



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

Caracterização do Comportamento de Ligações Assimétricas

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

Autor

Ana Francisca Ferreira Antunes

Orientador

Sandra Filomena da Silva Jordão Alves

Luís Alberto Proença Simões da Silva

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

Coimbra, 31 de Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

O trabalho realizado no presente documento contou com a contribuição de algumas pessoas, que, de alguma maneira ajudaram e proporcionaram que o trabalho convergisse nesta tese. Desta forma, a todos expresso o meu agradecimento.

De entre todos, destaco os orientadores do trabalho, Professora Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves, e Professor Doutor Luís Alberto Proença Simões da Silva, pela dedicação e a total disponibilidade no acompanhamento deste documento. Gostaria de agradecer por todo o tempo despendido através de partilha dos seus vastos conhecimentos, e particularmente por todos as opiniões e conselhos concedidos.

Gostaria de agradecer a todos os docentes do Laboratório de Mecânica Estrutural, particularmente ao Prof. Vitor Dias da Silva, Prof. Rui Simões, à Prof. Aldina Santiago, Prof. Costa Neves, e ao Prof. António Maranhã, por toda a simpatia e todas as contribuições fornecidas.

Aos colegas alunos de doutoramento e alunos de investigação Liliana Marques, Miguel Serra, Guiomar Rodrigues e Rui Matos, pela ajuda inestimável e boa vontade com que sempre se apresentaram. Um muito obrigado a todos.

Gostaria de agradecer a todos os meus familiares e amigos por todo o incentivo e suporte, por sempre terem uma palavra de conforto nos momentos mais difíceis. Particularmente gostaria de agradecer ao Francisco pela paciência e pelo grande apoio.

Em especial gostaria de agradecer à minha mãe, a quem dedico este trabalho. Obrigado pela enorme compreensão, infinito amparo, e acima de tudo por todo o carinho e amor com que me incentivou na realização da presente tese.

RESUMO

O método das componentes constitui uma ferramenta suficientemente precisa e simples para caracterização do comportamento de uma ligação estrutural e é o método preconizado no Eurocódigo 3 (Norma EN 1993-1-8) para o cálculo e verificação de segurança de ligações estruturais. No entanto, até à presente data, a referida norma não abrange o caso das ligações assimétricas. Contudo no próprio EC3 existe a indicação que no caso deste tipo de ligações é necessário mobilizar medidas especiais para o seu dimensionamento, o que confirma a importância do estudo das ligações assimétricas.

O objectivo da presente tese consiste na realização de um estudo paramétrico de caracterização do comportamento de ligações assimétricas soldadas. A referida caracterização será uma continuação do trabalho realizado por Jordão [Jordão, 2008]. Nesse trabalho é estabelecida formulação para as componentes da alma do pilar e estabelecido um modelo de molas em linha com o método das componentes, para ligações assimétricas com relação de 1/2 entre a altura das vigas, estando as vigas alinhadas pelos banzos superiores. A validação da formulação e do modelo é realizada para a geometria referida, sendo necessários casos representativos de toda a gama de geometrias para validação universal das propostas. O trabalho realizado na presente tese enquadra-se nesta problemática, pretendendo alargar o âmbito geométrico do respectivo estudo de modo a que as conclusões possam ser representativas de qualquer geometria de ligação. Com esse objectivo foram estudadas ligações com diferentes relações entre as alturas das vigas ($1/4$, $1/2$ e $3/4$) e com diferentes relações entre o tamanho da ligação e a secção do pilar (1, 2, 3, $1/2$, $1/3$, $2/3$).

Numa primeira fase são preparados modelos numéricos correspondentes a duas ligações do estudo de referência e os seus valores validados por comparação com resultados experimentais em modelos homólogos à escala real. Esta comparação funciona como *benchmark* garantindo assim a qualidade do modelo numérico desenvolvido.

Numa segunda fase os referidos modelos são alterados para reproduzir as geometrias da variação paramétrica.

Os resultados permitem tirar conclusões sobre o comportamento estrutural de ligações assimétricas para esta nova gama de valores.

Por último será revisitada a formulação do parâmetro β do método das componentes e serão propostas algumas alterações para o caso de ligações assimétricas. Essa formulação será implementada e comparada com os resultados numéricos.

ABSTRACT

In order to study the behavior of a connection, it was used the component method which is an accurate and simple tool that is recommended in Eurocode 3 (Standard EN 1993-1-8) for the calculation, verification and safety of structural connections. Though, until the present date, this standard EN does not cover the case of asymmetric links. However in the EC3 there is an indication that in the case of such connection, it is necessary to mobilize special measures for their design, which confirms the importance of the study of asymmetric connections.

This thesis purpose consists in the realization of a parametric study to characterize the behavior of welded asymmetric connections. Such characterization will be a continuation of the work done by Jordão [Jordão, 2008]. In this work it is presented an approach to asymmetric connections with a proportion between the heights of each beam of 2. The beams are aligned with the upper flanges. The design and validation of the model is performed for mentioned geometry, for that matter it is required representative cases of the full range of geometries for validation of the proposals. The work done in this thesis falls into this issue, then it was intended to extend the scope of its geometric study so that the findings may be representative of any binding geometry. To this end connections have been studied with different relationships between the heights of the beams ($1/4$, $1/2$ and $3/4$) and different relations between the size of the connection and the column section (1, 2, 3, $1/2$, $1/3$, $2/3$).

In the first phase are prepared numerical models corresponding to two connections of the study and its reference values validated by comparison with experimental results in homologous models to real scale. This comparison serves as benchmark guaranteeing the quality of the numerical model.

In a second step these models are modified in order to reproduce the geometry of parametric variation.

The results allow drawing conclusions about the structural behavior of asymmetric connections for this new range of values.

Finally will be revisited the formulation of the parameter β of the component method and propose some changes to the case of asymmetric links. This formulation will be implemented and compared with the numerical results.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	1
Índice.....	2
1 Introdução	4
1.1 Enquadramento.....	4
1.2 Objectivos da Dissertação	7
1.3 Organização do Trabalho	8
2 Estado do Conhecimento.....	9
3 Calibração de Modelos Numéricos com Resultados de Ensaios Experimentais.....	11
3.1 Ensaios Experimentais	11
3.1.1 Introdução.....	11
3.1.2 Descrição dos Ensaios Experimentais	11
3.1.3 Instrumentação	13
3.1.4 Referência aos Resultados Experimentais.....	14
3.1.5 Considerações Finais.....	15
3.2 Modelos Numéricos de Elementos Finitos.....	15
3.2.1 Introdução.....	15
3.2.2 Geometria	15
3.2.3 Condições de Apoio	16
3.2.4 Condições de Contraventamento e Carregamento	17
3.2.5 Material	17
3.2.6 Tipo de Análise	18
3.2.7 Malha e Elemento Finito.....	18
3.2.8 Processo de Calibração.....	18
3.2.9 Comparação entre os resultados numéricos e os experimentais existentes	21
4 Estudo paramétrico de Ligações Assimétricas	27
4.1 Modelos Numéricos	27
4.1.1 Introdução.....	27
4.1.2 Geometria.....	27

4.1.3	Condições de Apoio e de Contraventamento	28
4.1.4	Condições de Carregamento.....	29
4.1.5	Material	29
4.1.6	Considerações do Modelo numérico	30
4.1.7	Modelação da ligação viga-pilar por soldadura.....	30
4.1.1	Modelação da zona de transição entre a alma e o banzo do pilar.....	30
4.1.2	Resultados	31
4.1.3.	Comparação de Resultados – Comportamento global.....	63
4.1.3	Comparação de Resultados – Formulação do método das componentes	70
5.	Conclusão.....	76
6.	Referências Bibliográficas	77
Anexo A	1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas tem-se assistido a um aumento progressivo da construção metálica, atingindo-se actualmente valores muito significativos para o consumo de aço, nomeadamente a nível dos países Europeus membros ECCS¹ (Figura 1.1). Ainda que com números mais modestos, Portugal acompanha essa tendência, ainda que com uma ligeira inversão nos últimos dois anos por motivos que se prendem com a crise internacional (Figura 1.2). Este aumento progressivo da construção metálica reflecte a competitividade deste tipo de solução estrutural em diversos sectores da indústria da construção, como sejam os edifícios estruturais e de escritórios, as pontes, as coberturas de recintos desportivos, entre outros. De facto o aço apresenta vantagens incontornáveis em termos de menor tempo de execução, maior facilidade de manuseamento e de transporte, maior facilidade de montagem e desmontagem. A significativa resistência à corrosão dos aços de última geração, a maior facilidade de reforço, assim como a facilidade de vencer grandes vão e a maior limpeza de obra, também correspondem a vantagens associadas ao aço. Nesta lista inclui-se ainda um aspecto muito relevante que tem a ver com a sustentabilidade, isto porque as estruturas metálicas são completamente recicláveis, alinhando-se por isso com os requisitos da construção sustentável.

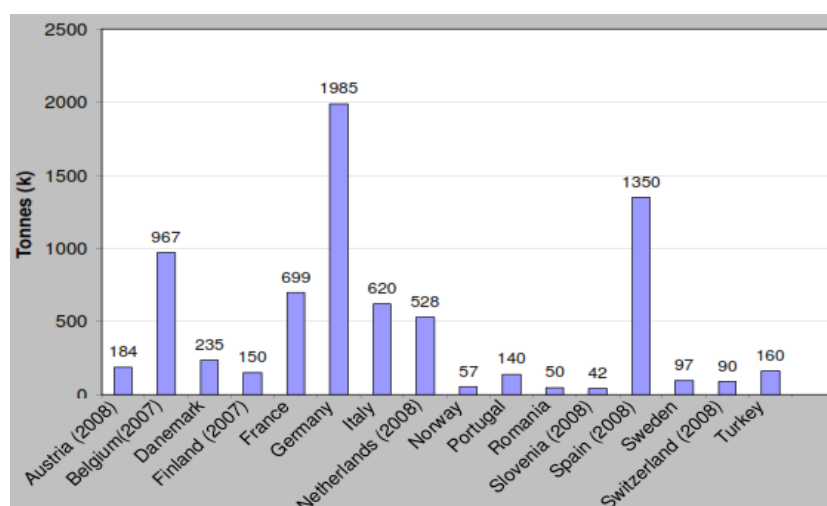


Figura 1.1 - Consumo de aço estrutural dos países europeus membros ECCS em 2009, CMM [CMM, 2010].

¹ECCS – Federação Europeia da Construção em Aço.

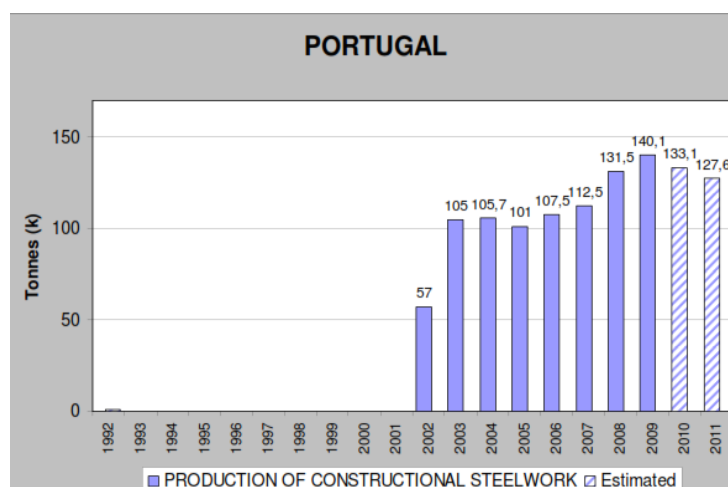


Figura 1.2 - Consumo de aço estrutural em Portugal entre 1992 e 2011, [CMM, 2010].

O crescimento da quota de mercado da construção metálica exige a familiarização do meio técnico com procedimentos de dimensionamento que promovam a qualidade, segurança e competitividade deste material. De facto, nas duas últimas décadas, as implicações em termos de custos decorrentes das incertezas na previsão do comportamento de ligações levaram a que o esforço de investigação em ligações sofresse um incremento notável, resultante no aparecimento de novas metodologias para o dimensionamento de ligações metálicas. Nesse enquadramento e tendo em vista a concepção de estruturas mais seguras e económicas, aliando maior rigor sem perder a simplicidade da utilização das estruturas, foram surgindo novos métodos (analíticos, numéricos e experimentais), para a análise e dimensionamento de ligações metálicas, tendo dado lugar ao aparecimento do denominado “método das componentes” [Weynald et al 1995]. Este método permite a determinação simples da resistência e deformabilidade da ligação partindo da sua geometria, esquema estrutural e propriedades do material, e viria a ser adoptado como método de dimensionamento de ligações ao nível dos Eurocódigos de estruturas metálicas e mistas e tem vindo lentamente a ser incluído em outros códigos a nível mundial.

O método das componentes constitui uma ferramenta suficientemente precisa e simples para caracterização do comportamento de uma ligação estrutural e é o método preconizado no Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8) para o cálculo e verificação de segurança de ligações estruturais. No entanto, até à presente data, este documento não abrange o caso de ligações assimétricas. Apesar disso indica que no caso deste tipo de ligações é necessário mobilizar medidas especiais para o seu dimensionamento. Onde se refere que a distribuição efectiva dos esforços de corte na alma do pilar devem ser tido em conta para a determinação do momento resistente. A inclusão deste comentário indica a relevância e carácter único das ligações assimétricas.

A relevância das ligações assimétricas é reforçada pelo facto de que existe um número elevado de estruturas com vão significativamente distintos entre pórticos adjacentes. Em alguns casos opta-se por reforçar a ligação ou por usar vigas iguais de ambos os lados, sendo no entanto esta situação bastante anti-económica, quer pelos custos de mão-de-obra quer por custos de material, se o número de ligações assimétricas na estrutura for elevado. Além disso, tendo em conta a sobrelotação e preços de construção nos grandes centros urbanos, a redução de pé direito que esta opção implica tem um peso cada vez mais significativo, particularmente em grandes construções em altura.



Figura 1.3 – Ligação Assimétrica.

As razões apontadas atrás evidenciam a necessidade do estabelecimento de formulação para ligações assimétricas (Figura 1.3). Em Jordão 2008 [Jordão, 2008], é feita a referida abordagem para ligações assimétricas com uma relação de 2 entre a altura das vigas, estando as vigas alinhadas pelos banzos superiores. A referida caracterização foi realizada na perspectiva do método das componentes, tendo sido estabelecido um modelo para a ligação assimétrica e formulação para as suas componentes activas.

O estudo de Jordão tem por base uma ligação que foi definida com base num conjunto de critérios que conduz a uma situação otimizada, mas nem sempre conseguida na prática, além disso corresponde a uma única relação entre as alturas das vigas e entre a dimensão da ligação em relação ao pilar. Frequentemente a relação entre a altura das vigas que confluem no nó é resultado da optimização do comportamento estrutural do pórtico ou resultam de questões económicas, logísticas, arquitectónicas, de produção ou outras, podendo conduzir a configurações distintas da estudada em Jordão, e que dada a sua importância, interessa estudar. Além disso, para universalização da formulação proposta em Jordão para análise de ligações assimétricas, é necessário que a sua validação seja realizada para um leque de geometrias que cubra todo o âmbito de ligações.

Assim, o estudo paramétrico realizado na presente tese pretende alargar o âmbito do trabalho realizado em [Jordão, 2008] e estudará outros valores para a relação entre as alturas das vigas e os casos em que o pilar é comparativamente muito maior ou menor que a viga maior. Desta forma constitui uma das etapas do trabalho necessário à validação completa da proposta de Jordão para formulação de dimensionamento de ligações assimétricas. As outras etapas passariam por outro estudo paramétrico com geometrias assimétricas com vigas não alinhadas e as respectivas análises estatísticas de validação das formulações propostas.

O estudo paramétrico realizado será feito com base em modelos de elementos finitos e será dividido em duas fases. Numa primeira fase serão preparados modelos idênticos aos preparados em Jordão e será feita uma análise de benchmark, em que os resultados numéricos serão comparados com resultados experimentais de modelos homólogos experimentais. Numa segunda fase esses modelos serão alterados para corresponderem à variação paramétrica escolhida para o trabalho.

Os resultados serão analisados em duas perspectivas:

(1) para cada caso, qual é a influência de cada uma das ligações no comportamento do painel da alma. Esta informação trará dados que permitem verificar as premissas onde se apoiou o desenvolvimento do modelo de comportamento e a formulação das componentes da alma do pilar para ligações assimétricas em [Jordão, 2008], nomeadamente sobre quais os parâmetros que mais condicionam a resposta estrutural da ligação assimétrica.

(2) para alguns casos representativos, avaliar como compara a actual formulação do método das componentes com os resultados numéricos. Esta avaliação trará informação que comprova que a actual formulação do método das componentes não serve para ligações assimétricas e que ajudará a isolar a influência de outros parâmetros ainda não considerados para o comportamento estrutural das ligações assimétricas.

1.2 Objectivos da Dissertação

O objectivo da presente tese consiste numa análise paramétrica no âmbito das ligações assimétricas. Sendo que, neste documento será dada continuidade ao trabalho realizado em Jordão [Jordão, 2008], através do estudo de novas configurações para ligações assimétricas, alterando as relações entre as vigas e a dimensão relativa da ligação em relação ao pilar.

Este trabalho corresponde a uma das etapas relativa ao trabalho remanescente a realizar no para a completa definição de modelos de molas e de formulação para as componentes da alma do pilar de ligações assimétricas, na perspectiva do método das componentes.

1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 1 foi descrito o enquadramento, objectivos e organização do trabalho.

No Capítulo 2 é estabelecido o estado do conhecimento relativamente ao comportamento estrutural de ligações metálicas assimétricas. No presente capítulo estabelece-se o interesse do tema e respectivos objectivos que impulsionaram a realização do mesmo.

No Capítulo 3 apresenta-se a elaboração de modelos numéricos de elementos finitos para dois casos. A primeira situação correspondente a uma ligação viga-pilar soldada em nó externo e a segunda situação correspondente a uma ligação assimétrica com uma relação de 2 entre a altura das vigas, estando as vigas alinhadas pelos banzos superiores. Além disso, calibraram-se os referidos modelos numéricos com resultados de ensaios experimentais provenientes do trabalho de referência [Jordão, 2008].

O Capítulo 4 descreve o estudo paramétrico realizado, com a realização de modelos numéricos de elementos finitos para ligações assimétricas com outras relações entre as alturas das secções das vigas e também outras relações entre as vigas e o pilar. De forma a se obter um conhecimento mais alargado no âmbito deste tipo de ligações.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho realizado. Sendo este um tema onde ainda existe muito trabalho que poderá ser desenvolvido, apresentam-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

Os primeiros estudos para a determinação dos parâmetros que influenciam o comportamento de ligações soldadas, em termos experimentais e analíticos remontam à década de 1940 nos EUA. Nestes trabalhos foram dados os primeiros passos no estudo de aspectos fundamentais para a caracterização analítica do comportamento de ligações como por exemplo os efeitos da distribuição e interacção de esforços, da instabilidade por compressão, da influência dos banzos do pilar e da influência do esforço de corte. Destes estudos surgiram as primeiras formulações analíticas para o estudo de ligações metálicas.

A partir do início da década de 70, estudos realizados no Japão dedicam-se ao estudo do painel da alma ao corte, especificamente na sua capacidade de dissipação de energia. Estes estudos tiveram grande impacto no campo da análise sísmica e permitiram estabelecer as estruturas metálicas como estruturas de grande capacidade dissipativa.

Com base num extenso trabalho experimental, Zoetemeijer [Zoetemeijer, 1975], no ano de 1975, analisa o efeito da interacção de tensões e estabelece formulação para a caracterizar. Esta contribuição é particularmente valiosa para a caracterização do comportamento do painel da alma do pilar pois o estado de tensão nele instalado devido às forças provenientes do pilar e das ligações é triaxial. Assim compreende-se que é imprescindível ter em conta a devida interacção entre todas as componentes do estado de tensão na alma do pilar para uma correcta avaliação da resistência da ligação.

O trabalho de Zoetemeijer permitiu que o foco de atenção na alma do pilar deixasse de estar dirigido apenas para o esforço de corte e trouxesse a lume a participação das outras componentes da alma do pilar (compressão e tracção). Nesse enquadramento, foi iniciado no início da década de 80, em Innsbruck, um programa de investigação com o objectivo de estabelecer individualmente o comportamento das três componentes da alma do pilar a partir de ensaios experimentais (Tschemmernegg, Humer e Klein).

Em 1987, em Lausanne, Frey e Sybai, deram continuidade a este trabalho, mas desta feita através de modelações numéricas que por seu turno serviriam de base ao trabalho analítico realizado nos anos de 1989 a 1995 por Sibay e Jaspert e Jaspert. Este trabalho deu origem a formulação analítica completa para as componentes da alma do pilar. No entanto esta formulação era complexa pois requeria a utilização explícita de um critério de cedência para ter em conta as interacções de tensões na alma do pilar.

Em 1995, Jaspert e Guisse, simplificaram as referidas formulações analíticas substituindo utilização explícita de um critério de cedência por coeficientes simplificados e substituindo a curva completa, multilinear de cada componente, por curvas bilineares, definidas por uma rigidez e uma resistência. Este era o input ideal para o método das componentes (Weinand), que viria a ser desenvolvido na década de 80 e permitia a análise rigorosa mas expedita de ligações.

Ainda com o objectivo de simplificar a formulação para análise de ligações nos Eurocódigos foi estabelecido um outro coeficiente simplificativo denominado de parâmetro β . Este permite ter em conta de forma simplificada o efeito recíproco que as ligações em nó interno têm uma sobre a outra devido ao facto de partilharem o painel da alma do pilar. A consideração explícita desse facto, para cada ligação, no cálculo de um pórtico tornaria o cálculo extraordinariamente iterativo e conseqüentemente proibitivo. No entanto a versão actual do Eurocódigo não preconiza valores do parâmetro β para ligações assimétricas, ainda que indique que em presença destas devem ser tomadas medidas especiais para o seu dimensionamento.

Neste enquadramento Jordão desenvolveu um estudo com vista a caracterizar o comportamento de ligações assimétricas na perspectiva do método das componentes. No trabalho foram desenvolvidos modelos numéricos calibrados com resultados experimentais de ligações assimétricas à escala real. Os resultados do trabalho permitiram estabelecer quais os parâmetros determinantes no comportamento deste tipo de ligações e formulação para as componentes da alma do pilar e bem assim um modelo de comportamento (molas) na perspectiva do método das componentes. Foram ainda estabelecidas conclusões relativamente aos parâmetros β para ligações assimétricas. No ano de 2009, E. Bayo, desenvolveu um novo modelo para ligações em nó interno em forma de cruz que compatibiliza o comportamento das duas ligações e o painel da alma do pilar, contornando a necessidade da transformação do parâmetro β , mas ficando não alinhado com o método das componentes. B. Hashemi, em 2010, analisou detalhadamente o efeito das ligações assimétricas quanto ao seu comportamento sísmico do momento resistente das secções, mas não propõe formulação.

O estudo realizado na presente tese enquadra-se nesta problemática. Especificamente pretende dar-se continuidade ao estudo iniciado por Jordão relativo ao estabelecimento de um modelo de molas e de formulação para as componentes da alma do pilar para ligações assimétricas, na perspectiva do método das componentes. Neste caso é estudada uma variação paramétrica mais alargada que permitirá ganhar sensibilidade aos parâmetros que condicionam o comportamento das ligações assimétricas nas geometrias analisadas na presente tese, e numa segunda iteração (fora do âmbito da presente tese e em trabalhos futuros) servir de plataforma de validação estatística para o modelo e a formulação proposta em Jordão [Jordão, 2008].

3 CALIBRAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS COM RESULTADOS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Ensaio Experimentais

3.1.1 Introdução

Os ensaios experimentais fornecem um conjunto de informação essencial para a compreensão do comportamento das ligações em estudo. Além disso, fornecem dados para a calibração dos modelos numéricos de elementos finitos.

Tendo em conta o referido e que o objectivo da primeira fase deste documento consiste na modelação de duas tipologias de ligações, sendo uma em nó externo e outra em nó interno e posteriormente calibrar esses modelos com os resultados obtidos em ensaios experimentais existentes. Pretende-se descrever os ensaios realizados para a obtenção de uma melhor compreensão dos resultados. Desta forma procede-se a uma explicação dos pontos mais importantes desses ensaios.

Foram vários os ensaios desenvolvidos por Jordão, 2008 [Jordão,2008], no entanto apenas serão referidos os considerados neste trabalho. No entanto apenas foram analisadas as tipologias com configuração em nó externo e em nó interno com vigas de alturas diferentes (sendo o rácio das alturas das vigas igual a 2). Sendo que a ligação em nó externo corresponde a um dos casos preconizados no EC3, que funcionam como “benchmark” para avaliar a qualidade das formulações e procedimentos estabelecidos nos modelos desenvolvidos.

3.1.2 Descrição dos Ensaio Experimentais

A descrição pormenorizada dos ensaios experimentais encontra-se no documento de referência [Jordão, 2008]. No entanto, apresenta-se uma breve referência das considerações nesse documento definidas, de forma a uma melhor compreensão da calibração realizada.

Foi considerada uma estrutura fixa de apoio ao conjunto ensaiado, constituída por uma parede e por uma laje de reacção de grande rigidez. Sendo que esta estrutura é aquela que serve de apoio a uma estrutura amovível constituída por uma viga de grande rigidez que se encontra ligada à parede de reacção, e pela sapata que se encontra fixa à laje de reacção. A configuração que foi ensaiada apoia-se nessa estrutura amovível, referindo que a ligação é feita por dispositivos que permitem a rotação das extremidades do pilar no plano da estrutura (rótulas). Além disso, no plano perpendicular à estrutura é prevista uma estrutura auxiliar constituída por um pórtico que se liga à extremidade da viga de grande rigidez. Com esta

estrutura auxiliar pretende-se conferir maior rigidez ao conjunto e minorar a deformação da viga provocada pela reacção dos actuadores quando estiverem em carga [Jordão, 2008].

As solicitações aplicadas na estrutura foram através de actuadores hidráulicos situados nas extremidades das vigas. Considerando isto, refere-se que o actuador utilizado para a viga menor tem capacidade nominal de 60 ton e curso efectivo de 100 mm, e o actuador na viga maior tem capacidade nominal de 100 ton e curso efectivo de 300 mm. Tendo em conta que ambos os actuadores serão equiparados com rótulas nos extremos de modo a que possam acompanhar a estrutura na situação de grandes deformações [Jordão, 2008].

