 * L/8$, esta pode ser desprezada. A largura efetiva nunca pode ser superior à distância entre vigas. É necessário ter em conta que esta última expressão da largura efetiva é usada para vigas mistas convencionais, portanto a norma europeia ainda não contempla nenhuma equação para as soluções do tipo "slim floor".

Nesta dissertação serão usados vários valores da largura efetiva, sendo a expressão de cálculo base a expressa na norma EN1994-1-1 (CEN, 2004b) ($B_{eff,EC4}$). Admitindo como base que

0% da expressão desta norma é igual ao valor do banzo superior da viga metálica, determina-se as restantes larguras efetivas a analisar através de percentagens:

- Largura efetiva igual a 25% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 50% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 75% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 100% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 125% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 150% do $B_{eff,EC4}$;
- Largura efetiva igual a 175% do $B_{eff,EC4}$;

Os resultados da ultima largura efetiva apresentada só serão expostos quando relevantes.

3.2 Tipologias de Vigas a Estudar

Para levar a cabo o estudo proposto por nesta dissertação, consideraram-se as quatro tipologias de vigas do tipo "slim floor" diferentes consideradas por José Almeida (Almeida, 2011). As vigas terão três metros de afastamento entre si e estudar-se-ão comprimentos longitudinais de três, seis e nove metros. A primeira viga a analisar será a *SlimFlor Beam*, que será composta por um perfil HEB e uma chapa soldada no banzo inferior (Figura 3.3). Na maior parte dos modelos executados o eixo neutro está no banzo inferior da viga mista, sendo o momento plástico resistente M_{Rd} para esta situação obtido através da equação (1).

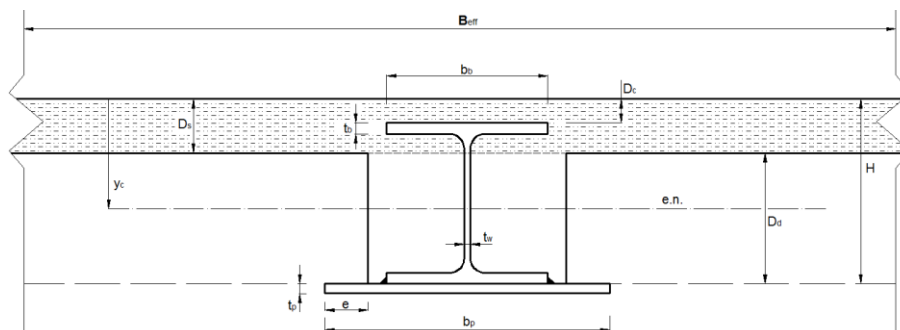


Figura 3.3 - Secção de uma viga mista do tipo *Slimflor Beam*.

$$M_{Rd} = R_d \left(H - \frac{t_p}{2} - y_c \right) + \frac{R_b}{2t_b} (H - t_p - y_c)^2 + \frac{R_b}{2t_b} (y_c - D_c - t_b - h_w)^2 + R_w \left(y_c - D_c - t_b - \frac{h_w}{2} \right) + R_t \left(y_c - D_c - \frac{t_b}{2} \right) + R_c \left(y_c - \frac{D_s}{2} \right) \quad (1)$$

Em que R_d , R_b , R_w e R_t representam a força resistente da chapa inferior, a força resistente do banzo inferior, força resistente da alma e força resistente do banzo superior da secção metálica respetivamente, e R_c a força resistente do betão. As restantes simbologias são relacionadas com a geometria da viga mista e podem ser observadas na Figura 3.3.

A segunda viga a estudar será a viga *Integrated Floor Beam* (Figura 3.4), sendo esta composta por meio perfil HEB com uma chapa soldada na base. Novamente expõe-se a equação que deduz o momento plástico resistente quando o eixo neutro se encontra na alma da viga mista, abaixo da lâmina de betão (equação (2)).

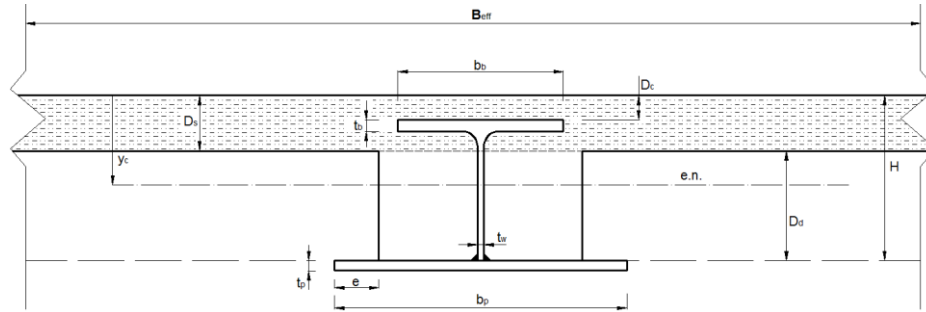


Figura 3.4 - Secção de uma viga mista do tipo *Integrated Floor Beam*.

$$M_{Rd} = R_b \left(H - \frac{t_p}{2} - y_c \right) + \frac{R_w}{2h_w} (y_c - t_b - D_c)^2 + \frac{R_w}{2h_w} (H - t_p - y_c)^2 + R_t \left(y_c - D_c - \frac{t_b}{2} \right) + R_c \left(y_c - \frac{D_s}{2} \right) \quad (2)$$

De seguida será estudada a viga *Inverted T Beam* (Figura 3.5) que é composta por duas chapas soldadas, uma na vertical e outra na horizontal que possui um eixo neutro, na maior parte dos casos, na alma abaixo da lâmina de betão (equação (3)).

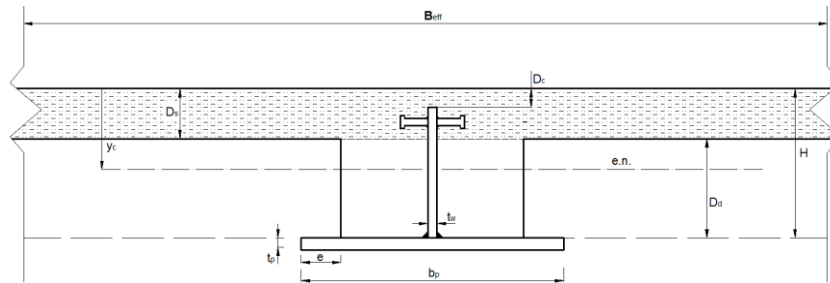


Figura 3.5 - Secção de uma viga mista do tipo *Inverted T Beam*.

$$M_{Rd} = R_b \left(H - \frac{t_b}{2} - y_c \right) + \frac{R_w}{2h_w} (D_c + h_w - y_c)^2 + \frac{R_w}{2h_w} (y_c - D_c)^2 + \frac{R_c}{2D_s} y_c^2 \quad (3)$$

Por fim será analisada a viga *HatBeam* que, como a Figura 3.6 indica, é composta por quatro chapas soldadas a formar um chapéu em que o seu eixo neutro está, na maior parte das vezes no mesmo sítio das últimas duas vigas apresentadas, ou seja, na alma abaixo da lâmina de betão (equação (4)).

$$M_{Rd} = R_c \left(y_c - \frac{D_s}{2} \right) + R_{cb} \left(y_c - D_c + \frac{D_s - D_c}{2} \right) + R_t \left(y_c - D_c - \frac{t_b}{2} \right) + \frac{R_w}{2h_w} \left(y_c - D_c - \frac{t_b}{2} \right)^2 + \frac{R_w}{2h_w} (h_w - y_c + D_c + t_b/2 + R_b H - t_b/2 - y_c) \quad (4)$$

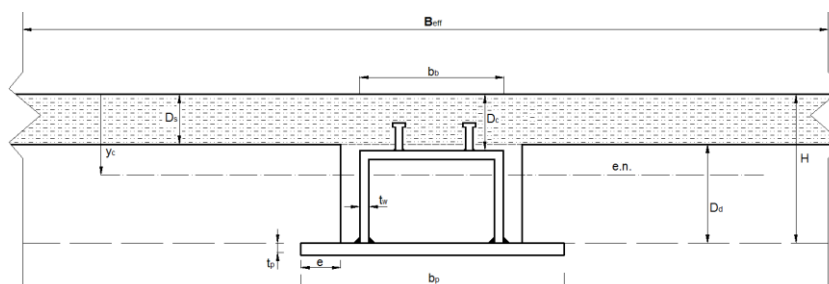


Figura 3.6 - Secção de uma viga mista do tipo *HatBeam*.

3.3 Método dos Elementos Finitos

Atualmente existe a teoria de que praticamente todo o comportamento da matéria pode ser descrito matematicamente através de equações diferenciais. No que toca às estruturas, sendo estas caracterizadas pela sua geometria, pelo seu material e pelo seu estado estático-cinemático, o seu comportamento pode ser muito difícil de resolver analiticamente através das equações diferenciais. Portanto, o método dos elementos finitos (FEM) simplifica estas equações e torna o seu cálculo relativamente mais simples. Este método basicamente consiste na divisão do corpo que se pretende estudar em vários elementos mais pequenos com uma geometria fixa (elementos triangulares, quadriláteros, cúbicos, hexagonais, etc), que permite uma melhor perceção do comportamento do corpo. A esta divisão em elementos mais pequenos denomina-se de discretização ("*meshing*") e é uma das etapas mais importantes do métodos dos elementos finitos. Todos os nós do tipo de elemento finito escolhido têm que estar unidos com outro elemento finito similar formando uma malha. As dificuldades da modelação começam a aparecer quando a geometria da peça que se pretende analisar não é linear e portanto a sua divisão em elementos do mesmo tipo torna-se extremamente difícil, como é o caso das peças curvas. Com elementos finitos de diferentes tamanhos e formas, o cálculo para além de se tornar mais difícil e demorado, torna-se também menos preciso. Portanto toda a conceção e discretização da malha cabe unicamente ao utilizador do método e não ao programa que vai aplicar o método. Na Figura 3.7 estão representados alguns tipos de elementos finitos. Os elementos planos geralmente designam-se por elementos de casca (shell) ou placa e os de três dimensões elementos sólidos. Cada nó destes elementos tem 6 e 3

graus de liberdade respetivamente, sendo os graus de liberdade dos elementos cúbicos apenas translações. Estas translações nodais originam deformações infinitesimais no elemento que se traduzem por um vetor de deformações (Figura 3.8).

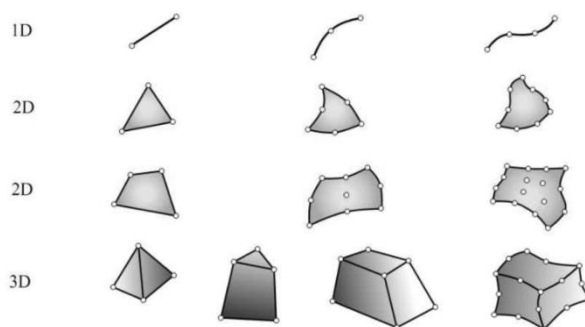


Figura 3.7 - Tipo de elementos finitos (Gerin, 2013)

No estudo em causa serão utilizados elementos sólidos pois estar-se-á a analisar vigas mistas que dispõem de uma laje de betão e como geralmente este toma espessuras elevadas, o uso de elementos de casca não consegue traduzir o comportamento real da parte de betão. Os elementos sólidos exigem um grande esforço computacional devido ao tamanho da matriz de rigidez de cada parte e devem ser utilizados apenas quando não houver possibilidade de se utilizar elementos menos robustos. Um bom refinamento da malha é "meio caminho andado" para obter resultados aceitáveis e reduzir a necessidade de processamento do computador.

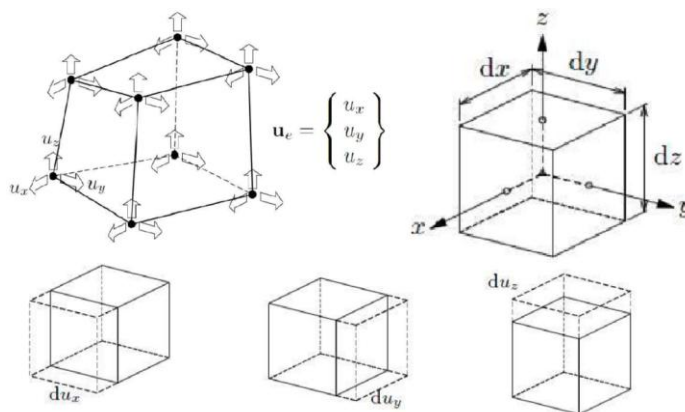


Figura 3.8 - Deslocamentos dos elementos sólidos (Ramos, 2010).

O método dos elementos finitos permite considerar uma análise não linear física e geométrica dos materiais e para tal pode-se considerar esta análise como independente ou dependente do elemento utilizado. A maior parte dos programas considera o tipo de elemento finito escolhido como independente, pois desta forma não há limitação do uso de um certo número específico de elementos e pode-se escolher os mais adequados ao tipo de estrutura que se pretende representar, tornando assim a modelação mais versátil.

3.4 Programa Abaqus®

O método dos elementos finitos é um tema muito complexo, pois este requer um nível de conhecimento elevado e facilmente se comete erros graves sem que o utilizador se aperceba. Por esta razão, quando se usam programas é importantíssimo conhecer a sua maneira de funcionar de forma a ser o utilizador a controlar o programa e não o programa a controlar o utilizador, como por vezes acontece.

Para a modelação das vigas propostas na presente dissertação recorreu-se ao programa Abaqus® que é um *software* de elementos finitos. O Abaqus® possui uma enorme biblioteca de propriedades dos materiais e é considerado um programa "sem limites" pelos utilizadores. Este divide a modelação em etapas (*part, property, assembly, load, step, mesh, job, etc*), o que torna mais fácil e perceptível o que se está a desenvolver e minimiza os erros que podem ocorrer.

3.5 Materiais usados

O programa em causa dispõe de um enorme detalhe na classificação do comportamento do material caso o utilizador o deseje. Como esta dissertação trata apenas de uma análise numérica em que ainda não foram efetuados ensaios experimentais, utilizam-se os dados mais gerais dos materiais aço e betão. O aço a usar será um S355 e o betão C20/25. Será também considerada uma análise não-linear material de forma a obter um momento resistente mais rigoroso.

Para o aço, assume-se que este tem comportamento elástico-perfeitamente-plástico (Figura 3.9). No Abaqus é necessário definir a parte elástica e a parte plástica, portanto, após o cálculo da extensão através da lei de Hook definiram-se ambas as retas. Como se está a trabalhar em milímetros no programa, introduziu-se uma tensão de cedência (f_y) de 355 N/mm^2 , um módulo de elasticidade (E) de $210 \times 10^3 \text{ MPa}$ e um coeficiente de *Poisson* (ν) de 0,3.

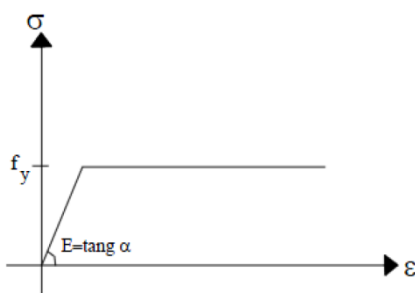


Figura 3.9 - Curva tensão-extensão do aço.

O comportamento mecânico do betão depende de mais fatores e é dos materiais mais complexos para uma simulação numérica pois este, para além de não ter a mesma resistência à tração e compressão, tem um comportamento muito dependente dos efeitos não lineares tais como a fluência, retração e fendilhação. Na presente tese definiu-se este material de forma simples introduzindo apenas os valores essenciais para a fase elástica e plástica. Foi portanto usado um módulo de elasticidade de $31 \times 10^3 \text{ MPa}$ e um coeficiente de *Poisson* de 0,2 para a primeira fase. De seguida, no programa escolheu-se a opção de "*concrete damaged plasticity*" que simula o comportamento do betão na fase plástica e pode levar o material à rotura pelo estado de compressão ou de tração (Figura 3.10). Para estas tensões usaram-se os valores de 20 MPa (f_{ck}) e 2.4 MPa (f_t) respetivamente, reduzidos pelos coeficientes da norma (CEN, 2004a).

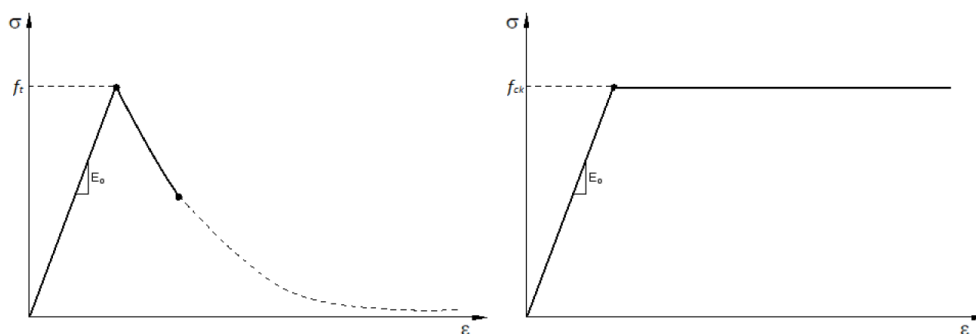


Figura 3.10 - Comportamento do betão para tensões de tração e compressão (CEN, 2004a).

3.6 Metodologias da modelação - Viga SFB

3.6.1 Construção do modelo

O Abaqus é uma ferramenta complexa e os seus conceitos podem demorar a ser adquiridos para os utilizadores menos experientes. De forma ao leitor entender melhor a maneira de processamento do programa, nesta dissertação será descrita de forma sucinta a execução do modelo de uma viga SFB de um pavimento de 30 centímetros e 6 metros de comprimento. Pela norma europeia (CEN, 2004a), o betão considerado no cálculo analítico é apenas aquele que se encontra à compressão, portanto será apenas este o considerado no cálculo numérico. Pelo cálculo analítico sabe-se que o eixo neutro da viga mista ronda sempre a parte inferior desta, na chapa, no banzo inferior do perfil ou por vezes na parte inferior da alma. Deste modo tem-se a certeza que a parte com betão está sempre à compressão.

O primeiro passo será a criação de uma *part*, podendo o utilizador criar quantas desejar e mais tarde agrega-las na etapa *assembly*. Numa primeira fase, assume-se que todas as vigas têm conexão total entre o aço e o betão, portanto apenas se criará uma parte contendo ambas. O programa tem uma componente de desenho bastante desenvolvida (*sketch*), logo basta

introduzir o contorno da secção da viga e o seu comprimento longitudinal (Figura 3.11). Introduziu-se portanto um perfil HEB 260 com uma chapa de aço 450x15.

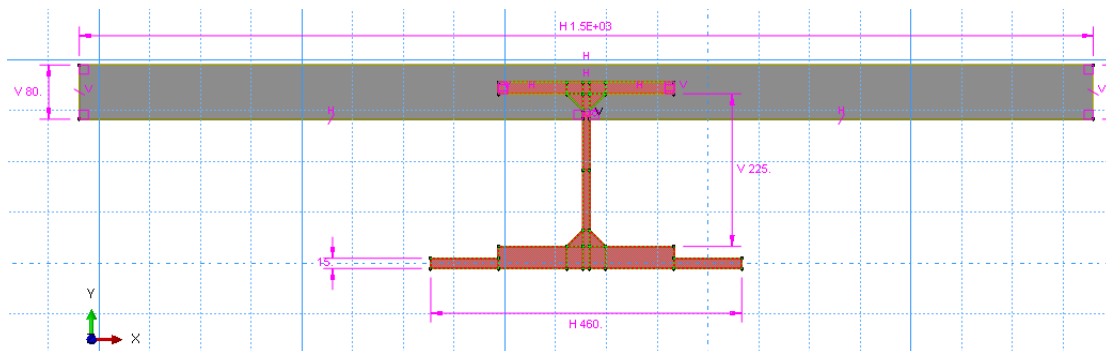


Figura 3.11 - Sketch da secção da viga SFB e laje de betão do pavimento de 30 cm.

Na fase *property* define-se o material e com ele cria-se uma secção que se atribui à *part* através do *assign*. Para as condições de fronteira assumiu-se que a viga se encontra simplesmente apoiada (apoio duplo e apoio simples nas duas extremidades). Para definir os apoios, no Abaqus recorre-se aos *reference points* (pontos de referência) que são pontos que controlam vários conjuntos de pontos, superfícies ou secções através da opção *constraint* na etapa *interaction*. Adoptou-se que cada uma das secções extremas da viga em análise é controlada por um *reference point* (Figura 3.12). A estes pontos de referência atribui-se os graus de liberdade e estes variam consoante o tipo de apoio que se tem. No apoio duplo libertam-se todas as rotações exceto uma e restringem-se todas as translações, no apoio simples para além de se libertar todas as rotações, liberta-se também a translação no sentido longitudinal da viga. A rotação que se restringe serve para negar a ocorrência de encurvadura lateral, pois na realidade a laje de betão funciona também como contraventamento da viga e este tipo de encurvadura não existe.

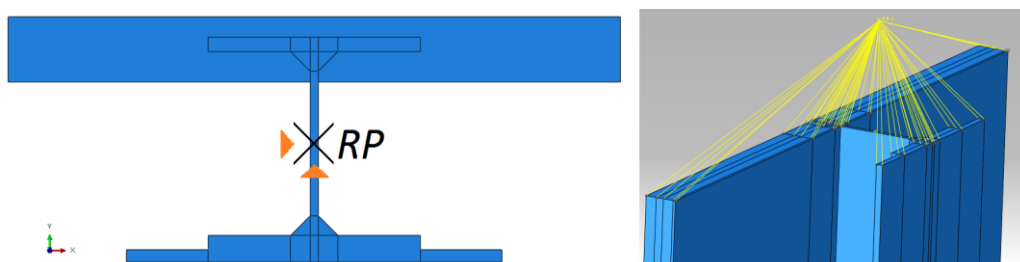


Figura 3.12 - Secção transversal da viga com um *reference point* restringido em X e em Y.

Na secção *load* do programa de cálculo podem-se introduzir as cargas. Como se pretende levar a viga à rotura o valor da carga aplicada não importa desde que seja superior à carga última da viga. No entanto, como o programa aplica a carga na estrutura por incrementos de percentagem de carga, se esta for próxima da carga de rotura as curvas força-deslocamento

resultantes serão mais próximas da realidade. O cálculo analítico de base efetuado para cada viga serviu para ter noção da carga de rotura e portanto no modelo numérico usou-se sempre uma carga próxima da obtida analiticamente. A carga inserida no Abaqus é do tipo *pressure* e foi aplicada em toda a largura do banzo de betão (Figura 3.13).

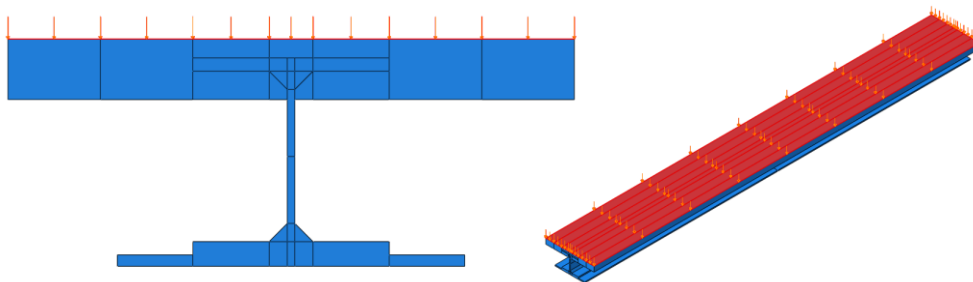


Figura 3.13 - Carga aplicada na viga SFB do pavimento com 30 cm de espessura.

O referido programa tem a opção de definir várias cargas e aplica-las na ordem desejada pelo utilizador. Para tal é necessário criar *steps*, mas no que toca ao estudo desta dissertação, como se pretende levar uma viga à rotura com uma carga distribuída, apenas é necessário um *step*. Neste *step* pode-se definir os incrementos de carga pretendidos sendo o inicial 0,1% da carga e os restantes um intervalo de valores. Quanto mais pequeno for a gama de valores neste intervalo mais precisa será a curva força-deslocamento pois será definida por um maior número de pontos, mas em contra partida, a velocidade de processamento do programa de cálculo é extremamente reduzida.

Por fim, só resta a fase de execução e refinamento da malha de elementos finitos adotada. Como já referido anteriormente esta é uma fase muito sensível e importante no modelo numérico pois esta influencia diretamente os resultados. A malha de elementos finitos considerada para ambos os elementos aço e betão é composta por elementos sólidos hexaédricos (seis faces) do tipo C3D8R e C3D8RH respetivamente, devido as seguintes características: continuum (C), three-dimensional (3D), with eight nodes (8), reduced integration (R) e no caso do aço, (H) para hybrid formulation que é a capacidade do aço mudar de secção quando se deforma. Após a escolha do tipo de elemento, o Abaqus atribui uma cor às peças consoante a facilidade de formar elementos finitos do tipo escolhido (Figura 3.14). De forma a melhorar a discretização usam-se partições que servem para dividir a peça em fragmentos mais pequenos o mais semelhante possível a um paralelepípedo que é das formas mais simples de efetuar uma discretização (Figura 3.15).

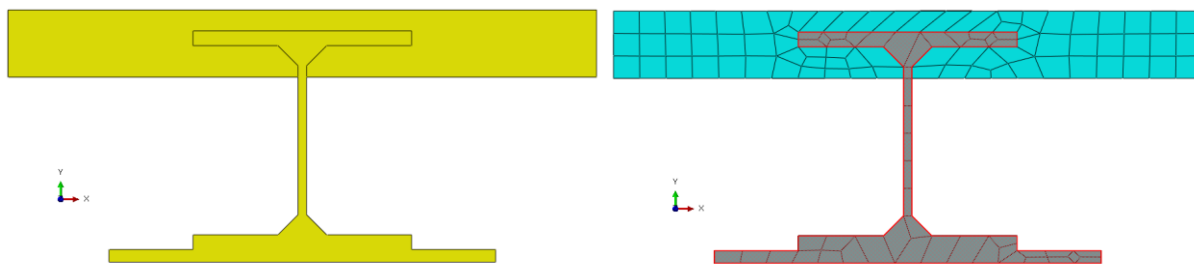


Figura 3.14 - Malha de elementos finitos pré-definida sem partições e malha resultante (azul).