Apresenta-se o esquema da instalação experimental para o caso da ligação em nó externo e para a ligação em nó interno com vigas de alturas diferentes na

Figura 3.1

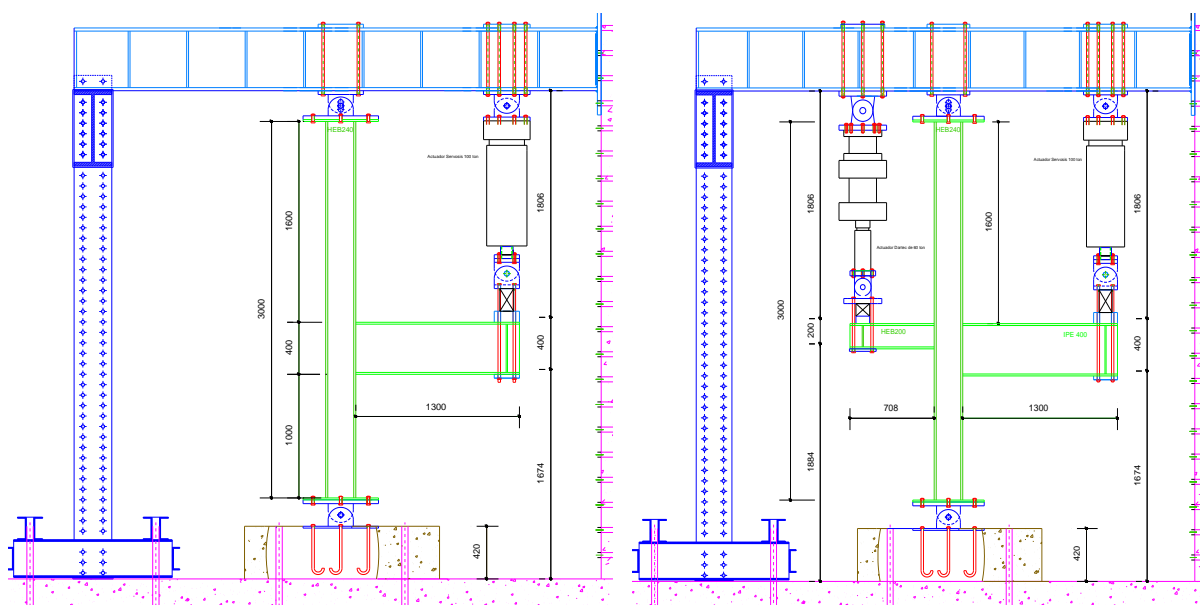


Figura 3.1 – Esquema da instalação dos ensaios referidos [Jordão, 2008].

Além dos elementos referidos e apresentados na figura anterior, foram também considerados alguns elementos secundários. Procedeu-se a uma especificação desses elementos seguidamente, pois nos modelos numéricos realizados foi necessário ter em conta todas estas considerações.

Tendo em conta o referido, refere-se que nas extremidades das vigas foram colocados dispositivos destinados a impedir deslocamentos das mesmas fora do plano da estrutura. Para além disso, quando as deformações das vigas atingem valores elevados a força horizontal do actuador é considerável e o actuador tem tendência a se movimentar ao longo da viga. Para evitar este deslocamento no ensaio foram consideradas barras soldadas à viga e que impedem o actuador de se deslocar ao longo da mesma.

3.1.3 Instrumentação

Um dos principais objectivos com a realização de ensaios experimental corresponde à obtenção de informação que permitam a calibração de modelos numéricos. Estes valores provenientes do ensaio experimental são retirados através de transdutores de deslocamento e extensómetros eléctricos. A caracterização da rotação da ligação e da deformação do painel da alma da coluna fora do seu plano é feita através dos transdutores (Figura 3.2)

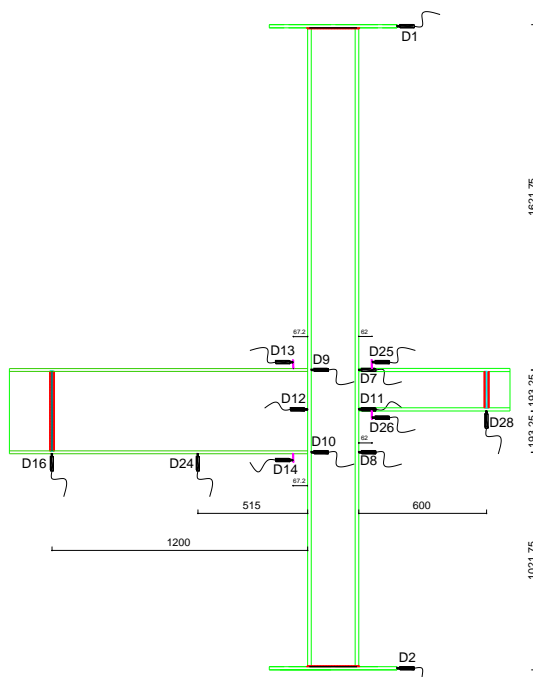


Figura 3.2 – Transdutores de deslocamentos nos ensaios [Jordão, 2008].

A instrumentação mais relevante para a obtenção de informação para a calibração dos modelos numéricos são os extensómetros eléctricos. Sendo que a sua localização foi definida tendo em conta as zonas mais determinantes em termos de esforços e deformações. Desta forma, refere-se que a zona objectivo corresponde ao painel da alma do pilar, isto porque, o comportamento da ligação é condicionado pelo comportamento do painel.

A distribuição destes foi efectuada de encontro com uma malha ortogonal regular, que se apoia em três linhas notáveis ao longo do painel. Salientando que estas linhas se encontram a meia da largura e de cada lado do painel do pilar, junto ao fim da zona de concordância circular entre a alma e o banzo [Jordão, 2008]. O posicionamento dos extensómetros eléctricos no ensaio experimental corresponde ao apresentado na Figura 3.3.

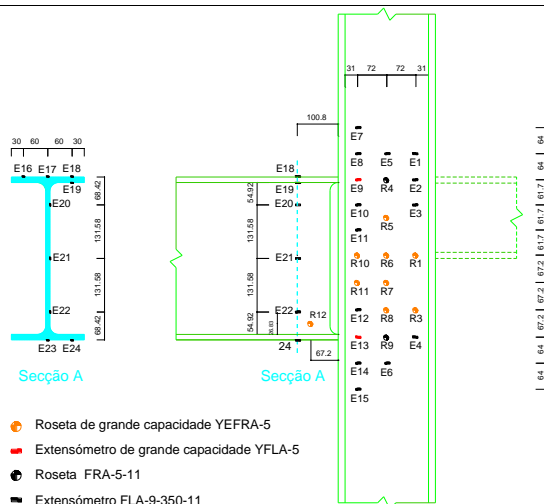


Figura 3.3 – Posicionamento dos extensómetros eléctricos no ensaio experimental [Jordão, 2008].

Ainda na instrumentação é necessário referir que os actuadores utilizados para a aplicação do carregamento à estrutura têm integrada uma célula de carga. É nesta célula de carga que se retira a força que solicita a estrutura. A observação desta força é fundamental para a reacção de gráficos força-deslocamento que contribuem para uma melhor compreensão do comportamento da ligação.

3.1.4 Referência aos Resultados Experimentais

Faz-se referência aos resultados provenientes do ensaio experimental referente à configuração em nó externo em termos de caracterização do estado de deformação. Esses resultados serão apresentados para níveis de momento flector seleccionados ao longo da história de carga. Assim será possível acompanhar a evolução das extensões ao longo do grupo (linhas verticais de extensómetros referidas no ponto 3.1.3 ao longo do painel da alma do pilar), e ao mesmo tempo, ao longo do carregamento. Para a configuração em nó interno com vigas de alturas diferentes (rácio entre as alturas de 2), os níveis de momento flector considerados para análise de resultados apresenta-se na

Figura 3.4.

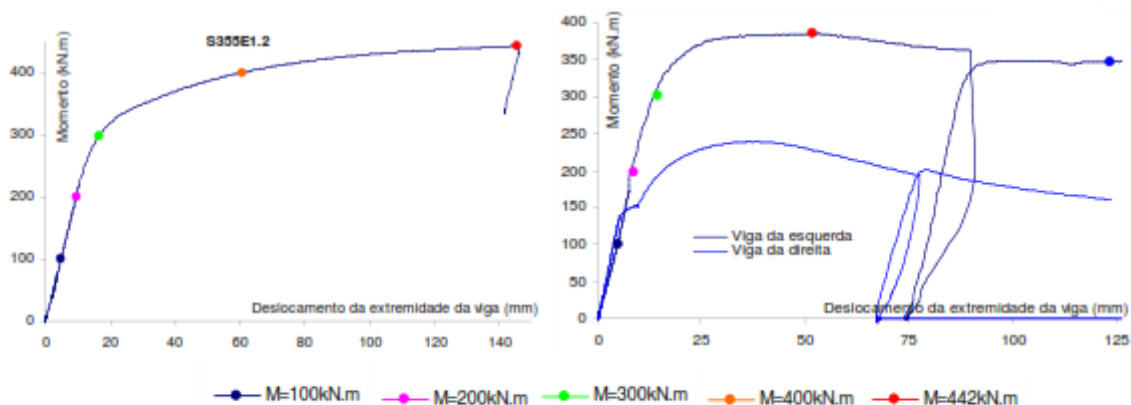


Figura 3.4 – Níveis de momento seleccionados (configuração em externo e em nó interno)

Serão estes os momentos flectores analisados na comparação dos resultados dos ensaios experimentais e dos modelos numéricos.

3.1.5 Considerações Finais

Sabendo todos os pressupostos que foram considerados e definidos no ensaio experimental pode-se proceder à modelação numérica dos casos descritos anteriormente (configuração em nó externo e em nó interno em que o rácio entre as alturas das vigas é de dois). Essa modelação será então calibrada com os resultados obtidos nestes ensaios experimentais de forma a analisar e a comparar os resultados entre os dois modelos. Tendo em conta o referido, note-se que no ensaio experimental, os parâmetros que se verificaram mais determinantes corresponderam aos valores do esforço de corte no painel da alma do pilar e a instabilidade da zona comprimida do painel. Pretende-se desta forma, comparar se no modelo numérico calibrado, estas também serão as zonas mais condicionantes.

3.2 Modelos Numéricos de Elementos Finitos

3.2.1 Introdução

O objectivo desta fase do trabalho corresponde à modelação dos casos anteriormente referidos configuração em nó externo e em nó interno em que o rácio entre as alturas das vigas é de dois) através do método dos elementos finitos, recorrendo ao software Abaqus.

Tendo como base o objectivo referido, será necessário ter em atenção todos os pressupostos do ensaio experimental descrito. Assim, serão descritas as considerações assumidas no modelo numérico de forma a que este modelo seja o mais semelhante possível ao modelo experimental. No entanto, este não corresponde ao único objectivo proposto, pois pretende-se ainda a calibração dos modelos numéricos de acordo com os resultados provenientes do ensaio experimental. De forma a cumprir os objectivos definidos, apresenta-se seguidamente todas as considerações admitidas ao longo da modelação numérica, para melhor compreensão do trabalho realizado.

3.2.2 Geometria

Para a geometria dos modelos referidos foram considerados os perfis homólogos aos admitidos nos ensaios experimentais referidos. Para o primeiro modelo efectuado (ligação em nó externo) as dimensões são as apresentadas no Quadro 1 do Anexo A, enquanto que as dimensões consideradas no segundo modelo estudado (ligação assimétrica com a altura das vigas com rácio de 2), apresentam-se no Anexo A. Para uma melhor compreensão dos dois modelos calibrados e analisados neste capítulo, apresenta-se a Figura 3.5, onde se verificam as dimensões (em milímetros) dos elementos constituintes das ligações em estudo.

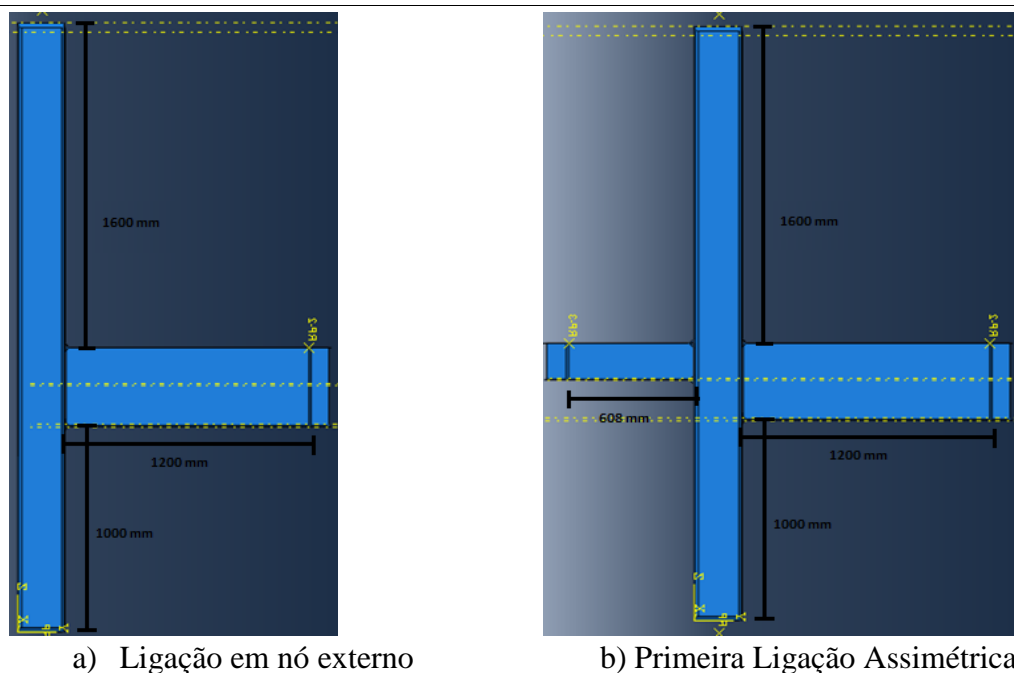


Figura 3.5 - Geometria dos dois modelos numéricos analisados e calibrados.

3.2.3 Condições de Apoio

A definição das condições de apoio é um factor preponderante na modelação das secções, pois, se esta for incorrectamente introduzida, os resultados não representam o real comportamento estrutural do modelo. De forma a representar o comportamento rígido do aparelho de apoio onde se aplicam as condições de apoio, foram consideradas chapas rígidas soldadas à secção transversal do pilar. Assim estes pontos funcionam como um só, e se movimenta em torno de um ponto de referência, representado na Figura 3.6.

De forma a simular o comportamento estrutural das condições de apoio definidas nos ensaios experimentais reproduziu-se os apoios superior e inferior do tipo rótulas, sendo que, no apoio superior verifica-se a possibilidade de deslocamento vertical (Figura 3.6). De salientar, que foram consideradas não só as libertações adequadas para simular o ensaio experimental, mas também as distâncias dos pontos onde se consideram as rotulas.

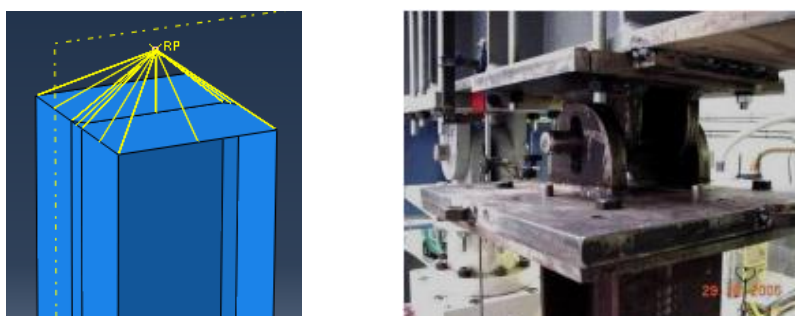


Figura 3.6 – Modelação das condições de apoio (rótula do pilar).

3.2.4 Condições de Contraventamento e Carregamento

No ensaio experimental foram considerados dispositivos destinados a impedir os deslocamentos das vigas fora do plano da estrutura (3.1.2). Desta forma, foi necessário simular este contraventamento, sendo que se admitiu a existência deste elemento com como um corpo rígido em que o ponto de referência corresponde ao ponto onde se aplica o carregamento (Figura 3.7).

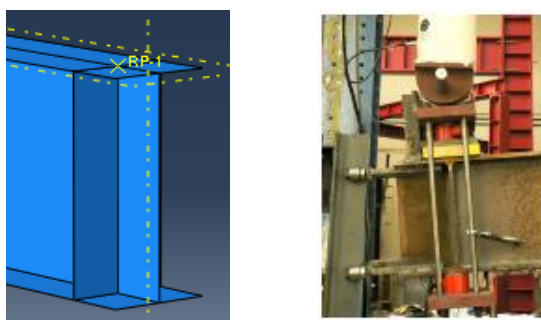
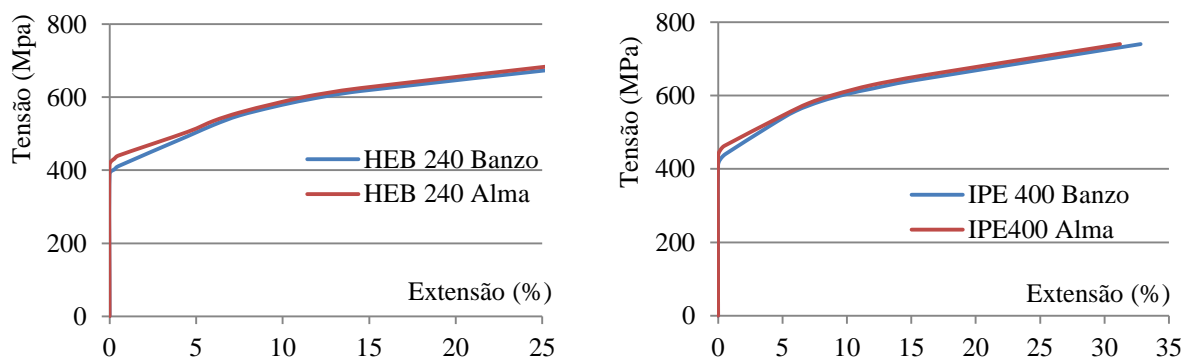


Figura 3.7 – Modelação das condições de contraventamento.

No ensaio experimental o carregamento foi aplicado através de um actuador hidráulico situado na extremidade da viga (como já referido). No modelo numérico o carregamento da secção foi atribuído através da imposição de um deslocamento, para que este reproduza o deslocamento de cada actuador considerado no ensaio experimental (Figura 3.7).

3.2.5 Material

As secções são em aço estrutural da classe S355, a que corresponde a uma tensão de cedência de 355 N/mm^2 . Para especificar o material no modelo é necessário considerar o Módulo de Elasticidade e o coeficiente de Poisson. A análise considerada foi baseada no método de Newton Rapson. As leis materiais adoptadas nos modelos numéricos são as apresentadas na Figura 3.8:



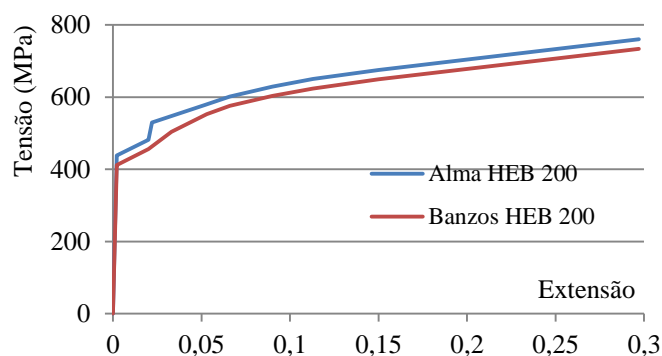


Figura 3.8 – Lei material considerados nos modelos numéricos.

3.2.6 Tipo de Análise

A análise através do método dos elementos finitos pode assumir diversos níveis de sofisticação, dependendo do tipo de problema que se pretende analisar. Nas soluções adoptadas considerou-se uma análise não linear geométrica e material.

Considerou-se uma análise não linear material porque se verifica que a relação tensão-extensão não é elástica linear, sendo que se verifica a existência de deformações plásticas. Admitiu-se uma análise não linear geométrica visto ser necessário considerar alterações na geometria na ligação, pois é espectável que esta sofra deslocamentos ou rotações demasiado grandes para se poder considerar que a geometria se mantenha inalterada.

3.2.7 Malha e Elemento Finito

A discretização da malha é estudada de forma a que se verifique a convergência da mesma, adoptando-se assim a malha óptima para a secção em estudo. Salienta-se assim, que se pretende uma optimização entre a qualidade da solução obtida e o esforço computacional exigido. Tendo em conta isto, considerou-se que os modelos com elementos finitos estudados seriam do tipo casca, em que se consideram deformações de membrana, corte transversal e flexão. Referindo que os elementos casca admitidos são lineares e apresentam 6 graus de liberdade ($U_x, U_y, U_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$).

3.2.8 Processo de Calibração

O processo de calibração foi efectuado no documento de referência [Jordão, 2008], sendo que, nos modelos realizados consideraram-se os parâmetros de calibração obtidos nesse documento. Esses parâmetros demonstraram ter capacidade de alterar o comportamento da estrutura, a nível global e a nível local. De forma a uma melhor compreensão apresentam-se seguidamente esses parâmetros com a referida justificação da escolha do mesmo, trabalho realizado no trabalho de referência [Jordão, 2008].

- Projecção da espessura da soldadura no plano do banzo do pilar:
- Espessura do banzo do pilar ao longo da projecção da espessura da soldadura.

Analisando os resultados dos ensaios experimentais do artigo de referência, ao verificar a deformação nesta zona, nomeadamente para grandes deformações, denota-se que o banzo deforma como um bloco rígido em todo o comprimento abrangido pela soldadura. Além disso, a zona do banzo do pilar, junto da soldadura, sofre um aumento de espessura para garantir uma deformação em bloco da zona da soldadura de acordo com a Figura 3.9:

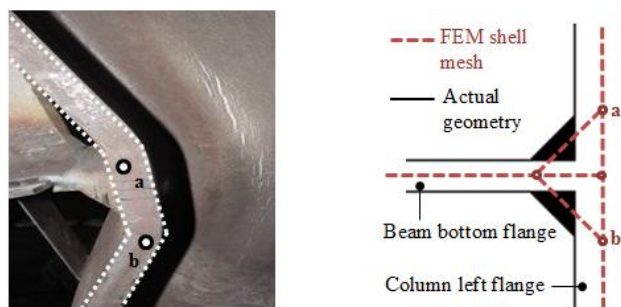


Figura 3.9 – Representação da Projecção da espessura da soldadura [Jordão, 2008]

▪ Zona de transição entre a alma e o banzo do pilar

Os efeitos da modelação deste elemento passam pela diminuição do comprimento de encurvadura do painel da alma do pilar, alterações em termos do campo de tensões no painel e aumento da rigidez da junta entre a alma e o banzo que faz com que a resistência do banzo no painel influencie o comportamento da alma.

Tendo em conta o referido, a transição entre a alma e o banzo do pilar foi modelada através do aumento da espessura dos elementos do painel adjacentes aos banzos. Os parâmetros analisados corresponderam ao comprimento da zona de transição entre a alma e o banzo do pilar ao longo da largura do painel e a espessura dos elementos do painel na zona de transição referida (Figura 3.10).

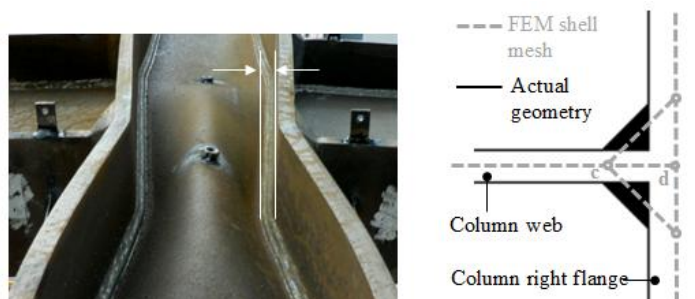


Figura 3.11 – Modelação da zona de transição entre a alma e o banzo do pilar [Jordão, 2008].

- Tipo e amplitude da perturbação geométrica.

Na análise geométrica não linear, em termos de análise numérica, verifica-se necessário introduzir uma perturbação para deteção do início da instabilidade. Nesta situação foi considerada uma pequena imperfeição geométrica no plano perpendicular ao plano do painel da alma do pilar (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Imperfeição geométrica [Jordão, 2008].

Os resultados obtidos em termos de comportamento global e local foram os seguintes:

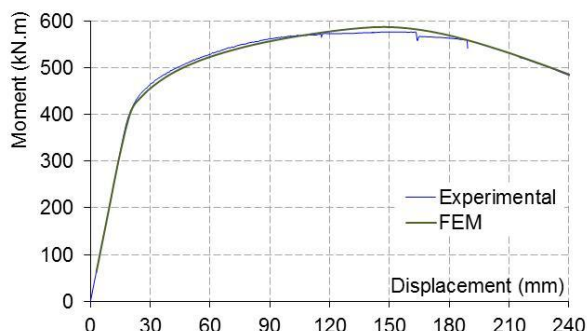
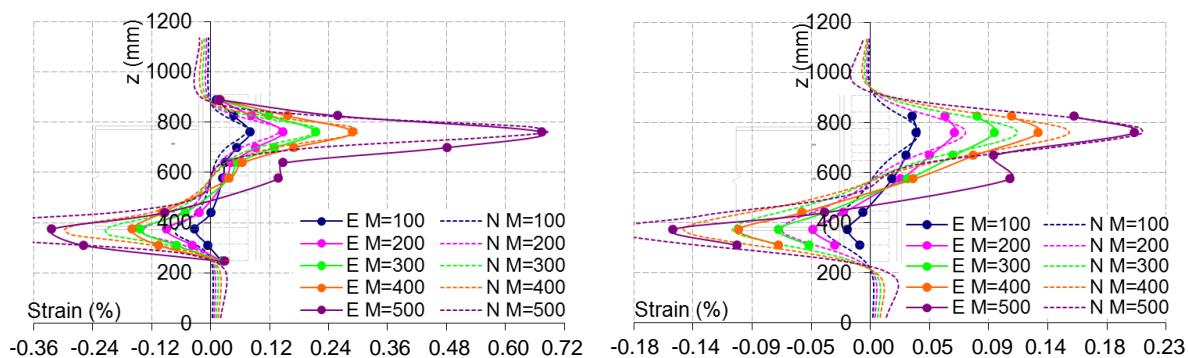


Figura 3.13 – Comparação entre valores numéricos e experimentais, em termos de comportamento global [Jordão, 2008].



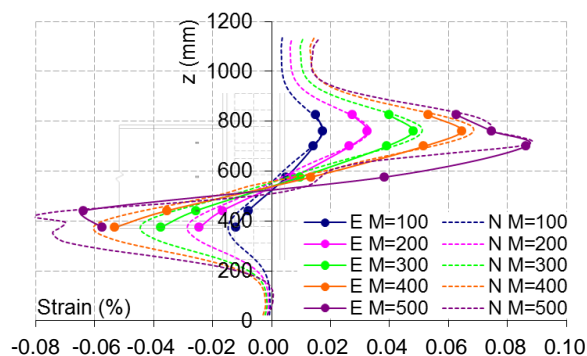


Figura 3.14 – Comparação entre valores numéricos e experimentais, em termos de comportamento local [Jordão, 2008].

3.2.9 Comparação entre os resultados numéricos e os experimentais existentes

Pretende-se agora comparar os resultados dos modelos numéricos com os resultados dos ensaios experimentais homólogos. Os resultados vão ser analisados em termos de comportamentos locais e em termos de comportamento global, nomeadamente, em termos de deslocamentos e de tensões, respectivamente. Primeiramente, será analisada a primeira modelação realizada, correspondente à ligação em nó externo e posteriormente serão analisados os resultados da ligação assimetria.