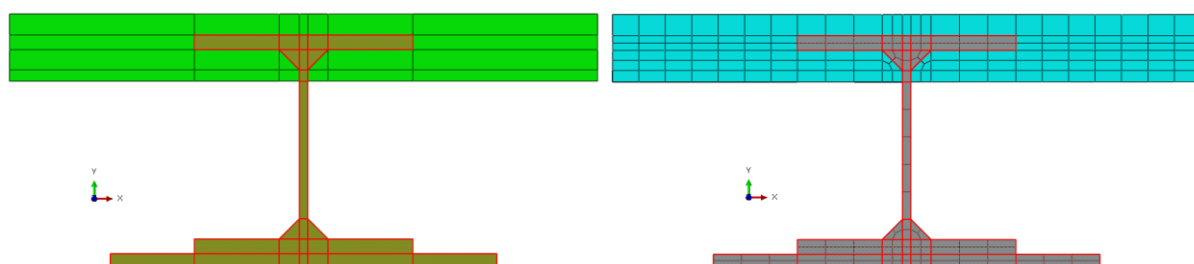


Figura 3.15 - Malha de elementos finitos com partições e malha resultante (azul).

Por vezes dividir a peça em várias partições nem sempre é adequado, como é o caso da alma. É habito os utilizadores mais inexperientes cometerem o erro de dividir a alma na vertical, e como usualmente esta tem espessuras muito reduzidas, ao criar uma partição, o elemento finito fica com uma altura muito superior à sua largura o que pode levar ao esmagamento do elemento no cálculo e afetar gravemente os resultados obtidos. Longitudinalmente não há qualquer dificuldade de discretização devido à secção transversal ser constante.

3.6.2 Calibração do modelo

Um modelo é a forma simplificada de representar analítica e numericamente algo que ocorre na realidade. É muito fácil criar um modelo, mas fazer com que este traduza o comportamento real do que se quer representar é um processo mais complicado e denomina-se de calibração do modelo. Este é outro passo fundamental, pois se o modelo não for calibrado todos os resultados provenientes deixam de ser plausíveis e este perde toda a sua fiabilidade. Neste processo é importante ter alguns resultados experimentais de forma a aumentar a credibilidade dos modelos numéricos. No entanto, como ainda não existiram ensaios experimentais relativos às vigas em estudo, os modelos serão calibrados com os resultados analíticos.

A teoria do método dos elementos finitos assume que quando uma peça é verticalmente simétrica, os resultados obtidos quando se analisa a totalidade da peça ou apenas metade da peça têm que ser idênticos. Como a quantidade de elementos está diretamente ligada à velocidade de processamento do programa, a hipótese de considerar apenas metade da peça

que se está a estudar salta à vista e portanto foi levado a cabo um estudo sobre este assunto (Figura 3.16).

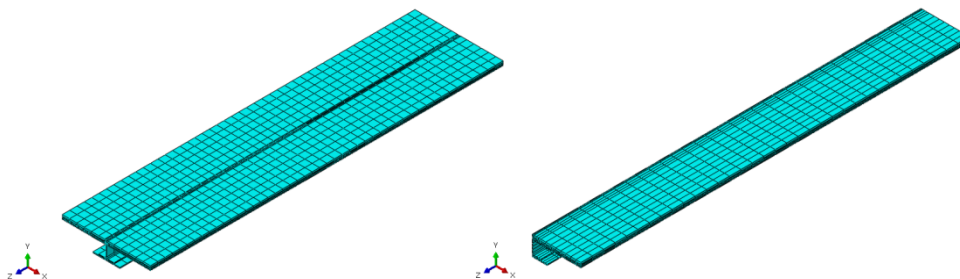


Figura 3.16 - Modelo da viga total e meia secção.

Após a aplicação da mesma carga a cada um dos modelos e feita a discretização de igual forma, retiraram-se as curvas força-deslocamento de ambos os modelos (Figura 3.17). Foram criadas novas condições de apoio para o modelo com metade da secção que restringem o deslocamento lateral dos elementos de forma a simular a simetria desta.

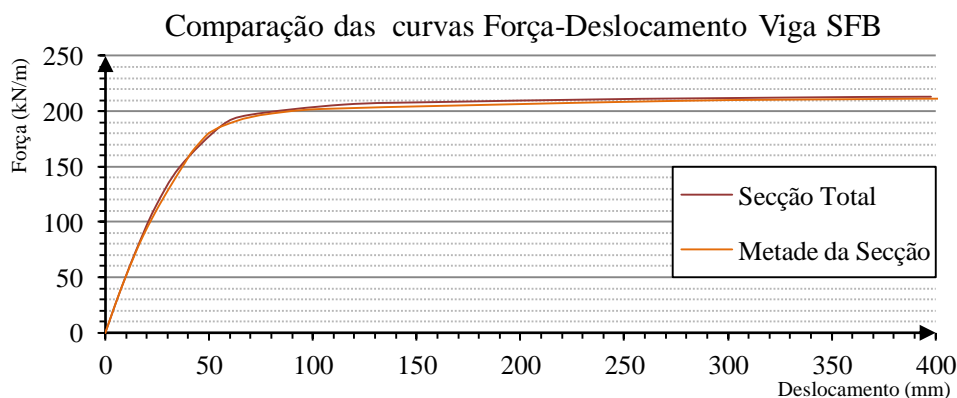


Figura 3.17 - Curvas força deslocamento dos modelos de secção total e meia secção.

Pode-se verificar pela Figura 3.17 que praticamente não existe diferença entre analisar a viga com a totalidade da secção ou apenas com metade. Como serão analisados um elevado número de modelos, de forma a reduzir o tempo de cálculo de cada um deles, optou-se por usar esta simplificação e apenas considerar metade da secção a analisar.

O segundo passo desta calibração do modelo é o estudo da convergência da malha que permite saber até que ponto o refinamento da sua discretização deixa de ter influência nos resultados obtidos. Para reduzir o esforço computacional, excluiu-se a laje de betão do modelo anteriormente referido e analisou-se apenas a viga SFB. Testaram-se então vigas em que os elementos finitos apresentam afastamentos com 0,5%, 1%, 2%, 3% e 5% do vão (6 metros)

que correspondem respetivamente a medidas de 30, 60, 120, 180 e 300 milímetros tanto na direção transversal (Figura 3.18) como na direção longitudinal da viga (Figura 3.19).

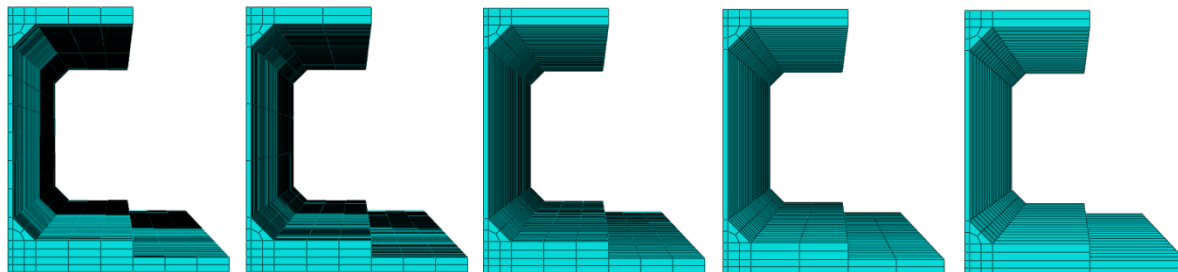


Figura 3.18 - Discretizações de meia secção transversal com espessuras dos elementos de 0,5%, 1%, 2%, 3% e 5% do vão respetivamente.

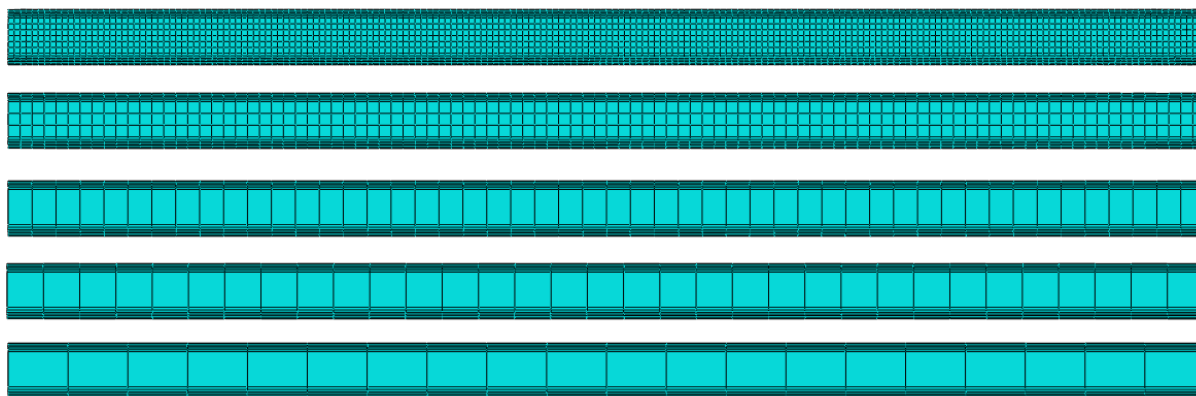


Figura 3.19 - Discretizações da secção longitudinal com espessuras dos elementos de 0,5%, 1%, 2%, 3% e 5% do vão respetivamente.

Para cada uma das discretizações referidas foram obtidos gráficos força-deslocamento (Figura 3.20) e analisaram-se os resultados de forma a entender a influência da discretização longitudinal e transversal para os resultados.

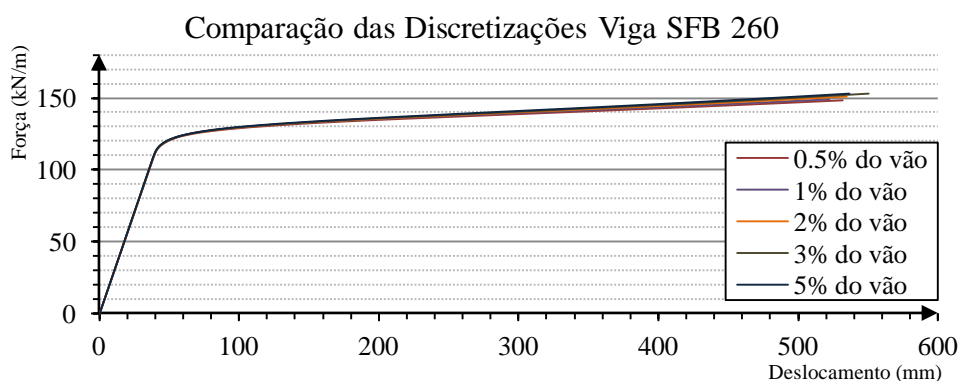


Figura 3.20 - Curvas força deslocamento para as diferentes discretizações.

Como era de esperar, este tipo de discretização não tem grande impacto nos resultados obtidos pois tratam-se de valores muito reduzidos. Se o comprimento dos elementos fosse maior a curva força-deslocamento seria menos precisa. No entanto entre as discretizações de 0,5% e 5% do vão já se nota uma ligeira diferença para valores de deslocamentos superiores a 300 milímetros. Os resultados adquiridos demonstram que não existiria qualquer problema em assumir uma discretização de 300 milímetros mas, de forma a obter resultados mais precisos e como de dispõe de uma máquina com uma velocidade de processamento razoável optou-se pelo uso de uma discretização com 60 milímetros de afastamento (1%). Este estudo de calibração foi realizado para todos os tipos de vigas a estudar e em qualquer uma delas foi considerada apenas metade da secção e uma discretização de 60 milímetros.

Para analisar a influência da largura efetiva da viga mista existem várias hipóteses. Uma destas hipóteses poderia ser através do caminho de tensões e avaliar a partir de que largura as tensões uniformizavam, no entanto optou-se por testar uma largura efetiva e ir aumentando sucessivamente o seu valor para observar a partir de qual, o seu aumento não influenciava a resistência da viga. Como já referido anteriormente, usando o valor da largura efetiva do Eurocódigo 4 como base ($L/4$), obteve-se as larguras a considerar: 0%, 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175% (Figura 3.21).

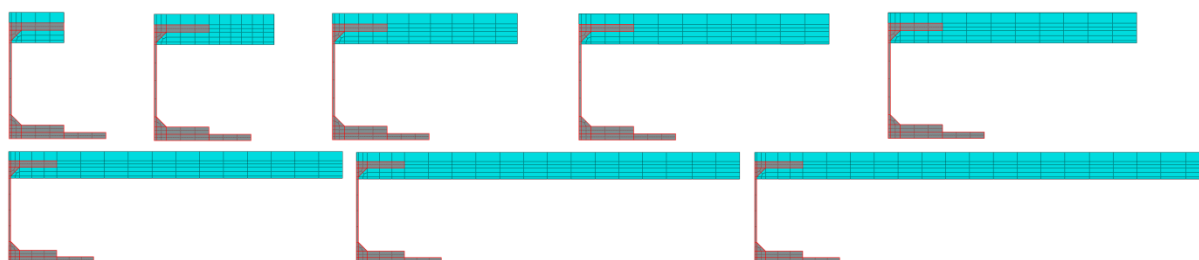


Figura 3.21 - Larguras efetivas a estudar (0%, 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175%)

Após a repetição desta modelação para as restantes vigas mistas do tipo SFB com diferentes dimensões, apenas falta retirar os resultados de cada um dos modelos.

3.6.3 Viga ITB - *Integrated Floor Beam*

O comportamento da viga *integrated floor beam* (IFB) é praticamente idêntica à da viga SFB, portanto consideraram-se praticamente as mesmas metodologias. Para o modelo do pavimento de 30 centímetros criou-se uma *part*, e com a ajuda de partições gerou-se uma malha de elementos finitos com o mesmo tipo de elementos C3D8R/C3D8RH (Figura 3.22).

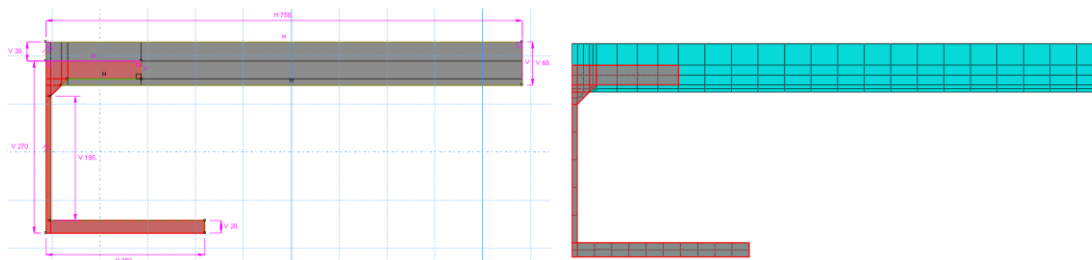


Figura 3.22 - Sketch da viga mista IFB do pavimento com 30cm de espessura e respetiva malha de elementos finitos.

A calibração desta viga foi idêntica à da secção anterior, portanto realizou-se um estudo de simetria e convergência da malha de elementos finitos. Para aumentar a velocidade de processamento o estudo levado a cabo foi apenas para a viga metálica (Figura 3.23).

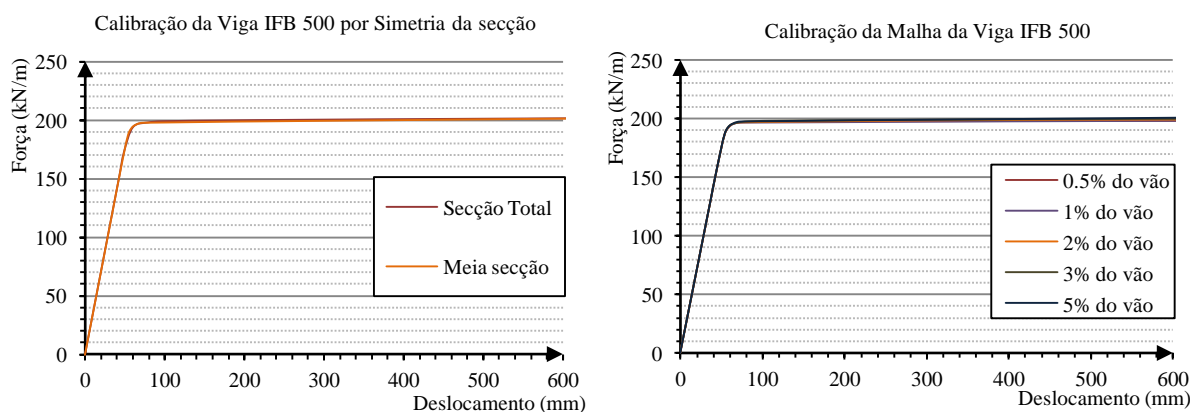


Figura 3.23 - Curvas força-deslocamento da calibração da simetria da secção e de convergência da malha de elementos finitos.

Uma vez mais verifica-se que não existe qualquer problema em considerar apenas metade da secção para o cálculo e uma discretização até 5% do vão.

3.6.4 Viga ITB - *Inverted T Beam*

A viga *Inverted T Beam*, que consiste em duas chapas soldadas, tem um comportamento ligeiramente diferente das secções mencionadas anteriormente. O facto de conter uma menor área de aço acima do eixo neutro, faz com que seja o betão a resistir a todas as tensões de compressão e portanto este tem um papel fundamental na rigidez da viga. Por esta razão, a referida viga mista dispõe de uma espessura de betão muito maior do que as restantes vigas, sendo esta por vezes o dobro das remanescentes. Esta viga dispõe de dois conectores soldados na chapa vertical, mas como nesta análise numérica será considerada conexão total entre o aço e o betão, os conectores não serão considerados nos modelos numéricos. Mais uma vez,

usando o mesmo tipo de elementos finitos das vigas SFB e IFB, criou-se um sketch e gerou-se a malha da viga ITB do pavimento com 30 centímetros de espessura (Figura 3.24).

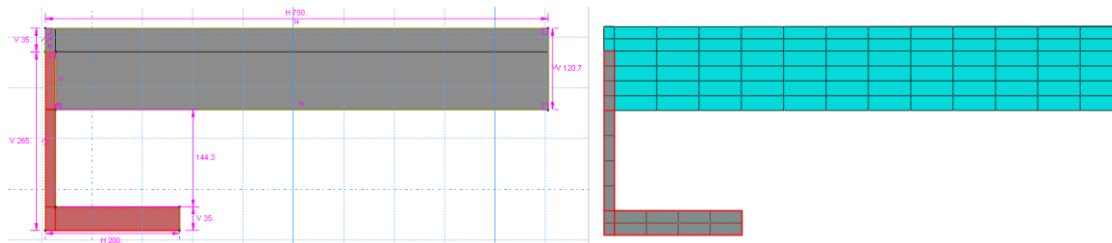


Figura 3.24 - Sketch da viga mista ITB do pavimento com 30cm de espessura e respetiva malha de elementos finitos.

Na Figura 3.25 encontram-se os resultados da calibração da simetria e da malha de elementos finitos da viga mista do pavimento em causa. Mais uma vez chegou-se à conclusão das vigas anteriores e optou-se pela mesmas consideração.

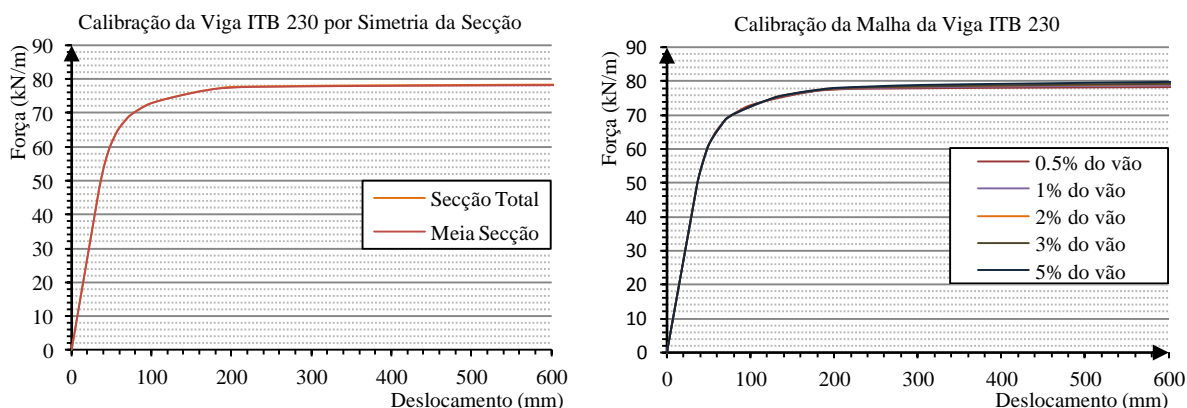


Figura 3.25- Curvas força-deslocamento da calibração da simetria da secção e de convergência da malha de elementos finitos.

Como este tipo de viga não dispõe de um banzo superior de aço, existe uma consola de betão praticamente igual á largura efetiva que se está a analisar e quando esta toma valores elevados (maior do que 50% do B_{eff} do Eurocódigo (CEN, 2004b)) deforma-se bastante e não se sabe até que ponto esta deformação influencia os resultados (Figura 3.26). O betão considerado apenas funciona à compressão, no entanto esta flecha pode levar à existência de tensões de tração indesejadas.

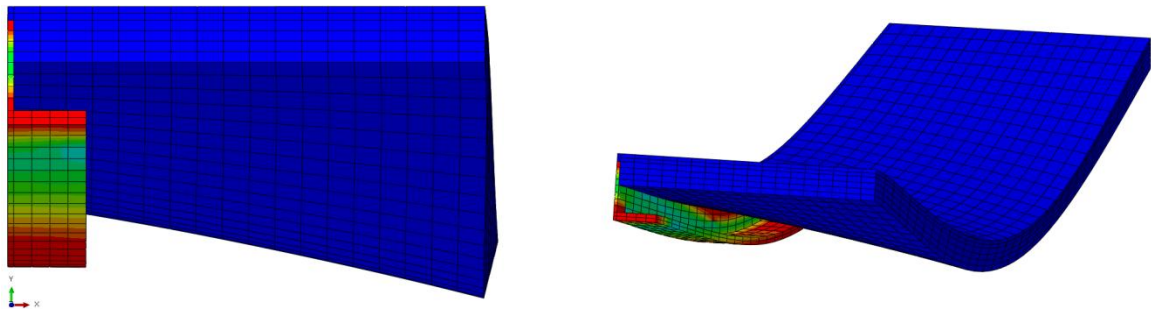


Figura 3.26 - Deformação da viga ITB para um B_{eff} de 100% do Eurocódigo.

De forma a avaliar a influência da deformação na consola de betão nos resultados, optou-se pelo uso de molas na extremidade desta, no entanto devido às dificuldade da obtenção do valor de rigidez e da sua variação ao longo do plano longitudinal da viga, decidiu-se sofisticar o modelo e modelar fisicamente a chapa colaborante da viga (Figura 3.27). Esta decisão foi tomada após alguma reflexão pois era necessário oferecer rigidez ao modelo no plano transversal da viga e não se pretendia qualquer tipo de rigidez (ou alguma que pudesse ser desprezável) no plano longitudinal à viga. Portanto a melhor escolha foi a de modelar a chapa, pois esta oferece um aumento de inércia significativa na direção x e um valor desprezável na direção y . Na realidade, a chapa colaborante está soldada no banzo inferior da viga, mas para o aumento de rigidez ser desprezável na direção longitudinal e para o modelo não ficar extremamente pesado do ponto de vista computacional, não se ligou a chapa ao banzo inferior da viga e deixou-se a um afastamento da alma igual à espessura de betão real.

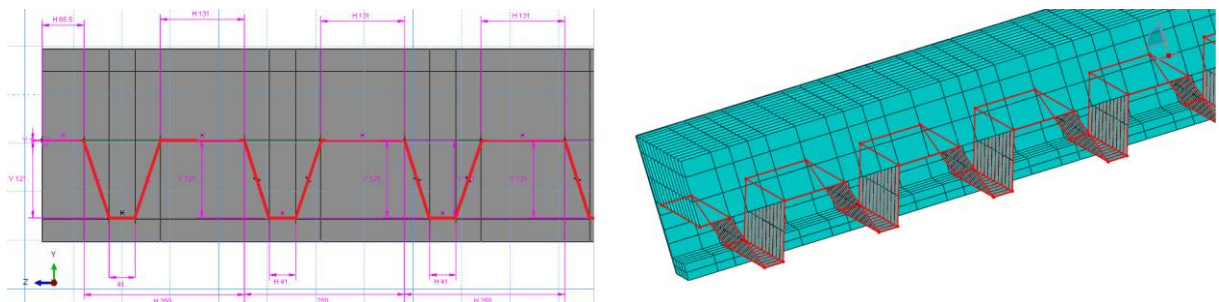


Figura 3.27 - Sketch da chapa colaborante.

Recorrendo ao trabalho realizado por José Almeida (Almeida, 2011), retiraram-se as dimensões da chapa colaborante a colocar no programa Abaqus. Quanto ao tipo de material, este é um enformado a frio e provém de uma bobina de chapa galvanizada de zinco por imersão a quente e possui uma tensão de cedência e de rotura de $320 N/mm^2$ e $390 N/mm^2$ respetivamente. Todas as chapas colaborantes utilizadas nos modelos contêm uma espessura de 1 milímetro. Devido à geometria da chapa, e pelo facto de esta apenas estar em contacto com grande parte da consola de betão, é necessário recorrer novamente ao uso de partições

para se poder criar uma malha de elementos finitos aceitável. Na Figura 3.28 pode-se visualizar o modelo sem partições e a respetiva malha de elementos finitos que está incompleta pois, como na zona da chapa colaborante é extremamente difícil criar uma malha e provavelmente os seus resultados seriam muito distantes da realidade, o programa não assume qualquer discretização. O programa atribui cores a *parts* do modelo de elementos finitos (verde - amarelo - castanho) que representam o grau de dificuldade de se efetuar uma discretização com resultados aceitáveis.

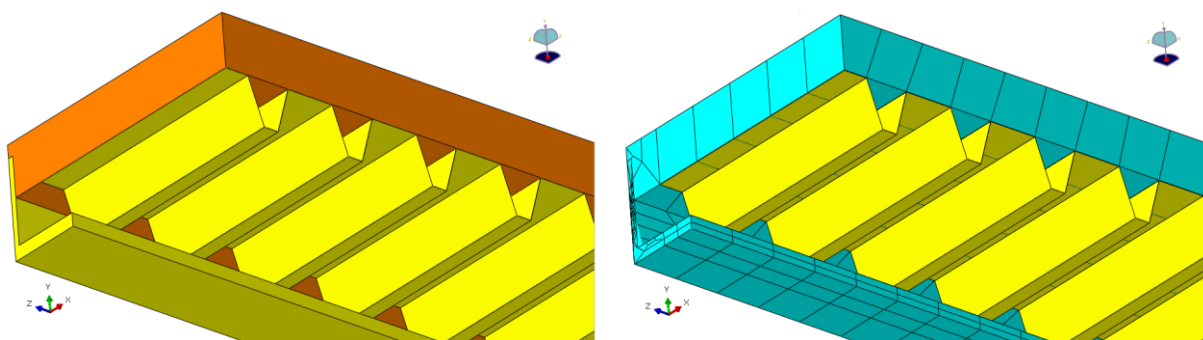


Figura 3.28 - Modelo sem partições e respetiva malha de elementos finitos.

Devido a este fenómeno, criaram-se partições em todas as mudanças de direção longitudinal da chapa e zonas de contacto entre o aço e o betão até que o programa assumisse que a discretização fosse aceitável e que os seus resultados fossem admissíveis (modelo com cor verde) (Figura 3.29). Note-se que a parte de betão não se alterou pois apenas se pretende simular o volume que está a compressão.

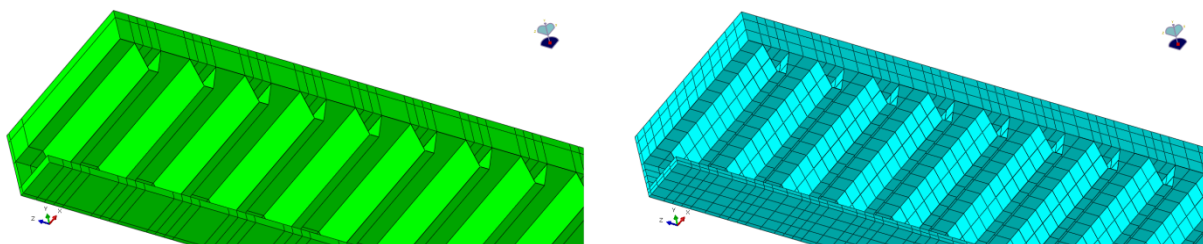


Figura 3.29 - Modelo com partições e respetiva malha de elementos finitos.

Após a disputa com todos os problemas que surgiram na modelação da chapa colaborante, retirou-se a deformada da viga para avaliar qual o comportamento da consola de betão (Figura 3.30). O aumento de rigidez que a chapa colaborante oferece à viga no plano transversal é suficiente para que o betão não se deforme excessivamente e traduza o seu comportamento real de compressão.

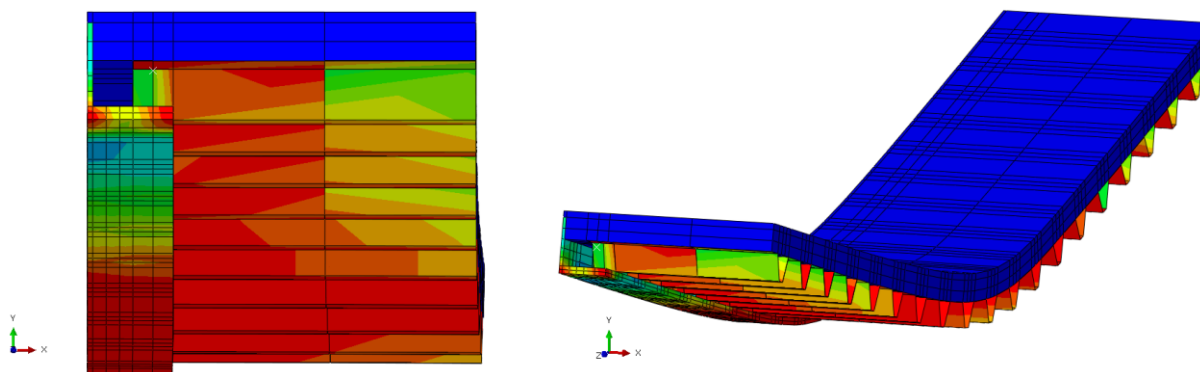


Figura 3.30 - Deformação da viga ITB com chapa colaborante para um B_{eff} de 100%.

No entanto, não basta comparar deformações, é necessário observar as curvas força-deslocamento e conhecer o aumento de carga provocado pela chapa colaborante. Pela Figura 3.31 pode-se visualizar uma ligeira diferença na força resistente da viga. Claro está que esta pode ser desprezada pois, após a execução de todos os modelos com os diferentes B_{eff} para a viga ITB 230, concluiu-se que o acréscimo de carga varia entre 1% – 2% da totalidade da carga. No entanto devido à sofisticação do modelo adquirida e à fidelidade deste, propôs-se modelar todas as vigas do tipo ITB e HB com a chapa colaborante, pois são estas que dispõem de uma menor quantidade de aço na parte superior da viga e provocam uma maior deformação na lâmina de betão. Caso ensaios experimentais forem levados a cabo sobre esta matéria, este refinamento do modelo de cálculo pode levar a uma melhor calibração de resultados.

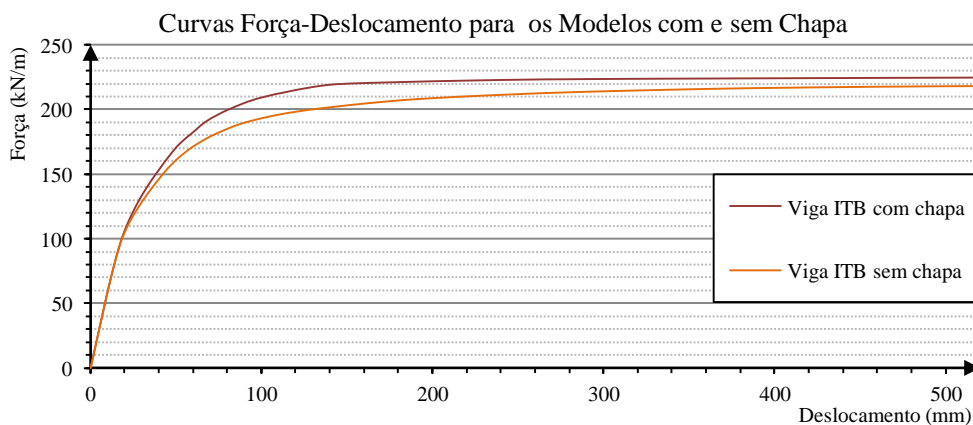


Figura 3.31 - Comparação dos modelos com e sem chapa colaborante.

3.6.5 Viga HB - HatBeam

Tal como as restantes vigas, foi efetuado um estudo de simetria e de convergência da malha de elementos finitos. Na Figura 3.32 está representado o sketch de metade da secção

transversal da viga *hatbeam* de 30 centímetros de espessura e respetiva malha de elementos finitos. Mais uma vez, por questões de velocidade de processamento, será efetuado o estudo de simetria e de convergência da malha de elementos finitos apenas para a viga metálica.

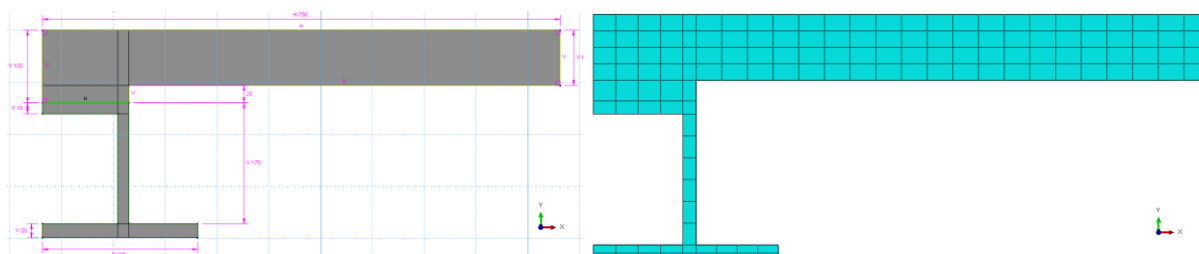


Figura 3.32 - Sketch e malha de elementos finitos de meia secção transversal da viga HB.

Na Figura 3.33 estão representadas as curvas força-deslocamento para o estudo de simetria e de convergência da malha de elementos finitos. Adotaram-se as mesmas considerações tomadas em todas as vigas representadas até à data. Como já anteriormente referido, a viga *HatBeam* sofre o mesmo fenómeno da *Inverted T Beam* relativamente à deformação excessiva da parte de betão no modelo numérico (Figura 3.34). Uma vez mais era provável que existissem tensões de tração indesejadas, o que poderia influenciar os resultados. Para contornar este problema, optou-se novamente por modelar fisicamente a chapa colaborante e observar o impacto que esta teria nos cálculos.

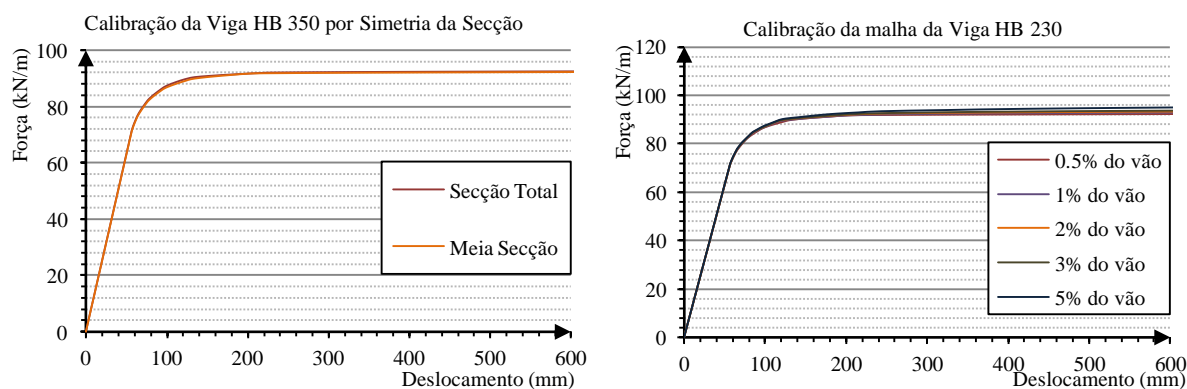


Figura 3.33 - Curva força-deslocamento para a viga "*Hatbeam*"

Com as dimensões da chapa obtidas no trabalho realizado por José Almeida (Almeida, 2011), introduziu-se esta num novo *Sketch* do Abaqus (Figura 3.35). Nesta figura pode-se observar também a malha de elementos finitos que tal como na viga ITB, foi necessário recorrer ao uso de um número elevado de partições de forma o programa conseguir compor uma discretização com elementos do mesmo tipo, sendo estes C3D8R/C3D8RH para o betão e o aço respetivamente.

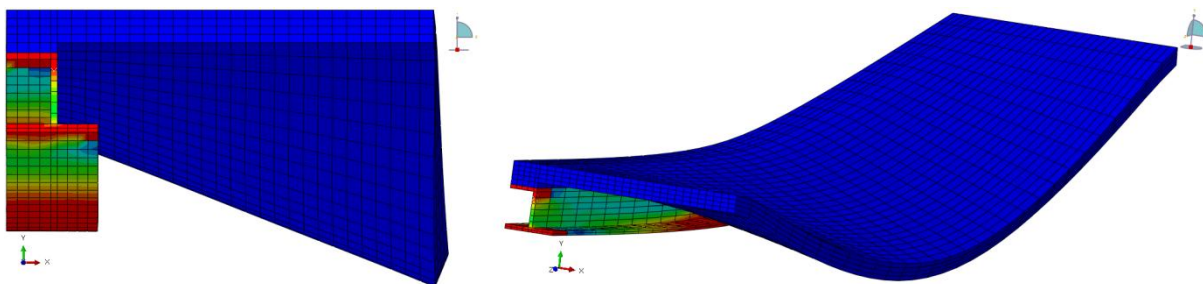


Figura 3.34 - Deformação da viga HB para um B_{eff} de 100% do Eurocódigo.

Uma vez mais foram comparadas as deformações de ambas as vigas e, através da Figura 3.36, pode-se concluir que existe uma deformação menos acentuada no plano transversal da viga. Não será escusado referir que para este modelo o betão também se deforma, no entanto esta deformação está mais próxima da flecha real tendo em conta que as vigas terão um afastamento de 3 metros.

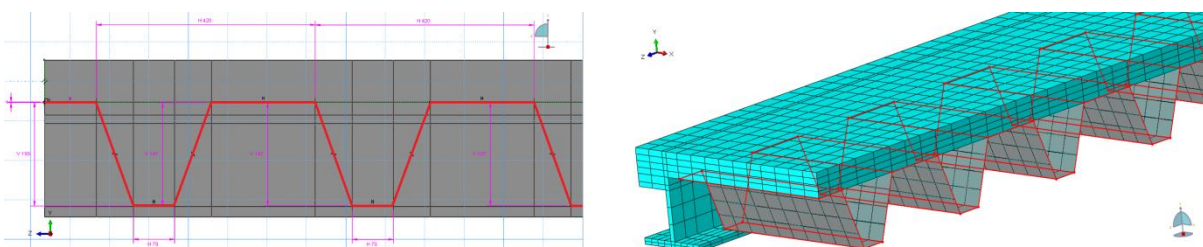


Figura 3.35 - Sketch da chapa colaborante e respetiva malha de elementos finitos.

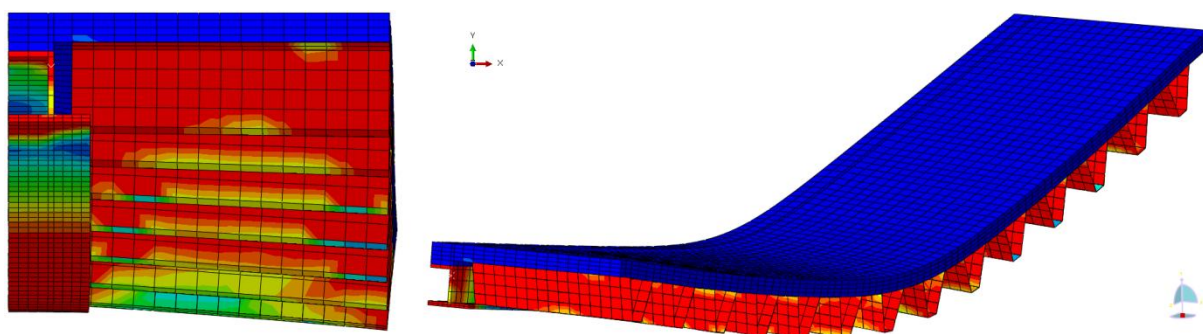


Figura 3.36 - Deformação da viga HB com chapa colaborante para um B_{eff} de 100%.

As curvas força-deslocamento dos presentes modelos podem ser observadas na Figura 3.37. A chapa colaborante gera um aumento de carga resistente de cerca de 5%, que já é um valor considerável. Portanto para a viga *HatBeam* a consola de betão pode ter uma influência significativa para os B_{eff} maiores e como a solução com chapa é a que está mais próxima da realidade, será considerada para o cálculo numérico da presente viga.

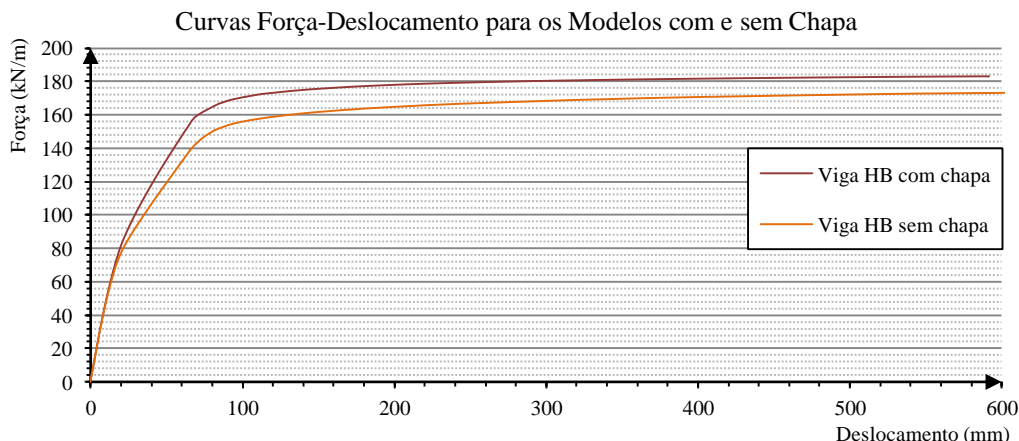


Figura 3.37 - Comparação dos modelos com e sem chapa colaborante.

3.7 Vigas em conexão parcial

Pretende-se com a realização desta dissertação a avaliação da resistência e da rigidez de vigas mistas do tipo "slim floor" com conexão total entre o aço e o betão. No entanto esta conexão total pode não acontecer na realidade pois, embora exista sempre atrito entre o aço e o betão, a transmissão mecânica das tensões de corte longitudinal através dos conectores pode não ser suficiente para atingir esta condição (conexão total). Teoricamente para existir conexão total é necessário que a força transmitida entre o aço e o betão seja superior à força resistente de cada um destes materiais, ou seja, a conexão total é obtida quando o número de conectores é igual ou superior aos que seriam necessários para assegurar a mobilização do momento plástico resistente da secção mista. Portanto levou-se a cabo a execução e o estudo de vários modelos a fim de simular apenas esta conexão entre o aço e o betão. Este estudo foi efetuado apenas para as vigas ITB e HB pois, devido à sua geometria, são as que exigem um estudo mais pormenorizado relativamente ao seu comportamento quando sujeito a cargas. Desta forma, o número de conectores necessários para cada viga foi obtido dividindo a força de corte atuante (F_p) pela força resistente de cada conectores ao corte (Q_p), sendo esta última 80% da força resistente do conector.

3.7.1 Viga ITB

A viga *inverted T beam* escolhida para a modelação em conexão parcial correspondente à mesma viga mista apresentada no ponto referente à discretização da malha de elementos finitos anteriormente descrita neste capítulo. Este modelo verifica-se verdadeiramente mais complexo do que qualquer um dos apresentado até ao presente ponto desta dissertação. Para além dos passos de modelação demonstrados para as restantes vigas mistas, neste modelo é necessário abrir cortes em vários sítios com precisão, unir *parts* e ainda criar interações entre o aço e o betão. Foram então criadas duas *parts* no *Abaqus*, uma para a viga metálica e outra

para a viga de betão (Figura 3.38 e Figura 3.39). Na modelação, os conectores foram considerados soldados à viga metálica, na parte lateral da chapa vertical, e que a sua rotura não seria por corte da soldadura em questão. Estes conectores têm comportamento elástico-plástico perfeito e o seu material é constituído por um aço com tensão de cedência de 450 kN/mm^2 . Quanto à geometria, foram usados conectores Nelson KB (5/8)" que têm 16 milímetros de diâmetro e 35 milímetros de altura. Na *part* com a lâmina de betão, foram efetuados *cuts* cilíndricos na zona de penetração dos conectores de forma a simular a realidade. Nesta viga foram usados 16 conectores de cada lado do eixo de simetria espaçados 37,5 centímetros. Na Figura 3.39 também se pode observar a chapa colaborante da respetiva viga.

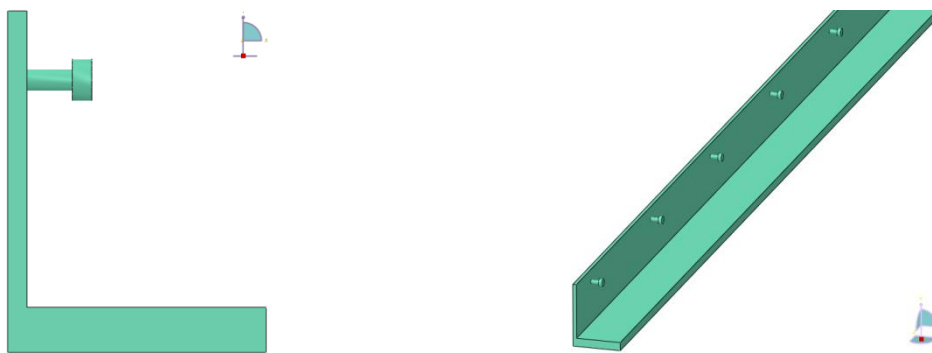


Figura 3.38 - *Part* da viga metálica com conectores.

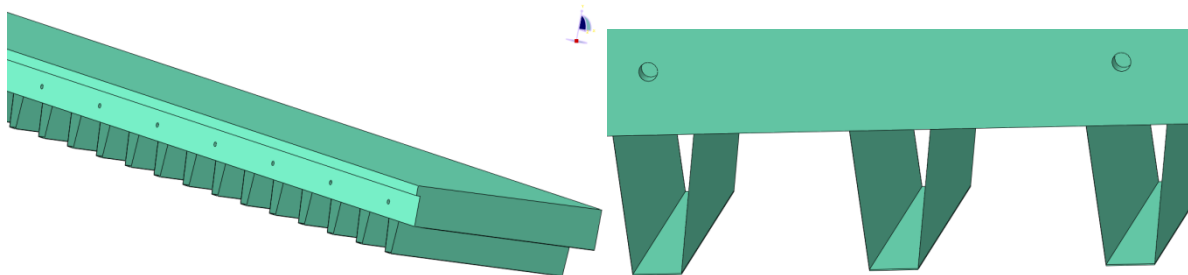


Figura 3.39 - *Part* da lâmina de betão com *cuts* para os conectores.

Após a execução de todos os passos correspondentes à geometria da peça, é necessário formular uma vez mais a malha de elementos finitos da respetiva viga mista. Será criada uma malha para cada *part* em separado. Refere-se ainda que os conectores apresentam uma geometria cilíndrica que, como contém uma base circular, torna-se difícil a elaboração de uma malha de elementos finitos que forneça resultados plausíveis. Desta forma é necessário a geração de partições de modo a obter quatro quartos de círculo, que expõe uma geometria mais acessível à formulação da malha de elementos finitos (Figura 3.40). Após o refinamento da malha nos conectores, facilmente se efetuou a malha para a restante viga metálica. Na *part* de betão foi necessário o uso de um abundante número de partições de forma a gerar uma

malha que forneça confiança para extração de resultados (Figura 3.41). Na fase *interaction* define-se o contacto entre os conectores de aço e a lamina de betão. Para tal criou-se uma nova interação usando a opção *surface-to-surface*, seleccionando as superfícies desejadas e atribuindo um coeficiente de atrito de 0,25 entre os dois materiais. Este coeficiente de atrito foi definido com base no estudo levado a cabo por Joadéio Soares (Soares, 2006) sobre a relação entre os elementos de aço e betão, que sugere o uso de um coeficiente de atrito entre 0,2 e 0,5 dependendo do nível de aderência entre estes dois materiais. Através do *assembly*, uniram-se ambas as *parts* criadas de forma a estas funcionarem como uma só. Quanto às condições de apoio e à carga aplicada, usou-se o mesmo critério das restantes vigas apresentadas até ao momento.

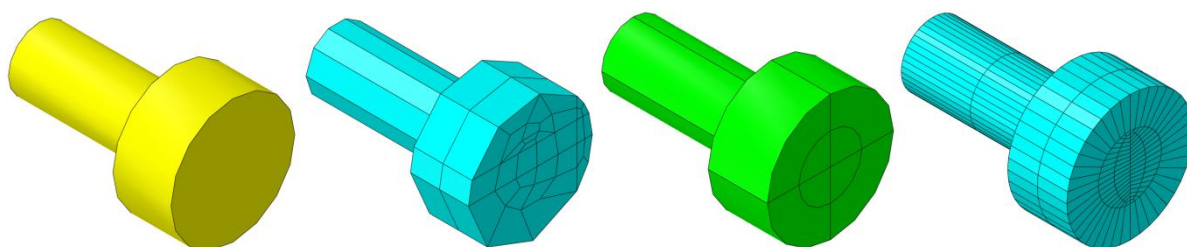


Figura 3.40 - Refinamento da malha de elementos finitos de um conector.

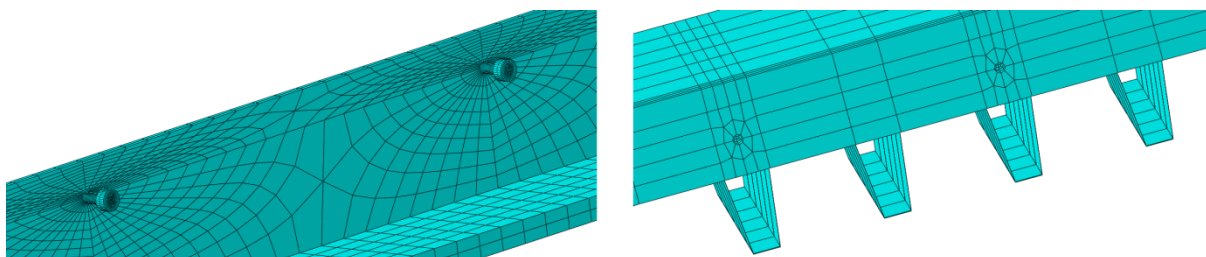


Figura 3.41 - Malha de elementos finitos da *part* da viga metálica e de betão respetivamente.

3.7.2 Viga HB

A viga mista seleccionada para o uso de conexão parcial correspondente a aquela que possui uma espessura de 30 centímetros. Sendo que nesta viga os conectores encontram-se no topo da viga metálica. Efetuando os mesmos passos expressos no subcapítulo anterior, criaram-se *parts* para o aço e o betão respetivamente (Figura 3.42 e Figura 3.43) e formulou-se uma discretização para cada uma delas (Figura 3.44).

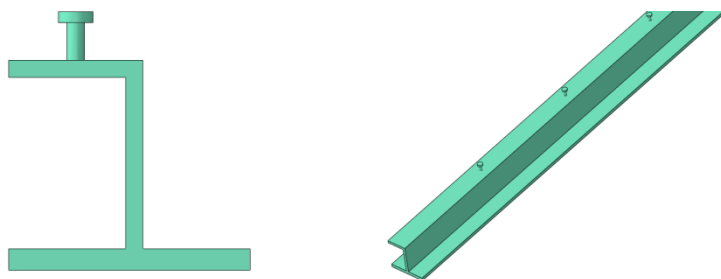


Figura 3.42 - *Part* da viga metálica com conectores.