3.2.9.1. Resultados do Modelo da Ligação em Nó Externo

A primeira análise apresenta-se seguidamente em termos de comportamento local, de acordo com a seguinte figura (Figura 3.15)

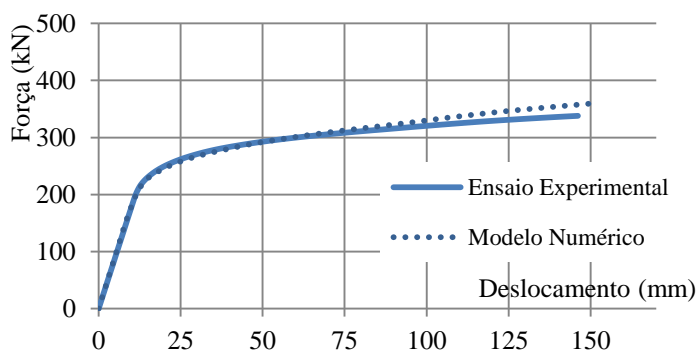
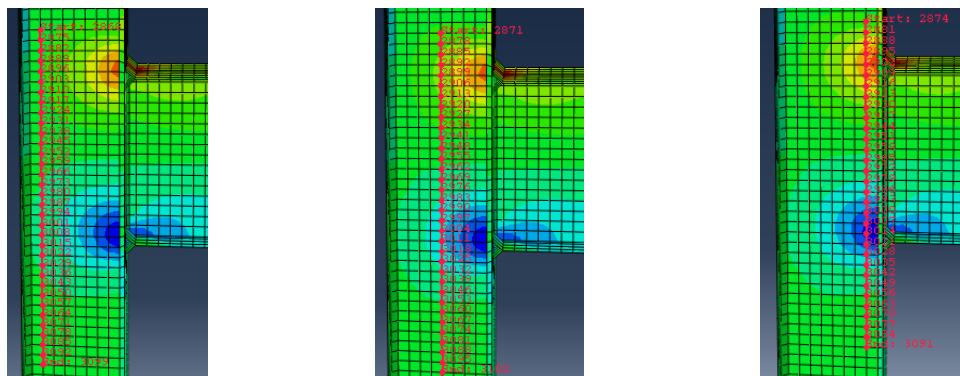


Figura 3.15 – Comparação entre resultados em termos de comportamento global.

Comparando os resultados da simulação numérica com os resultados experimentais obtidos de acordo com a figura anterior, verifica-se um bom ajuste o que permite utilizar o modelo de forma a prever o comportamento da ligação real. No caso da rigidez inicial o ajuste é bastante razoável, no entanto, para valores de deslocamentos elevados, a força já não se ajusta tão bem, mas verifica-se que mesmo assim o ajuste é aceitável.

Em termos de comportamento local apresentam-se os valores obtidos nas linhas homólogas às linhas onde foram consideradas os extensómetros apresentadas no ensaio experimental (3.1.3), como se analisa na Figura 3.17:



a) Linha número 1

b) Linha número 2

c) Linha número 3

Figura 3.16 – Representação esquemática da colocação das linhas de extensómetros no modelo numérico.

Os resultados experimentais representados (Figura 3.17, Figura 3.18, Figura 3.20 e Figura 3.21 são os correspondentes às linhas de extensómetros colocados ao longo da alma do pilar (Figura 3.17).

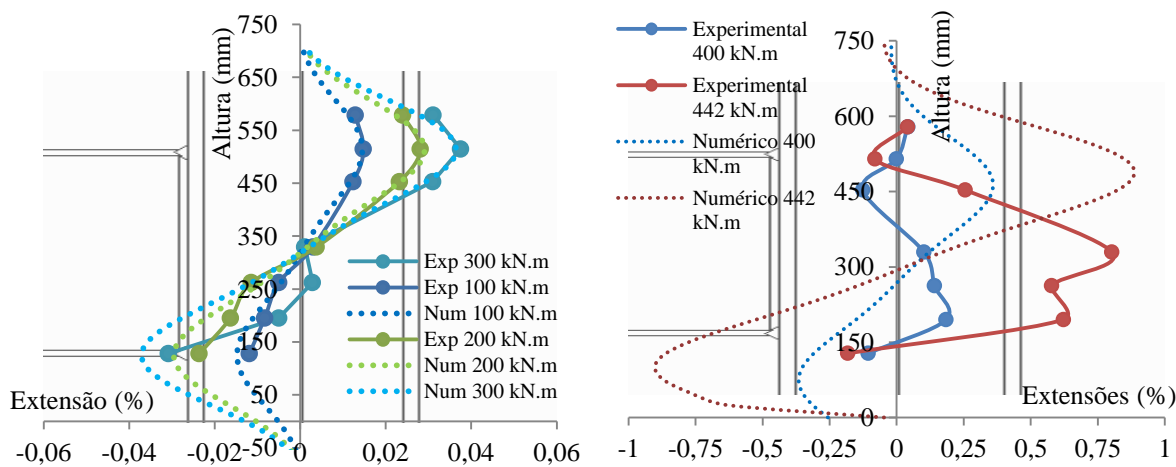


Figura 3.17 - Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 1 - antes e depois da carga máxima respectivamente).

Nas figuras seguintes apresentam-se os valores referentes às extensões na segunda linha vertical de extensómetros, primeiramente para níveis de momento inferiores à carga máxima e posteriormente para valores superiores à carga máxima.

Compara-se seguidamente os valores obtidos correspondentes à segunda linha vertical de extensómetros localizada na alma do pilar para os mesmos níveis de carga.

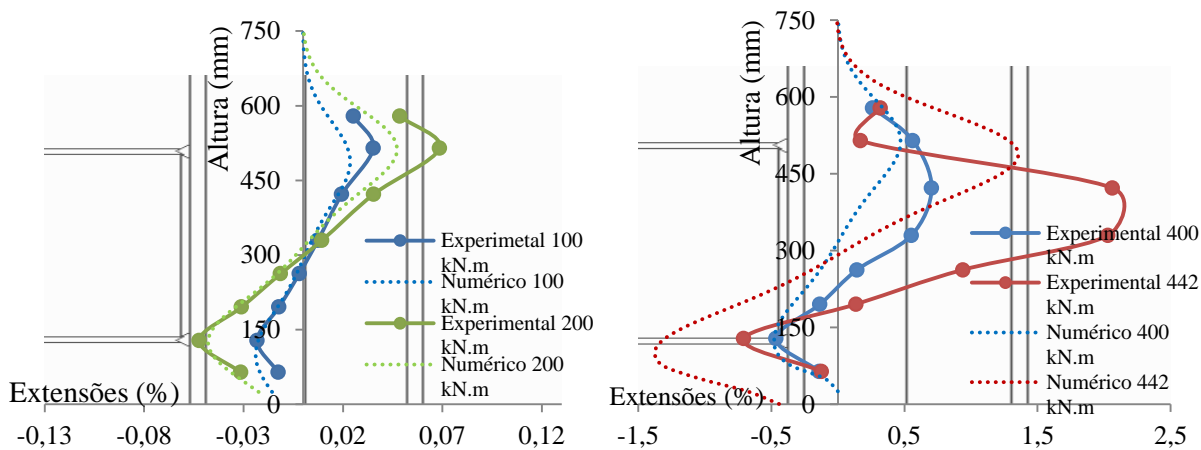


Figura 3.18 - Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 2 - antes e depois da carga máxima, respectivamente)

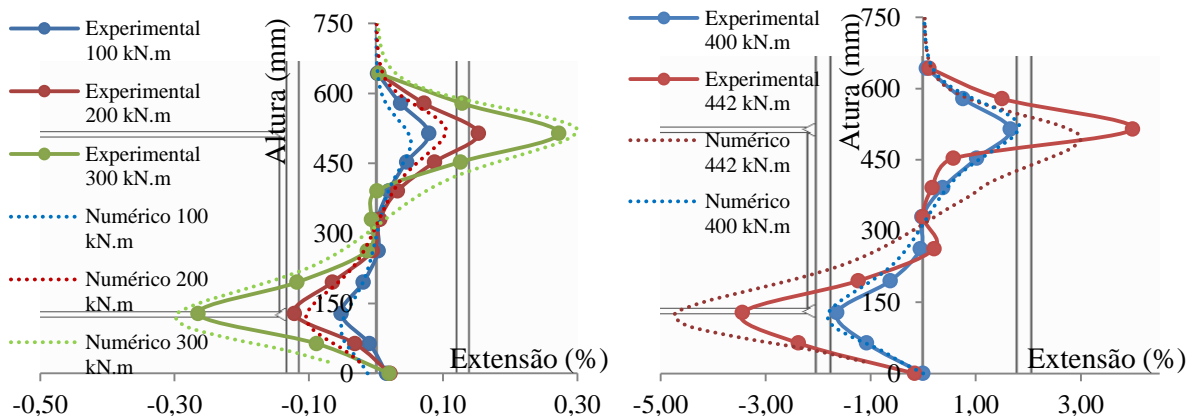


Figura 3.19 – Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 3 - antes da carga máxima)

Verifica-se que de uma maneira geral o ajuste é razoável, no entanto, para níveis de momentos superiores a 300 kN.m o ajuste não é tão aceitável. Esta situação prende-se com o facto de que a partir do momento em que se verifica instabilidade da zona comprimida do painel esta passa a exibir deformação fora do plano da alma, que acarreta alguma flexão e que aparece nos resultados dos extensómetros.

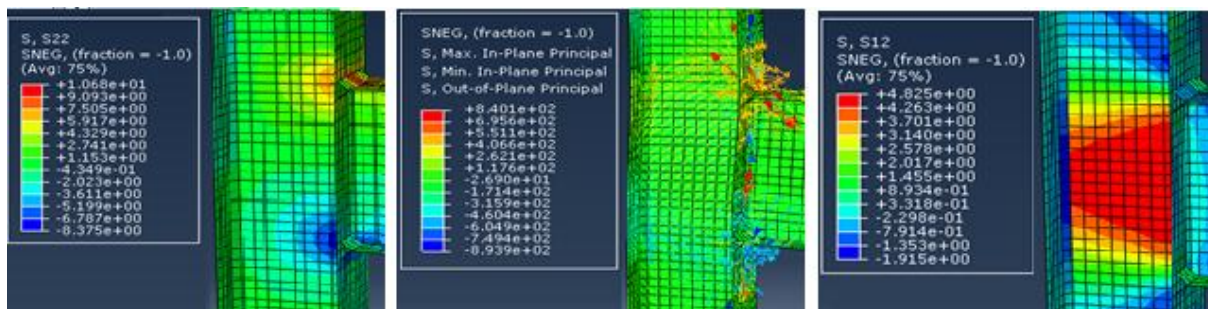


Figura 3.20 - Resultados obtidos no modelo numérico

3.2.9.2. Resultados do Modelo da Ligação Assimétrica (com rácio relativo à altura das vigas de 2)

Os primeiros resultados analisados apresentam-se em termos de comportamento local, nomeadamente traduzida pela curva momento flector-deslocamento. Comparam-se estes resultados com os obtidos no ensaio experimental homólogo, como se realizou no modelo anterior.

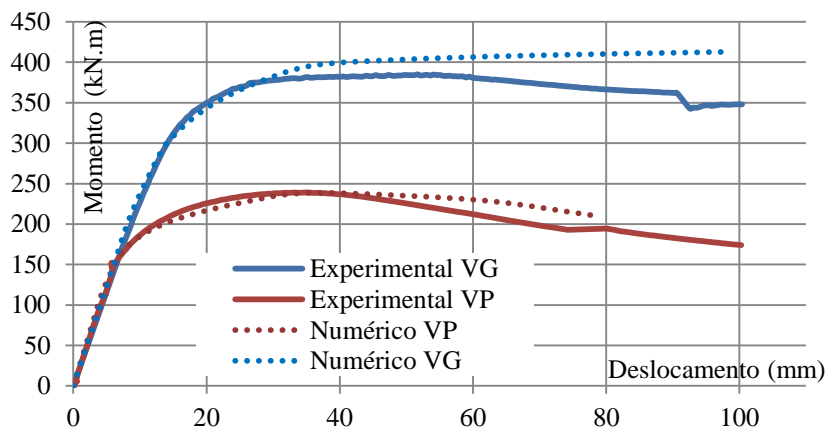


Figura 3.21 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos, em termos de comportamento global.

Comparando os resultados da simulação numérica com os resultados experimentais obtidos de acordo com a figura anterior, verifica-se uma boa correcção o que permite utilizar o modelo de forma a prever o comportamento da ligação real. No caso da rigidez inicial o ajuste é bastante razoável, no entanto, para valores de deslocamentos elevados, o momento analisado já não se ajusta tão bem, pois é difícil simular no modelo numérico o comportamento verificado no ensaio experimental para valores acima da carga crítica. Em termos de comportamento local apresenta-se os valores obtidos das extensões na linha de contacto entre a soldadura e o banzo do pilar, de forma a analisar as variações das extensões ao longo da ligação (Figura 3.22).

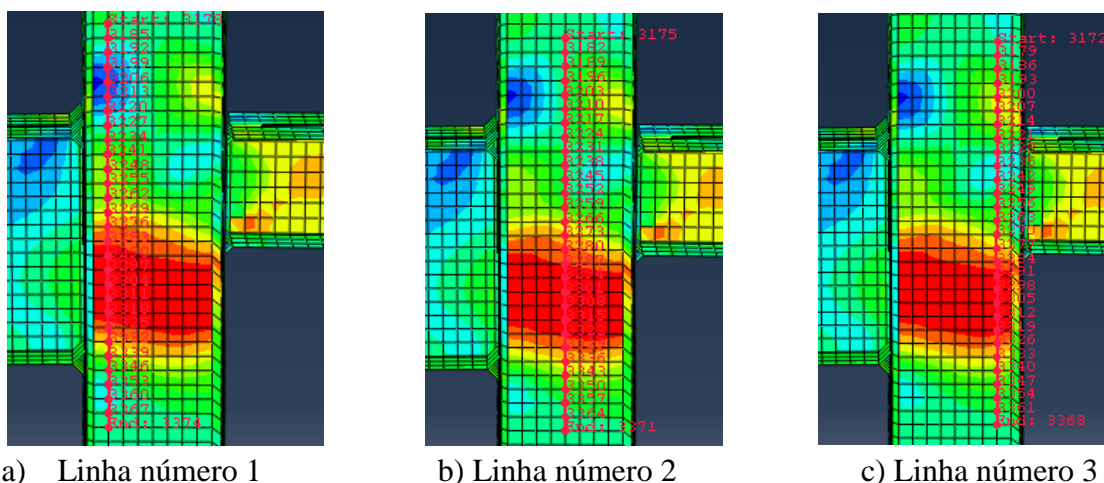


Figura 3.22 – Representação esquemática da colocação das linhas de extensómetros.

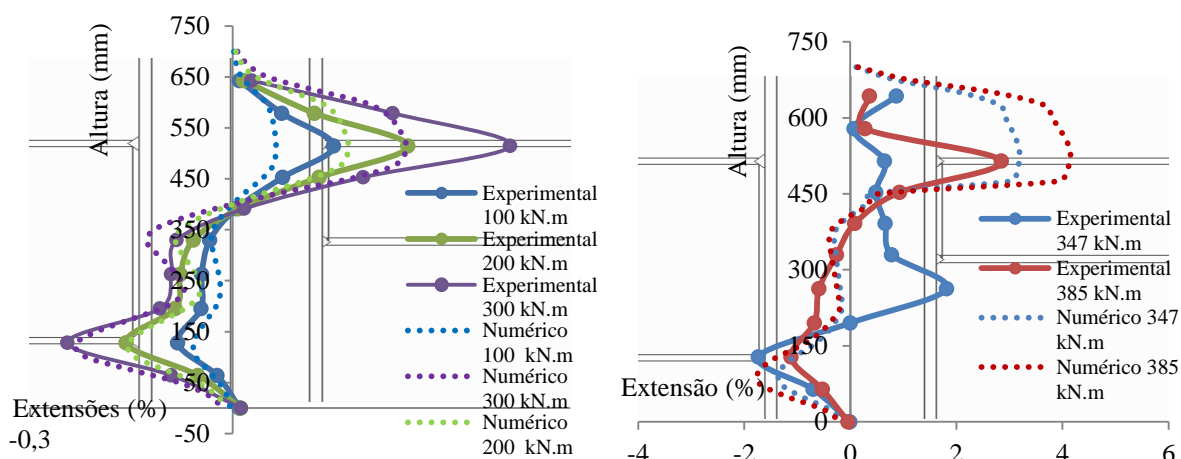


Figura 3.23 – Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 1)

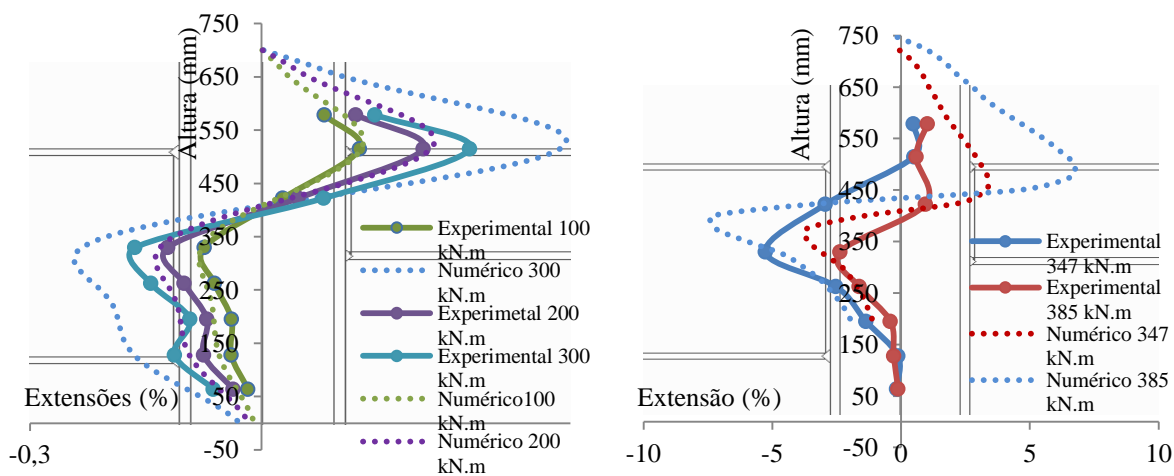


Figura 3.24 - Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 2)

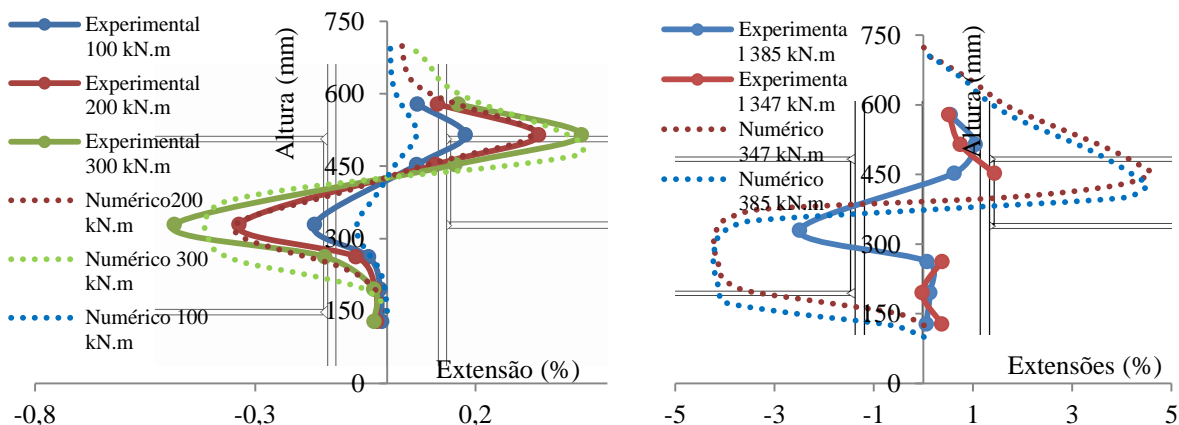


Figura 3.25 - Resultados numéricos em termos de comportamento local (linha 3)

Conclui-se que para valores anteriores aos da carga máxima, o ajuste atingido é aceitável relativamente às tendências visualizadas e aos pontos iniciais. Sendo de salientar apenas que para níveis de momento a partir da carga máxima, o ajuste não é tão aceitável, pois os valores máximos nas zonas de tracção e de compressão são inferiores aos verificados nos valores experimentais (Figura 3.22), denunciando o efeito da deformação fora do plano devida à instabilidade, já referida atrás. As tensões verificadas no modelo numérico apresentam-se de seguida.

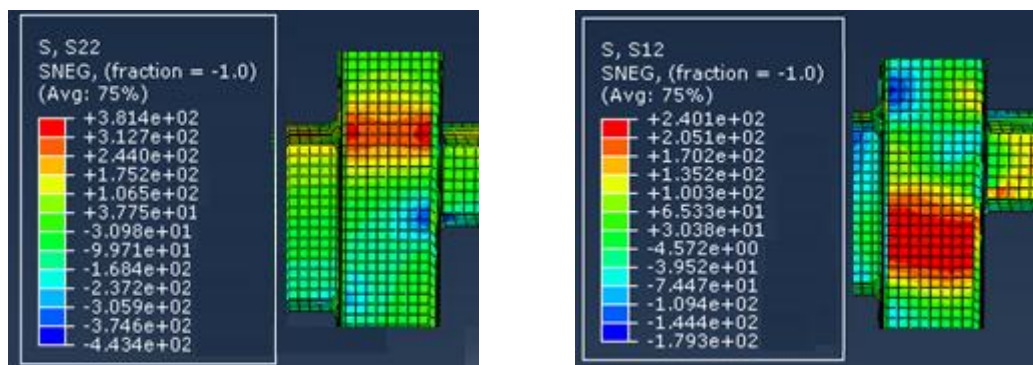


Figura 3.26 - Resultados obtidos no modelo numérico (direcções principais)

4 ESTUDO PARAMÉTRICO DE LIGAÇÕES ASSIMÉTRICAS

4.1 Modelos Numéricos

4.1.1 Introdução

Nesta fase do presente documento, pretende-se realizar um estudo paramétrico relativo a configurações de ligações assimétricas. Este estudo é efectuado de forma a serem estudadas maiores diferenças entre as alturas das vigas e casos em que o pilar é comparativamente muito maior ou menor que a viga maior, sendo desta forma coberto um âmbito muito alargado de geometrias. Desta forma, e para melhor compreensão do trabalho realizado, serão especificadas primeiramente as considerações adoptadas que se mantêm para todos os modelos. Numa seguinte fase, procede-se à descrição e pormenorização das considerações assumidas relativamente a cada modelo.

Os primeiros modelos desenvolvidos são divididos em nove análises. Estas análises apenas apresentam diferentes relações entre as alturas das secções adoptadas para as vigas (maiores e menores) e a altura da secção dos pilares.

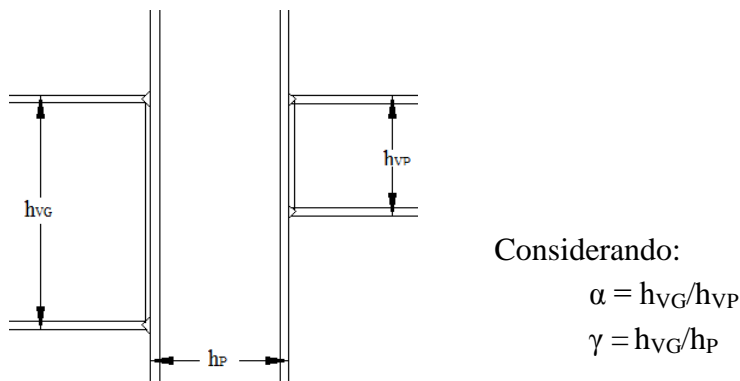


Figura 4.1 – Esquema representativo dos parâmetros analisados.

4.1.2 Geometria

Nas análises realizadas foram estudadas diferentes relações α e γ . Contudo as relações de altura entre a viga maior e a viga menor (α) estudadas foram sempre de 1/2, 1/4 e 3/4, atendendo à secção da viga maior. Além disso, a viga maior dependia da secção adoptada para o pilar, surgindo assim a relação γ . No entanto, para este estudo paramétrico foram estudadas apenas três secções para os pilares. Tendo em consideração o referido e de forma a uma melhor compreensão do referido, apresenta-se seguidamente um esquema representativo com as configurações estudadas (Figura 4.2).

Salienta-se que de modo a manter os coeficientes inteiros foi necessário modificar a altura de algumas secções para alguns dos casos, como se verifica no Anexo A.

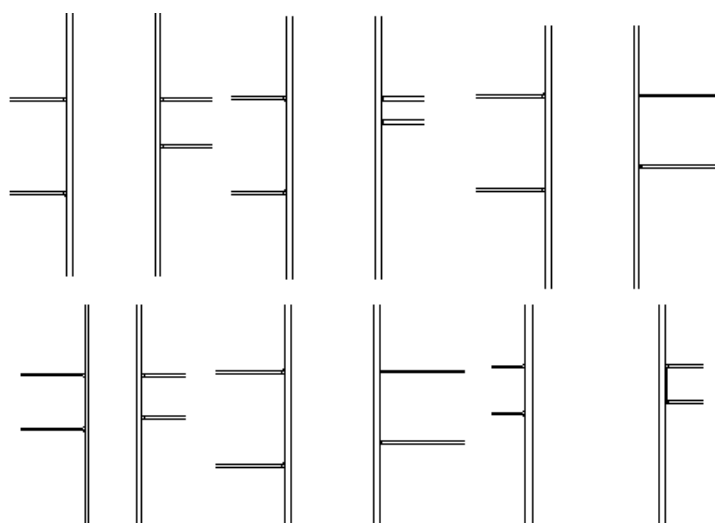


Figura 4.2 – Esquema representativo das configurações estudadas.

Na figura anterior apresenta-se uma imagem à escala das ligações em análise de modo a ter-se uma ideia das dimensões relativas das várias ligações. Na tabela seguinte apresenta-se um resumo da variação paramétrica a considerar.

Quadro 1 – Relações entre as alturas das secções das vigas e do pilar para todos os casos,

Casos	α	γ	Casos	α	γ	Casos	α	γ
Caso 1	1/2	1	Caso 10	1/2	1/2	Caso 19	1/2	1/3
Caso 2	1/4	1	Caso 11	1/4	1/2	Caso 20	1/4	1/3
Caso 3	3/4	1	Caso 12	3/4	1/2	Caso 21	3/4	1/3
Caso 4	1/2	2	Caso 13	1/2	1	Caso 22	1/2	2/3
Caso 5	1/4	2	Caso 14	1/4	1	Caso 23	1/4	2/3
Caso 6	3/4	2	Caso 15	3/4	1	Caso 24	3/4	2/3
Caso 7	1/2	3	Caso 16	1/2	2	Caso 25	1/2	1
Caso 8	1/4	3	Caso 17	1/4	2	Caso 26	1/4	1
Caso 9	3/4	3	Caso 18	3/4	2	Caso 27	3/4	1

4.1.3 Condições de Apoio e de Contraventamento

Relativamente às condições de apoio e sistema de contraventamento refere-se que se admitiu o mesmo sistema estrutural que nos modelos anteriores (modelos calibrados). Desta forma, todas as considerações admitidas para esses modelos foram mantidas para os modelos seguintes.

4.1.4 Condições de Carregamento

Tendo em conta a variedade de secções transversais a considerar para as vigas e o pilar não é fácil escolher o valor de carregamento que permita uma comparação transversal dos resultados obtidos nos vários modelos.

Para ultrapassar, ou pelo menos, minimizar essa questão optou-se por escolher um carregamento da seguinte forma: (1) calcular a resistência elástica da viga mais fraca (P_y); (2) calcular o momento na ligação associado a P_y ; (3) usar na outra viga um valor de momento igual. Ao considerar o momento igual nas duas vigas há alguma adimensionalização da acção que permite alguma transversalidade na comparação de resultados.