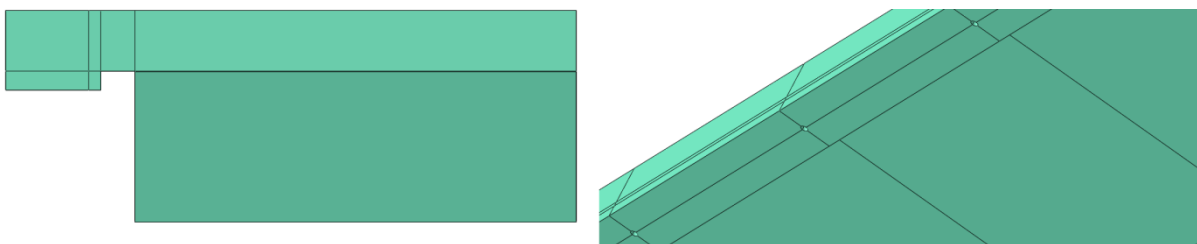


Figura 3.43 - *Part* da lâmina de betão com *cuts* para os conectores.

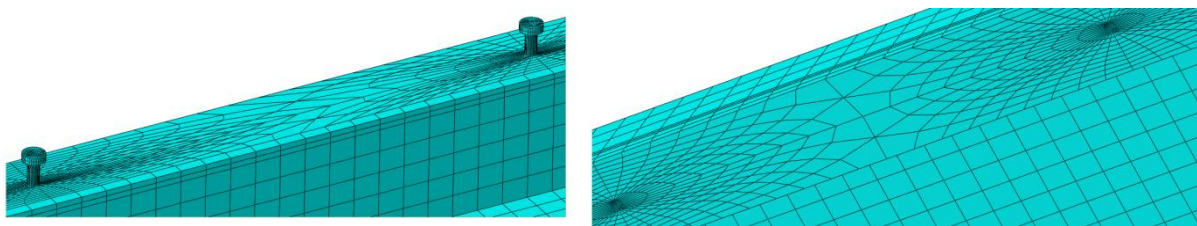


Figura 3.44 - Malha de elementos finitos da *part* da viga metálica e de betão respetivamente.

Uma vez mais atribuiu-se uma interação de superfície com superfície a fim de simular contacto entre os conectores de aço e o betão com um coeficiente de atrito de 0,25. Novamente juntaram-se ambas as *parts* através do *assembly* e por fim definiram-se as condições de apoio e a carga aplicada na viga mista.

4º CAPÍTULO - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução aos resultados

Correntemente as estruturas são dimensionadas para condições de rotura (ULS) e condições de serviço (SLS) sendo que a primeira certifica-se que a estrutura resiste a uma carga última imediatamente antes do colapso desta, quer seja por perda de equilíbrio ou deformação excessiva, mesmo não importando a sua danificação. As condições de serviço impõem que a estrutura resista a todas as condições normais de utilização sem que esta sofra deformações excessivas que coloquem em causa a sua estética e fomentem um possível desconforto para quem a utilizar.

Cada uma das secções das vigas estudadas foi analisada para ambos os estados limites últimos e de utilização. As curvas força-deslocamento retiradas do *Abaqus* foram obtidas através de incrementos de carga numa viga até à rotura. Portanto o valor máximo desta curva representa o valor que esta toma para condições ultimas. Pelo Eurocódigo 4 (CEN, 2004b) sabe-se que a limitação de deformação máxima de uma viga pode ser dada pela expressão $L/250$ dependendo da função da viga, em que L é o seu comprimento. Nesta dissertação adotou-se esta limitação, portanto, para os estados limites de serviço, as vigas de 3, 6 e 9 metros, o limite da flecha é de 12, 24 e 36 milímetros respetivamente. No entanto, pretende-se também analisar qual a diferença entre o dimensionamento pelos estados limites de utilização e últimos.

Neste capítulo serão apresentados os resultados apenas para as vigas mistas de 30 e 15 centímetros, no entanto, devido há limitação de espaço, os resultados das restantes vigas mistas encontram-se em anexo. Os valores adquiridos do programa *Abaqus* provenientes da modelação apresentada e explicada no capítulo 3. Contudo pretende-se elucidar a forma como se retiraram os valores do referido programa, qual a sua fiabilidade e que problemas poderão ocorrer na sua extração.

Para cada uma das tipologias apresentadas no capítulo 3 (Figura 3.3 - Figura 3.6), serão estudadas secções transversais com diferentes dimensões de perfis, comprimentos e espessuras de chapa. No Quadro 4.1 estão todos os dados necessários, relativos à geometria das vigas, para o seu estudo numérico. Estas diferentes geometrias servem para se poder analisar com maior rigor o comportamento das vigas quando sujeitas a cargas e de que forma

este comportamento varia com as dimensões dos perfis. Os critérios utilizados para a obtenção das dimensões escolhidas encontram-se apresentadas no trabalho realizado por José Almeida (Almeida, 2011).

Quadro 4.1 - Dados das secções mistas estudadas (Almeida, 2011).

H (cm)	Secção metálica	A (cm ²)	D (mm)	D (mm)	D (mm)	V (m ³ /m ²)	Resultados (kN/m)**
30	SFB HEB260 + 460x15	187,40	25	85	200	0,151	210,76
	IFB (1/2)HEB500 + 500x20	219,30	30	80	200	0,146	224,61
	ITB 230x30 + 400x35	209,00	35	142	158	0,196	217,36
	HB (1/2)350x250x16 + 460x15	179,50	105/25*	80	200	0,146	168,03
25	SFB HEB260 + 460x15	138,10	35	77	158	0,131	132,24
	IFB (1/2)HEB400 + 500x20	198,90	30	72	158	0,126	183,46
	ITB 230x30 + 400x35	168,75	25	113	137	0,159	146,06
	HB (1/2)350x250x16 + 460x15	155,05	105/25*	93	137	0,139	126,05
20	SFB HEB260 + 460x15	90,30	30	53	137	0,099	71,71
	IFB (1/2)HEB320 + 500x15	155,70	25	48	137	0,094	111,68
	ITB 230x30 + 400x35	120,00	25	99	101	0,131	89,26
	HB (1/2)350x250x16 + 460x15	124,15	95/25*	84	101	0,116	79,60
17,5	SFB HEB260 + 460x15	77,00	25	59	106	0,091	57,17
	IFB (1/2)HEB260 + 460x12	114,40	33	57	106	0,089	66,73
	ITB 230x30 + 400x35	115,00	25	101	74	0,117	69,23
	HB (1/2)350x250x16 + 460x15	118,55	85/25*	80	80	0,099	64,86
15	ITB 105x15 + 360x20	87,75	25	76	74	0,092	43,36
	HB (1/2)120x200x14 + 450x15	107,33	75/25*	61	74	0,077	46,40

*distância entre o banzo superior e o topo de perfil/recobrimento acima do conector metálico

**Resultados da tese do José Almeida

Novamente pelo estudo de José Almeida (Almeida, 2011), adquiriram-se os perfis de chapa colaborantes usadas no dimensionamento de cada uma das vigas (Quadro 4.2). No cálculo analítico estes perfis serviram para obter a espessura do betão a usar mas no cálculo numérico estas possuíram o importante papel de diminuir as deformações do betão.

Quadro 4.2 - Chapa colaborante em uso por cada viga.

Chapa Colaborante	altura	largura banda	largura ranhura superior	largura ranhura inferior	Pavimento			
					SFB	IFB	IFB	HB
80/260	80	260	90	34			ITB 15	HB 17,5; HB 15
85/280	85	280	161	40	SFB 17.5		ITB 17,5	
100/275	101	275	135	40			ITB 20	HB 20
106/250	106	250	110	40		IFB 20		
135/310	137	310	166	43	SFB 20	IFB 25	ITB 25	HB 25
160/250	158	250	131	41	SFB 25	IFB 25	ITB 30	
200/420	200	420	199	79	SFB 30	IFB 30		HB 30

4.2 Avaliação da resistência dos diferentes pavimentos de 30 centímetros

4.2.1 SFB - Slimflor Beam

A extração de uma curva força-deslocamento no *Abaqus* não é direta. Antes de calcular o modelo numérico é necessário definir que tipo de output se pretende que o programa forneça. Deste modo apenas se obtém o desejado e não é necessário calcular informação que não se vai utilizar, reduzindo assim o tempo de processamento. No corrente modelo solicitou-se que o programa disponibilizasse as tensões, esforços, deslocamentos e tensões de contacto. Note-se que cada um destes resultados são nodais, portanto para obter uma curva força-deslocamento é necessário analisar um conjunto de nós. De forma a se conseguir a variação de deslocamento por incremento de carga na viga escolheu-se um nó a meio vão, pois é este que irá possuir maior deslocamento. Escolhendo os dois "Reference Points" introduzidos em cada extremidade da viga, pode-se retirar a força de cada uma das respetivas reações de apoio (Figura 4.1).

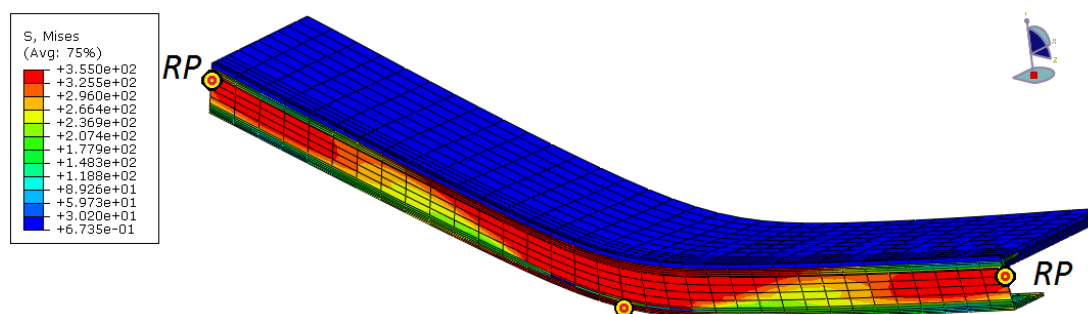


Figura 4.1 - Pontos de referência nas extremidades e ponto a meio vão.

Somando a força vertical (kN) captada pelos *reference points* (sendo a força vertical de cada *reference point* a soma da força de todos os pontos da extremidade correspondente) para cada incremento de carga, pode-se combinar com o valor do deslocamento no ponto a meio vão no respetivo incremento. Como, devido à simetria, se modelou apenas metade da viga, é necessário multiplicar por dois a força vertical total da viga. Notando que se pretende uma curva que traduza o deslocamento da viga consoante a carga aplicada em (kN/m), então dividindo a força vertical pelo comprimento da viga obtém-se a carga por metro linear.

De seguida serão apresentados os gráficos contendo as curvas força-deslocamento para as vigas mistas com 30 e 15 centímetros de altura. Nestes gráficos estão expostos os resultados de cada largura efetiva considerada, tendo sido usada sempre a mesma cor para cada uma delas. As retas horizontais a traço picotado representam os valores obtidos analiticamente, sendo o seu valor representado à direita.

Na Figura 4.2 estão as curvas força-deslocamento dos diferentes B_{eff} para a viga mista de 6 metros com 30 centímetros de espessura. As retas horizontais deste gráfico representam os resultados obtidos analiticamente pelas expressões descritas por José Almeida (Almeida, 2011) para o cálculo da carga resistente. As curvas foram retiradas do programa *Abaqus* e no que toca à resistência máxima desta, nota-se claramente uma diferença de capacidade de carga entre a largura efetiva de 0% do Eurocódigo (CEN, 2004b) e de 175%.

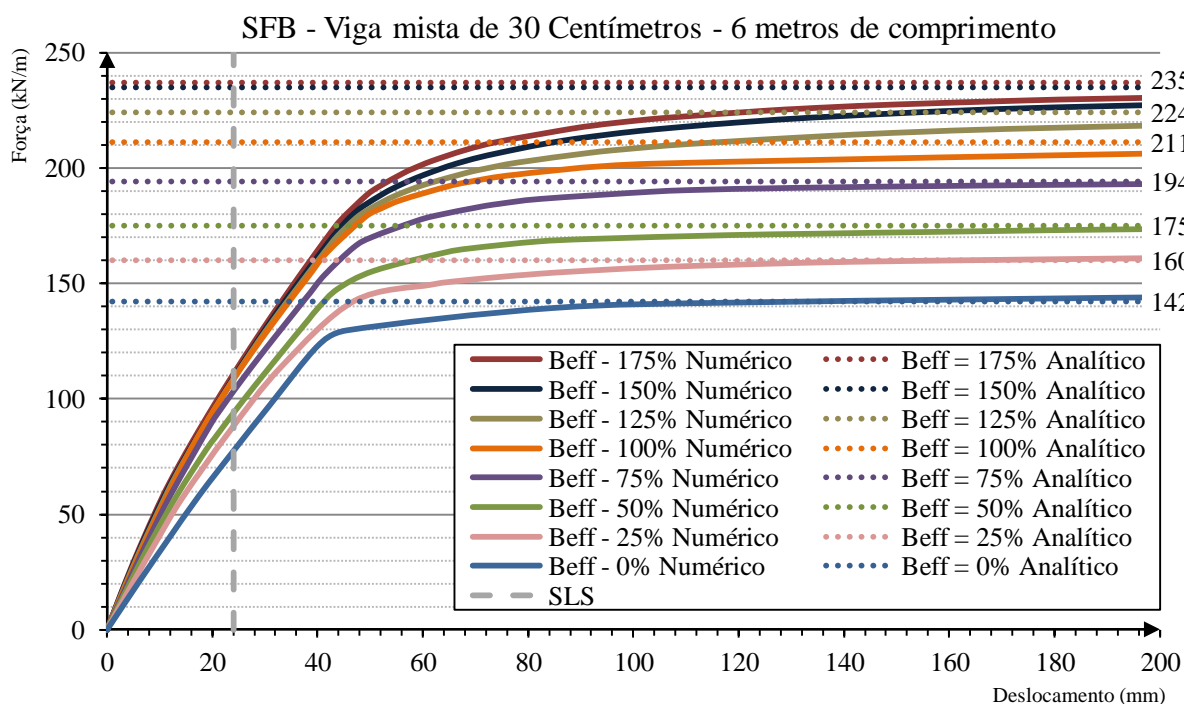


Figura 4.2 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 6 metros.

Tal como esperado, para larguras efetivas baixas a resistência da viga aumenta consideravelmente, mas quando estas tomam valores elevados, a resistência tende a convergir para um valor. A rigidez da viga tem um papel importante nos resultados obtidos e esta aumenta significativamente de modelo para modelo, como seria de esperar.

Neste tipo de pavimento, esta convergência de carga sucedeu para valores de largura efetiva superiores a 150% $B_{eff,EC4}$. Se no dimensionamento apenas se considerasse a largura efetiva igual ao banzo da viga (0%), estar-se-ia a desprezar cerca de 70 kN/m de resistência para uma largura efetiva igual à do Eurocódigo (CEN, 2004b). No entanto entre a largura efetiva da norma e 175% desta, apenas existe uma diferença de cerca 30 kN/m.

No que toca ao limite de carga por deformação excessiva (SLS), esta toma um valor muito mais reduzido, sendo por isso o ponto condicionante no dimensionamento da maior parte das

vigas. A diferença entre a largura efetiva mais baixa e a mais alta são cerca de 35 kN/m, no entanto para modelos com B_{eff} superiores a 100%, esta diferença é praticamente nula.

Note-se que este pavimento é o que possui maior espessura, portanto é esperado uma maior discrepância entre o valor das larguras efetivas. Como se pode verificar nas curvas força-deslocamento dos gráficos exibidos nos anexos que se encontram no final da presente dissertação, quanto menor é o pavimento, menor será a diferença entre a carga máxima e a maior parte dos modelos converge para valores de largura efetiva entre 125% e 150%.

De seguida apresentam-se os resultados para o mesmo tipo de vigas mas com um comprimento de 3 metros (Figura 4.3).

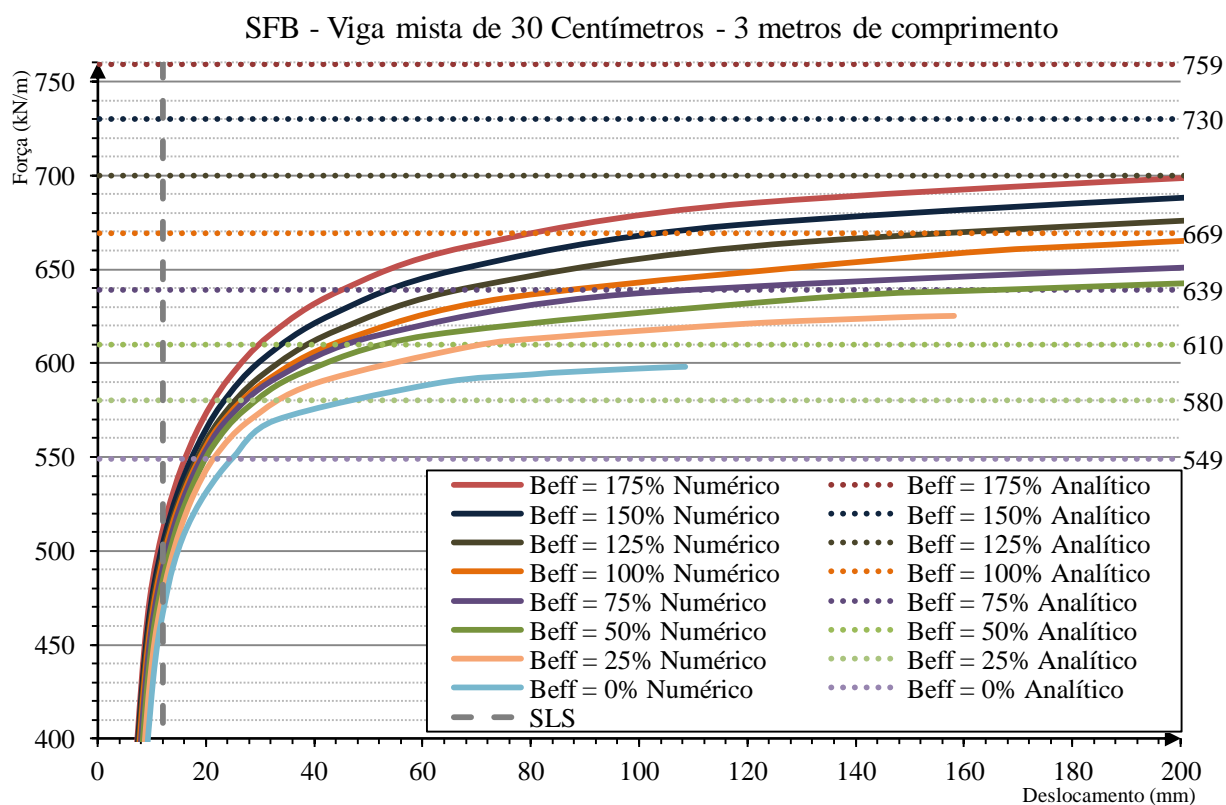


Figura 4.3 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 3 metros.

Como era de esperar, esta viga apresenta uma resistência máxima muito maior do que a representada anteriormente. O vão de 3 metros proporciona um aumento de rigidez significativo para qualquer B_{eff} . Observando a reta que delimita os deslocamentos máximos chega-se à conclusão que a viga mista após esta restrição pode absorver cerca de 300 kN/m para entrar em rotura. Devido à sua baixa ductilidade a transição da fase elástica para a fase

plástica é mais brusca e a rotura é frágil. A diferença entre a largura efetiva máxima e mínima considerada nestes cálculos pode levar a uma diferença de carga de cerca 100 kN/m .

Quanto à viga mista com 9 metros de comprimento (Figura 4.4), como já se está a retirar partido de um vão grande, resistência máxima para os ULS é de cerca de 120 kN/m , e para os SLS é cerca de metade. Para esta viga mista, a diferença entre considerar um B_{eff} de 0% e 175% pode reduzir a carga máxima para metade, no entanto, para B_{eff} superiores a 100% esta pouco aumenta.

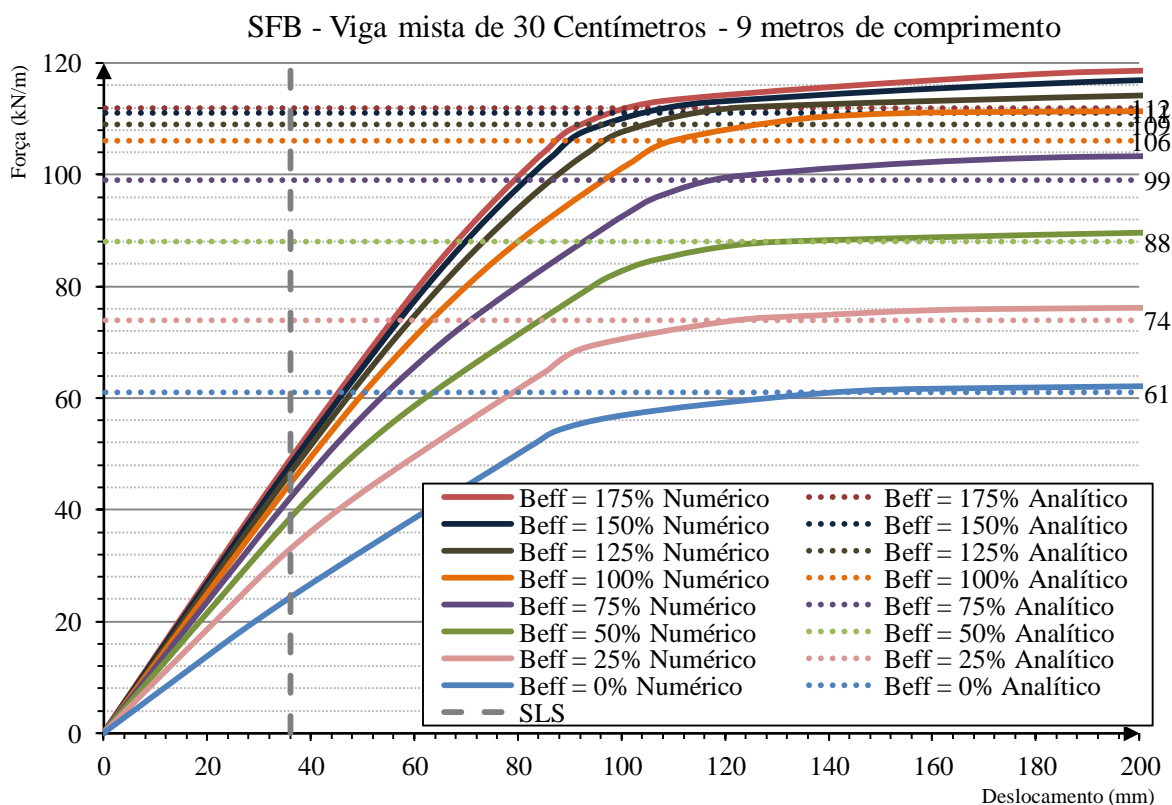


Figura 4.4 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 9 metros.

Quanto à viga mista desta tipologia com 17,5 centímetros de altura (Figura 4.5), esta apresenta uma maior relação entre o B_{eff} mínimo e máximo comparando esta com a de 30 centímetros. Para um B_{eff} igual ao Eurocódigo 4 (CEN, 2004b) o valor da carga máxima é cerca de 61 kN/m , para 0% e 150% da largura efetiva esta carga toma valores de 29 kN/m e 64 kN/m respetivamente. Atendendo aos SLS, a carga limite varia entre 10 kN/m e 24 kN/m para as larguras efetivas extremas.

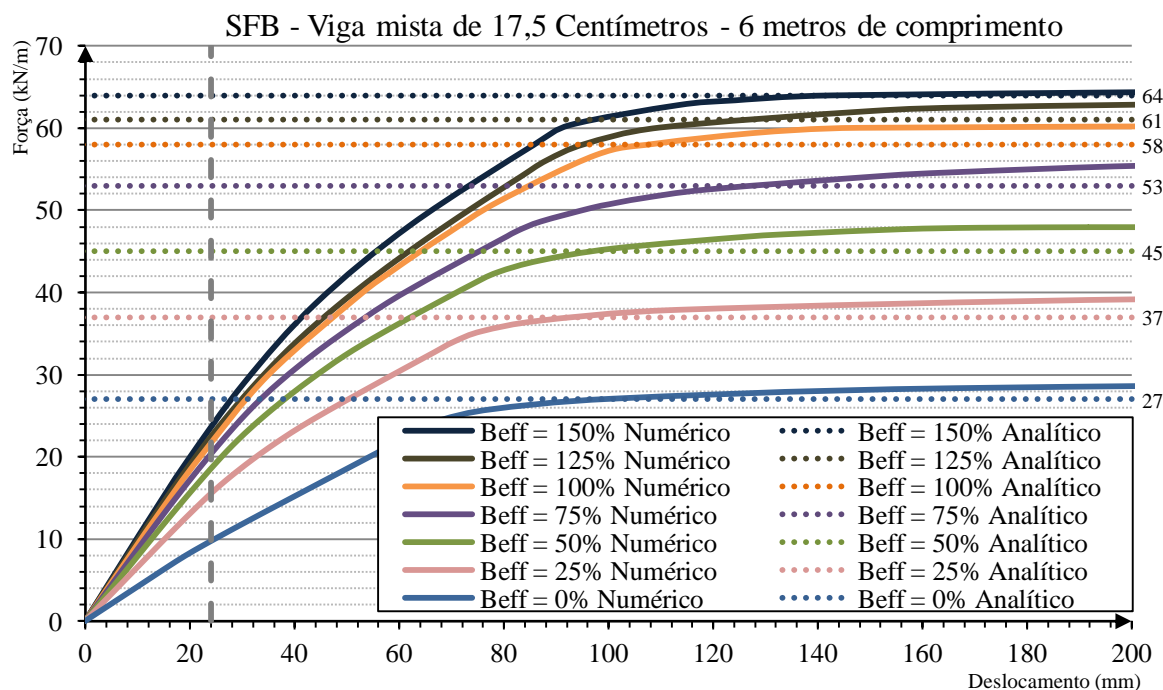


Figura 4.5 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 6 metros.

De forma a uma melhor comparação entre todos os resultados obtidos da viga mista de 6 metros de comprimento elabora-se um quadro com todos estes valores (Quadro 4.3 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). Este quadro para além de expor os resultados relativos à carga máxima que cada viga mista pode estar sujeita em kN/m , expõe também a relação da resistência última da viga para cada B_{eff} com o $B_{eff,0}$. Nos elementos mistos com menor altura esta relação é maior, ou seja, a diferença de capacidade de carga entre cada B_{eff} diminui à medida que se aumenta a altura da viga mista.

Quadro 4.3 - Todos os resultados relativos à viga *Slimflor Beam*.