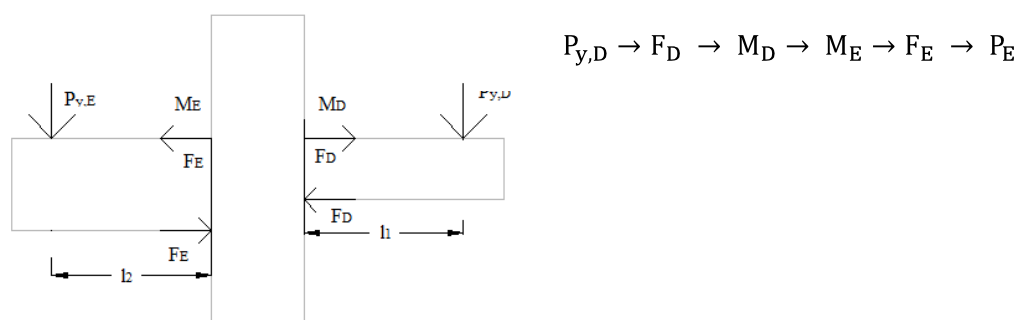


Figura 4.3 – Esquema representativo da determinação das cargas a aplicar no modelo.

4.1.5 Material

As secções são em aço estrutural da classe S355, a que corresponde uma tensão de cedência de 355 N/mm^2 . Para especificar o material no modelo é necessário considerar o Módulo de Elasticidade e o coeficiente de Poisson. A lei material adoptada no modelo numérico é a correspondente à Figura 4.4.

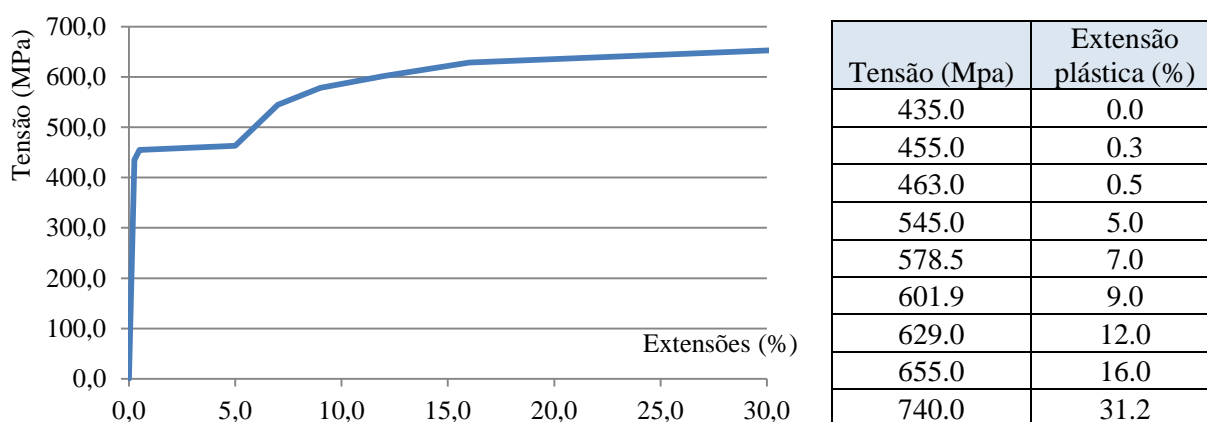


Figura 4.5 – Lei material considerados nos modelos numéricos.

4.1.6 Considerações do Modelo numérico

A análise através do método dos elementos finitos pode assumir diversos níveis de sofisticação, dependendo do tipo de problema que se pretende analisar. Nas soluções adoptadas considerou-se uma análise não linear geométrica e material. Relativamente à malha adoptada nos modelos refere-se que a discretização da malha foi estudada de forma a que se verifique a convergência da mesma, adoptando-se assim a malha óptima para a secção em estudo. Além disso, da mesma forma que para os modelos analisados no capítulo anterior, nestes próximos estudos, os modelos foram considerados com elementos finitos do tipo casca.

4.1.7 Modelação da ligação viga-pilar por soldadura

A modelação desta zona da ligação para todos os modelos foi considerada, na mesma proporção do modelo calibrado, de forma a que, os resultados sejam todos coerentes com o mesmo princípio. Tendo em conta o referido, a projecção da espessura da soldadura na ligação, quer na zona do banzo quer na zona da alma, foi determinada de acordo com a projecção da espessura na ligação em nó externo calibrada, relacionando estes com as respectivas espessuras. Da mesma forma sucedeu com a espessura do banzo na zona referida, que de acordo com o modelo calibrado, seria superior ao valor da secção. A relação adoptada para considerar nestes modelos criados foi a mesma que na situação da projecção das espessuras da soldadura. Estas considerações referidas tornam-se muito importantes na modelação desta zona, visto que é condicionado o braço do momento da ligação. Além disso, a distribuição das forças das vigas no painel também é condicionada, acarretando assim consequências ao nível dos comprimentos efectivos das componentes de compressão e de tracção da alma do pilar.

4.1.8 Modelação da zona de transição entre a alma e o banzo do pilar

Assim como se sucedeu na modelação da ligação viga-pilar baseando os valores adoptados no modelo calibrado anteriormente neste documento, assim também na modelação da zona de transição se pretende que os modelos realizados sejam na mesma proporção que o modelo calibrado. Para tal, analisou-se o valor do raio de concordância da secção do pilar na ligação calibrada e o valor da projecção adoptado no modelo. Sabendo esta relação, e sabendo o raio de concordância da secção considerado no novo pilar, determinou-se o valor da projecção a adoptar no modelo numérico. No entanto é também necessário analisar o valor da espessura a adoptar nesta zona de transição. Para tal considerou-se a relação referida, de acordo com a espessura considerada no modelo calibrado e pela mesma proporção obtiveram-se os valores pretendidos para as espessuras.

Destacam-se estes parâmetros apresentados anteriormente, porque, esta zona de transição entre a alma e o banzo nas secções particularmente dos pilares, fazem com que se verifique uma diminuição do comprimento de encurvadura do painel da alma do pilar. Além de que, com o aumento da espessura também se verifica um aumento da rigidez da ligação entre a alma e o banzo.

4.1.9 Resultados

4.1.9.1. Primeira Análise

Na primeira análise realizada, verificaram-se três situações, em que as relações entre as alturas das vigas foram de 1/2, 1/4 e 3/4. Notando que a geometria das secções foram anteriormente apresentadas. Nestes três casos, a secção do pilar (HEB 240) e a secção da viga de maiores dimensões (IPE 240) mantêm-se, e apenas a secção das vigas de menores dimensões se altera entre HEB 120, HEB 100* e HEB 180, respectivamente para cada caso. Os resultados serão analisados caso a caso, para total a análise das configurações modeladas.

*significa que a geometria da secção foi modificada, para melhor compreensão consultar o Anexo A.

Esses resultados serão apresentados em termos de comportamento global através das curvas acção/deformação, e em termos de comportamento local através dos cortes de tensões ao longo da alma do pilar.

4.1.9.1.1 Primeiro Caso de Estudo

Os resultados obtidos no primeiro caso de estudo, tendo em conta todas as considerações referidas foram os seguintes:

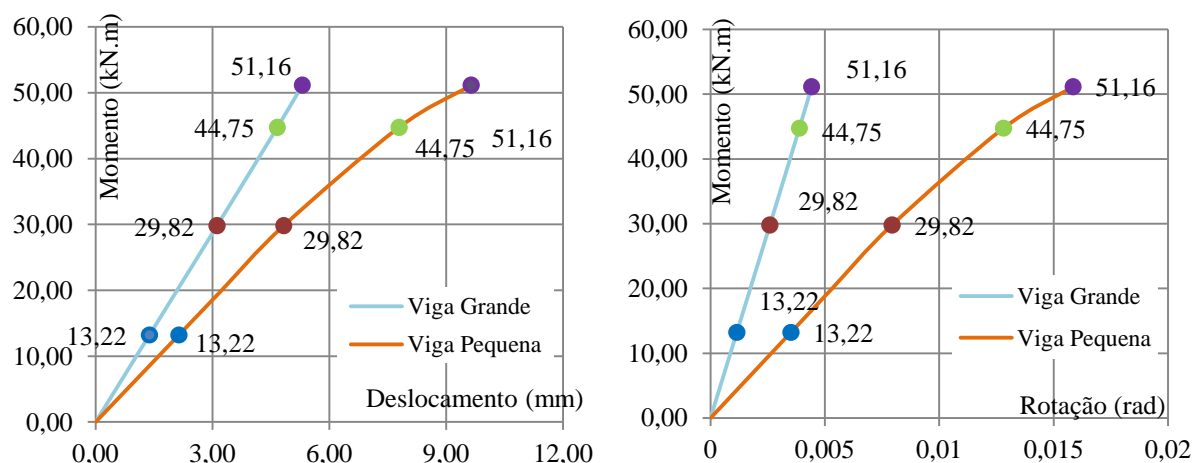


Figura 4.6 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

De acordo com a figura anterior, verifica-se que, os deslocamentos observados não foram muito elevados. Para além disto, pretendia-se analisar esta ligação como um caso real onde não era objectivo esgotar a capacidade resistente da alma do pilar. Esta situação deve-se ao facto de que as vigas têm uma dimensão reduzida em relação ao caso de referência, pelo que introduzem uma solicitação modesta no painel da alma do pilar. Se a acção introduzida na ligação é pequena então naturalmente a deformação produzida também o será. As extensões obtidas nas seguintes figuras são provenientes das linhas definidas (na ordem apresentada) na Figura 3.22, para os valores de carga representados na Figura 4.6:

De modo a que haja uma perspectiva relativa das dimensões do caso em análise, apresenta-se uma imagem sobreposta representando o caso em análise e o caso de referência.

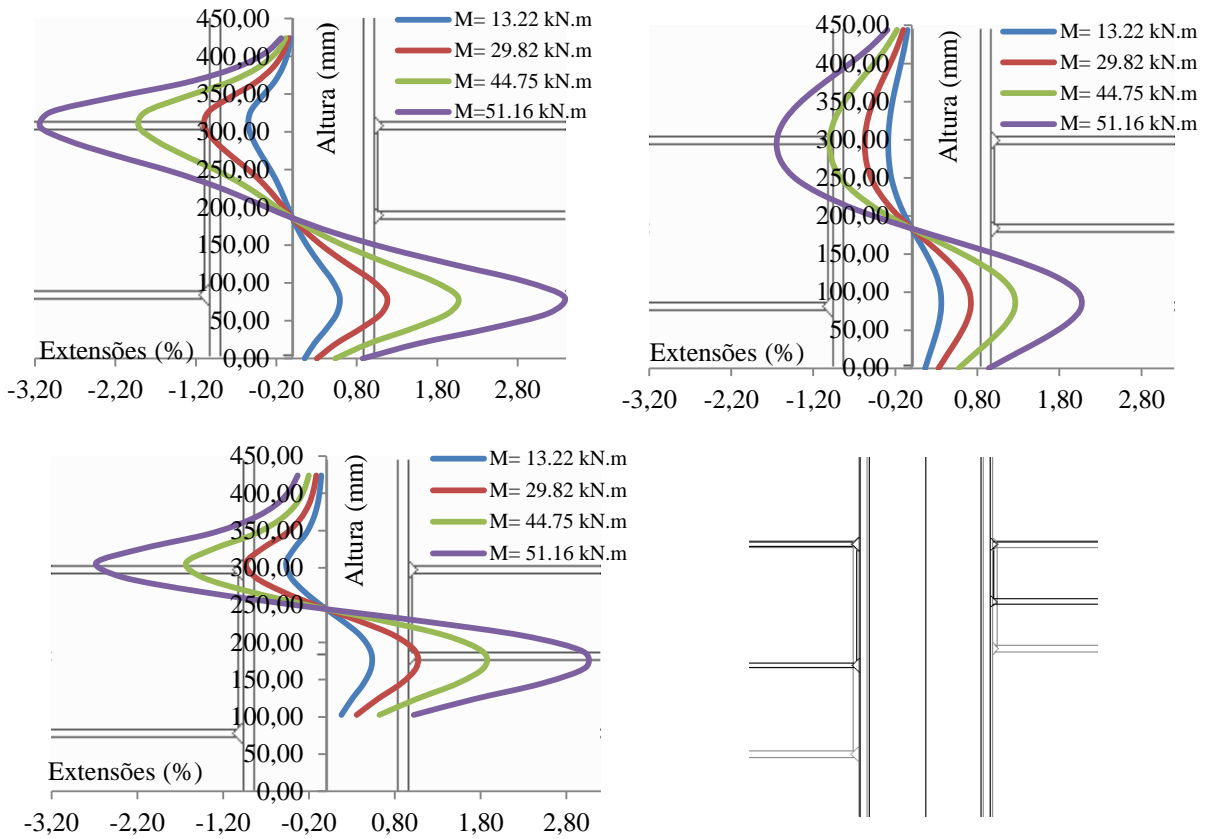


Figura 4.7 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados apresentados conclui-se que as extensões se encontram em regime elástico. Analisando as extensões nas três linhas notáveis verticais da alma do pilar, verifica-se que não existe influência significativa da viga da esquerda na viga da direita. Isto porque, nos resultados obtidos para a primeira linha, os valores não sofrem alteração ao longo da linha do banzo inferior da viga pequena. No entanto, pode verificar-se que a influência da viga da esquerda atinge a viga da direita pois os valores das extensões na direcção dos banzos da viga grande, na linha 3, não são simétricos.

4.1.9.1.2 Segundo Caso de Estudo

Os resultados obtidos relativamente ao segundo caso em estudo foram os seguintes:

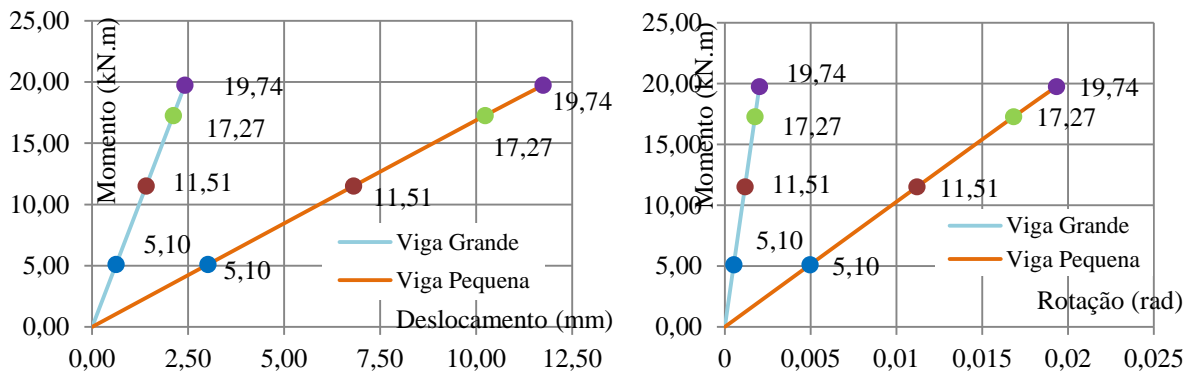


Figura 4.8 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

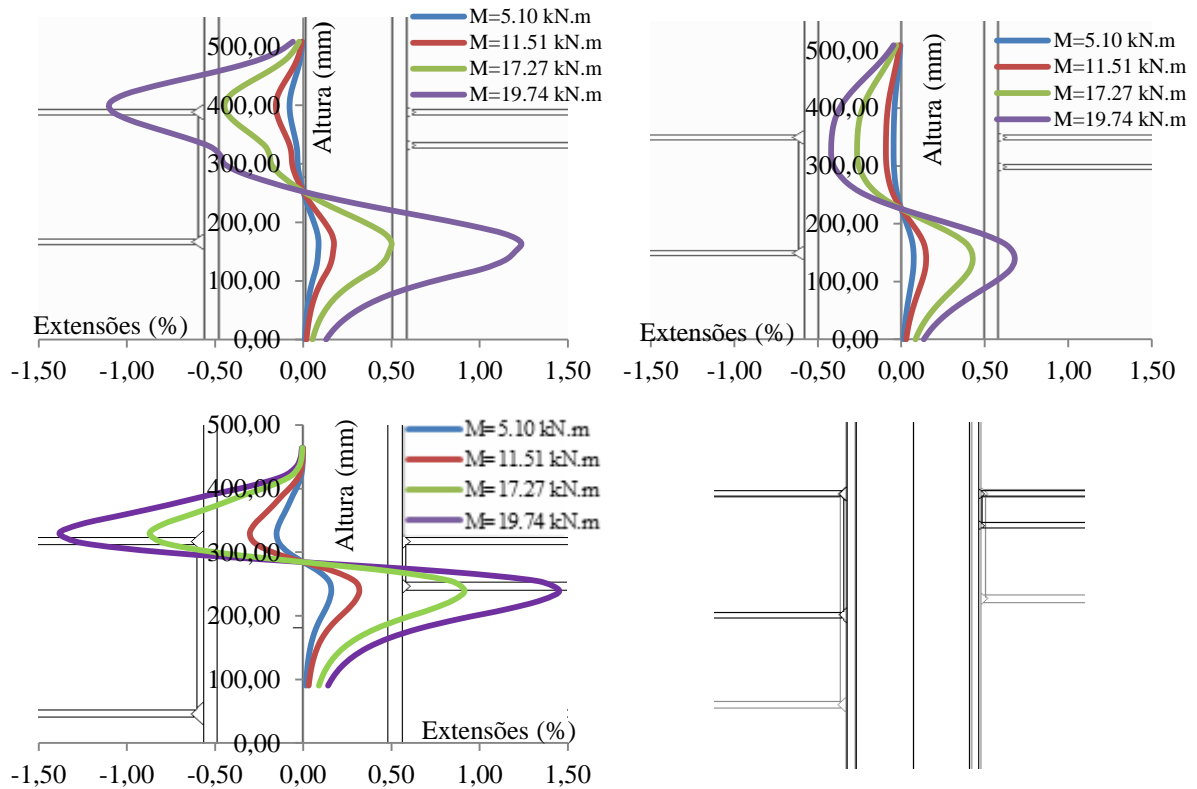


Figura 4.9 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Da mesma forma que no primeiro caso de estudo, verifica-se que as extensões se encontram em regime elástico. Neste caso, dada o valor relativo das forças nos bantos das vigas, verifica-se que a viga pequena influencia os resultados ao nível da linha 1. Isto pode constatar-se pelas irregularidades dos diagramas na linha 1, na direcção do banto inferior da viga menor. A assimetria verificada entre as zonas tracionada e comprimida do painel também confirma que a influência da viga pequena atravessa o painel..

4.1.9.1.3 Terceiro Caso de Estudo

Relativamente ao terceiro caso de estudo, os resultados obtidos foram os seguintes:

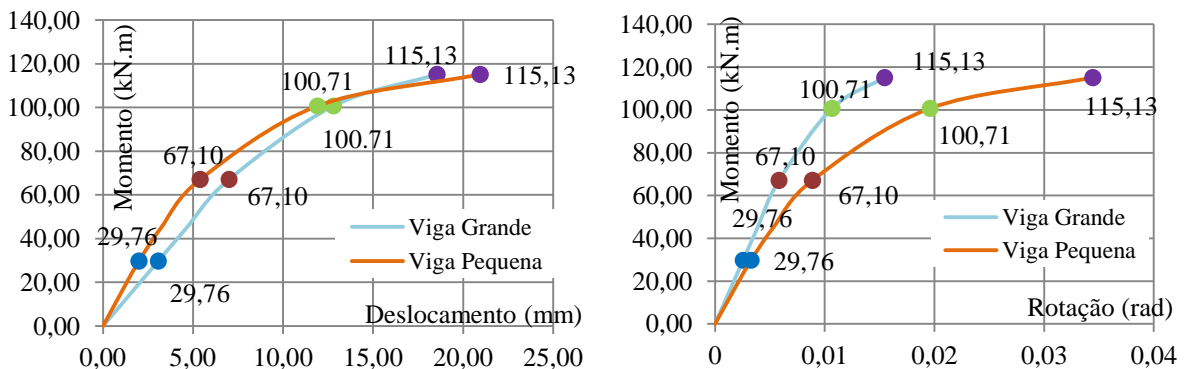


Figura 4.10 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Em termos de comportamento local analisam-se as mesmas linhas de extensões referidas:

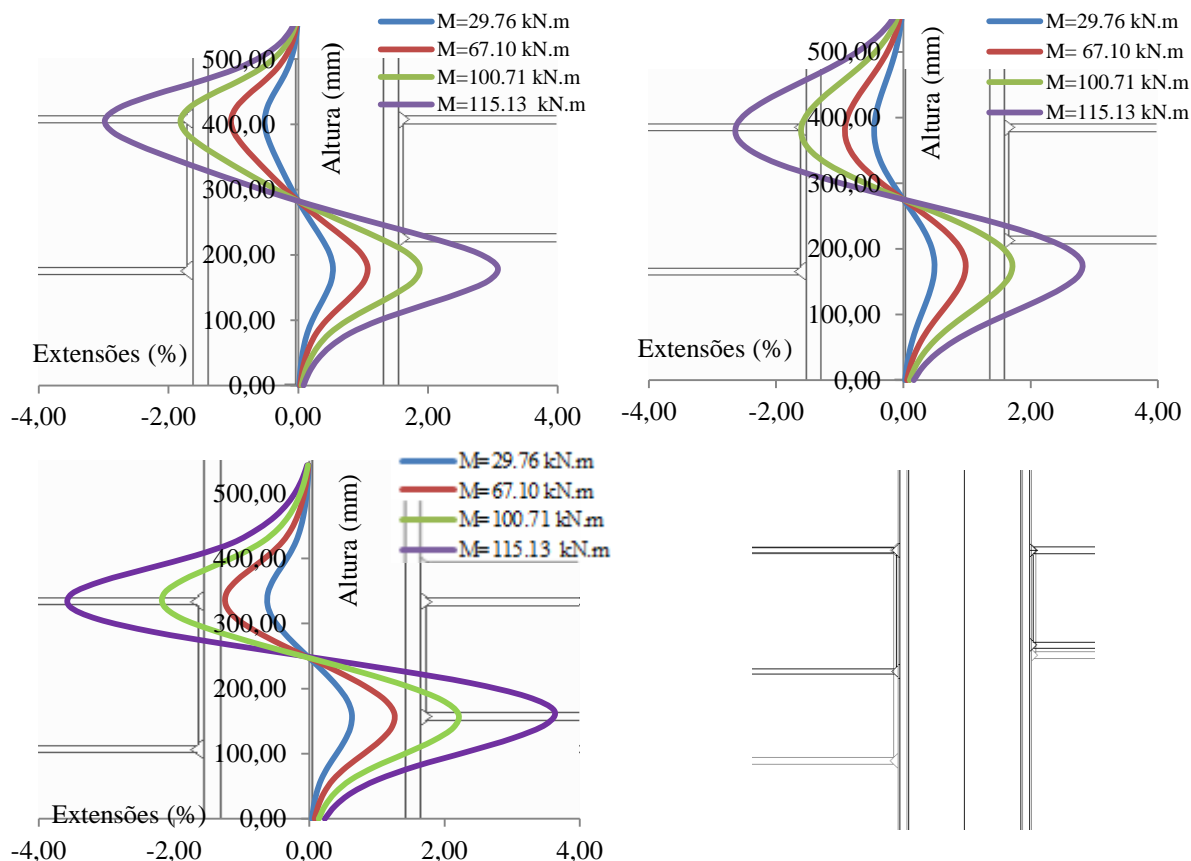


Figura 4.11 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Com estes resultados verifica-se que os valores das extensões são superiores nesta configuração comparativamente com as duas configurações apresentadas anteriormente. Isto acontece porque as forças de compressão e de tração são elevadas nesta configuração devido ao valor do momento também ser mais elevado. Contudo, verifica-se que as extensões para este caso ainda se encontram em regime elástico. Tendo em conta os resultados apresentados, verifica-se ainda que não existe influência da viga pequena no comportamento da viga grande, no entanto verifica-se a influência da viga grande na viga pequena.

4.1.9.2. Segunda Análise

Da mesma forma que na primeira análise, foram analisadas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões passou de 1 para 2. Contudo de forma a existir um elemento comparativo, a secção do pilar não foi alterada (HEB 240) mas sim a secção do pilar passou para IPE 500*. As secções das vigas de menores dimensões variam entre HEB 240, HEB 120e HEB 360, respectivamente para cada caso.

4.1.2.2.1. Quarto Caso de Estudo

Serão apresentados resultados para as configurações apresentadas de igual forma aos casos anteriores, sendo que primeiramente se analisa o comportamento global (Figura 4.12).

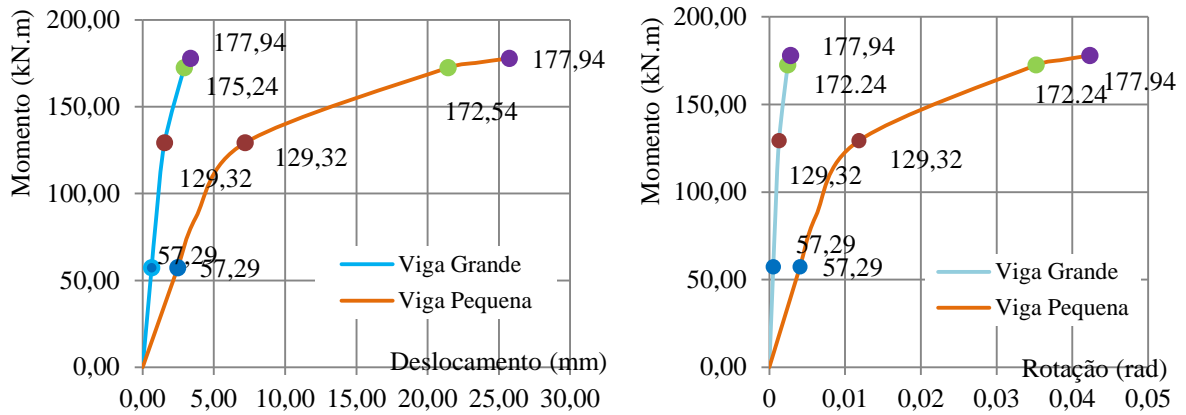


Figura 4.12 -Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global

Realizando agora uma análise em termos de comportamento local, e de acordo com a Figura 3.3, apresentam-se de seguida as extensões verificadas nas linhas criadas com esse intuito.