B_{eff}	$Carga\ kN/m$				$Carga\ (kN/m)_{B_{eff,i}} / Carga\ (kN/m)_{B_{eff,0}}$			
	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm
0%	145.99	74.89	39.5	30	0%	0%	0%	0%
25%	163.13	93.4	49.47	39.24	12%	25%	25%	31%
50%	176.37	104.3	58.27	47.91	21%	39%	48%	60%
75%	195.38	123.2	65.18	55.76	34%	65%	65%	86%
100%	211.19	139.19	71.07	60.59	45%	86%	80%	102%
125%	225.23	149.97	73.26	63.69	54%	100%	85%	112%
150%	233.45	154.16	74.18	64.93	60%	106%	88%	116%
175%	233.98	-	-	-	60%	-	-	-

4.2.2 IFB - Integrated Floor Beam

Para a viga mista de 30 centímetros de altura e 6 metros de comprimento que consiste em metade de um perfil HEB com uma chapa soldada na sua parte inferior (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), foi usado o mesmo raciocínio exposto no subcapítulo anterior a fim de extrair as curvas força-deslocamento. Para tal combina-se a deformação máxima da viga a meio vão (Figura 4.6) e as respetivas reações de apoio. A curva força-deslocamento obtida demonstra que a carga última resistente é mais homogénea ente larguras efetivas do que a viga anterior (Figura 4.7).

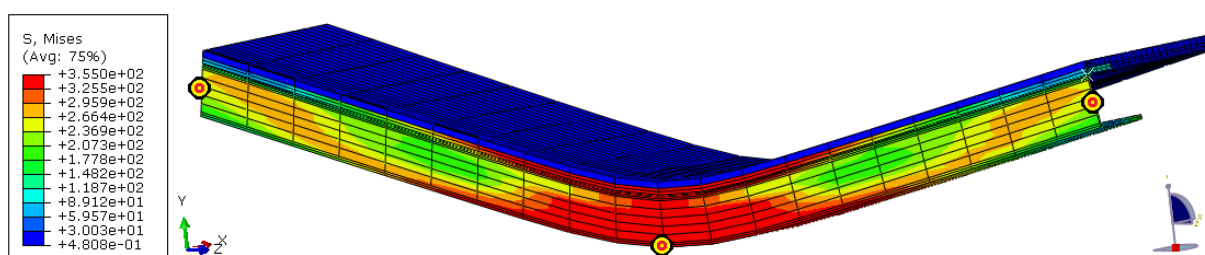


Figura 4.6 - Deformada da viga mista IFB de 30 cm.

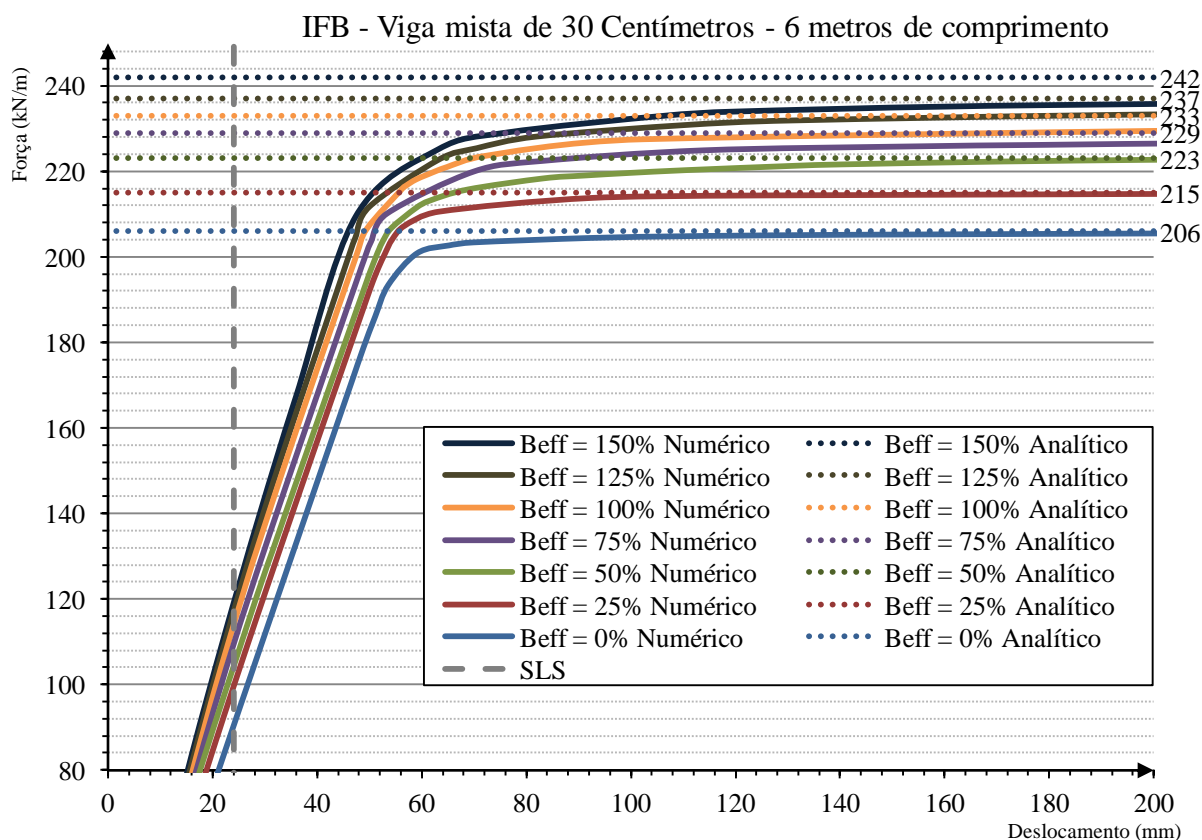


Figura 4.7 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 metros.

A transição da fase elástica para a fase plástica é muito mais brusca devido à elevada rigidez e a diferença de carga entre larguras efetivas mínima e máxima é apenas de cerca 36 kN/m . Estes resultados obtidos numericamente são consistentes com os valores analíticos, sendo estes sempre ligeiramente superiores. No que toca ao dimensionamento por SLS, esta limita a carga atuante na viga a cerca de metade da carga última para cada B_{eff} .

Efetuuou-se novamente um estudo paramétrico com a mesma secção mista para um comprimento de 3 (Figura 4.8) e 9 metros (Figura 4.9). Relativamente à primeira, esta apresenta resultados mais grosseiros do que usual e este fenómeno deve-se ao facto de a carga de rotura ser demasiado alta e praticamente igual para cada largura efetiva, o que causa dificuldade em retirar curvas força-deslocamento com precisão. Entre o maior e menor B_{eff} modelado a carga última varia apenas cerca de 60 kN/m . Esta diferença decai para cerca de 25 kN/m quando se analisa a carga de serviço limite.

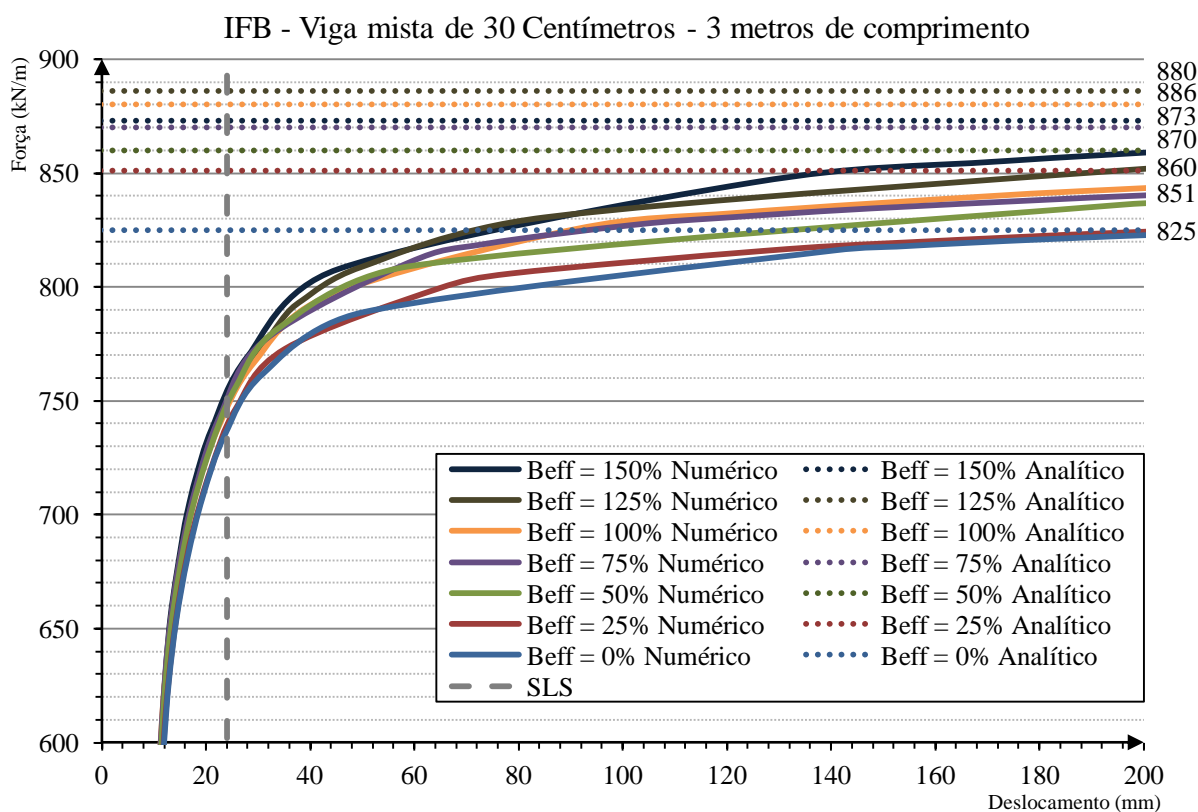


Figura 4.8 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 3 metros.

Por sua vez, as vigas com 9 metros de comprimento apresentam praticamente metade da carga máxima da viga de 6 metros. Os resultados obtidos para esta secção são bastante homogéneos e novamente esta carga vai aumentando com a largura efetiva, embora nesta viga este

aumento seja cerca de 1 kN/m para amplitudes maiores do que 50%, podendo então ser desprezável. A carga respeitante aos estados limites de serviço varia entre 20 kN/m e 32 kN/m . Tal como as secções anteriormente apresentadas, o aumento do vão diminui brutalmente a rigidez. Os resultados analíticos efetuados não se afastam dos obtidos através dos modelos numéricos, no entanto mais uma vez estes demonstram que o comportamento de uma viga mista é bastante complexo que este tipo de análise pode ser insuficiente para um bom dimensionamento.

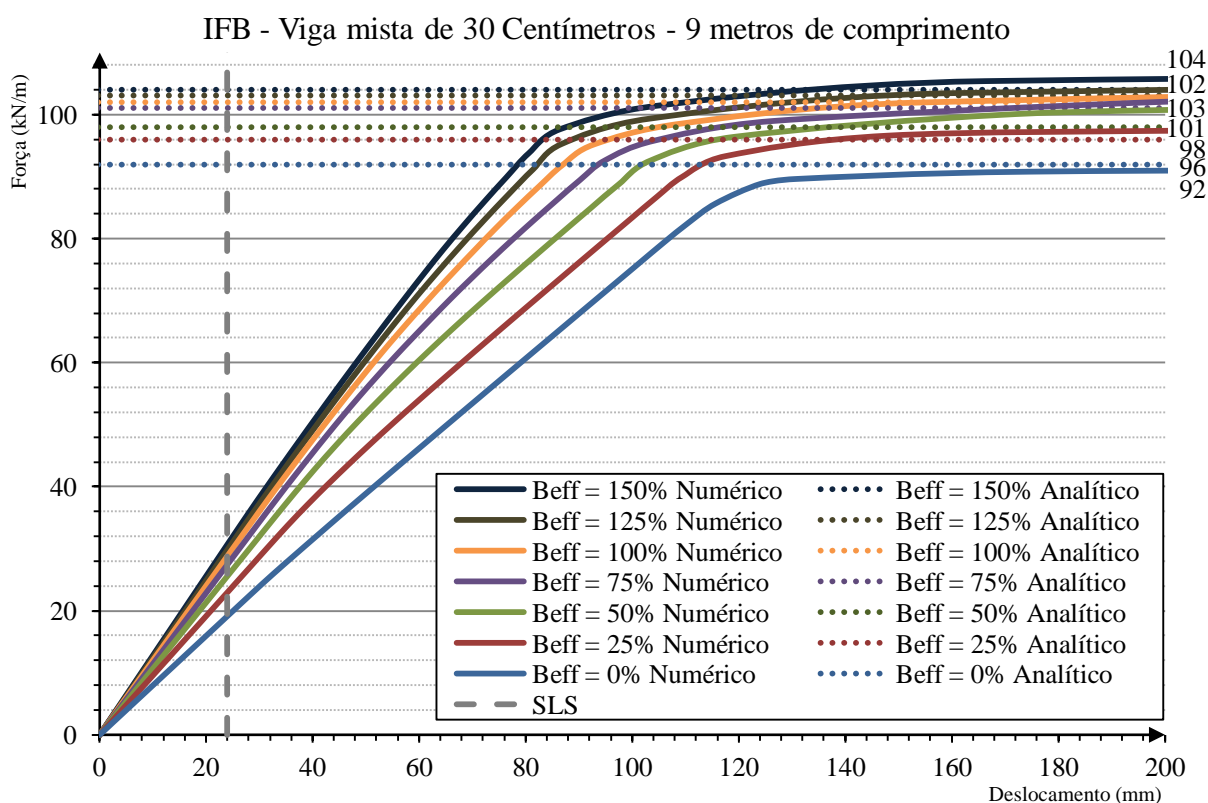


Figura 4.9 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga com 9 metros.

A viga mista correspondente ao pavimento de 17,5 centímetros com comprimento de 6 metros demonstra novamente pouca variação de carga entre as larguras efetivas extremas consideradas (Figura 4.10). No entanto, como era de esperar esta variação é menor à medida que se vai aumentando a referida largura. Tanto a variação de carga última como a carga de serviço é apenas de 10 kN/m , mesmo sendo esta última seja apenas 30%.

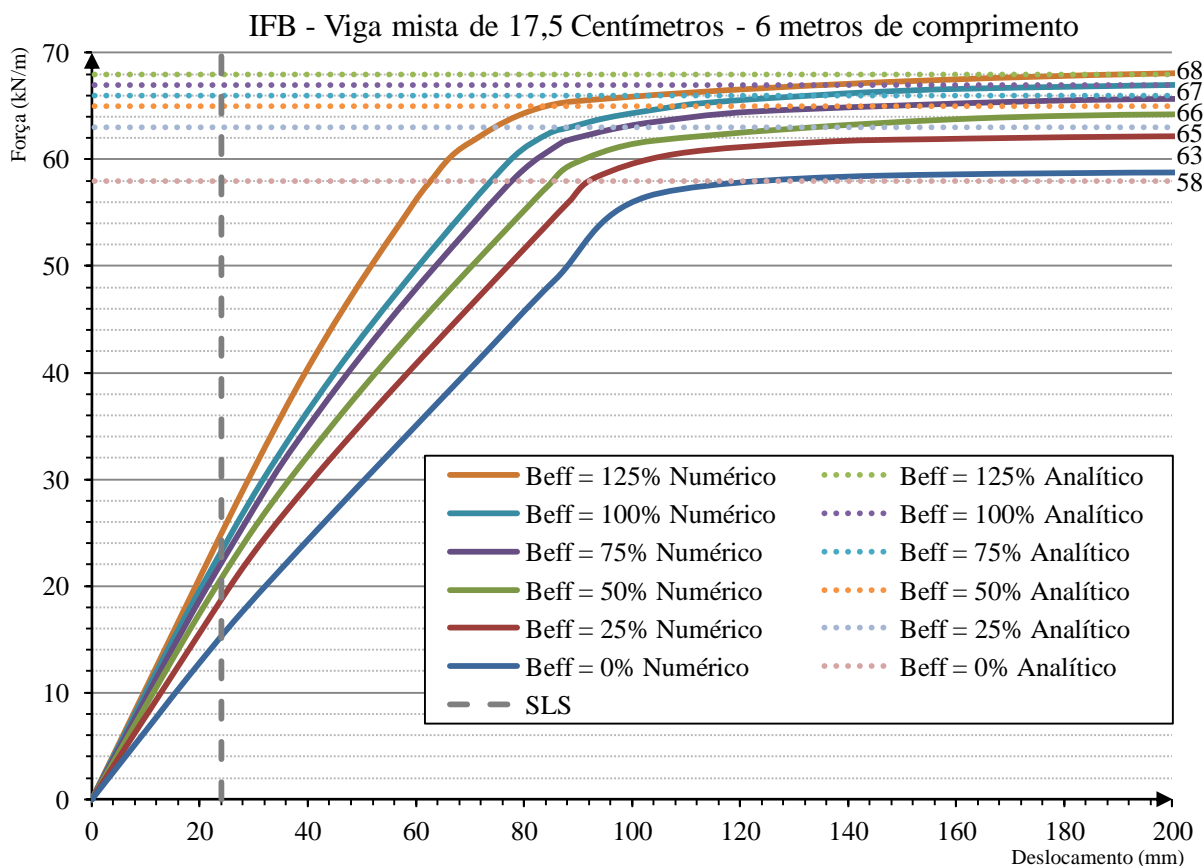


Figura 4.10 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 metros.

Com todos os resultados relativos às vigas mistas de 6 metros de comprimento elabora-se novamente um quadro que, para além de expor todos os valores referentes à sua carga última, relaciona cada uma delas com a carga pertencente à menor largura efetiva da respetiva viga. Portanto através do Quadro 4.4 pode-se verificar novamente que a diferença da resistência entre larguras efetivas é maior para as vigas mistas com menor espessura.

Quadro 4.4 - Todos os resultados relativos à viga *Integrated Floor Beam*.

Beff	Carga kN/m				Carga (kN/m) $B_{eff,i}$ / Carga (kN/m) $B_{eff,0}$			
	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm
0%	205.83	151.59	97.54	59.48	0%	0%	0%	0%
25%	215.14	158.88	101.5	62.73	5%	5%	4%	5%
50%	225.32	168.58	104.14	65.32	9%	11%	7%	10%
75%	230.13	171.2	106.18	66.66	12%	13%	9%	12%
100%	234.81	175.16	107.73	68.23	14%	16%	10%	15%
125%	238.85	183.06	110.2	70.93	16%	21%	13%	19%
150%	241.49	186.17	110.39	-	17%	23%	13%	-

4.2.3 ITB - *Inverted T beam*

Na presente viga mista em estudo foram extraídos resultados para as mesmas componentes geométricas das vigas anteriormente apresentadas. Claro está que a primeira tipologia a analisar foi a secção com comprimento de 6 metros e 30 centímetros de altura. Neste modelo foi introduzida a chapa colaborante de forma a reduzir a deformação excessiva da consola de betão. Como já está mais que confirmado, as larguras efetivas abaixo de 75% do valor do Eurocódigo 4 (CEN, 2004b) são praticamente obrigatórias no cálculo da carga resistente, portanto como este se trata de um modelo que exige mais esforço computacional não se modelará aqueles com larguras efetivas abaixo desse valor.

Na Figura 4.11 está representada a deformação da viga mista para a qual se obteve o valor da deformação máxima a meio vão e das respetivas reações de apoio de forma a adquirir curvas força-deslocamento expressas na figura seguinte (Figura 4.12). Não se pode usar a mesma comparação das vigas mistas expressas nos subcapítulos anteriores pois não se dispõe da largura efetiva igual a 0%, 25% e 50% portanto usar-se-á como base os resultados obtidos para a o B_{eff} de 75%. Esta pequena consideração não influencia as conclusões que se pretendem retirar da análise dos presentes modelos. Quando comparada com as vigas SFB e IFB, este tipo de secção transversal tem algumas particularidades relativamente ao comportamento da curva força-deslocamento.

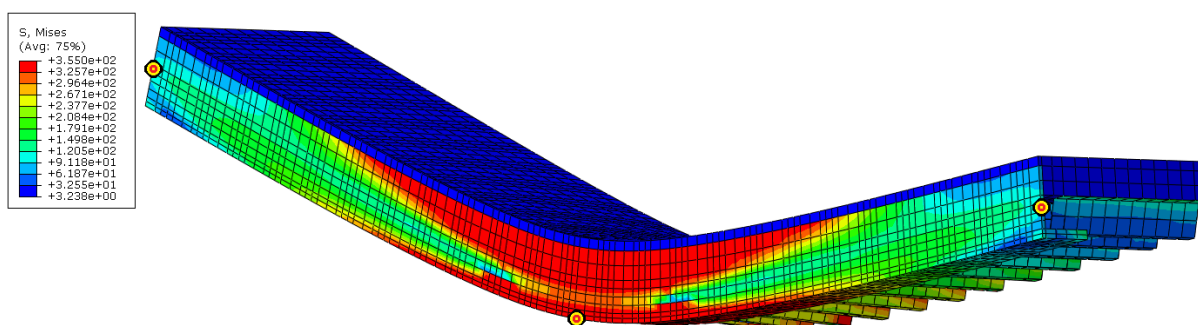


Figura 4.11 - Deformada da viga mista ITB de 30 cm.

A secção de T invertido apresenta um comportamento muito mais dúctil. Enquanto que nas restantes vigas apresentadas até ao presente ponto desta dissertação a transição da fase elástica para a fase plástica era brusca, nesta viga esta é mais "suave". É neste tipo de secção que é importante o uso de uma análise não-linear e pode-se verificar que os valores da rigidez são mais reduzidos.

A carga última que viga mista pode estar sujeita para a maior largura efetiva é de 246 kN/m enquanto que para a menor é de 196 kN/m . Relativamente aos estados limites de serviço a

resistência decai para valores entre 110 – 130 kN/m . Mais uma vez observa-se que os resultados analíticos aproximam-se bastante dos resultados numéricos.

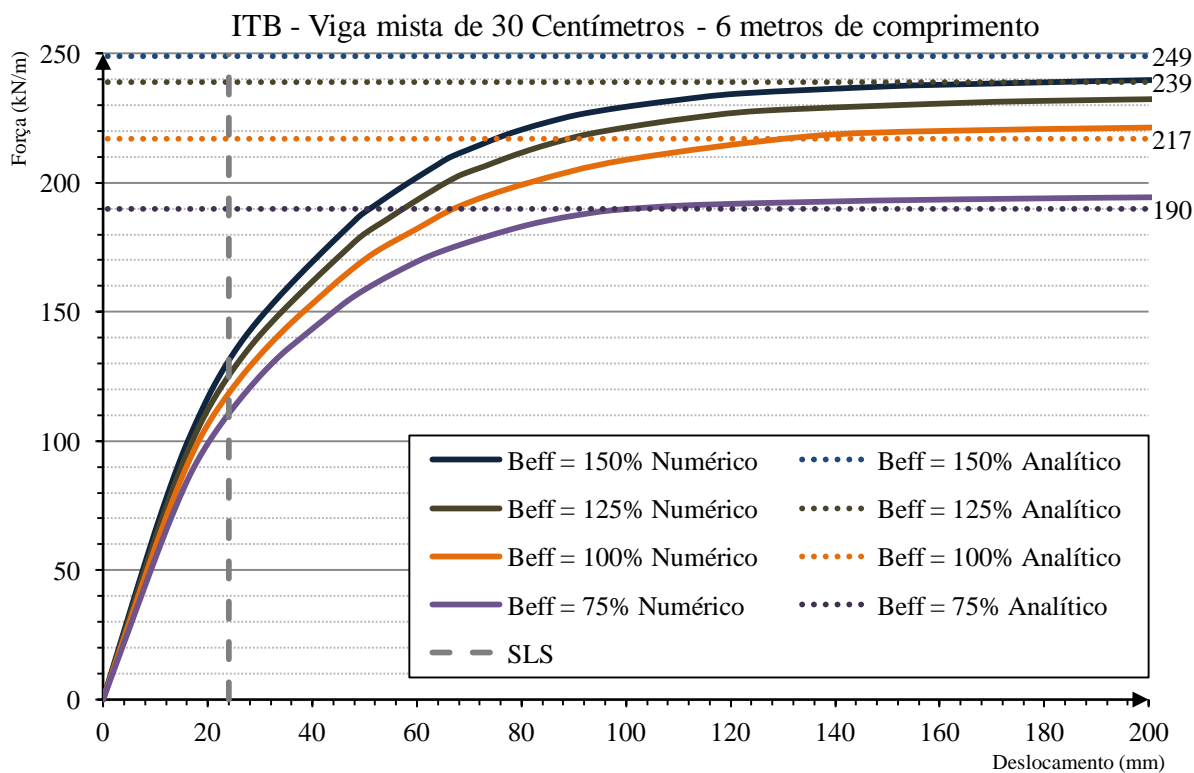


Figura 4.12 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 m.

A Figura 4.13 ilustra os resultados obtidos para a mesma secção da viga em análise mas com 3 metros de comprimento. Uma vez mais, a viga mista com 3 metros de comprimento apresenta uma elevada rigidez comparativamente com as vigas de 6 e 9 metros de comprimento. A resistência da viga aumenta consideravelmente quando se aumenta a largura efetiva, tal como tem acontecido em todos os resultados apresentados até ao momento. No entanto, neste modelo a resistência continua a aumentar para valores de largura efetiva superiores a 175%. Entre cada largura, existe um aumento de resistência de cerca de 50 kN/m , sendo a variação total de todos os modelos efetuados 250 kN/m . Quanto aos estados limites últimos, esta viga mista já não apresenta variação acentuada visto que quando estes ocorrem, a secção ainda está a funcionar na fase elástica. Ainda assim esta apresenta uma diferença de cerca 150 kN/m . Os resultados analíticos demonstram igualmente grande variação de carga entre larguras efetivas e esta continua elevada para amplitudes superiores a 175%.

Na Figura 4.14 estão os valores obtidos para os cinco modelos numéricos efetuados para a viga mista de 9 metros de comprimento juntamente com os respectivos valores adquiridos analiticamente.