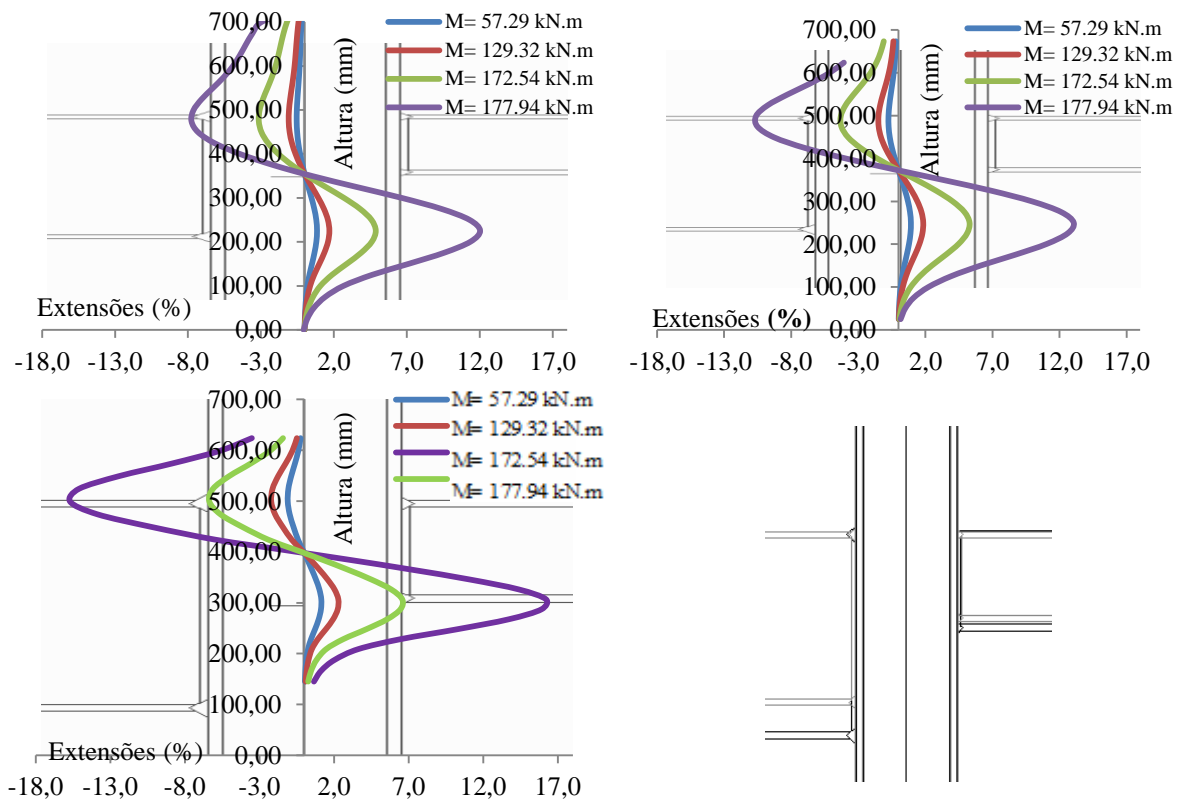


Figura 4.13 – Resultados em termos de comportamentos locais

Para este caso, as extensões já se encontram em regime plástico (Figura 4.5) visto que o valor da extensão máximo na terceira linha apresenta valor próximo dos 18 %. Além do referido, verifica-se também que o comportamento de uma viga não influencia o comportamento da outra. Mais concretamente, a viga pequena não afecta as extensões obtidas ao longo da linha mais próxima da viga grande. Contudo, mesmo não se observando claramente nos resultados da terceira linha, a viga grande influencia o comportamento da viga pequena.

4.1.2.2.2. Quinto Caso de Estudo

Os resultados obtidos no quinto caso de estudo, em termos de comportamento global e local, foram os seguintes:

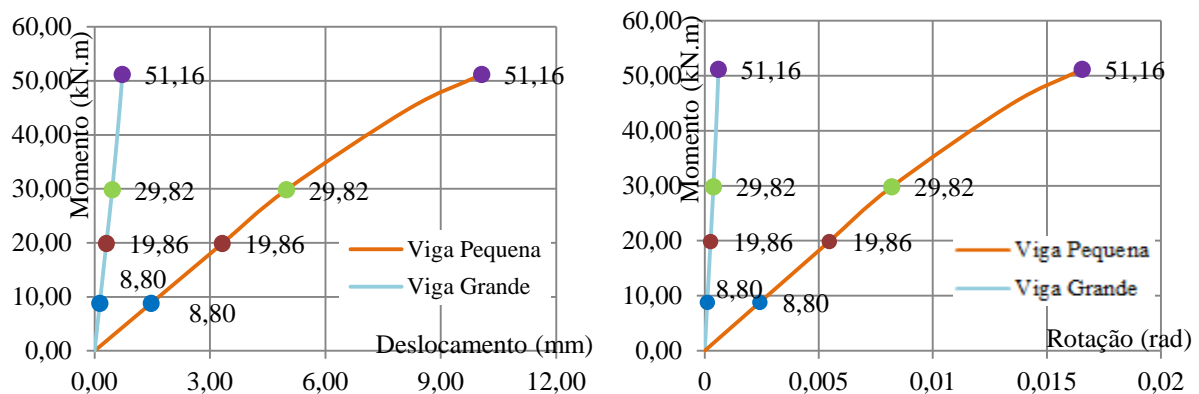
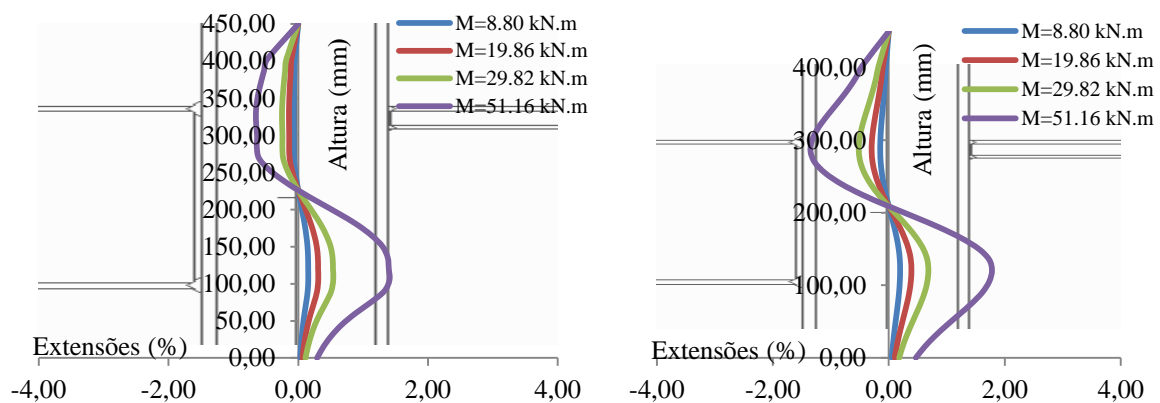


Figura 4.14 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Analisa-se seguidamente os resultados em termos de comportamento local para este caso de estudo, de acordo com as seguintes figuras, de acordo com as linhas de extensões (Figura 3.3):



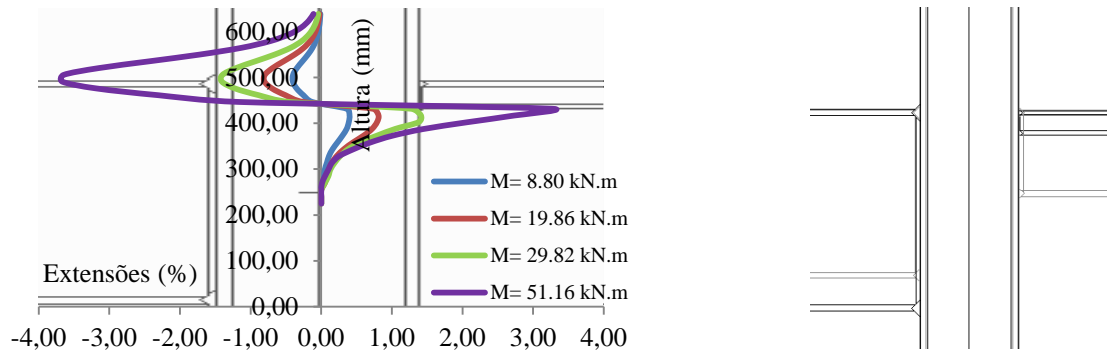


Figura 4.15 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com o resultado dos valores das extensões, estes apresentam-se em regime elástico. Contudo, na primeira linha, verifica-se que a tendência das curvas é mais achatada, o que significa plastificação nessas zonas. Para este caso, verifica-se que a viga de menores dimensões não influencia o comportamento da viga grande, contudo verifica-se que a viga grande também influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não se analisando esse efeito directamente nas linhas de extensões apresentadas.

4.1.2.2.3. Sexto Caso de Estudo

Inicia-se a análise deste caso através dos resultados obtidos em termos de comportamento global (Figura 4.16).

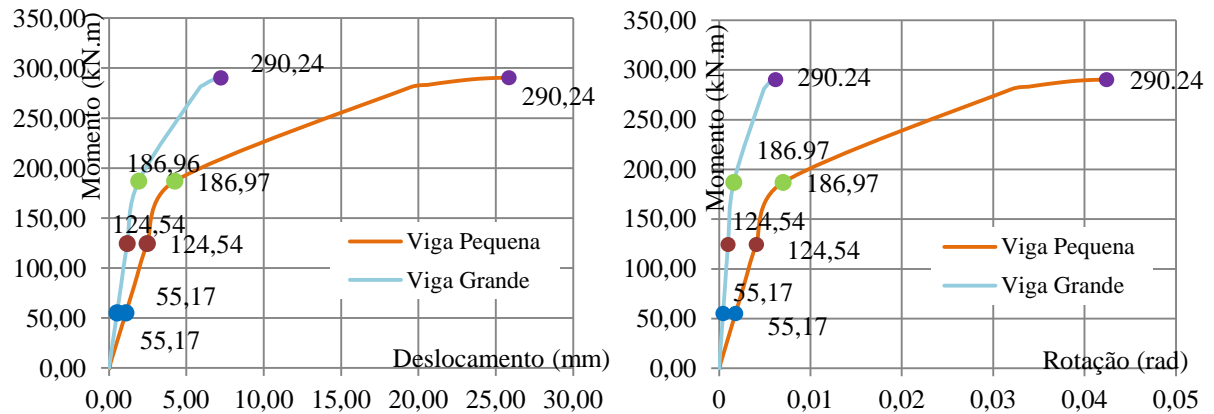


Figura 4.16 -Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

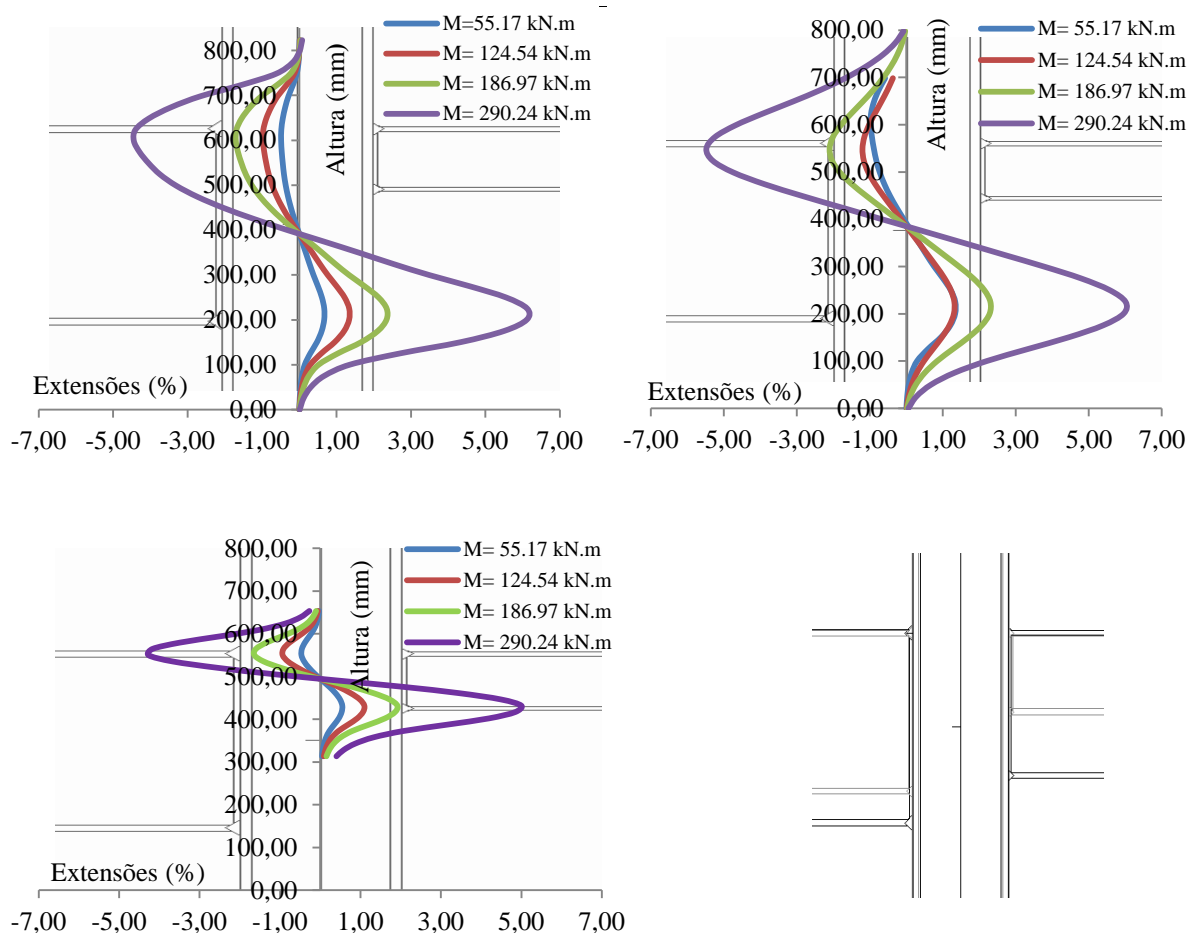


Figura 4.17 -Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento local.

Neste caso, verifica-se que as extensões obtidas encontram-se em regime plástico (Figura 4.5). Tendo em conta o referido, pode-se ainda observar na primeira linha nominal vertical de extensões que a tendência da curva é mais achatada, o que corresponde a plastificação nessa zona. Verifica-se ainda que o comportamento da viga pequena não influencia o comportamento da viga grande.

4.1.9.3. Terceira Análise

Da mesma forma que na segunda análise apresentada, foram analisadas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões passou de 2 para 3. Contudo de forma a existir um elemento comparativo, a secção do pilar não foi alterada (HEB 240) mas sim a secção do pilar passou para IPE 750*. As secções das vigas de menores dimensões variam entre HEB 360, HEB 180 e HEB 550*, respectivamente para cada caso.

4.1.2.3.1. Sétimo Caso de Estudo

Os resultados obtidos em termos de comportamento global são os apresentados na seguinte Figura 4.18:

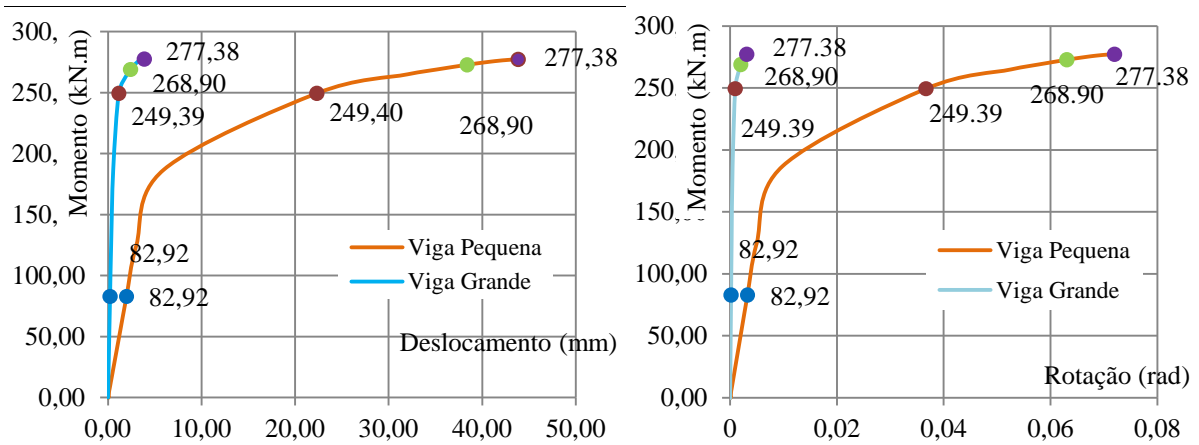


Figura 4.18 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Os resultados em termos de comportamento local apresentam-se na seguinte figura (Figura 4.19). Sendo que, estes valores foram obtidos ao longo das linhas onde foram colocados os extensómetros, apresentadas na Figura 3.3.

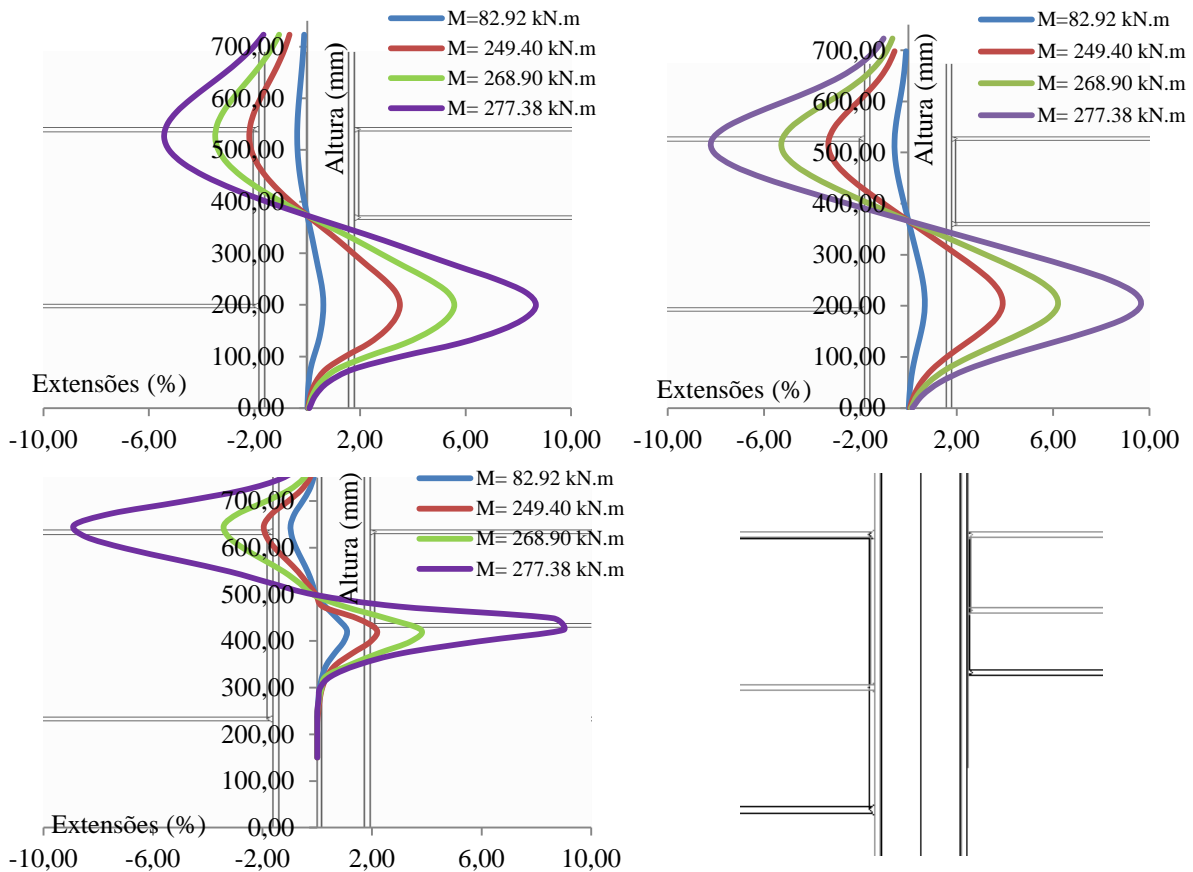


Figura 4.19 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Analisando os resultados anteriores conclui-se que as extensões estão em regime plástico, pois as extensões são bastante elevadas (Figura 4.5). Não sendo no entanto visível nas tendências das curvas tal comportamento.

4.1.2.3.2. Oitavo Caso de Estudo

Neste caso de estudo, assim como nos anteriores, a primeira análise realizada é em termos de comportamento global da ligação, considerando os resultados obtidos na Figura 4.20

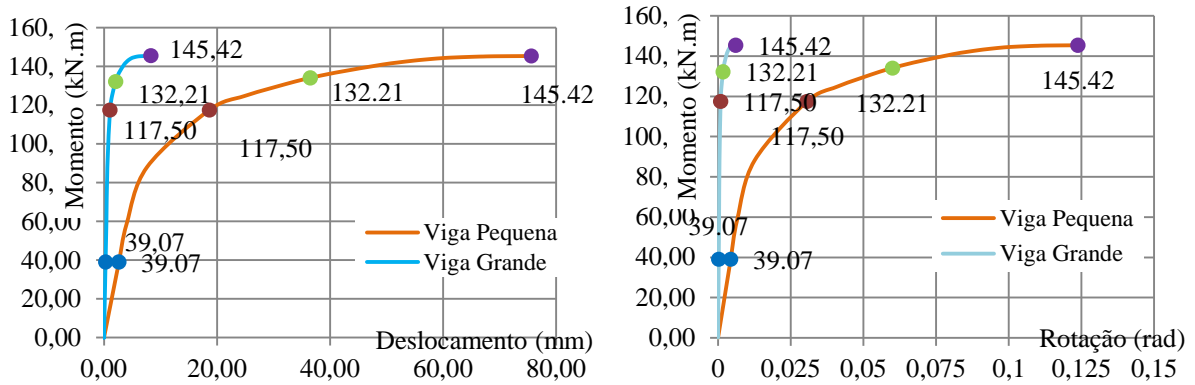


Figura 4.20 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Os resultados em termos de comportamento local são apresentados seguidamente:

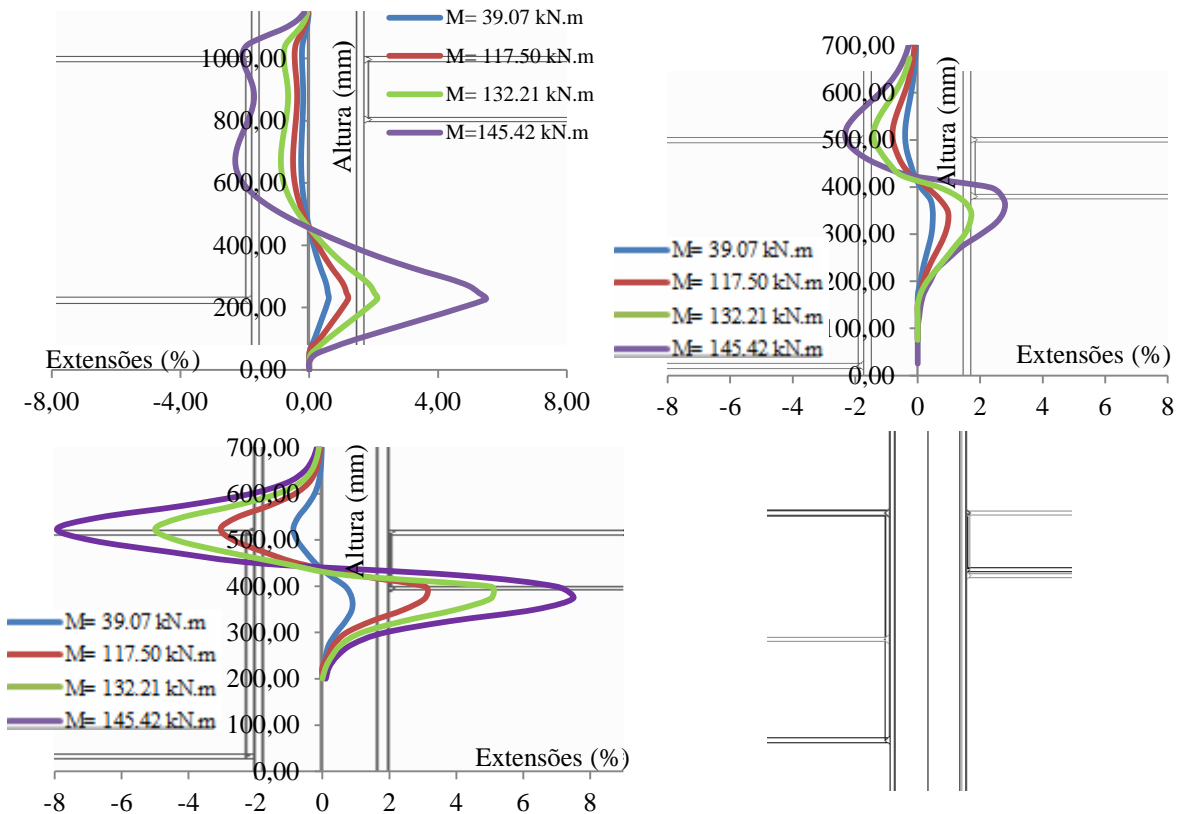


Figura 4.21 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Neste caso de estudo, analisa-se que as extensões se encontram em regime plástico, atendendo ao valor máximo da extensão (Figura 4.5)

Verifica-se também que a viga de menores dimensões influencia o comportamento da viga grande, de acordo com a tendência da curva da primeira linha vertical de extensões. A viga de maiores dimensões também influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não se analisando esse efeito directamente nas extensões apresentadas.

4.1.2.3.3. Nono Caso de Estudo

Apresenta-se de seguida a análise realizada em termos de comportamento global da ligação:

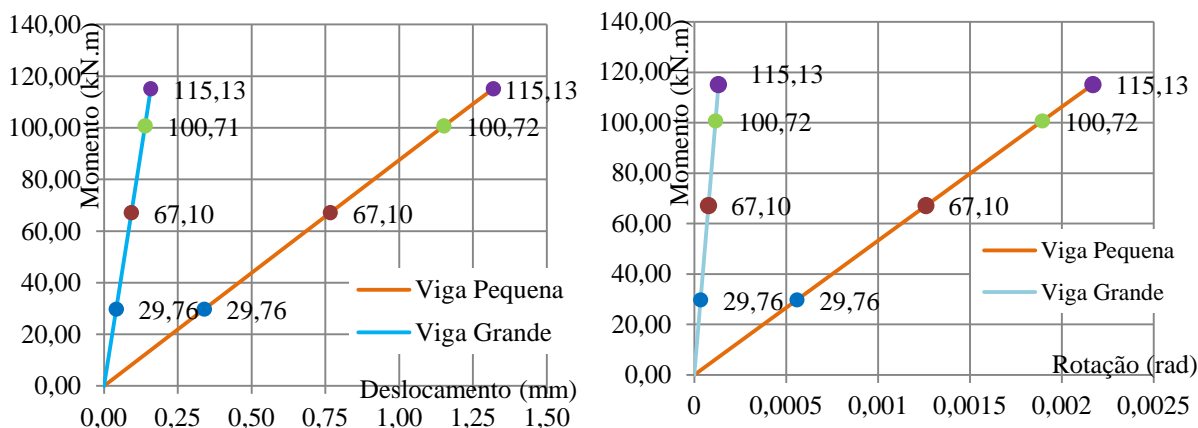


Figura 4.22 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

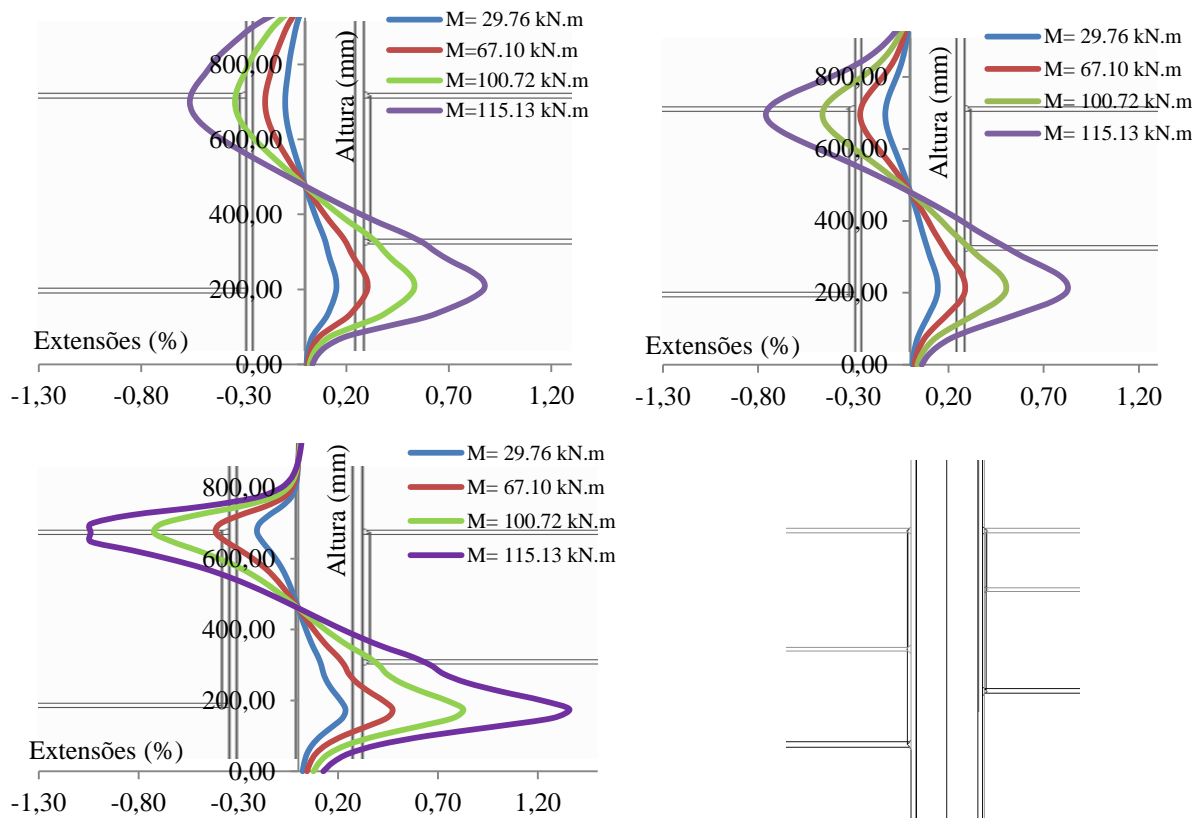


Figura 4.23 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com a figura anterior verifica-se que as extensões se encontram em regime elástico (Figura 4.5), pois as extensões são de valor reduzido. Analisando as curvas das extensões assim apresentadas conclui-se que este corresponde ao primeiro caso de estudo em que existe influência entre as vigas. A viga de maiores dimensões influencia o comportamento da viga de menores dimensões, e a viga pequena influencia o comportamento da viga de maiores dimensões. Isto analisa-se ao longo das linhas dos banzos das vigas e verifica-se que o valor da extensão é superior nessa zona.

4.1.9.4. Quarta Análise

Da mesma forma que na segunda análise apresentada, foram analisadas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões passou de 2 para 3.

A secção do pilar foi alterada (HEB 400) assim como a secção do pilar que passou para IPE 200. As secções das vigas de menores dimensões variam entre HEB 100, HEB 100** e HEB 140*, respectivamente para cada caso.

4.1.2.4.1. Décimo Caso de Estudo

De forma a observar os resultados obtidos em termos de comportamento global e local, apresentam-se nas seguintes figuras (Figura 4.24 e Figura 4.25):

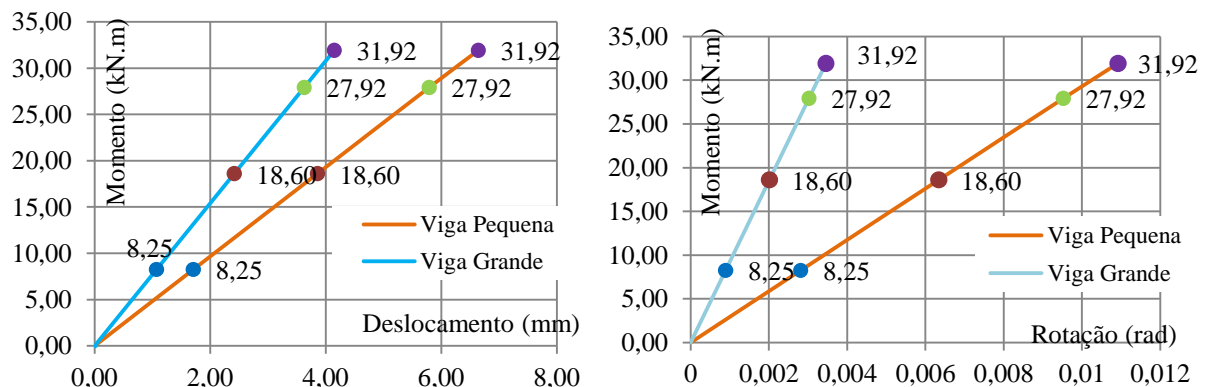
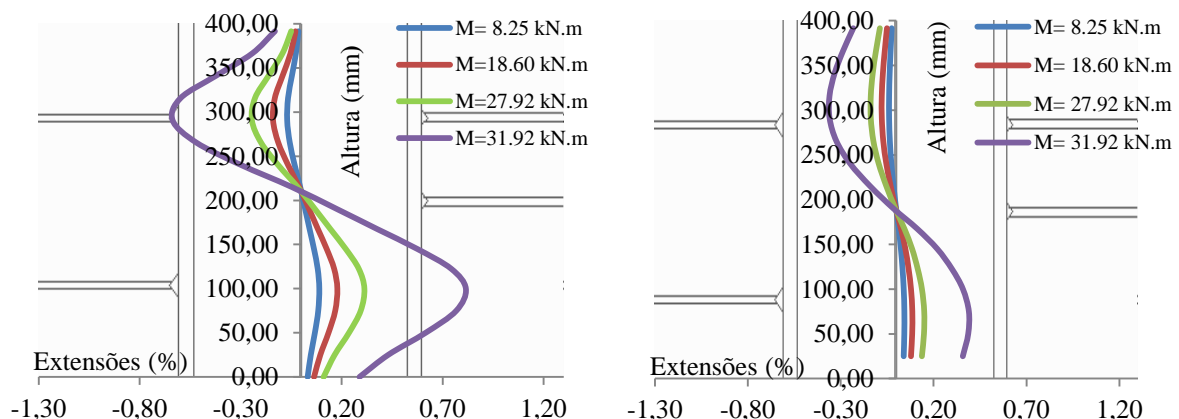


Figura 4.24 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.



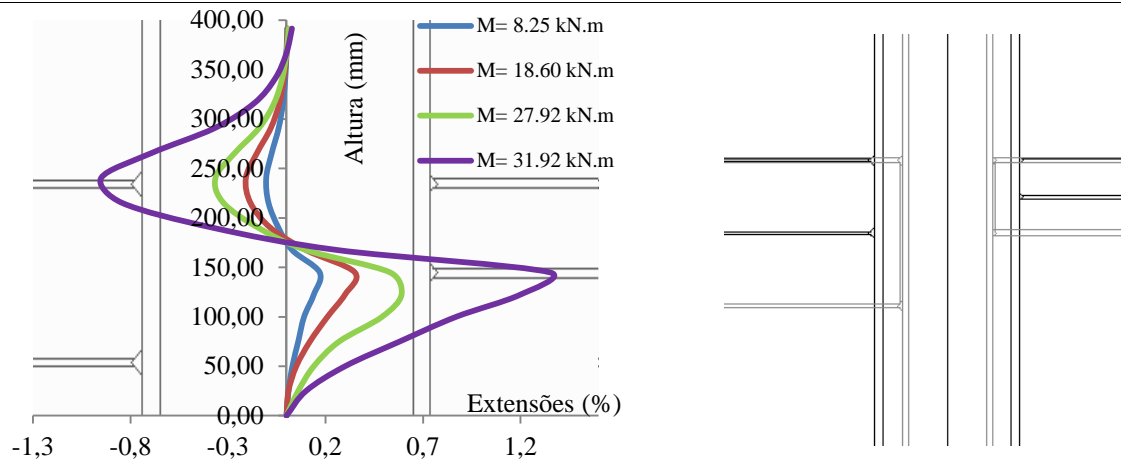


Figura 4.25 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Analisa-se que as extensões verificadas são de valores reduzidos nas três linhas definidas, referindo que os valores obtidos se encontram em regime elástico. De acordo com a figura anterior verifica-se que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena. Contudo o comportamento da viga grande não é influenciado pela viga pequena.

4.1.2.4.2. Décimo Primeiro Caso de Estudo

Os resultados obtidos para este caso de estudo foram os seguintes:

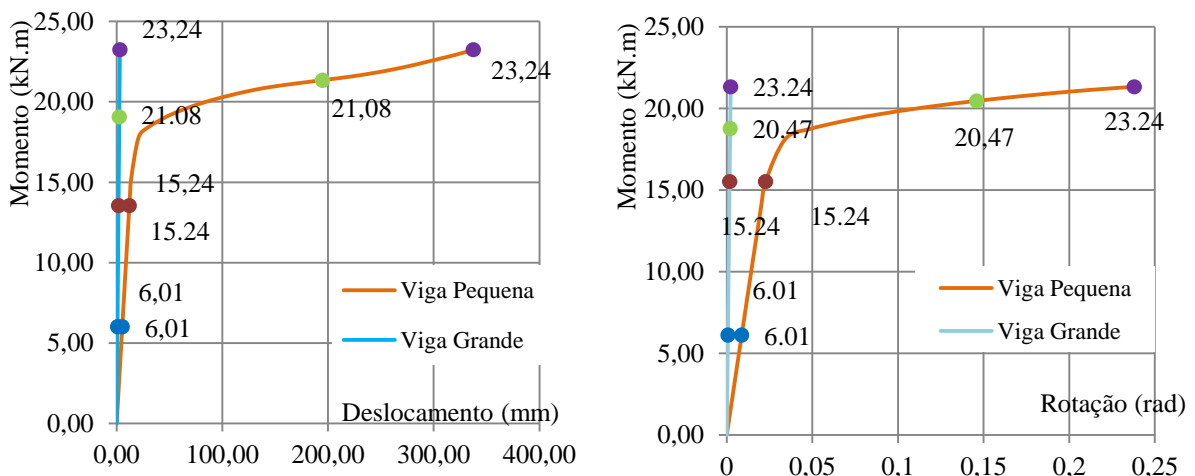


Figura 4.26 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Os resultados em termos de comportamento local, nomeadamente em termos das extensões apresentam-se seguidamente. Atendendo novamente ao pormenor onde foram retirados os valores das extensões, nas linhas apresentadas na Figura 3.3.

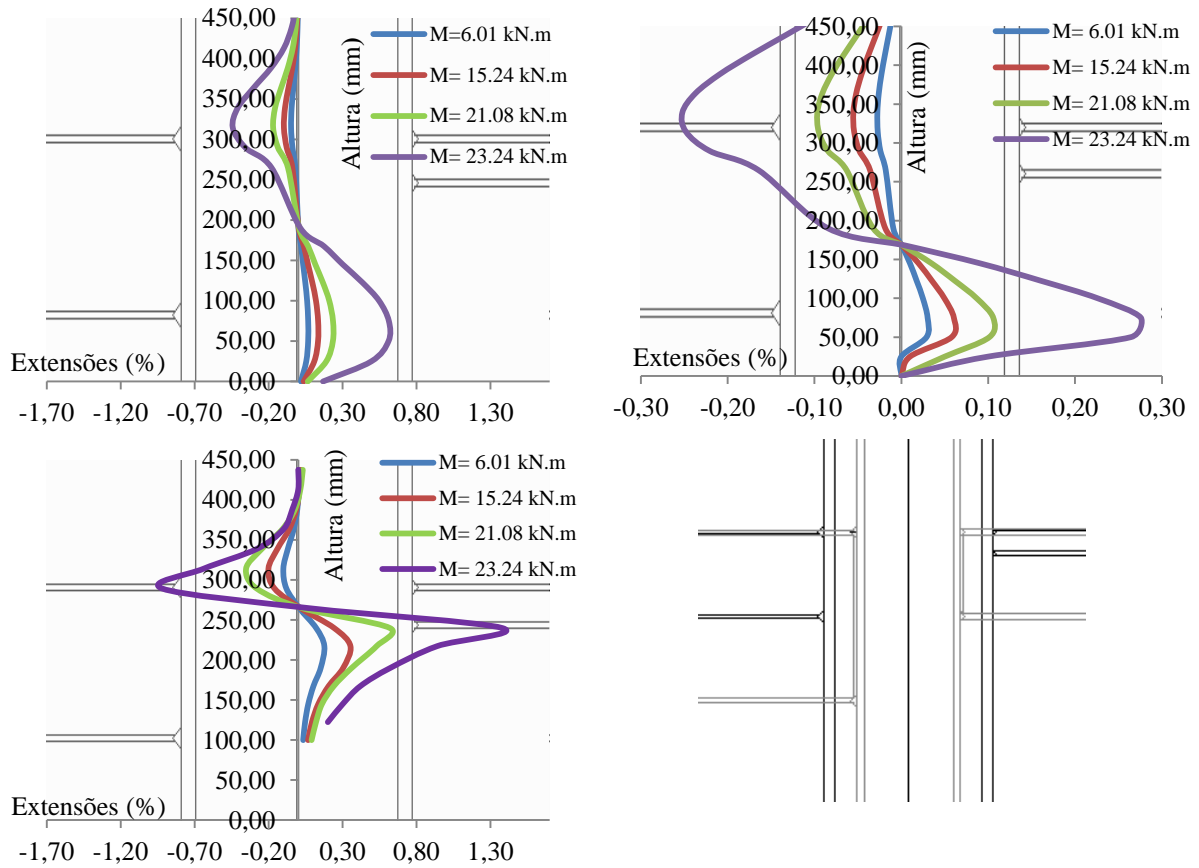


Figura 4.27 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Através da análise dos resultados anteriores, verifica-se que as extensões encontram-se em regime elástico. Além disso, verifica-se que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande como se pode ver na tendência das curvas associadas à primeira e segunda linha. Contudo, verifica-se que a viga grande interfere o comportamento da viga pequena, de acordo com a tendência da terceira linha.

4.1.2.4.3. Décimo Segundo Caso de Estudo

Começando por analisar este caso em termos de comportamento global e local, de acordo com as seguintes figuras (Figura 4.28 e Figura 4.29):

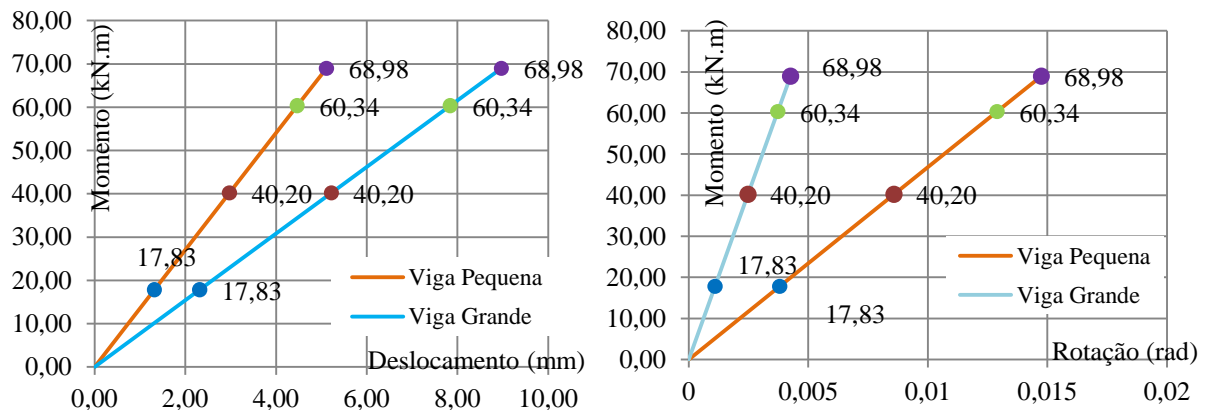


Figura 4.28 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

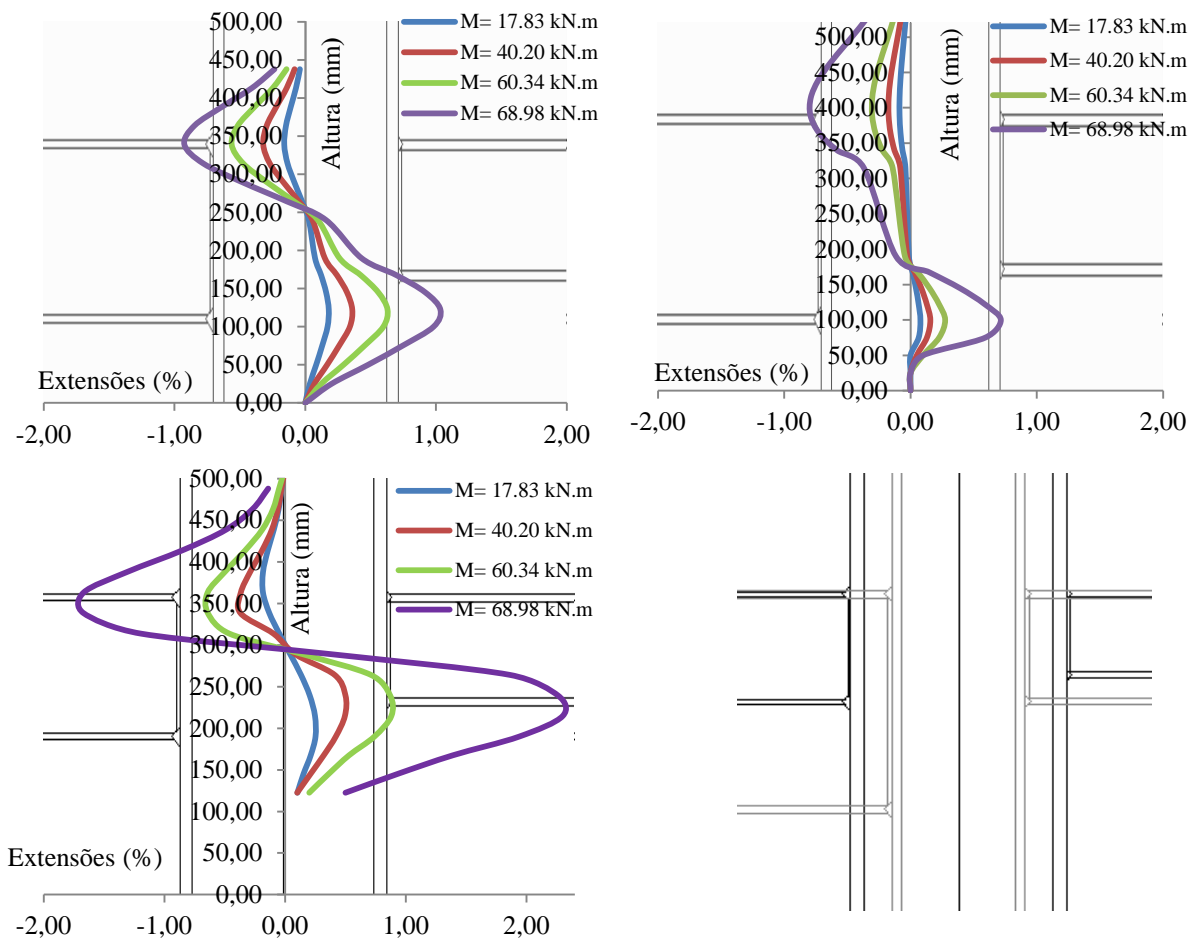


Figura 4.29 – Resultados em termos de comportamentos locais – Terceira linha.

Verifica-se através da figura anterior que, as extensões obtidas encontram-se em regime elástico de acordo com a Figura 4.5. Além disso, também se verifica que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande, como se pode observar na tendência das curvas referentes à primeira e segunda linha. Verifica-se ainda que a viga de maiores dimensões influencia o comportamento da viga pequena, como se pode verificar pela tendência da curva da terceira linha vertical.

4.1.9.5. Quinta Análise

Da mesma forma que nas análises apresentadas anteriormente, foram analisadas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões foi de 1/2. A secção do pilar não foi alterada (HEB 400) no entanto a secção do pilar passou para IPE 400. Além disso as secções das vigas de menores dimensões foram as seguintes HEB 200, HEB 100 e IPE 300, respectivamente para cada caso.

4.1.2.5.1. Décimo Terceiro Caso de Estudo

Em termos de comportamento global, os resultados obtidos para esta configuração de ligação assimétrica foram os seguintes:

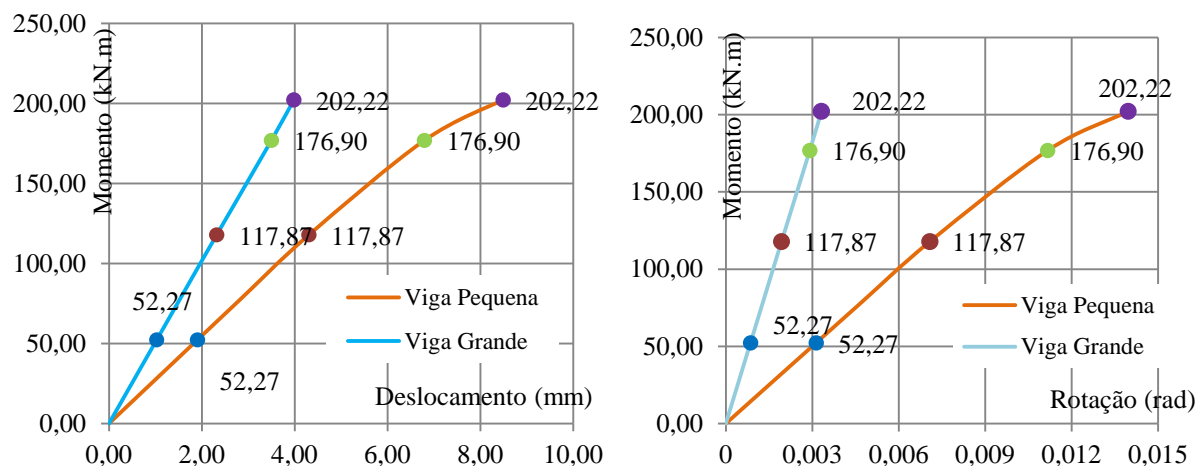
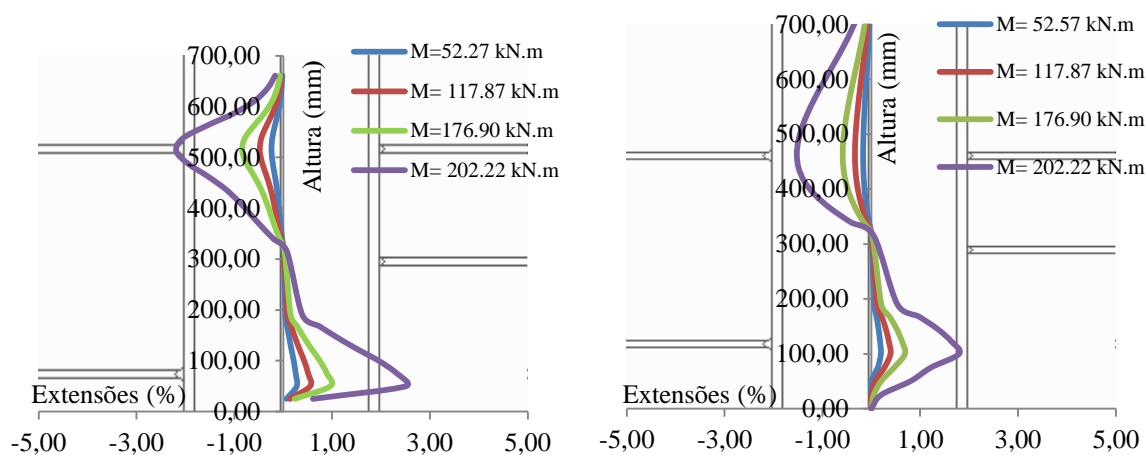


Figura 4.30 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Os resultados em termos de comportamento local para este caso de estudo, de acordo com as linhas de extensões (Figura 3.3), são os seguintes:



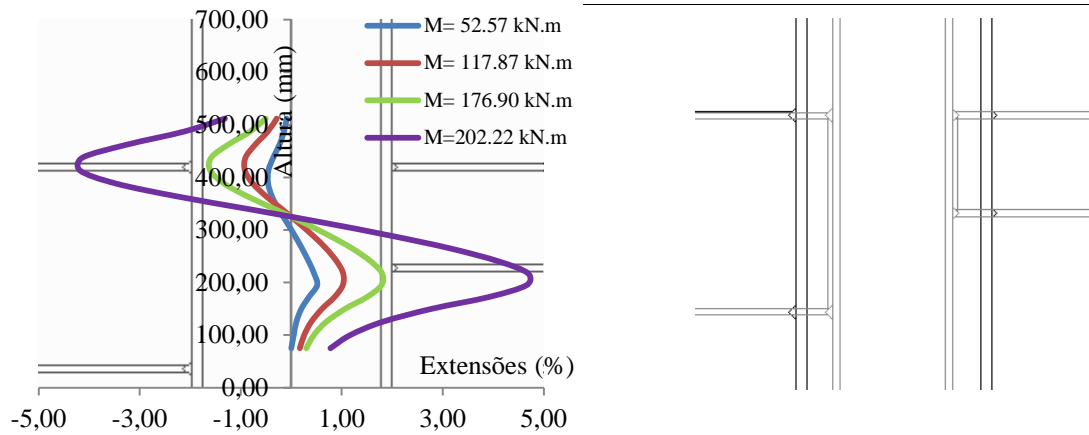


Figura 4.31 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Dos resultados obtidos verifica-se que as extensões se encontram em regime elástico, atendendo ao valor da extensão máxima observado. Verifica-se também que a viga de pequena influencia o comportamento da viga grande, como se pode verificar ao longo da tendência das curvas correspondentes à primeira e segunda linha.

Também se verifica que a viga de maiores dimensões influencia o comportamento da viga pequena, como se pode observar pela tendência das curvas associadas à terceira linha vertical.