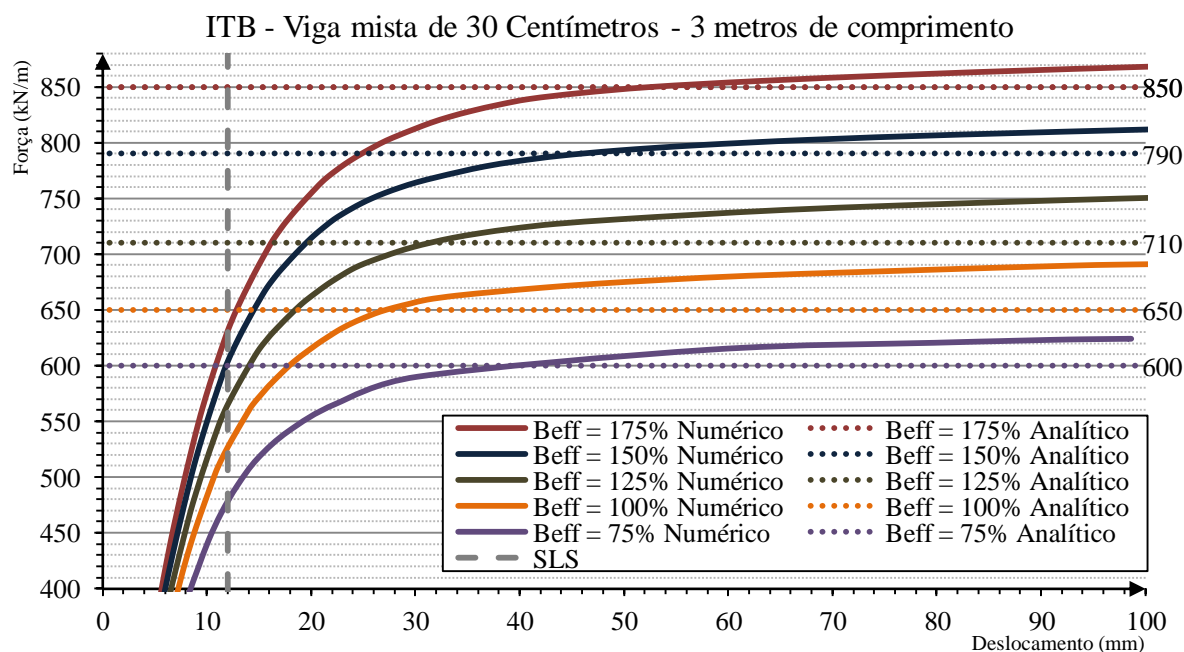


Figura 4.13 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 3 m.

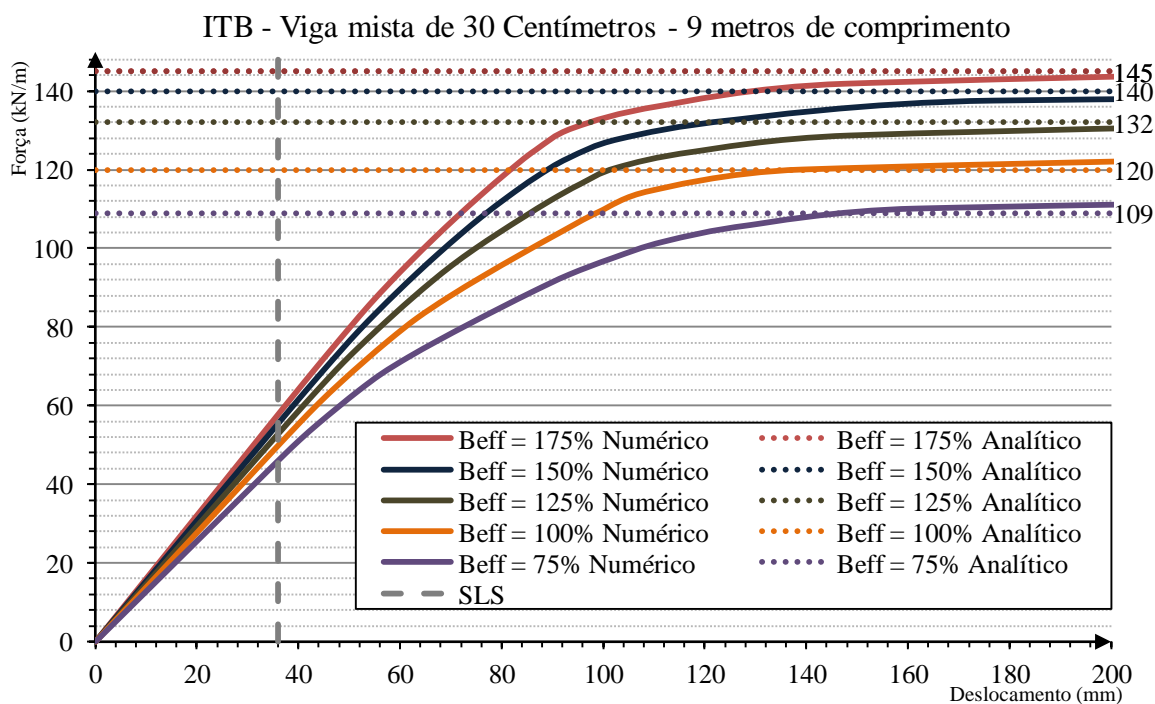


Figura 4.14 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 9 m.

Como era esperado, a viga respetiva ao vão de 9 metros de comprimento tem menor resistência última do que as vigas mistas de 3 e 6 metros. A diferença entre larguras efetivas modeladas é cerca de 142 kN/m . Uma vez mais, nota-se claramente que à medida que se aumenta a amplitude efetiva, a carga última da viga vai convergindo para um valor perto dos 145 kN/m , tendo a secção uma deformação superior a 10 centímetros. A variação entre larguras efetivas provoca uma diversidade de cargas de cerca 10 kN/m para os estados limites de serviço. Os resultados obtidos analiticamente para a carga última da viga são praticamente coincidentes aos dos modelos numéricos.

A menor secção deste tipo de viga mista tem uma espessura de 15 centímetros (Figura 4.15). Embora esta tenha metade da altura da secção anterior, apenas mobiliza cerca de $1/3$ da carga última. A variação da carga para ULS entre as larguras efetivas limites é de 25 kN/m e esta variabilidade é praticamente inexistente para SLS, sendo $18,5 \text{ kN/m}$ o valor para o B_{eff} de 100%. Nesta viga mista, a carga última obtida analiticamente é ligeiramente inferior à carga obtida para cada modelo efetuado.

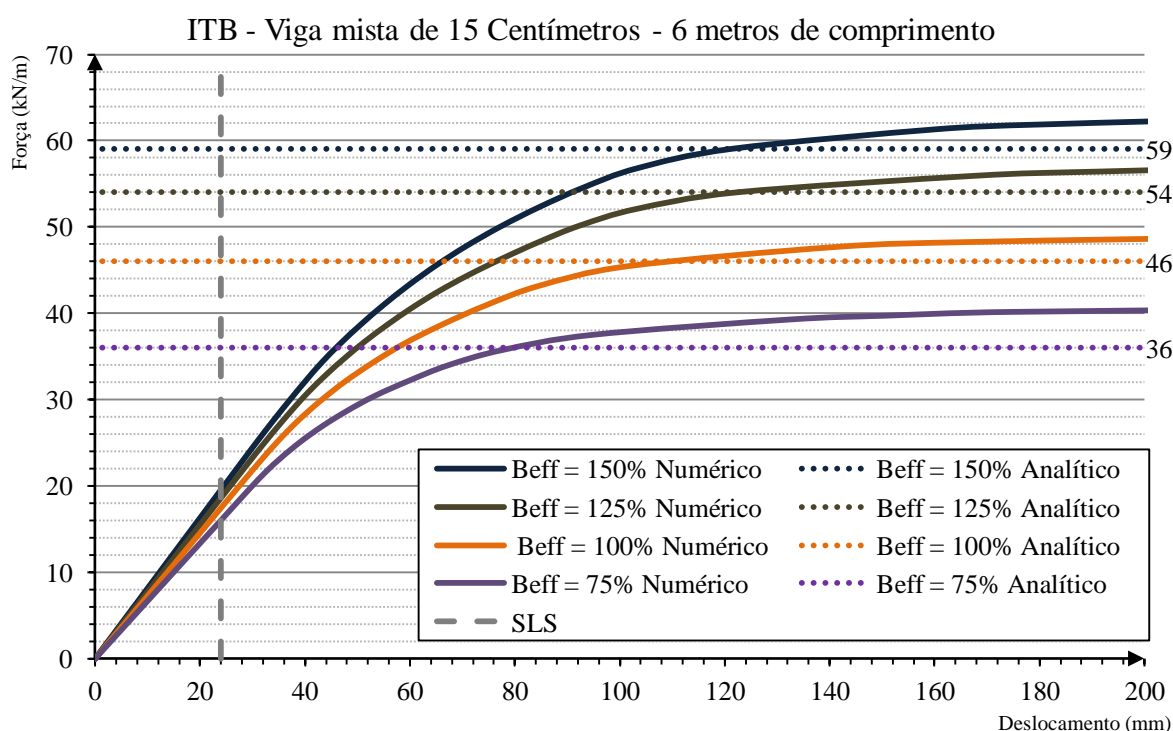


Figura 4.15 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 metros.

Recorrendo aos resultados relativos às vigas mistas de 6 metros de comprimento, elaborou-se novamente o quadro que, para além de expor todos os valores referentes à sua carga última, relaciona cada uma delas com a carga pertencente à menor largura efetiva da respetiva viga (Quadro 4.5). Como não se desenvolveram modelos para B_{effs} inferiores a 75%, foi este que

serviu de comparação para as restantes larguras efetivas. Como seria de esperar, é nas menores vigas que a consideração do valor da largura efetiva no cálculo tem maior influência.

Quadro 4.5 - Todos os resultados relativos à viga *Inverted T Beam*.

Beff	<i>Carga kN/m</i>					$Carga (kN/m)_{B_{eff,i}} / Carga (kN/m)_{B_{eff,0}}$				
	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	15 cm	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	15 cm
75%	197	143	90	67	41	0%	0%	0%	0%	0%
100%	225	159	104	80	50	14%	11%	16%	19%	22%
125%	236	173	114	91	58	20%	21%	27%	36%	41%
150%	246	181	120	96	65	25%	27%	33%	43%	59%
175%	-	188	-	-	-	-	31%	-	-	-

Quanto ao modelo da viga em causa modelada com conetores, este foi executado apenas para uma largura efetiva igual à obtida pela expressão do Eurocódigo (CEN, 2004b) ($B_{eff,100}$). Com a realização deste modelo pretende-se apenas proceder a uma simples comparação com os resultados obtidos para a conexão total, sem conetores. Para retirar a curva força-deslocamento deste modelo segue-se exatamente os mesmos passos dos restantes modelos, ou seja, através da deformação (Figura 4.16) da viga e respetivas reações de apoio. Durante o carregamento, o betão é o primeiro material a entrar na fase plástica e posteriormente seguem-se os conectores. Assim se o número de conectores usado for menor do que o número necessário para existir uma conexão total teórica, o modo de rotura dá-se por corte nos conectores. Na Figura 4.17 está representado um conector tanto na fase elástica como na fase plástica e facilmente se observa que este conector entrou em rotura devido a uma força de corte.

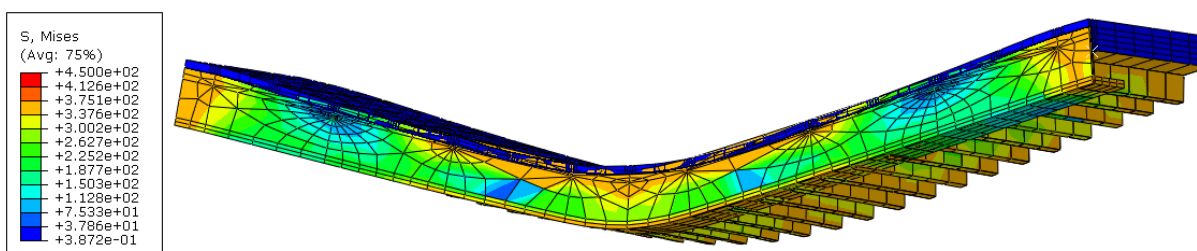


Figura 4.16 - Deformada da viga ITB com o uso de conetores.

Embora os resultados obtidos para esta viga mista serem bastante próximos dos resultados obtidos para a anterior viga com conexão total, verifica-se uma ligeira diferença nas curvas força deslocamento de ambas as vigas (Figura 4.18).

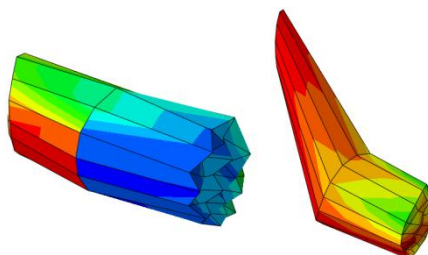


Figura 4.17 - Espiga do conector na fase de elástica e plástica respetivamente.

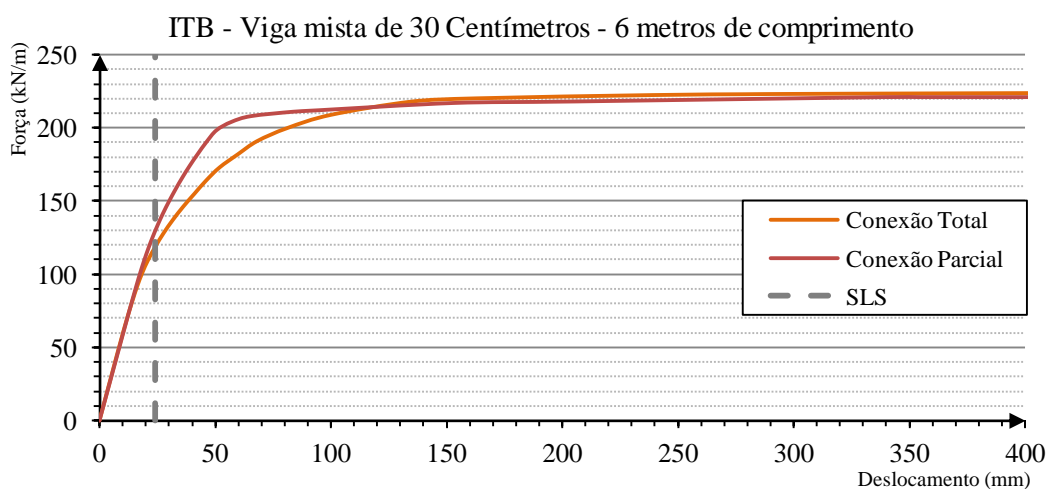


Figura 4.18 - Curva força-deslocamento para os modelos com conexão total e parcial.

A curva força-deslocamento que representa a conexão induz que a rotura da respetiva viga mista é mais frágil, o que é de esperar devido à conexão existir apenas pelos conectores ao corte, sendo este um modo de rotura de baixa ductilidade. Numa carga próxima de 220 kN/m os conectores entram em rotura e por consequência a viga colapsa.

4.2.4 HB - Hat beam

Por fim serão apresentados os resultados da viga *Hat Beam* para a maior e menor secção. Sendo que a maior apresenta 30 centímetros de altura, foi efetuado um estudo para os mesmos comprimentos das vigas mistas anteriores, tais como 3, 6 e 9 metros, enquanto que para a menor, de 15 centímetros, apenas se estudou o caso intermédio de 6 metros de comprimento. Com o auxílio do programa *Abaqus*, foi usado o mesmo raciocínio exposto nos subcapítulos anteriores que consiste em extrair o deslocamento máximo a meio vão e as respetivas reações de apoio a fim de formular as curvas força-deslocamento (Figura 4.19). Neste tipo de viga mista, optou-se novamente pela modelação da chapa colaborante (pelas razões expressas no capítulo 3), o que exige um esforço de processamento bastante elevado e, por esta razão,

optou-se novamente por apenas modelar as vigas com largura efetiva superiores a 75% da largura efetiva base do Eurocódigo 4 (CEN, 2004b).

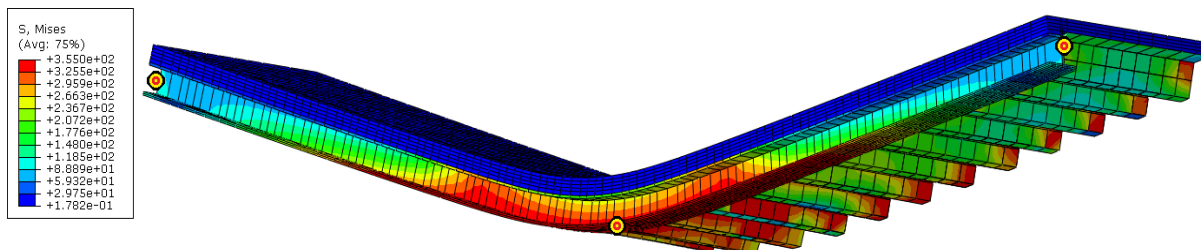


Figura 4.19 - Deformada da viga mista HB de 30 cm.

Na Figura 4.20 estão os resultados de todos os modelos realizados para a viga de 30 centímetros de espessura e 6 metros de comprimento. O comportamento desta secção é totalmente diferente das secções referidas até à data. Para todos os resultados obtidos notam-se claramente três fases distintas sendo a primeira a elástica, a segunda, que tem início após uma deformação de 20mm , é uma etapa de transição entre a fase elástica para a fase plástica. Notando que nesta fase a viga mista está claramente a entrar em cedência, no entanto, esta ainda mobiliza o dobro da carga aplicada na primeira fase até chegar à terceira fase e entrar em plasticidade total. Através das curvas força-deslocamento, pode concluir-se que para esta secção, a consideração da largura efetiva no cálculo é mais importante na análise da carga última, pois observando a carga de serviço, esta toma um valor aproximado de 84 kN/m praticamente para todas as larguras efetivas. A diferença entre a menor e a maior largura efetiva considerada numericamente é cerca de 20 kN/m , rondando a carga última desta viga os valores de 170 kN/m . Os resultados analíticos pouco diferem dos resultados numéricos, o que aumenta a fiabilidade dos resultados.

De seguida analisou-se a mesma viga mista mas com 3 metros de comprimento (Figura 4.21). Devido à sua elevada rigidez, as três fases do comportamento material desta secção são menos acentuadas. No entanto a segunda fase absorve a mesma quantidade de carga absorvida na primeira fase, mas com o dobro do deslocamento necessário para a mobilizar. Relativamente à carga dos estados limites últimos, esta é mobilizada para valores de 600 kN/m , sendo aproximadamente 100 kN/m a diferença entre as cargas últimas da menor e a maior largura efetiva. A carga de serviço de cada modelo é cerca de $2/3$ da carga última e varia entre 350 kN/m e 420 kN/m para a menor e maior largura efetiva respetivamente.

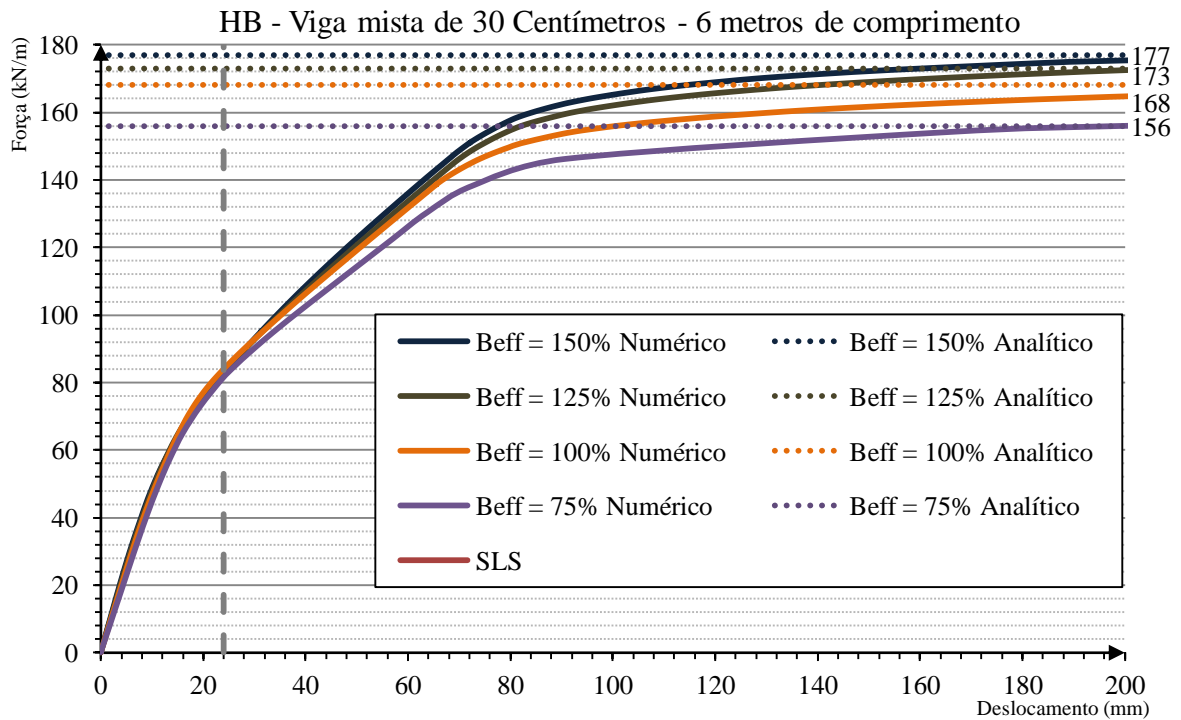


Figura 4.20 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 metros.

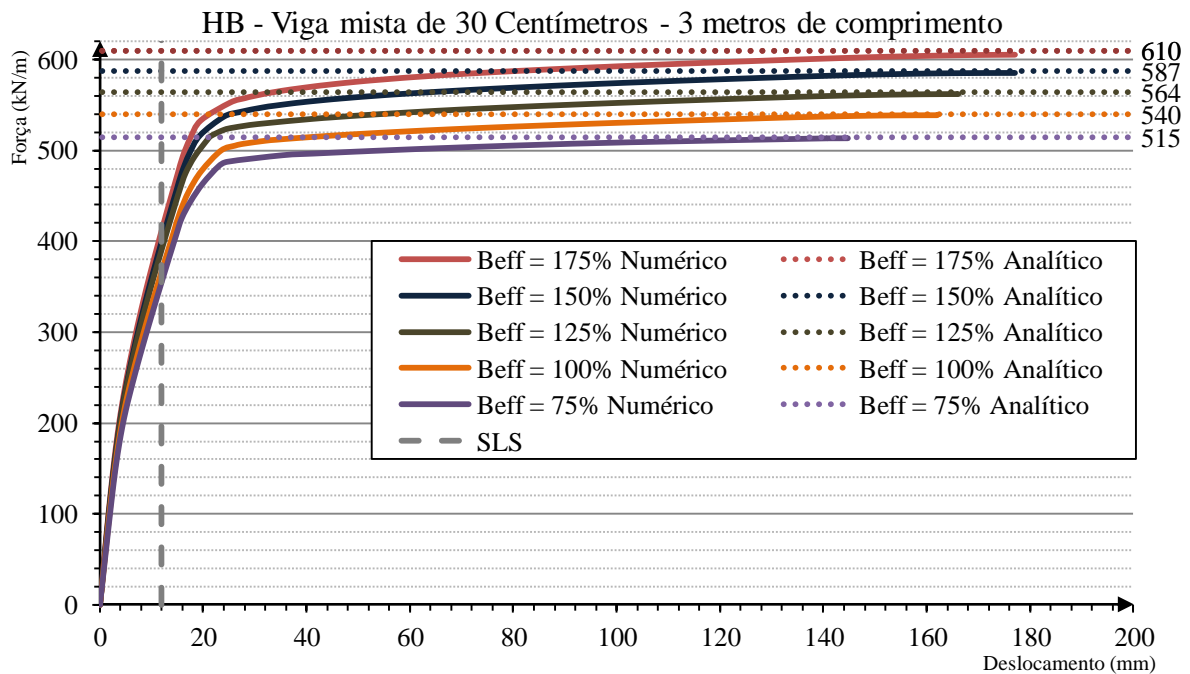


Figura 4.21 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 3 metros.

No que toca à viga mista de 9 metros de comprimento (Figura 4.22), esta apresenta uma rigidez bastante inferior aos dois casos já apresentados neste subcapítulo. Embora a carga

última desta viga seja cerca de 105 kN/m , a carga respeitante aos estados limites de serviço é cerca de 40 kN/m . Quando comparada com a viga mista de 6 metros de comprimento, a de 9 metros apresenta cerca de metade das propriedades resistentes. Esta redução de capacidade de carga pode não ser uma desvantagem do uso de vigas com este comprimento, pois, 105 kN/m de carga mobilizada para o vão um vão de 9 metros com uma espessura de 30 centímetros é bastante benéfico. Os resultados analíticos foram ligeiramente mais baixos do que os resultados numéricos. Esta diferença é apenas de 10 kN/m e pode ser perfeitamente desprezável. No entanto não é a única viga mista em que existe uma ligeira diferença entre os resultados numéricos e analíticos, alias, esta é perfeitamente normal especialmente nas duas últimas secções modeladas (ITB e HB) devido à consideração da chapa colaborante, que apesar de desprezável, oferece alguma rigidez aos modelos.