4.1.2.5.2. Décimo Quarto Caso de Estudo

Os resultados obtidos em termos de comportamento global foram os seguintes:

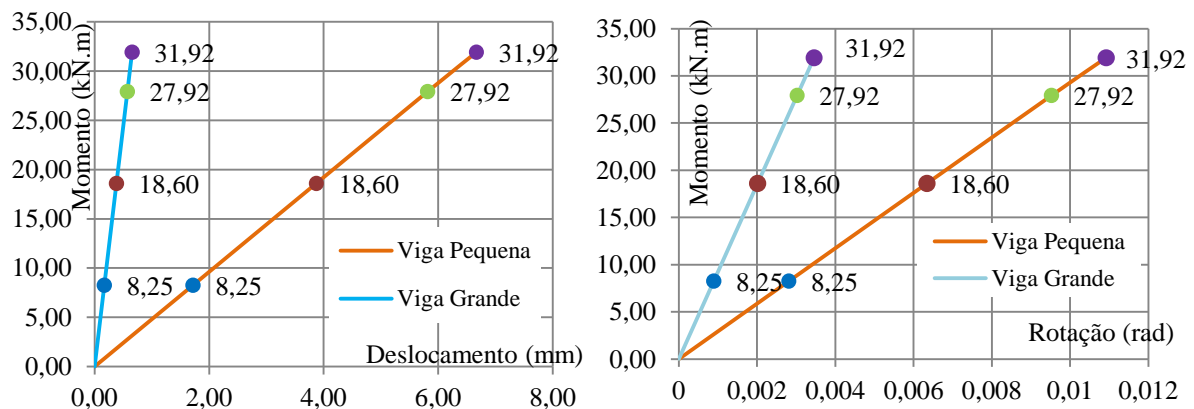


Figura 4.32 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Em termos de comportamento local, e atendendo todas considerações referidas nos restantes casos, obtiveram-se os seguintes resultados:

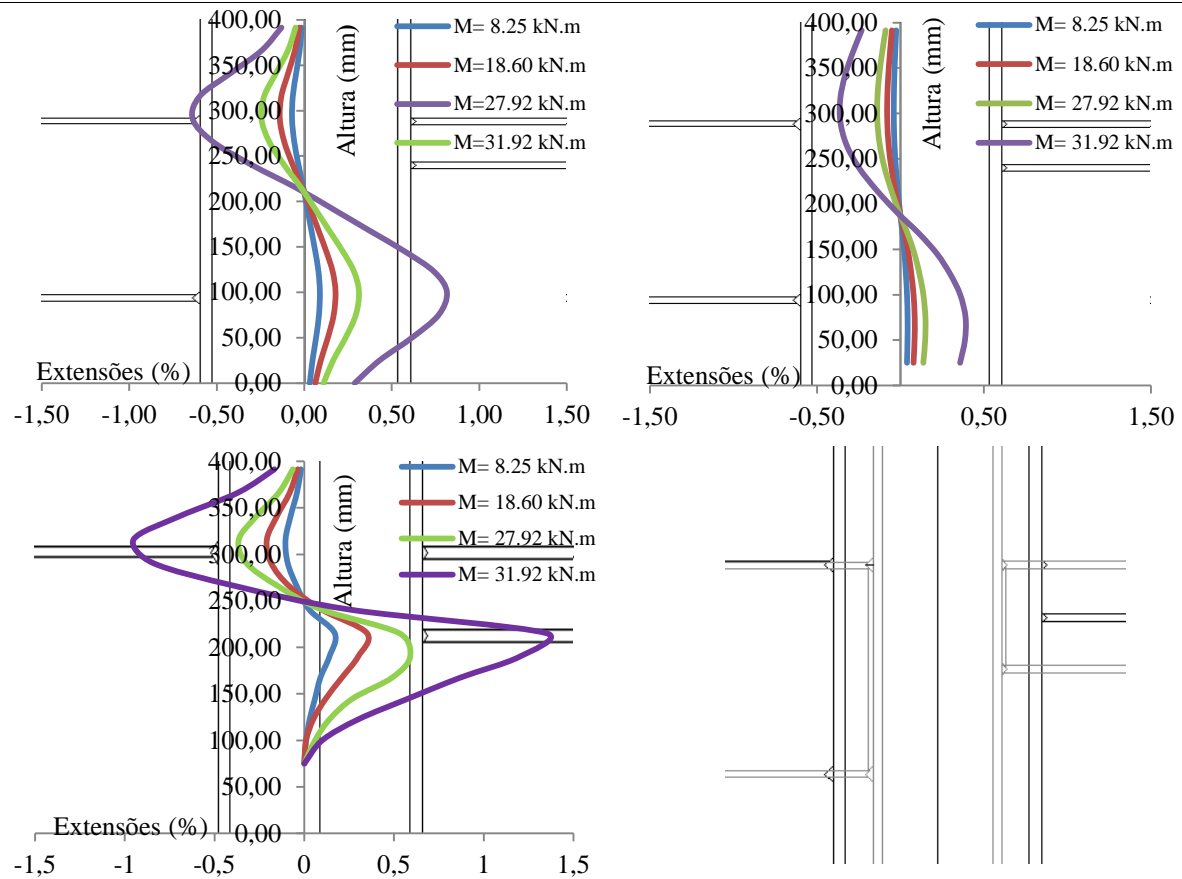


Figura 4.33 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que as extensões estão em regime elástico (Figura 4.5). Verifica-se ainda que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande, atendendo à tendência das curvas para a primeira e segunda linha. Refere-se também que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não se observando isso nas linhas de extensões apresentadas.

4.1.2.5.3. Décimo Quinto Caso de Estudo

Os resultados obtidos para este caso de estudo foram os seguintes:

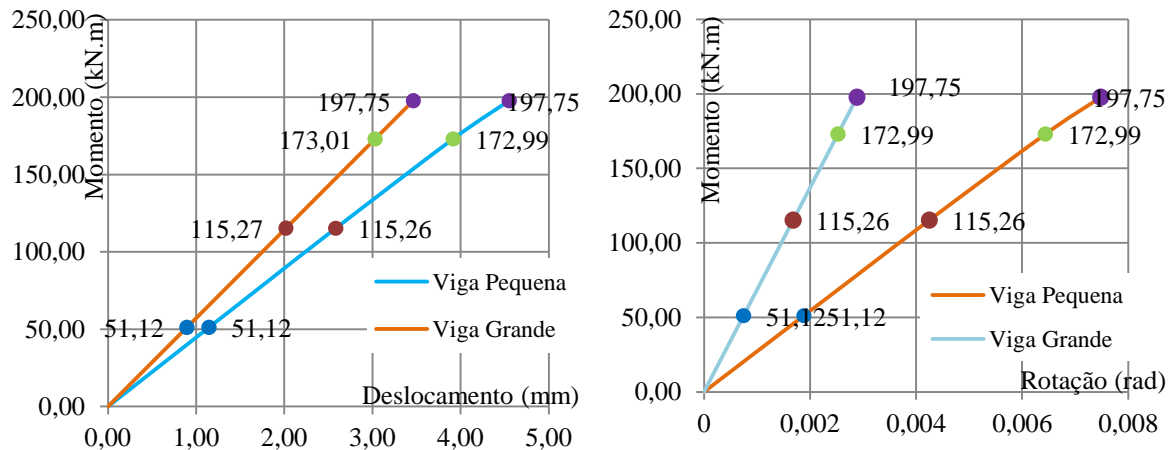


Figura 4.34 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Para analisar o comportamento deste caso de estudo em termos de comportamento local, foram verificados os valores das extensões nas mesmas linhas que se analisaram no primeiro caso de estudo.

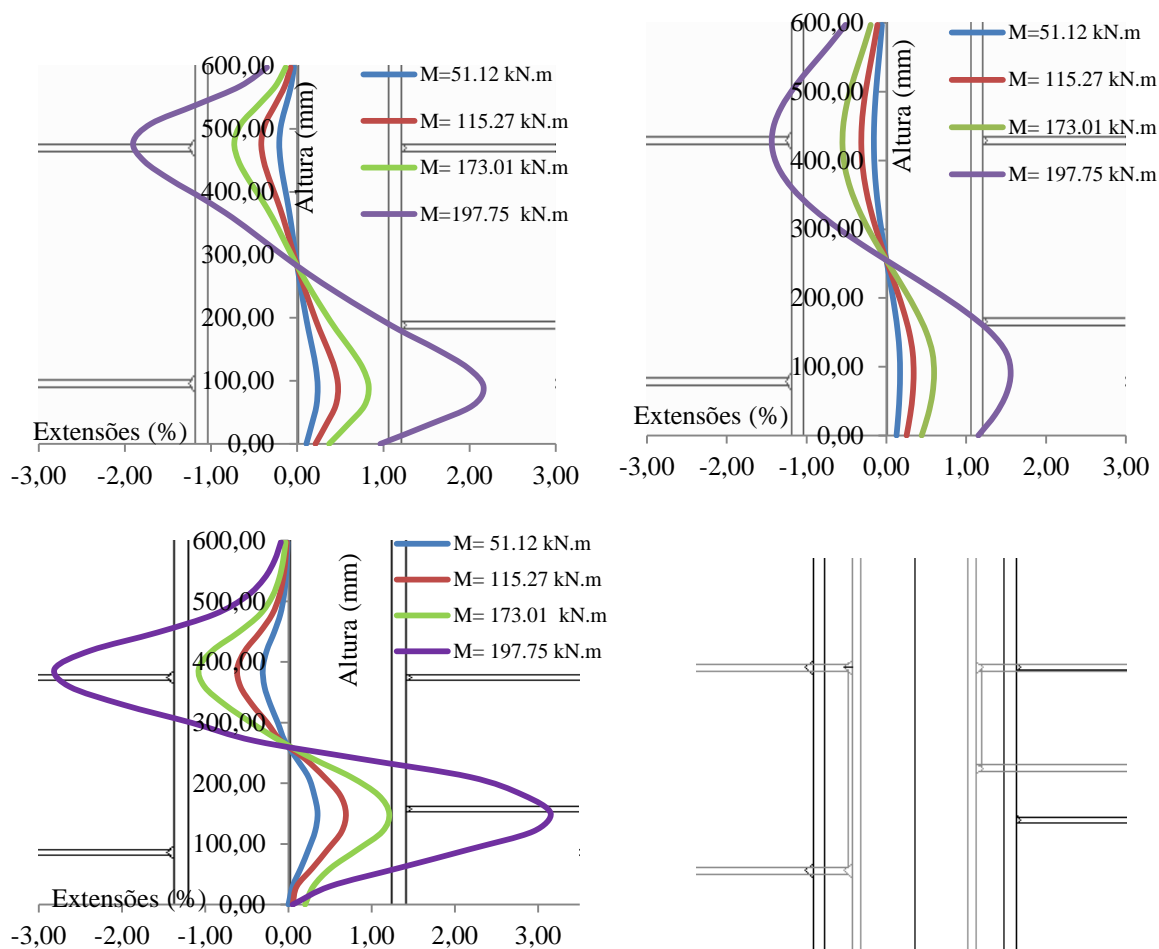


Figura 4.35 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Verifica-se que as extensões observadas se encontram em regime elástico, como se pode observar pelo valor reduzido das extensões obtidas. De acordo com a figura anterior, verifica-se ainda que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande. Contudo, a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, como se verifica na terceira linha de extensões.

4.1.9.6. Sexta Análise

Procede-se da mesma forma que nas análises apresentadas anteriormente, e desta forma foram analisadas as mesmas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas. No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões foi de 2. A secção do pilar não foi alterada (HEB 400) no entanto a secção do pilar passou para IPE 750*. Além disso as secções das vigas de menores dimensões foram as seguintes HEB 400, HEB 200 e HEB 600, respectivamente para cada caso.

4.1.2.6.1. Décimo Sexto Caso de Estudo

Em termos de comportamento global, os resultados obtidos para esta configuração de ligação assimétrica foram os seguintes:

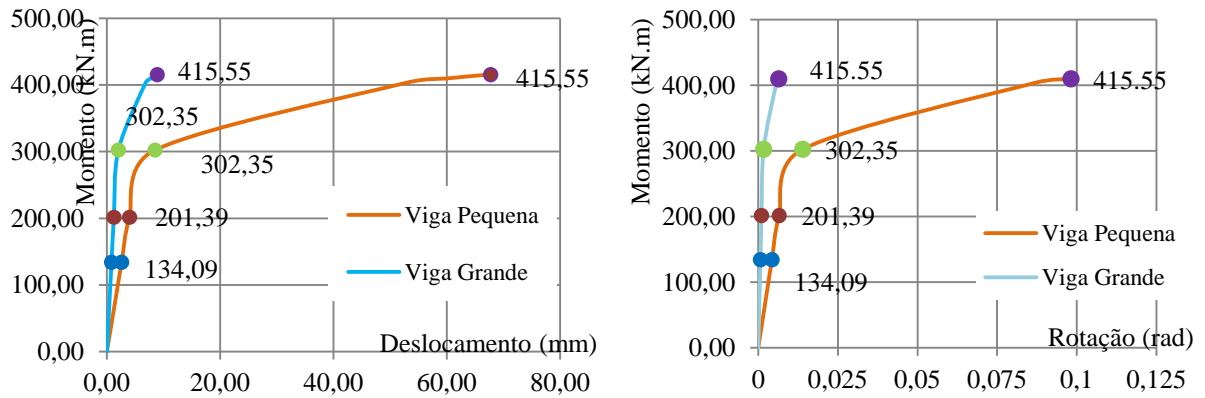


Figura 4.36 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Os resultados em termos de comportamento local apresentam-se seguidamente.

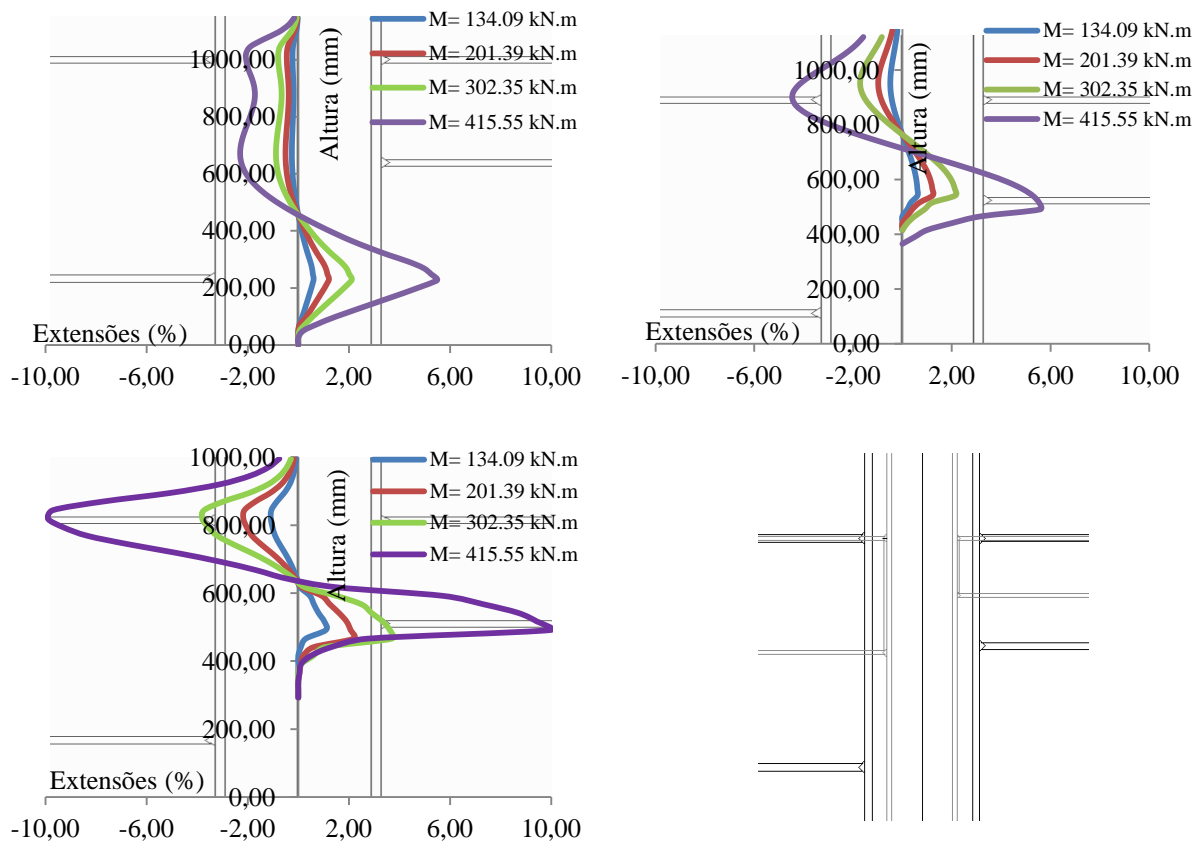


Figura 4.37 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que as extensões estão em regime plástico atendendo à Figura 4.5. Além disso, verifica-se que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande, como se pode ver pela análise da tendência da curva correspondente à primeira linha de extensões. Tendo em conta isto, refere-se ainda que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não se podendo observar essa influência nos resultados provenientes da terceira linha em estudo.

4.1.2.6.2. Décimo Sétimo Caso de Estudo

Em termos de comportamento global e local, apresentam-se os seguintes resultados:

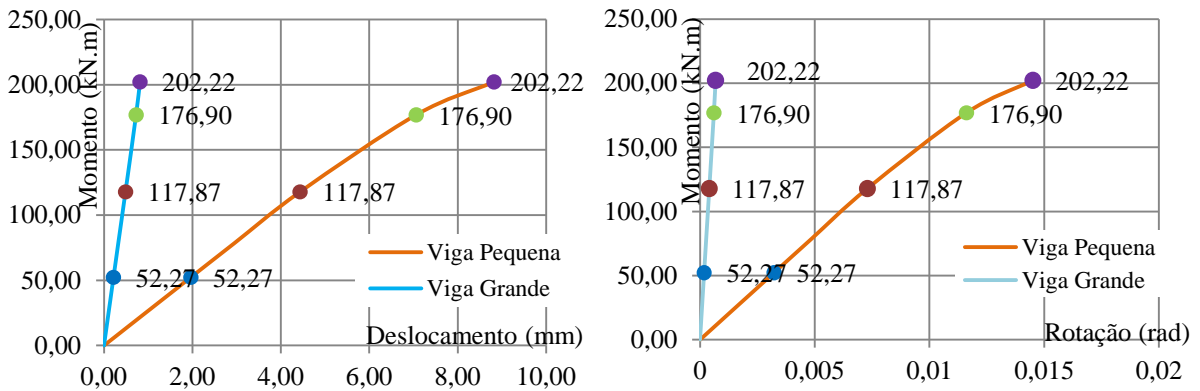


Figura 4.38 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

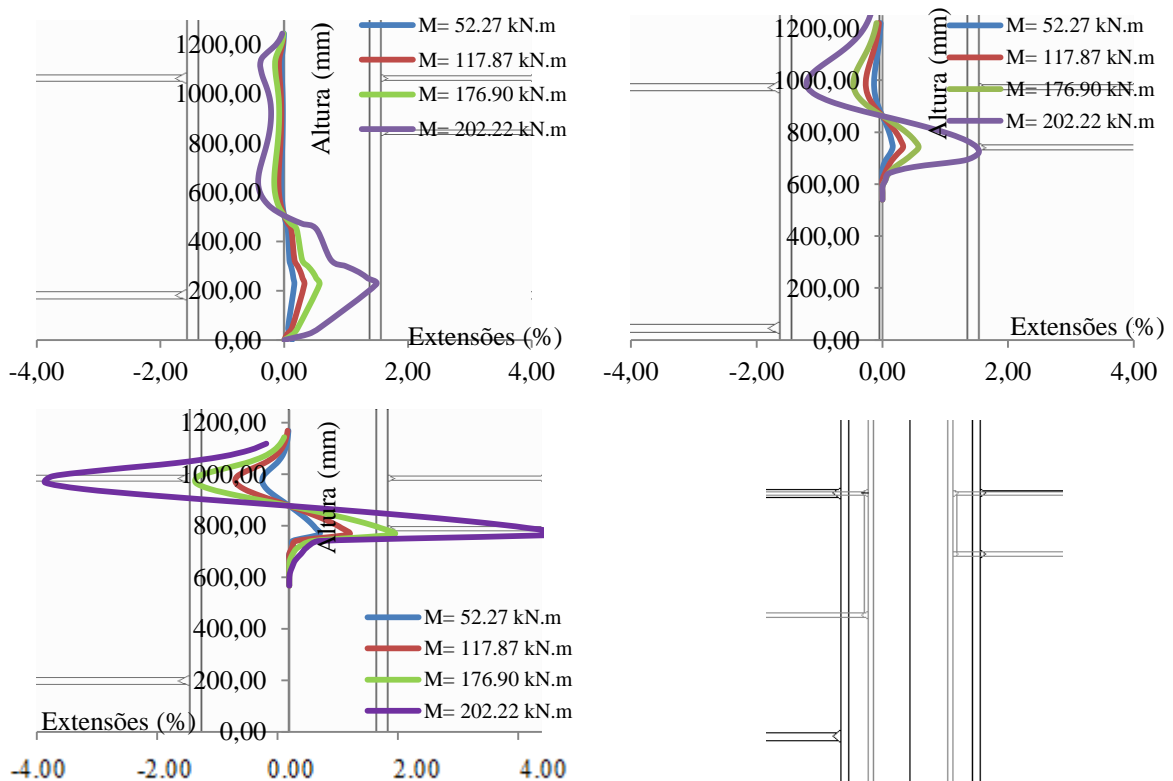


Figura 4.39 – Resultados em termos de comportamentos locais .

Verifica-se que as extensões estão em regime elástico (Figura 4.5) Além disso, verifica-se que a viga de menores dimensões influencia o comportamento da viga grande, como se verifica através da análise das curvas correspondentes à primeira linha vertical. No entanto, a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não se verificando nos resultados provenientes da terceira linha vertical.

4.1.2.6.3. Décimo Oitavo Caso de Estudo

Os resultados obtidos para esta configuração foram os seguintes (Figura 4.40 e Figura 4.41):

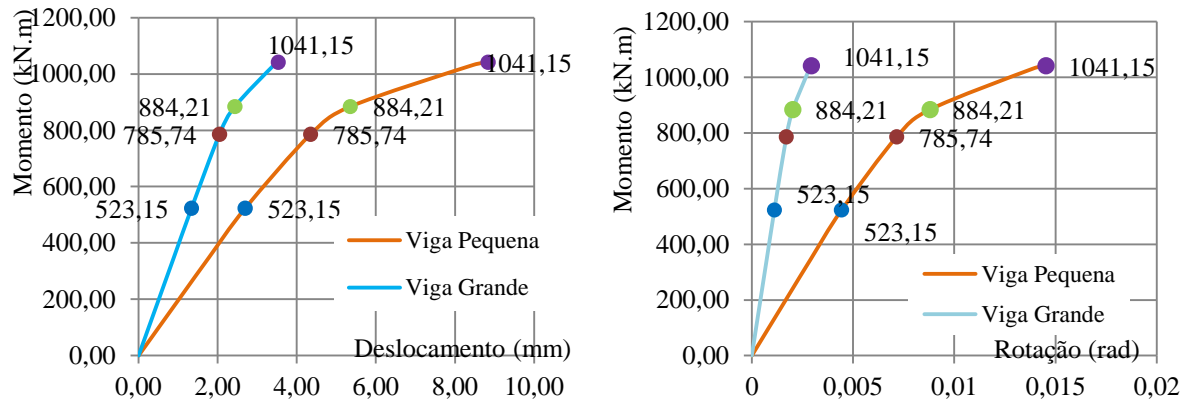


Figura 4.40 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

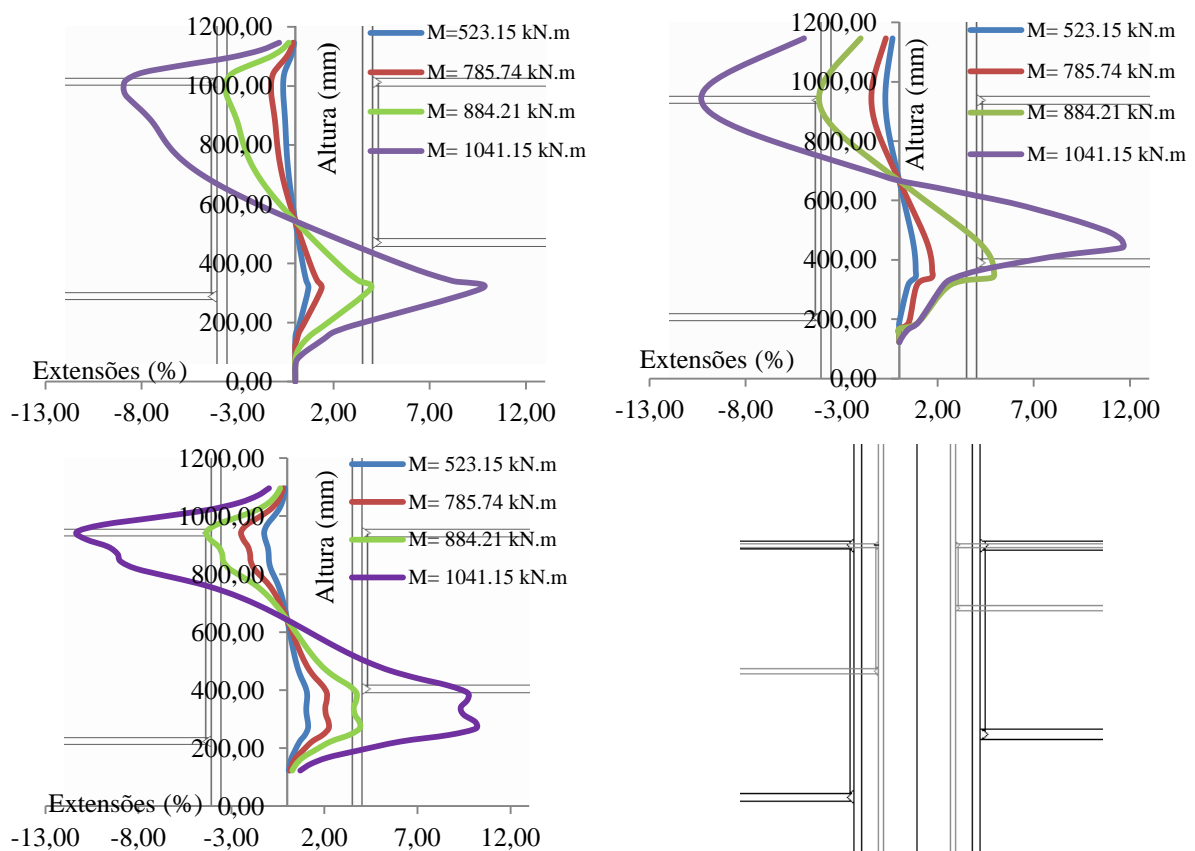


Figura 4.41 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que as extensões estão em regime plástico, verificando o valor significativo das extensões observadas. Além disso, de acordo com os resultados obtidos, verifica-se que, pela primeira vez entre os vários casos estudados, existe influência do comportamento de ambas as vigas. Com isto, especifica-se que, verifica-se a influência da viga pequena no comportamento da viga grande na segunda linha de extensões.

Verifica-se também a influência da viga de maiores dimensões no comportamento da viga pequena, de acordo com a tendência das curvas obtidas para a terceira linha de extensões.

4.1.9.7. Sétima Análise

Procede-se da mesma forma que nas análises apresentadas anteriormente, e desta forma foram analisadas as mesmas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões foi de 1/3. A secção do pilar foi alterada para HEB 600. Além disso as secções das vigas de menores dimensões foram sendo alteradas para HEB 100, HEB 100** e HEB 140*.