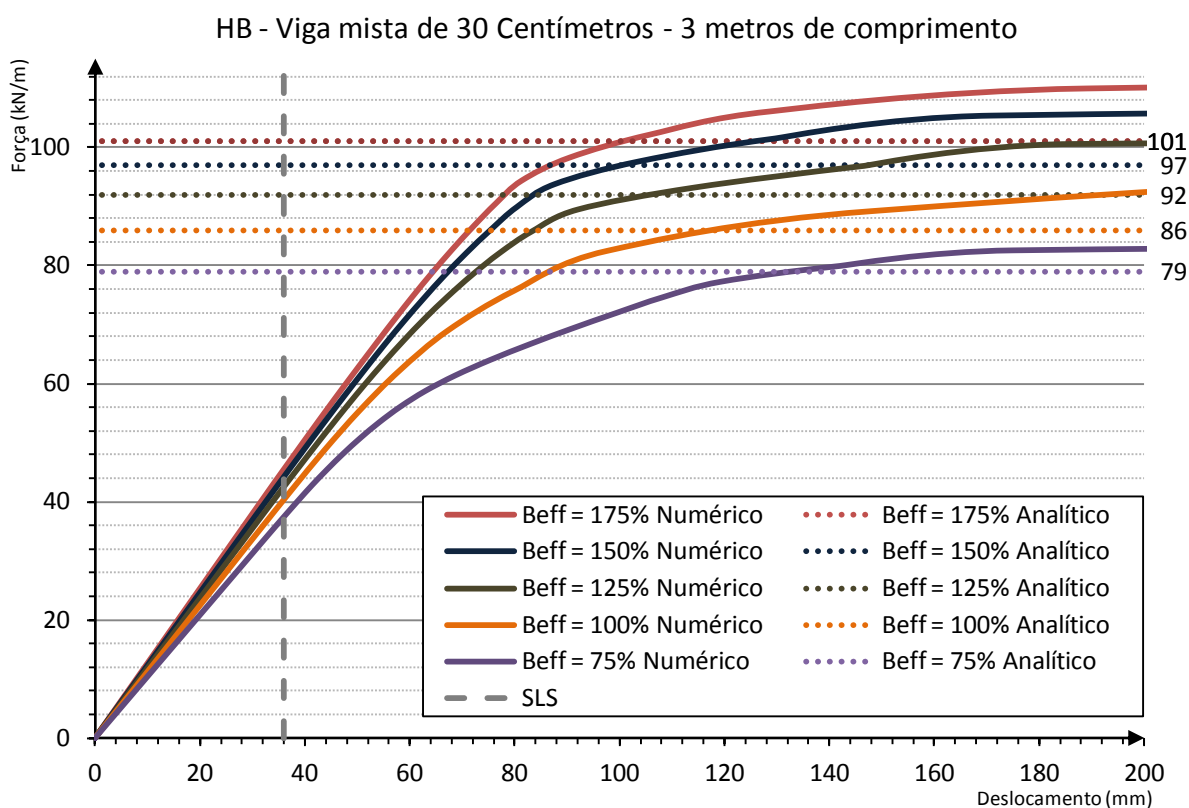


Figura 4.22 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 9 metros.

Por último modelou-se a viga *hat beam* com 15 centímetros de espessura e 6 metros de comprimento. As cargas últimas para cada largura efetiva rondam praticamente o mesmo valor, sendo este cerca de 55 kN/m . Uma vez mais, não vale a pena comprar larguras efetivas quando se pretende obter uma carga de serviço, pois, como se pode visualizar no

gráfico respeitante à viga mista de 15 centímetros, esta carga toma um valor de 18 kN/m praticamente para todas as larguras efetivas.

No Quadro 4.6 estão representados todos os resultados relativos a todas as secções da viga mista *hat beam* de 6 metros de comprimento. Uma vez mais, a largura efetiva de 75% serviu de base para a formulação das comparações entre vigas. Nesta viga mista é difícil de dizer para que altura de secção é mais condicionante a influência da largura efetiva pois as vigas com 25 e 20 centímetros apresentam uma maior variação de carga entre B_{eff} do que a viga com 17,5 centímetros. Denote-se ainda que o comportamento desta viga mista é diferente das restantes três apresentadas pois trata-se de uma secção fechada.

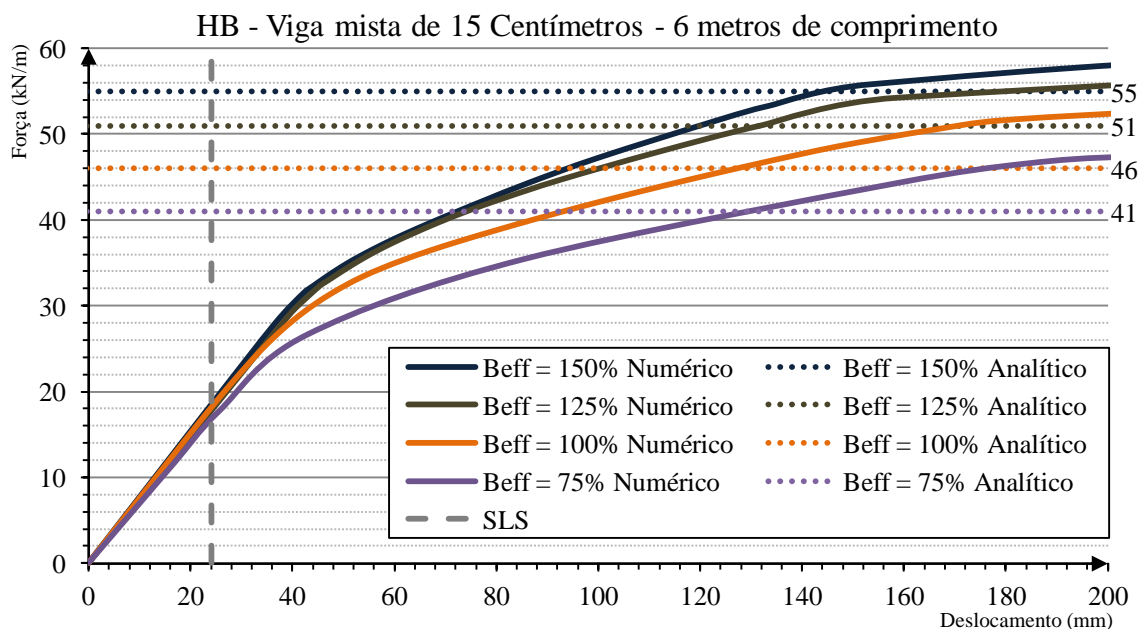


Figura 4.23 - Curva força-deslocamento para os diferentes B_{eff} da viga mista com 6 metros.

Quadro 4.6 - Todos os resultados relativos à viga *Hat Beam*.

beff	Carga kN/m					$Carga (kN/m)_{B_{eff,i}} / Carga (kN/m)_{B_{eff,0}}$				
	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	15 cm	30 cm	25 cm	20 cm	17.5 cm	15 cm
75%	163	123	85	69	48	0%	0%	0%	0%	0%
100%	173	136	91	77	55	6%	11%	7%	12%	15%
125%	175	147	101	78	60	7%	20%	19%	13%	25%
150%	177	155	110	80	63	9%	26%	29%	16%	31%
175%	-	-	121	-	-	-	-	42%	-	-

Por fim apresenta-se o modelo e respetivos resultados da viga mista com conectores soldados no seu banzo superior. Uma vez mais, este modelo foi apenas levado a cabo para a viga mista com uma largura efetiva idêntica à obtida pela expressão do Eurocódigo (CEN, 2004b). Na Figura 4.24 pode-se observar a deformada da estrutura pela qual se retiraram as reações de apoio e o deslocamento máximo a meio vão. Novamente os conectores entraram em rotura através de uma força de corte e, na Figura 4.25 está representado um conector para a fase elástica e a fase de corte. Tal como na viga ITB, durante o carregamento, o betão é o primeiro material a entrar na fase plástica e seguido deste, são os conectores. No instante em que estes entram em rotura, a viga colapsa.

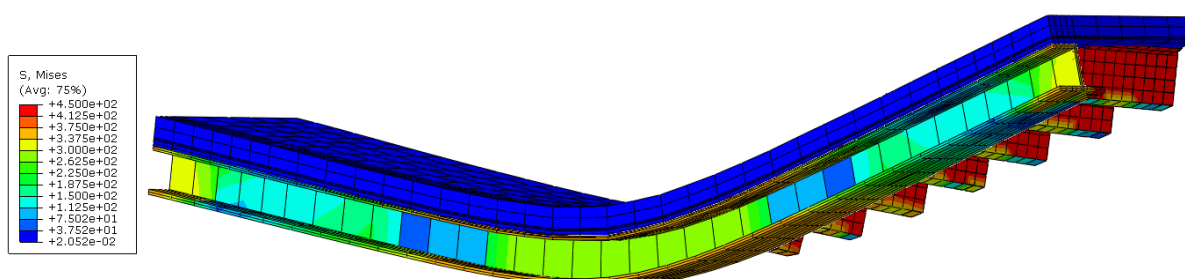


Figura 4.24 - Deformada da viga HB com conexão parcial.

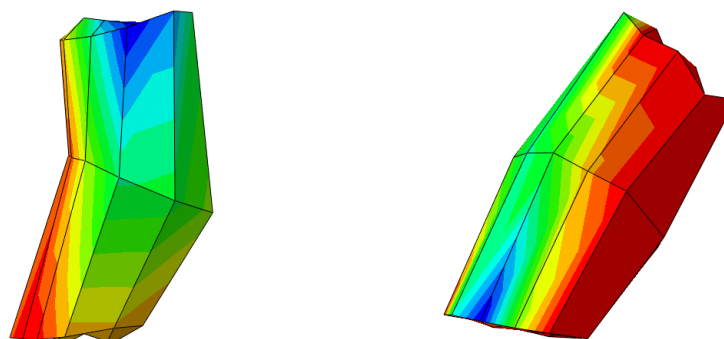


Figura 4.25 - Conector na fase de elástica e plástica respetivamente.

As curvas forças-deslocamento retiradas tanto para a viga mista com conectores como da viga sem conectores, está representada na Figura 4.26. Note-se que devido à existência destes conectores, a curva força-deslocamento da viga mista com conexão parcial demonstra mais rigidez na fase elástica, ao contrario do modelo de conexão total que, como anteriormente referido, apresenta praticamente duas fases elásticas com níveis de rigidez ligeiramente diferentes. No entanto, a carga última de ambos os modelos das vigas mistas converge para um valor de cerca de 170 kN/m .

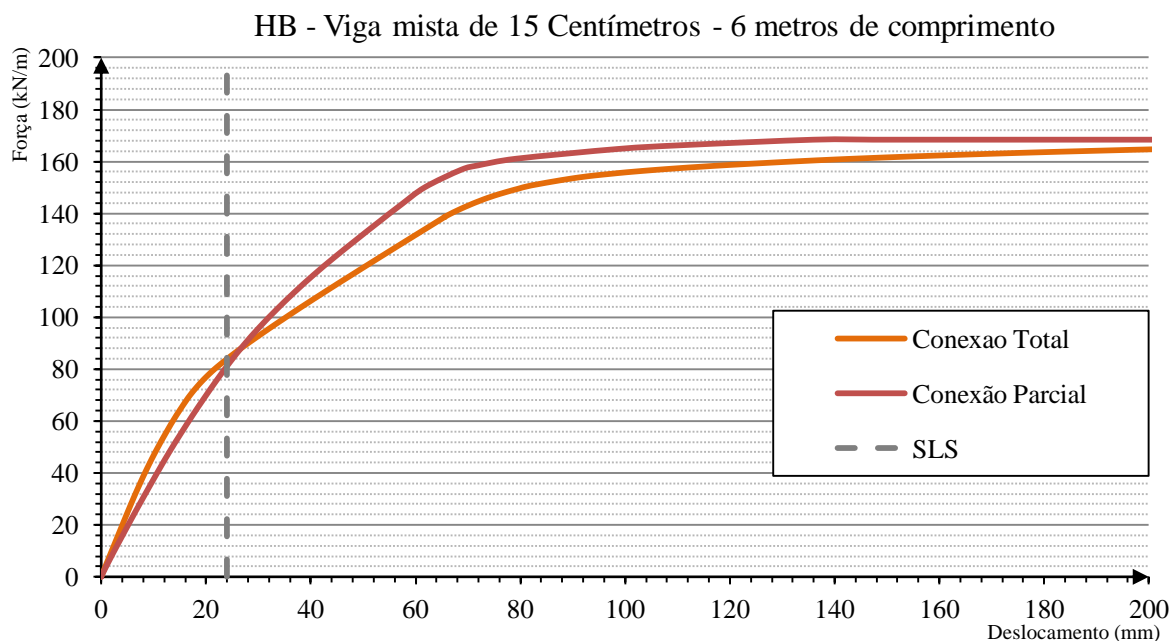


Figura 4.26 - Curva força-deslocamento para os modelos com conexão total e parcial.

4.3 Síntese

Para qualquer uma das vigas apresentadas, verifica-se que o modo de rotura aparenta ser a meio vão e provocado pelo betão. A resistência à flexão da viga mista a meio vão é a que condiciona o comportamento desta e, assim que esta cede, a viga entra em colapso. Quando o aço ainda está na fase elástica, parte do betão já se encontra plastificado, continuando todas as restantes fibras a plastificar à medida que a tensão do aço aumenta. No momento em que o aço atinge a sua tensão máxima, praticamente toda a largura efetiva de betão já se encontra plastificada.

Relativamente às vigas ITB e HB modeladas com conectores, estes demonstram uma rotura frágil pelos respetivos conectores devido a uma força de corte, sendo a carga última muito próxima dos modelos em que foi considerada conexão total.

Todos os resultados, que não foram apresentados no presente capítulo, obtidos para os modelos das vigas mistas com espetros de alturas de 25, 20, 17.5 e 15 centímetros estão expressos no ANEXO A.

Com os resultados, volume de betão, custo e carga última correspondente ao B_{eff} de 150% do Eurocódigo (CEN, 2004b), construiu-se um quadro (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**Quadro 4.7) que, para além de apresentar estes valores, demonstra a relação entre o preço e a carga resistente. Relativamente ao preço do aço e do betão foi considerado

um preço de 2€/kg e 115€/kg. Por esta relação conclui-se facilmente que a viga SFB é a que apresenta melhor preço-quantidade de material por metro linear. Por sua vez, a viga ITB apresenta também resultados fantásticos ficando esta pouco distante da viga SFB no que toca a otimização de material.

Quadro 4.7 - Custo de cada viga mista por metro linear

H (cm)		Secção metálica	G (kg/m)	Vbetão (m ³ /m ²)	Custo Aço+Betão	Carga ULS Beff 150% (kN/m)	Relação Preço/carga resistente
30	SFB	HEB 260+460x15	147.1	0.151	363.66 €	233.45	0.64
	IFB	(1/2) HEB500+500x20	172.2	0.146	411.56 €	241.49	0.59
	ITB	230x30+400x35	159.89	0.196	409.94 €	246	0.6
	HB	(1/2)350x250x16+450x20	139.35	0.146	345.86 €	177	0.51
25	SFB	HEB 200+460x15	108.4	0.131	277.06 €	154.16	0.56
	IFB	(1/2) HEB400+500x20	156.1	0.126	370.16 €	186.17	0.5
	ITB	195x25+400x30	129.09	0.159	331.32 €	181	0.55
	HB	(1/2)250x250x14+450x20	119.85	0.139	303.64 €	155	0.51
20	SFB	HEB 160+360x10	70.8	0.099	187.14 €	74.18	0.4
	IFB	(1/2) HEB320+500x15	122.2	0.094	287.64 €	110.39	0.38
	ITB	150x20+360x25	91.8	0.131	243.86 €	120	0.49
	HB	(1/2)180x260x14+450x15	96.09	0.116	245.54 €	110	0.45
17.5	SFB	HEB 140+360x10	60.4	0.091	162.66 €	64.93	0.4
	IFB	(1/2) HEB260+460x12	89.8	0.089	220.54 €	70.93	0.32
	ITB	125x20+360x25	90.32	0.117	234.46 €	96	0.41
	HB	(1/2)150x250x14+450x15	91.69	0.099	228.92 €	80	0.35
15	ITB	105x15+360x20	67.13	0.092	176.58 €	65	0.37
	HB	(1/2)120x200x14+450x15	82.89	0.077	201.20 €	63	0.31

5º CAPÍTULO - CONCLUSÕES

O objetivo da presente dissertação consistiu no estudo do comportamento de vigas mistas do tipo "*slim floor*" em termos de resistência e rigidez, considerando diferentes tipologias de vigas de aço. Para este estudo foram usados quatro tipos de secções mistas usando os perfis metálicos *slimflor beam* (SFB), *integrated floor beam* (IFB), *inverted T beam* (ITB) e *hat beam* (HB) para distintos espectros de alturas de pavimento.

Considerando o método dos elementos finitos, foram obtidos resultados para vigas com cada secção referida, através do auxílio do programa de cálculo *Abaqus*. Relativamente aos resultados obtidos para cada secção considerada, estes foram extraídos do referido programa através da utilização do método dos elementos finitos. Para cada malha de elementos finitos foi efetuado um estudo de convergência e de calibração da respetiva malha. Notando que foi fornecida uma especial atenção a este ponto devido à sua elevada importância para uma extração de resultados plausíveis.

Como seria de esperar, verificou-se ser bastante proveitoso tirar partido do comportamento misto aço-betão nas vigas do tipo "*slim floor*", no entanto pretendia-se saber até que ponto esta consideração da parte mista deixa de influenciar o valor da carga de serviço e última da viga mista.

A análise paramétrica efetuada em relação à largura efetiva da laje de betão, calculada segundo a norma EN1994-1-1 (CEN, 2004b), permitiu fomentar a ideia acerca da evolução da rigidez e capacidade de carga da viga mista. Este aumento de rigidez por largura efetiva é bastante importante quando se analisa a capacidade de carga última da viga mista, no entanto, na maior parte das vezes a carga de utilização é a que condiciona o dimensionamento da respetiva viga. Após a cuidadosa observação dos resultados alcançados para todas as vigas mistas modeladas, não se pode concluir ao certo a largura efetiva a considerar no dimensionamento. Se apenas forem observados os resultados numéricos, conclui-se facilmente que a cada aumento de largura efetiva a resistência última aumenta, o que leva a crer que, quanto maior esta largura considerada no cálculo melhor. No entanto, quando se olha para os resultados analíticos obtidos por José Almeida (Almeida, 2011), pode-se observar que em alguns casos, nomeadamente na viga mista SFB com 3 metros de comprimento, a resistência da viga modelada para uma largura de 150% é inferior à resistência da mesma viga calculada analiticamente para uma largura efetiva de 125%.

Atendendo a larguras efetivas menores ou outras vigas mistas, os resultados provenientes dos modelos numéricos só atingem os resultados analíticos após uma excessiva deformação. Portanto, é provável que a largura efetiva proveniente da expressão referida no Eurocódigo (CEN, 2004b) (100%) para vigas mistas convencionais não seja adequada para o dimensionamento de vigas do tipo "*slim floor*", sendo mais correto a consideração de uma largura efetiva menor.

Observando os resultados obtidos de todas as vigas mistas analisadas, concluiu-se também que a secção do tipo SFB é a que apresenta valores mais promissores de resistência e qualidade de material. Referindo ainda que a viga ITB também apresenta resultados bastante bons sendo, depois da viga SFB, a que apresenta melhor eficiência.

Apesar dos resultados alcançados através dos modelos executados, estes podem conter algumas limitações como por exemplo a enunciação da lei material usada para o betão. Tal como referido no capítulo 3, o programa dispõe de enumeras opções para a modelação do betão, portanto a sofisticação desta modelação deste material cabe inteiramente ao utilizador. Devido à inexistência de resultados experimentais, optou-se por usar uma lei material bastante simples, o que poderá influenciar os resultados finais.

Os modelos das vigas mistas do tipo *inverted T beam* e *hat beam* levados a cabo com a modelação dos conectores funcionam e serviram o seu propósito, no entanto estão aquém das expectativas caso se pretenda extrair mais resultados conclusivos sobre tanto o comportamento destes conectores como o comportamento dos dois materiais (aço e betão) a trabalharem em simultâneo. Este assunto promove o investimento em trabalhos futuros de forma a estudar e compreender a conexão parcial em vigas do tipo "*slim floor*".

Todos os resultados apresentados nesta dissertação impulsionam a necessidade de ensaios experimentais de forma a estes serem validados. Estas futuras investigações experimentais servirão também para a realização de um estudo mais aprofundado do comportamento da estrutura em relação à transferência de esforços entre os materiais.

BIBLIOGRAFIA

- Almeida, José António (2011). "Estudo do comportamento de vigas mistas aço-betão em pavimentos do tipo Slim Floor". Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Bailey, C. G. (1999). "The behavior of assymetric slim floor steel beams in fire". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 20, pp 235-257.
- Barros, Mariana (2011). "Análise e dimensionamento de pavimentos mistos Slim Floor". Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Calado, Luis e Santos, João (2010). "Estruturas mistas de Aço e Betão". Instituto Superior Técnico IST Press, Lisboa.
- CEN (2004a). "Eurocode 2 - Design of Concrete Structures Part 1-1 General rules and rules for buildings". European committee for standardization, Brussels.
- CEN (2004b). "Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings". European committee for standardization, Brussels.
- Gerin, Mayara Turi (2013). "Experimental tests to evaluate the shear resistance of normal and high strength bolts". Departamento de Engenharia Civil da Universidade de coimbra, Coimbra.
- Hauf (1996). "EN1994 Slim Floor workshop". Oslo.
- Jurado, Manuel Gálvez (2008). "Estudio del comportamiento estructural de los forjados tipo "slim floor" bajo". *Universitat Politècnica de Catalunya*, Vol.1, Barcelona.
- Kuhlmann, Ulrike e Hauf, Gunter (s.d.). "Efficient Design for the Calculation of the Deflection and the Shear Force Capacity of Slim-Floor Girder". Institute of Structural Design, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Lars, W. (1978). "Technical and Economic Advantages of Steel Construction, Building costs and Overaçç Economy". European Convention for Construction Steelwork.
- Lawson, R. M., Mullet, D. L. e Rackham J. W. (1998). "Design of Asymetric Slim Floor using Deep Decking". Ascot.
- Malaska, Mikko (200). "Behavior of a Semi-Continuour Beam-Column". Helsinki.
- Mullet, D. L. (1997). "Design of RHS slimflor Edge Beams". The Steel Construction Institute, Ascot.
-

Mullet, D. L. e Lawson, R. M. (1993). "Slimfloor Construction using Deep Decking". The Steel construction Institute, Ascot.

Mullet, D. L.(1992). "Slim Floor Design and Construction". The steel Construction Institute, Ascot.

Ramos, André Luiz (2010). "Análise Numérica De pisos Mistos Aço-Concreto de Pequena Altura". Universidade de São Paulo, São Carlos.

Simões, R. A. D. (2007). "Manual de dimensionamento de Estruturas Metálicas". CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra.

Simões da Silva, L., Gervásio, H. (2007). "Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados". CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra.

Schleich, J. B., Mathieu, J., Conan, Y. (2000) "Manual de Cálculo de Pórticos Amiostrados Mixtos según Eurocódigo 4". ProfilArbed, Luxembourg.

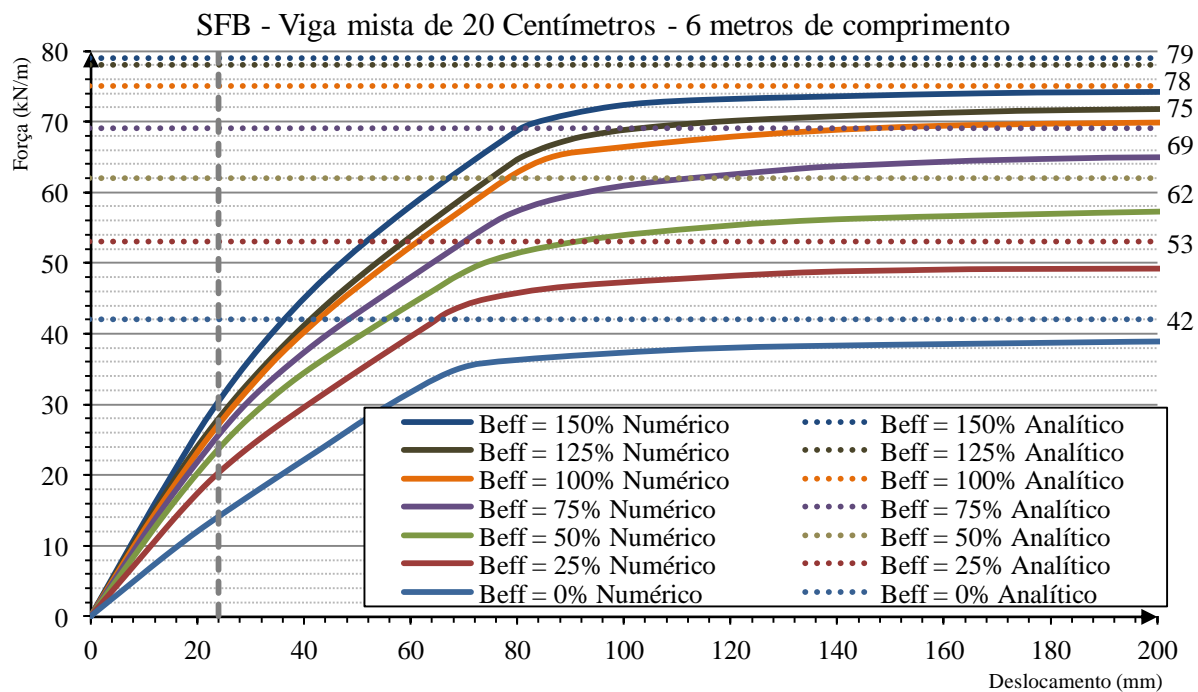
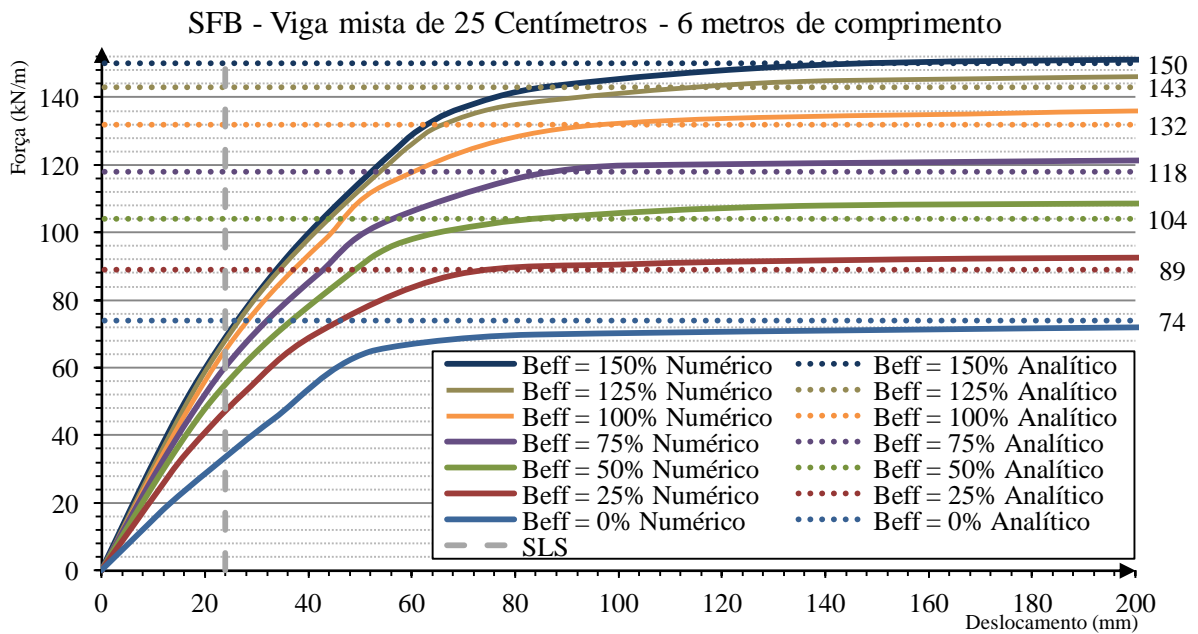
Soares, Joadelio chagas (2006). "Aço-Concreto: Correlação entre Tensão de Aderência e Comprimento de Ancoragem". Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

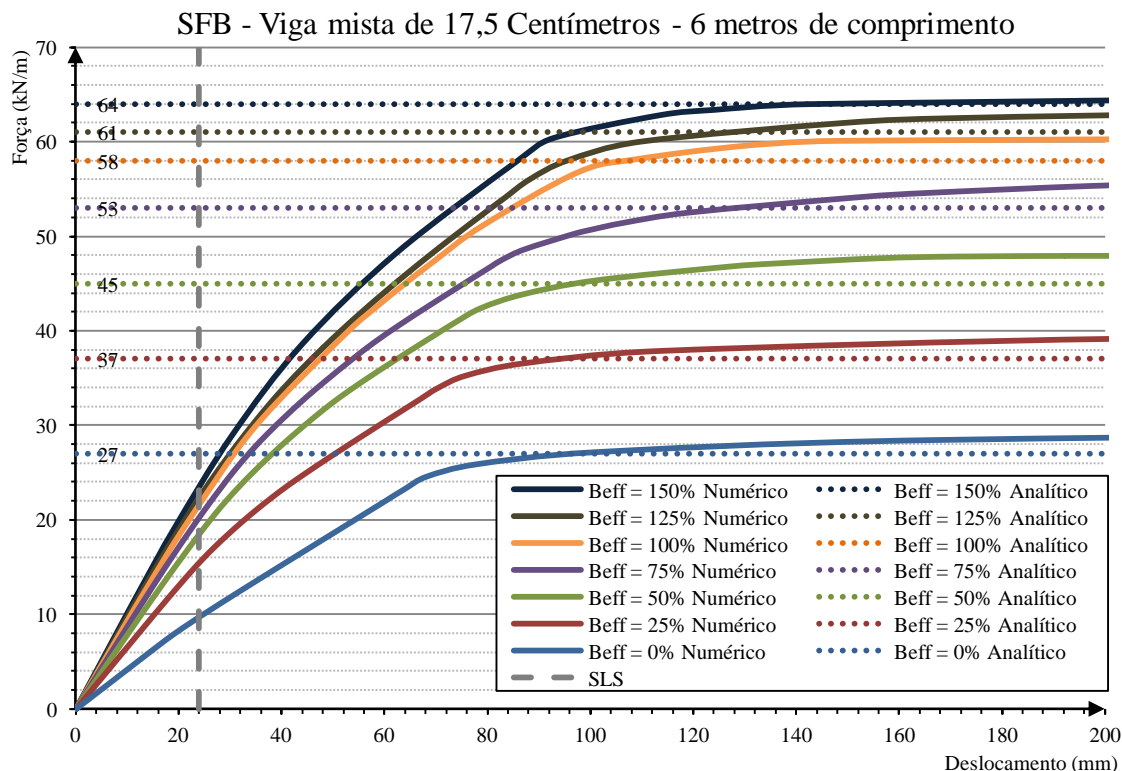
TS@ (2010). www.tatasteelconstruction.com. Tata Steel Reino, Unido.

Wang, Lu, Yang, Yuanqing, Shi, Youngjiu, Zhang, Ruhang (2008) "Loading capacity of composite slim frame beams". Journal of constructional Steel Research, Beijing.

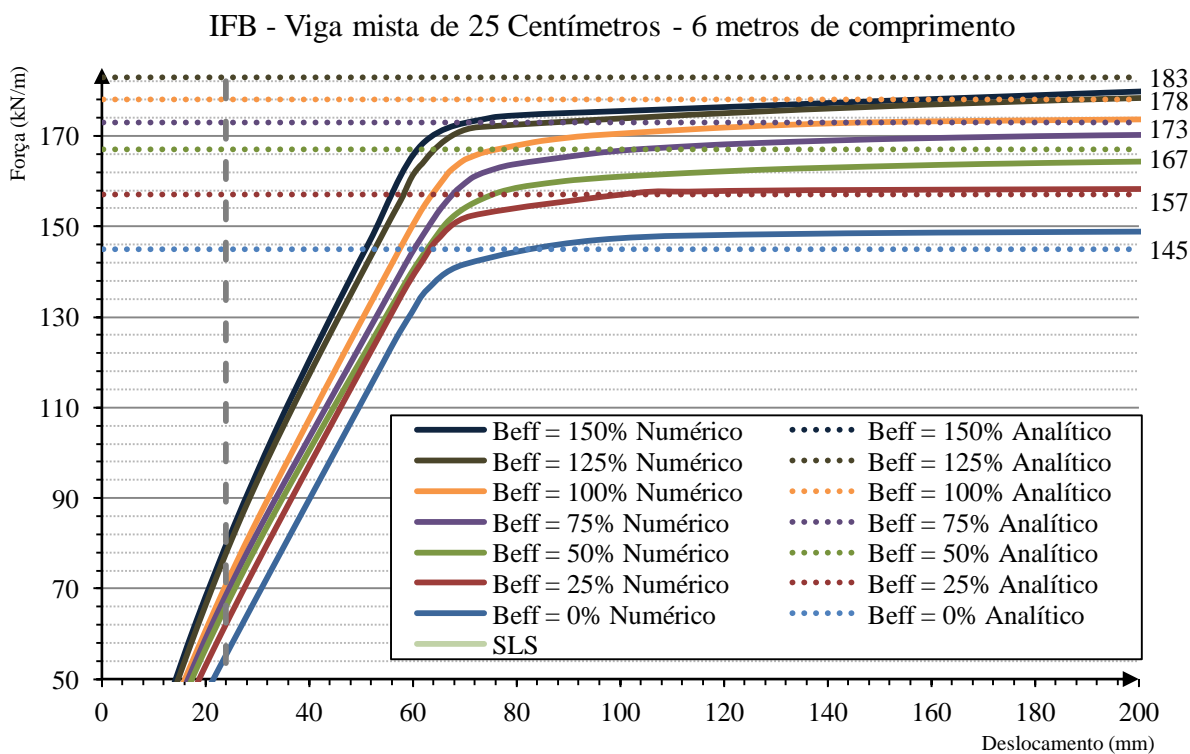
ANEXO A

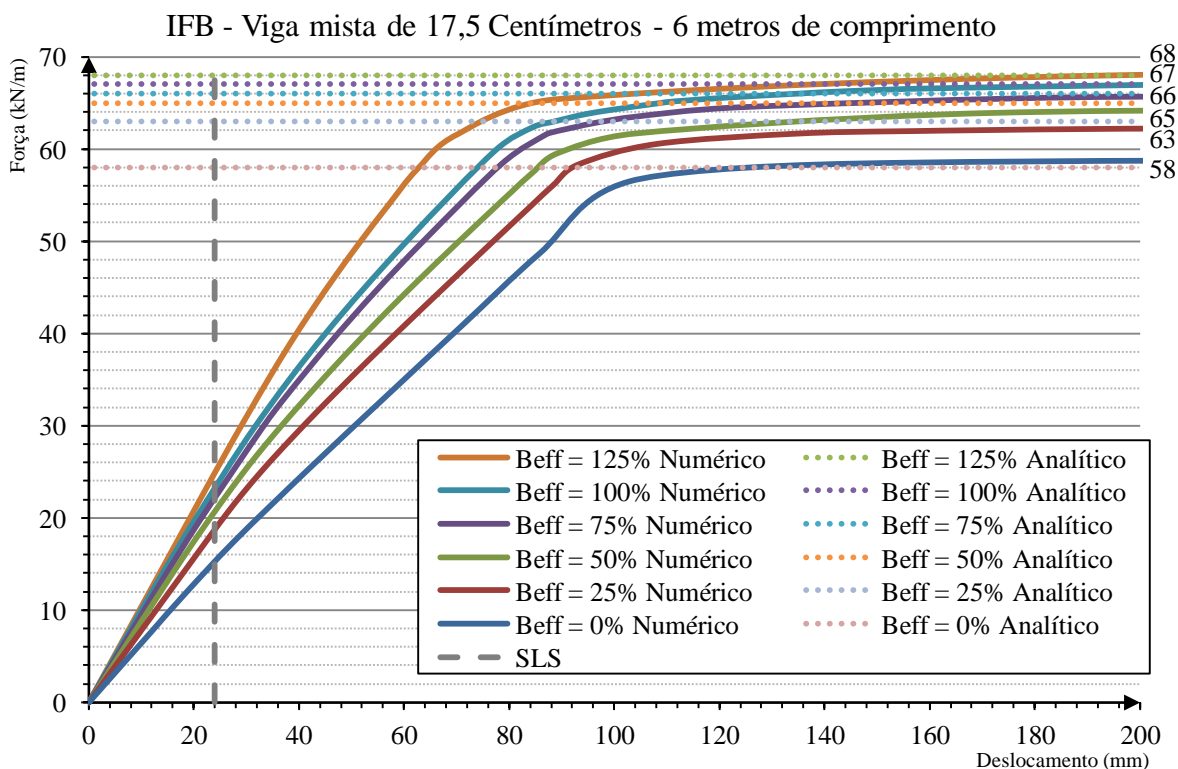
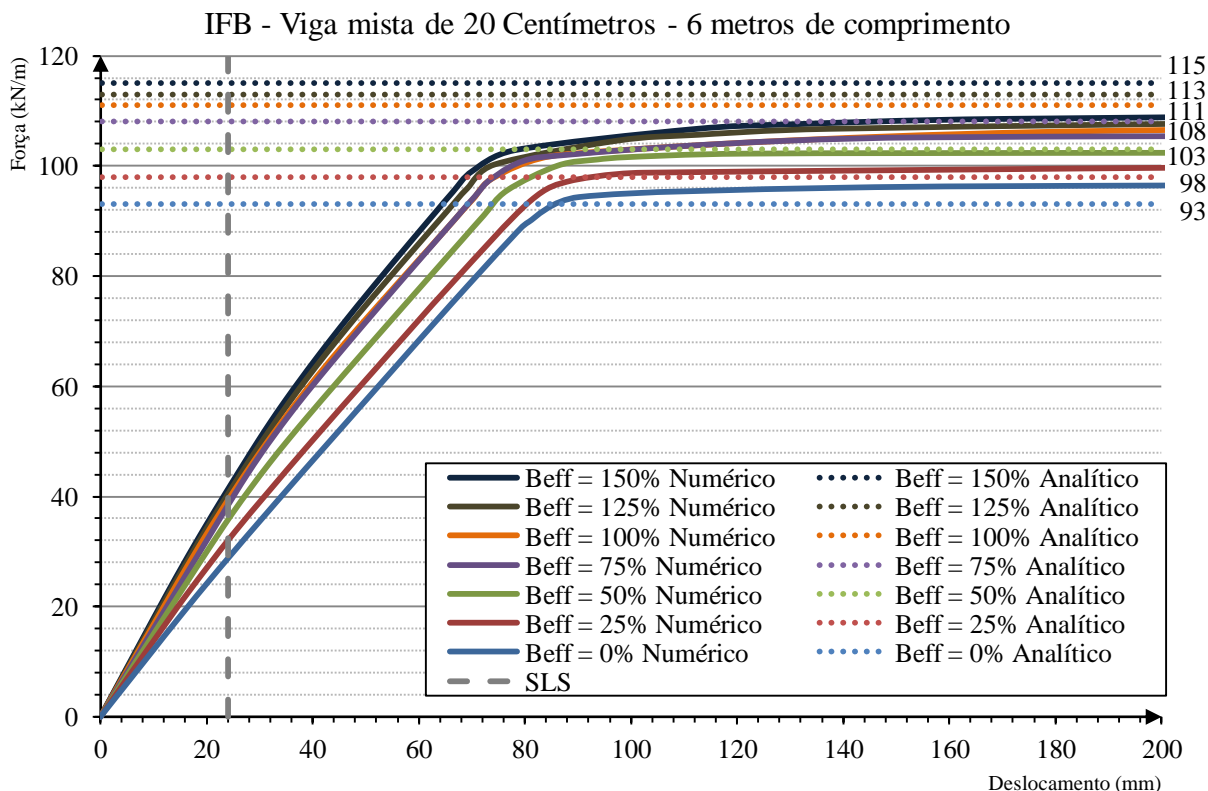
SFB - SlimFlor Beam





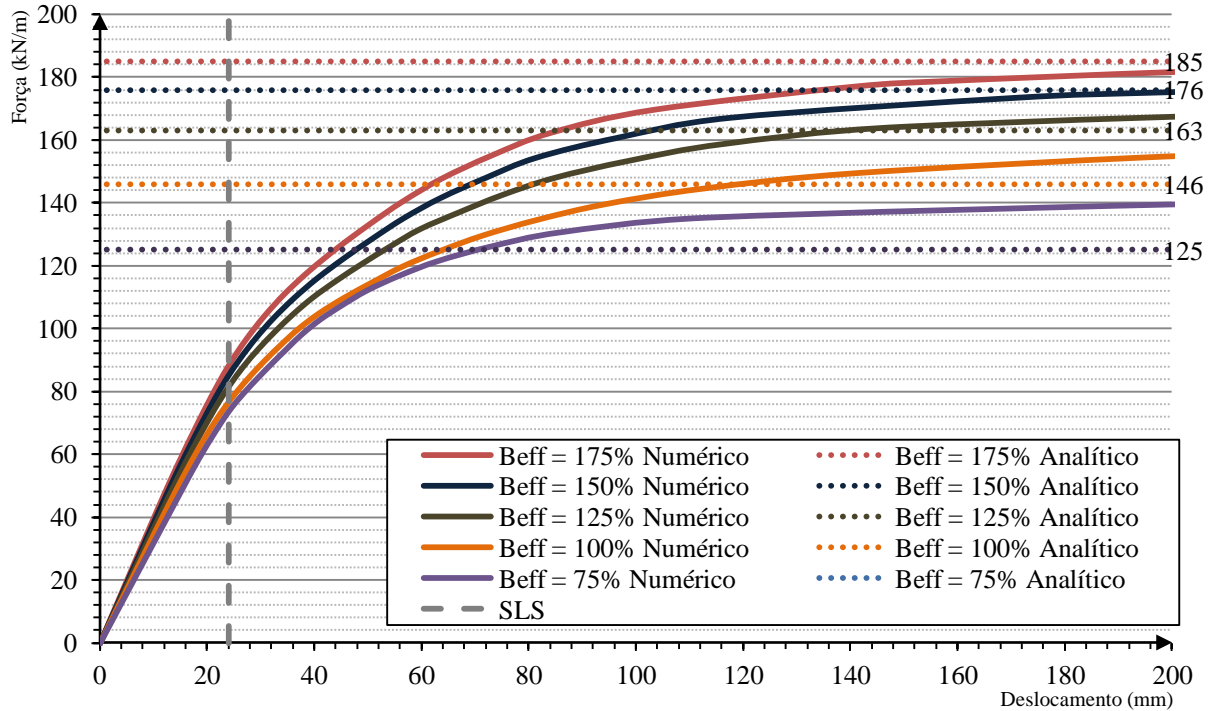
IFB - Integrated Floor Beam



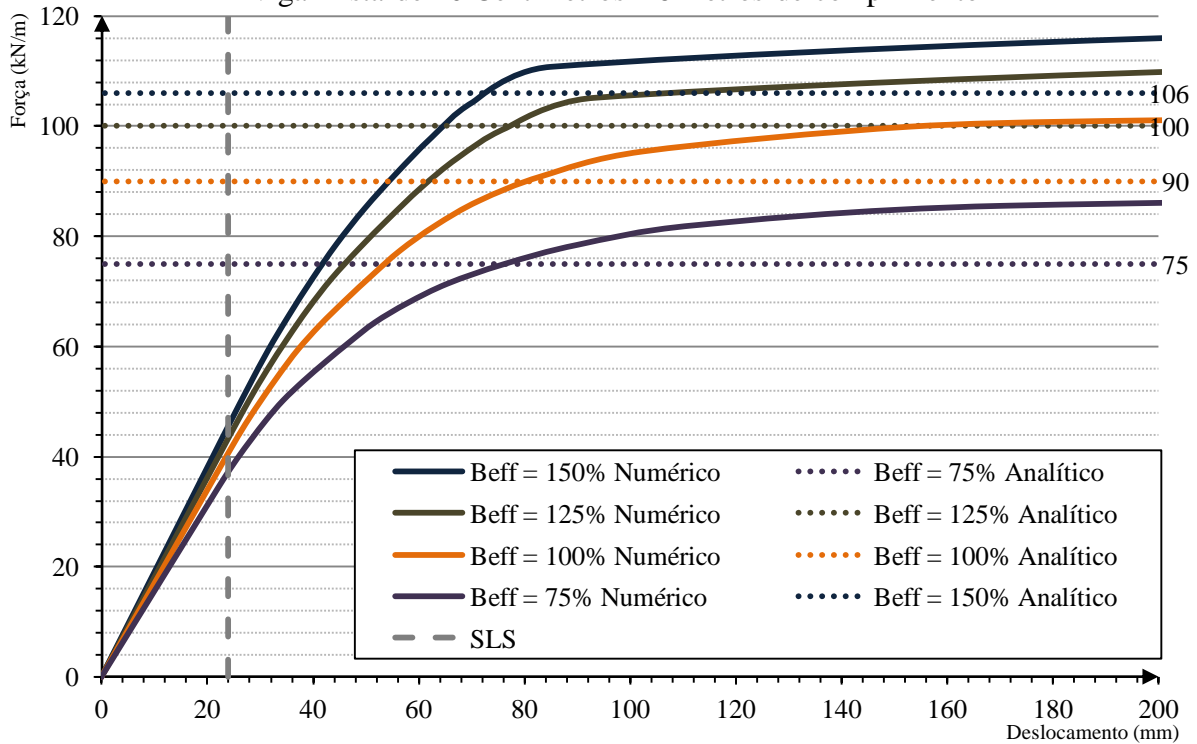


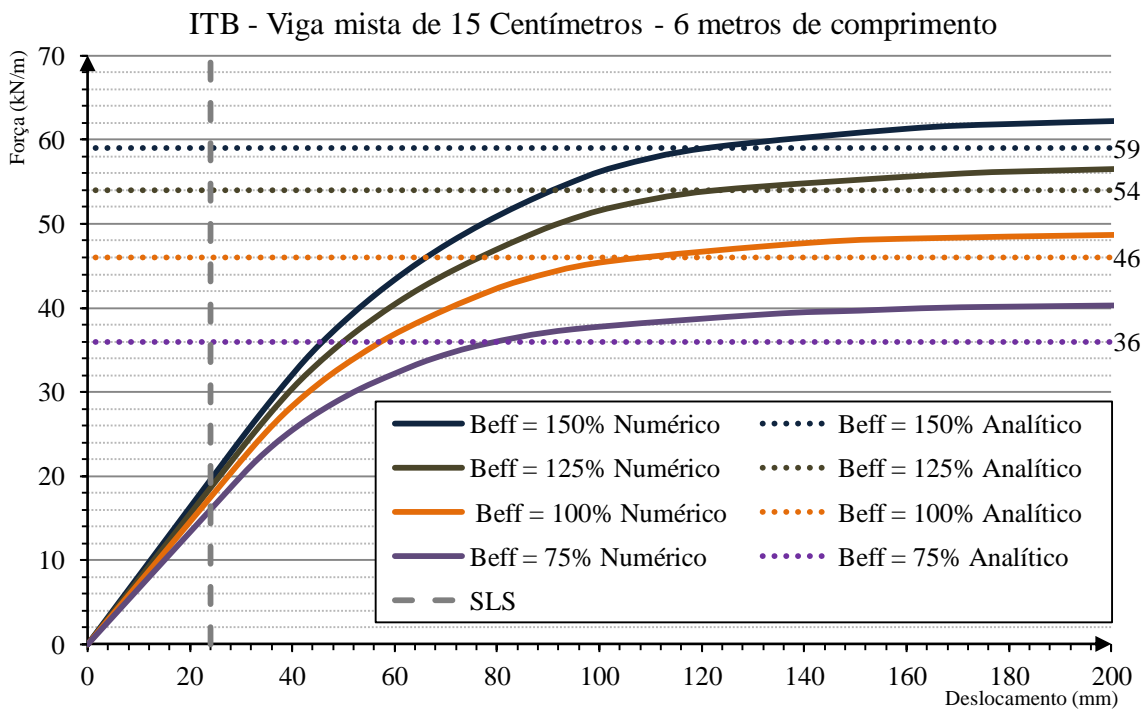
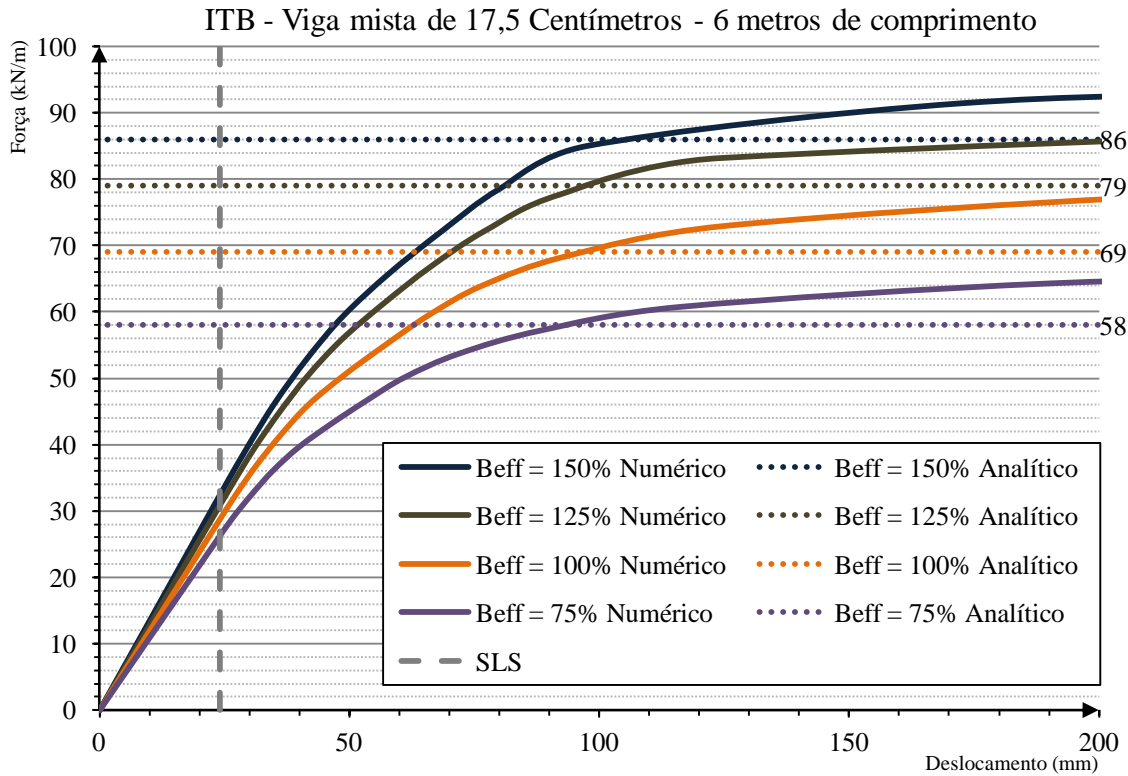
ITB - Inverted T Beam

ITB - Viga mista de 25 Centímetros - 6 metros de comprimento



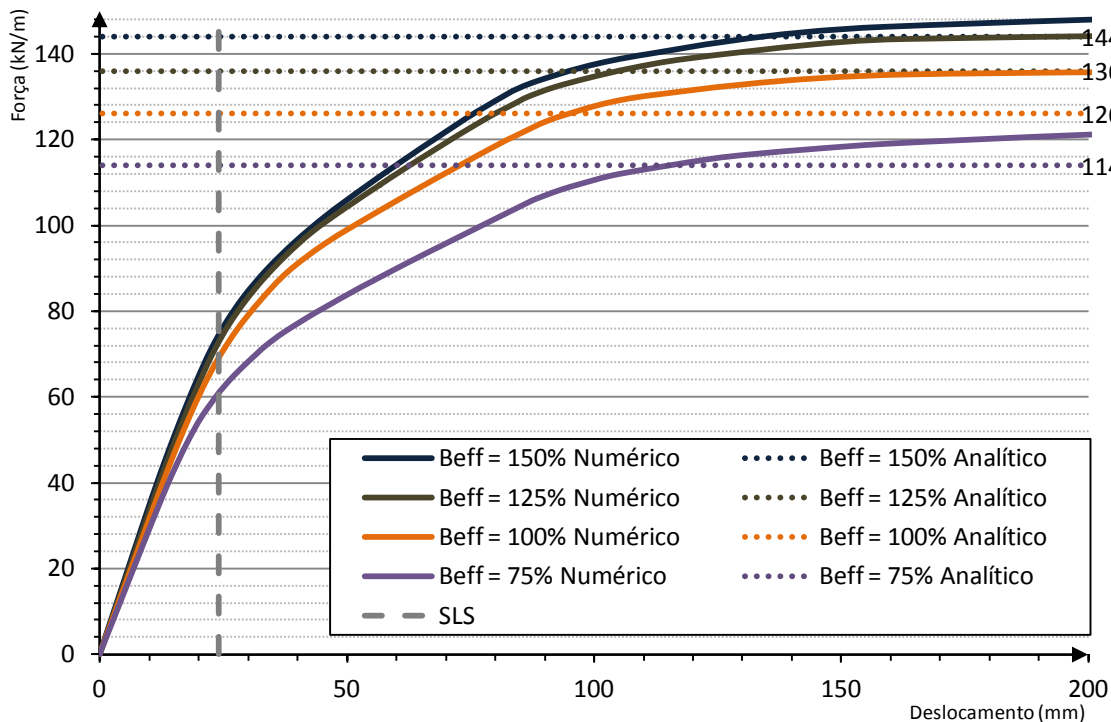
ITB - Viga mista de 20 Centímetros - 6 metros de comprimento





HB - Hat Beam

HB - Viga mista de 25 Centímetros - 6 metros de comprimento



HB - Viga mista de 20 Centímetros - 6 metros de comprimento