4.1.2.7.1. Décimo Nono Caso de Estudo

Em termos de comportamento global, os resultados obtidos para esta configuração de ligação assimétrica foram os seguintes:

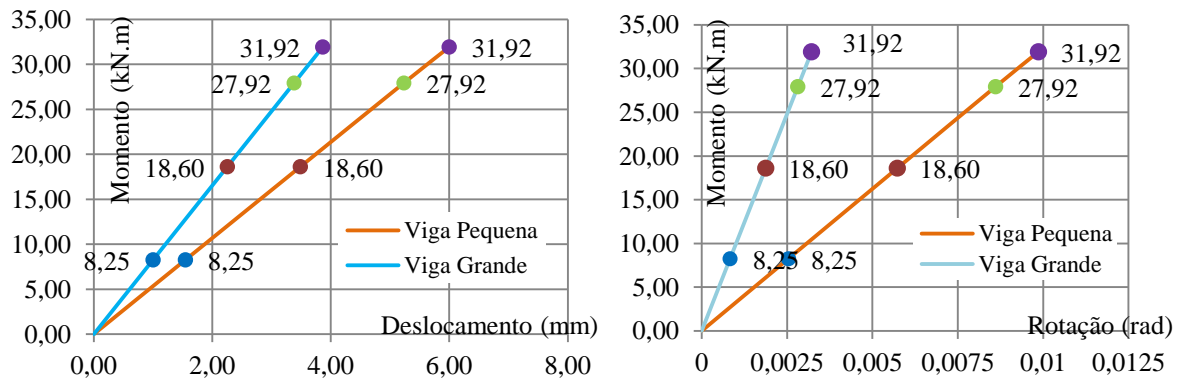


Figura 4.42 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Em termos de comportamento local, apresentam-se os resultados obtidos para este caso de estudo, para os níveis de momento flector acima salientados nas curvas momento flector-deslocamento. Estas extensões são provenientes das linhas definidas na Figura 3.3.

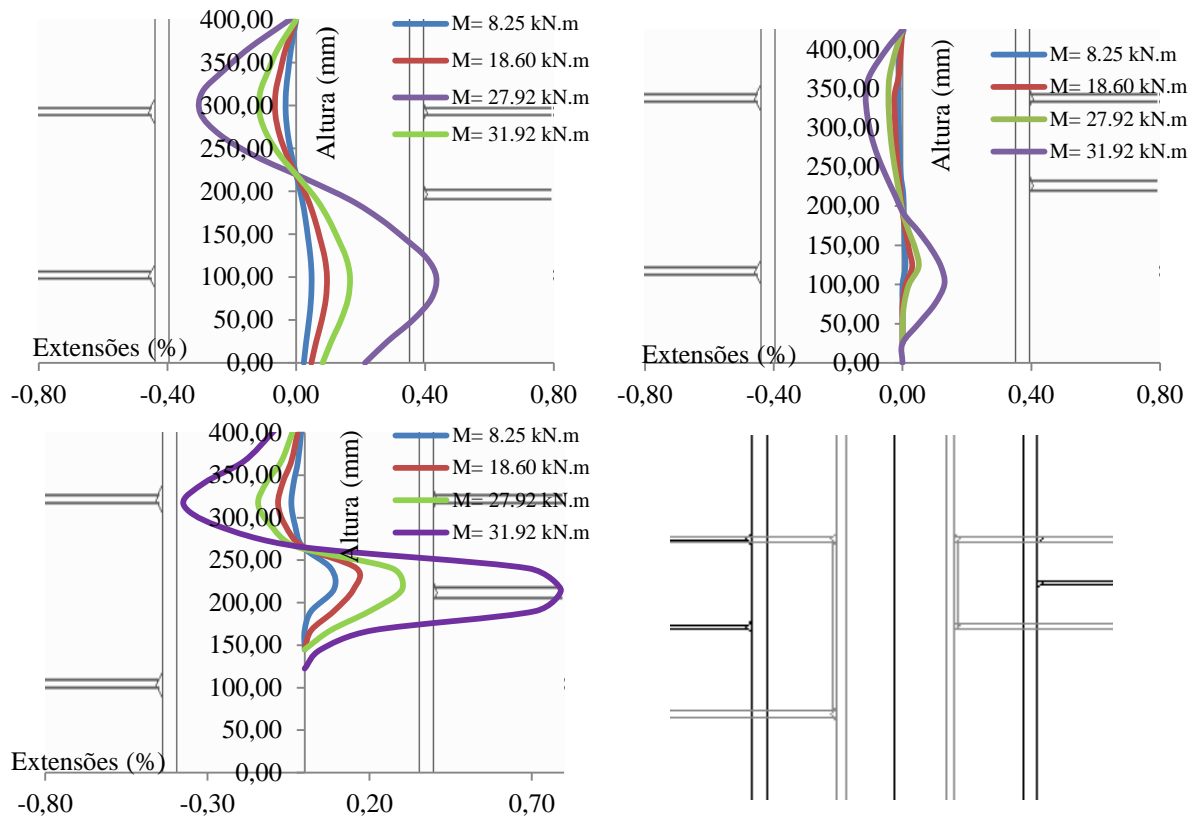


Figura 4.43 – Resultados em termos de comportamentos locais.

As extensões encontram-se em regime elástico (Figura 4.5). No entanto, na terceira linha de extensões, os resultados sugerem plastificação na zona do banzo inferior da viga pequena. Verifica-se também que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande. Refere-se ainda que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não sendo possível uma análise clara das extensões apresentadas.

4.1.2.7.2. Vigésimo Caso de Estudo

Apresentam-se os resultados em termos de comportamento global e local (Figura 4.42 e Figura 4.43).

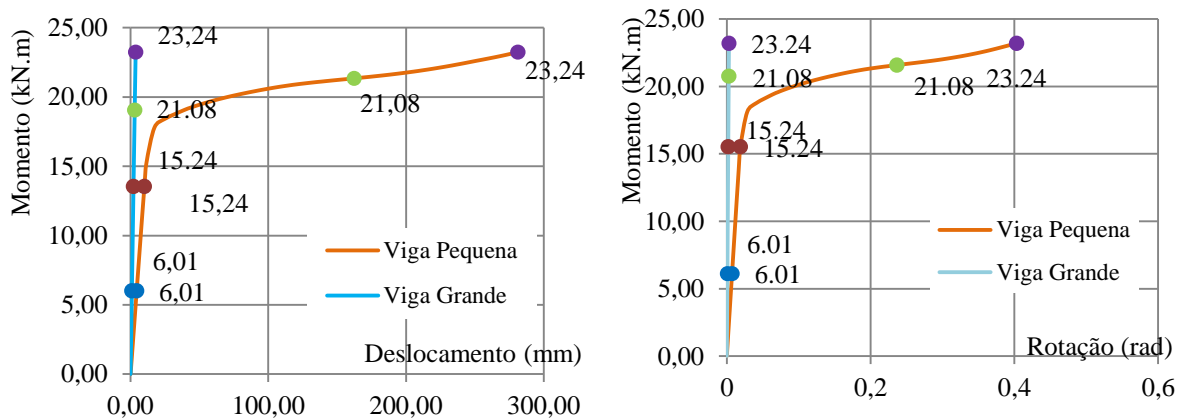


Figura 4.44 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

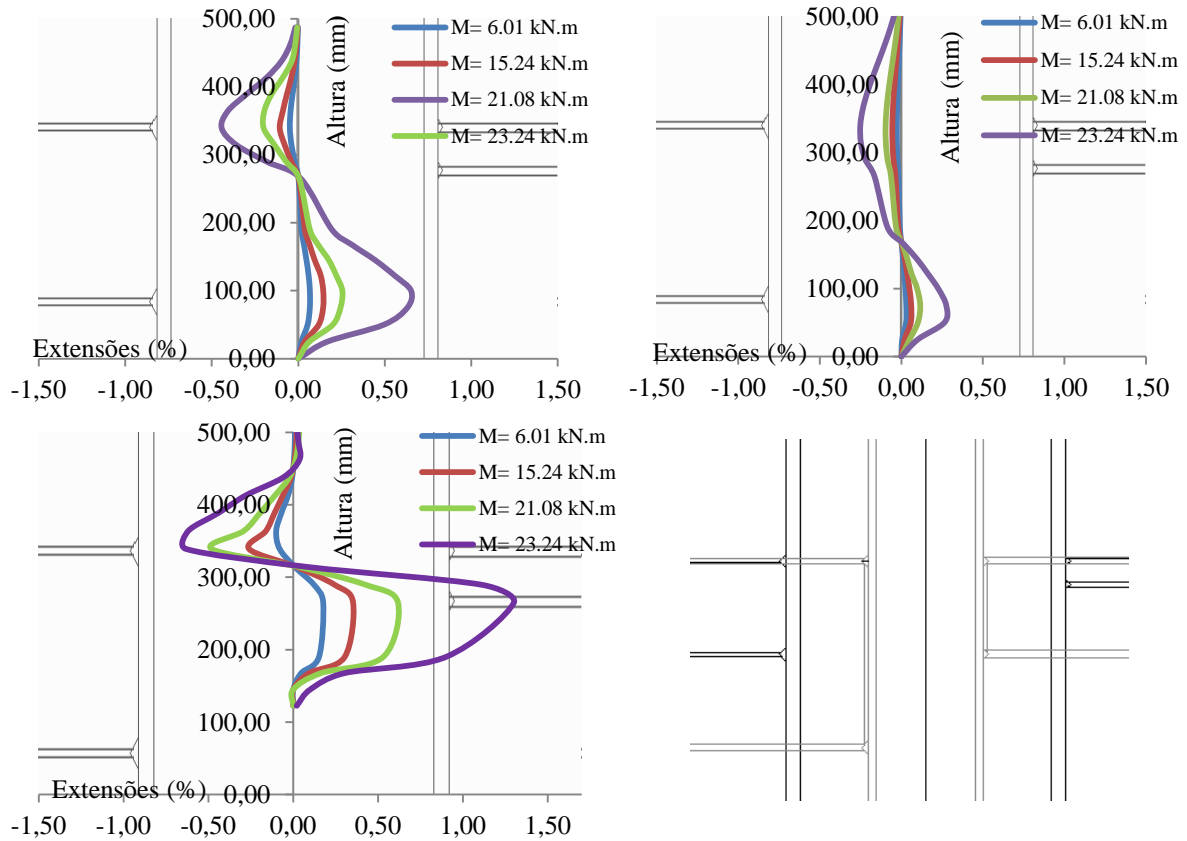


Figura 4.45 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que as extensões são de valor reduzido e que se encontram em regime elástico (Figura 4.5). De acordo com os resultados obtidos, refere-se ainda que, de acordo com a tendência das curvas provenientes da primeira e segunda linha, verifica-se que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande.

4.1.2.7.3. Vigésimo Primeiro Caso de Estudo

Apresenta-se de seguida a análise realizada em termos de comportamento global da ligação:

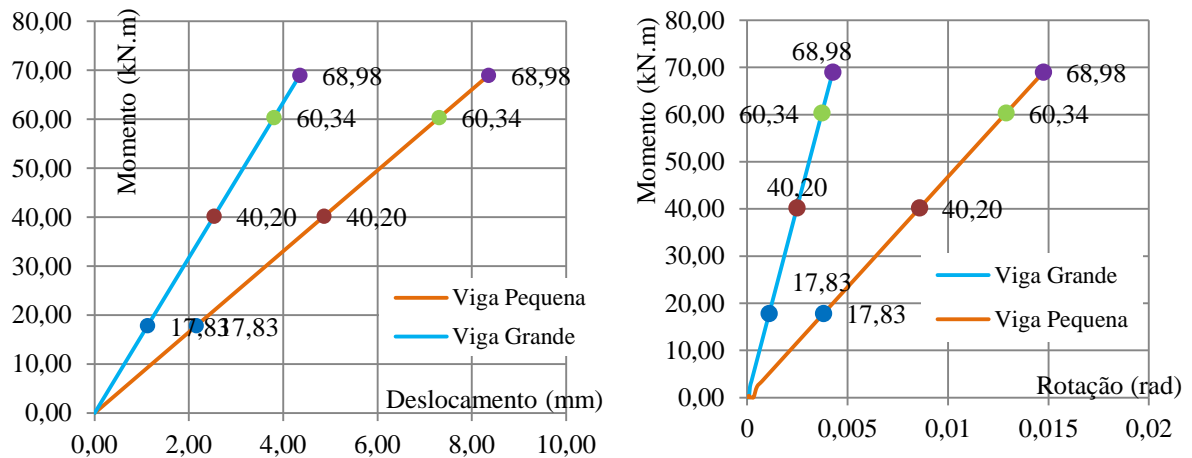


Figura 4.46 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

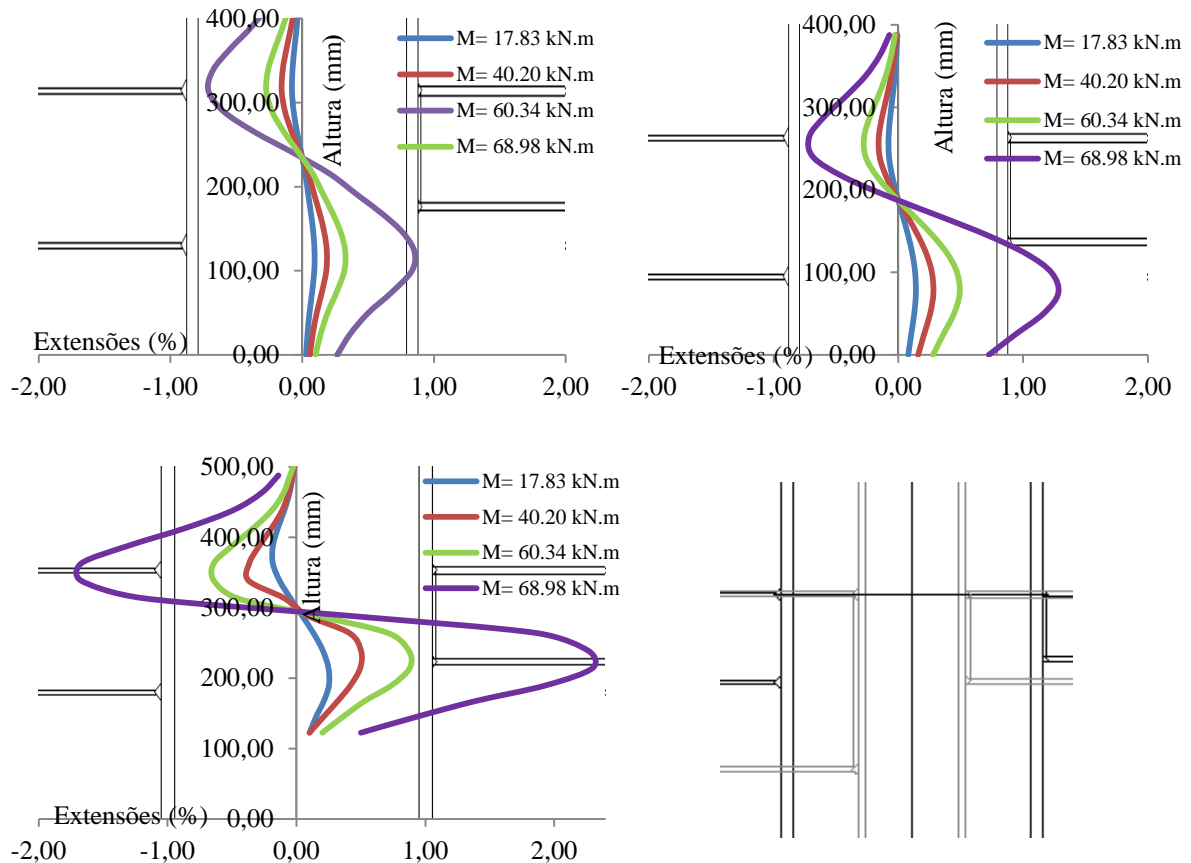


Figura 4.47 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Dos resultados obtidos verifica-se que as extensões são de valor reduzido e que se encontram em regime elástico (Figura 4.5). Em termos de comportamento das vigas, verifica-se que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande. Como se pode observar nomeadamente na tendência das curvas obtidas para a primeira e segunda linha. Verifica-se ainda que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, como se verifica nos resultados obtidos na terceira linha.

4.1.9.8. Oitava Análise

As análises apresentadas nesta análise correspondem às mesmas que anteriormente, e desta forma, foram analisadas as mesmas três configurações. As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões foi de 2/3. A secção do pilar não foi alterada (HEB 600). Além disso as secções das vigas de menores dimensões foram sendo alteradas para HEB 200, HEB 100 e HEB 300.

4.1.2.8.1. Vigésimo Segundo Caso de Estudo

Procede-se primeiramente à análise desta configuração em termos de comportamento global:

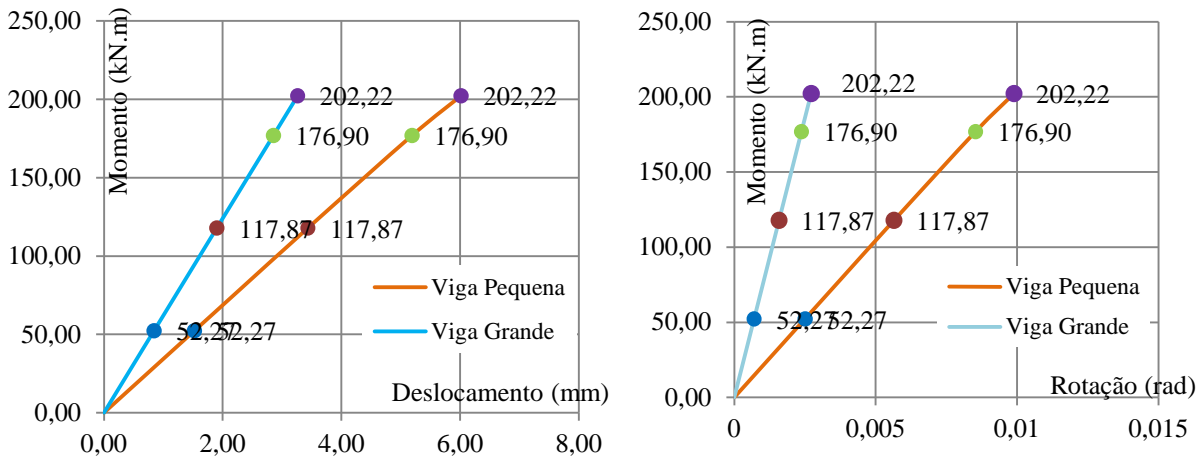


Figura 4.48 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

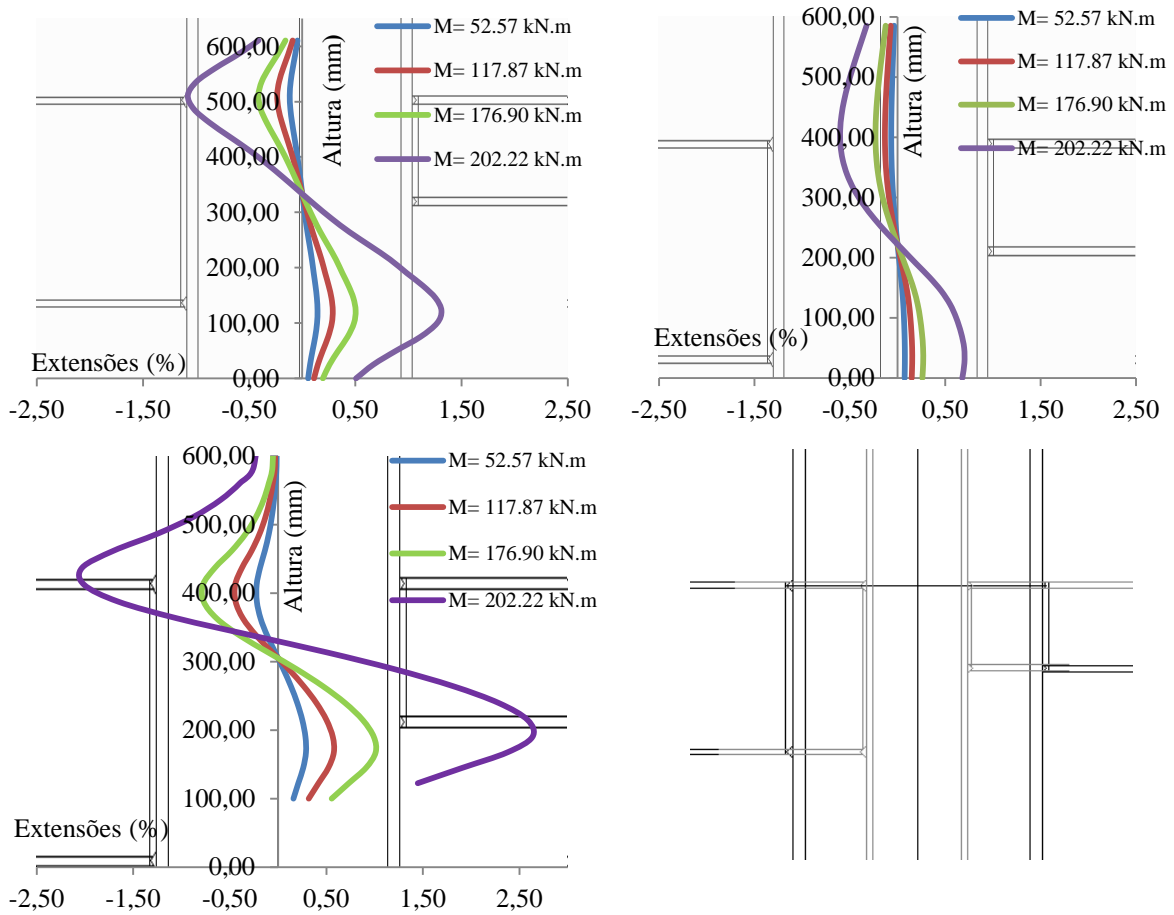


Figura 4.49 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com as extensões obtidas verifica-se que os valores obtidos se encontram em regime elástico (Figura 4.5). Analisando a influência entre as vigas, verifica-se que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande, como se conclui da análise da tendência das curvas correspondentes à primeira e segunda linha de extensões.

4.1.2.8.2. Vigésimo Terceiro Caso de Estudo

Em termos de comportamento global, a configuração de ligação assimétrica deste caso:

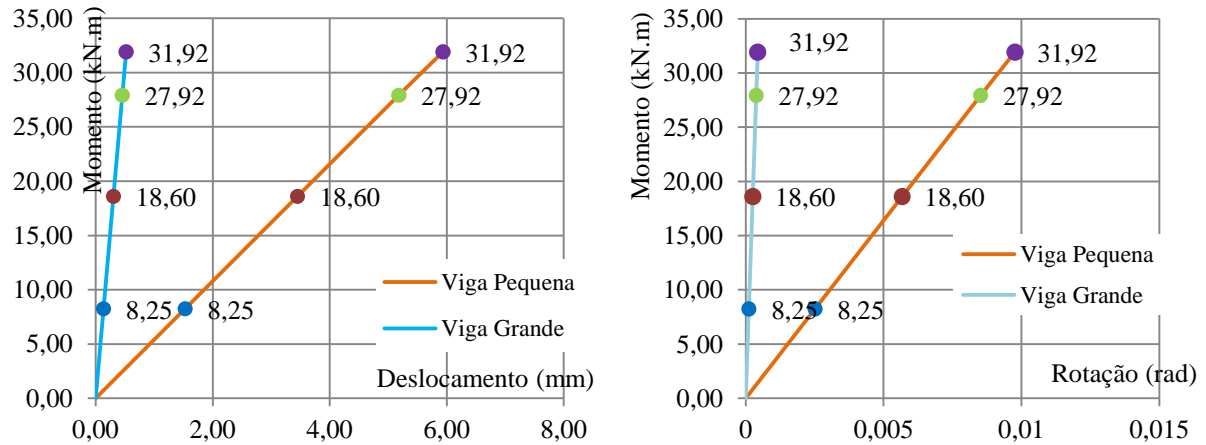


Figura 4.50 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

Analisando agora o comportamento local desta ligação, apresentam-se as extensões obtidas:

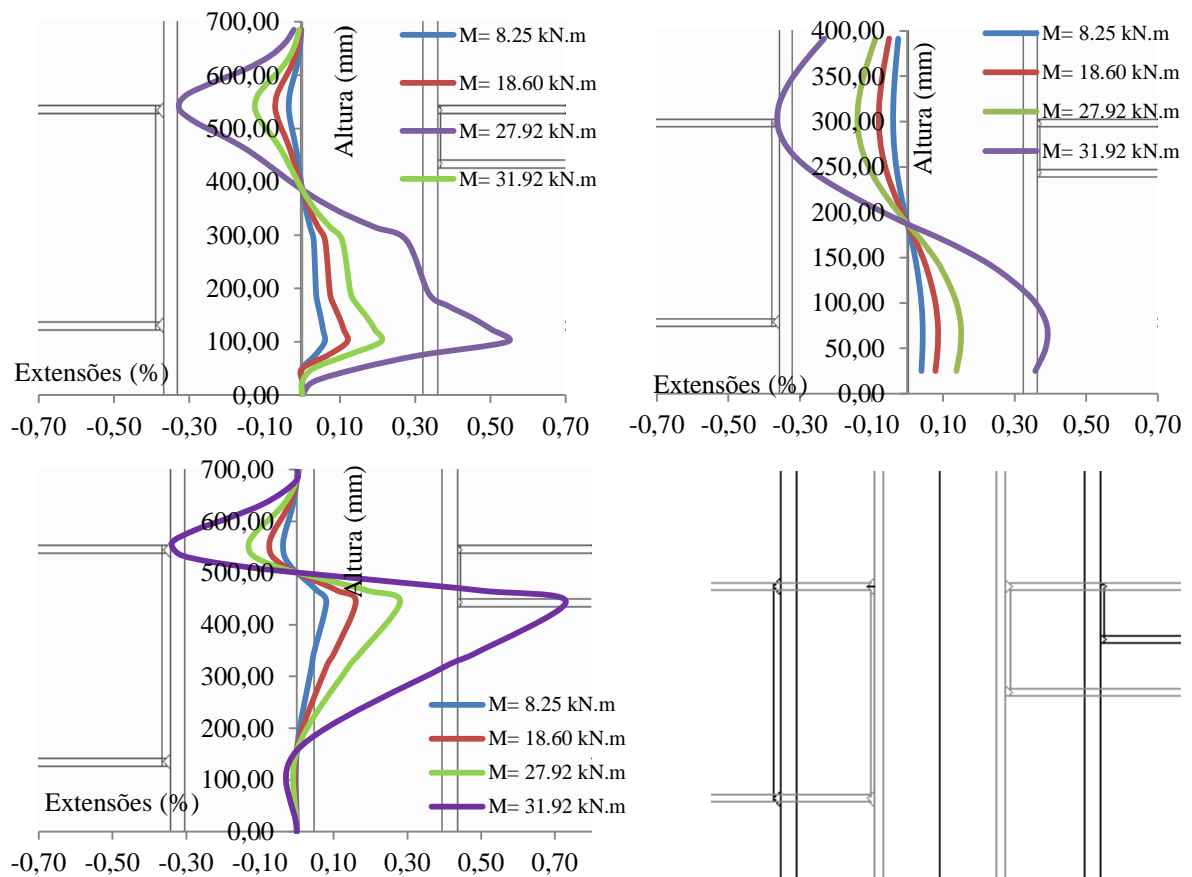


Figura 4.51 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados anteriores verifica-se que as extensões para este caso também se encontram em regime elástico (Figura 4.5). Analisando a tendência das curvas provenientes da primeira linha, verifica-se que existe alguma influência da viga pequena na viga grande. Contudo essa influência não está tão visível nos resultados obtidos ao longo da segunda linha.

4.1.2.8.3. Vigésimo Quarto Caso de Estudo

Analisando os deslocamentos e as rotações obtidas para este caso de estudo, obtêm-se as curvas momento-deslocamento e momento-rotação representadas na Figura 4.52.

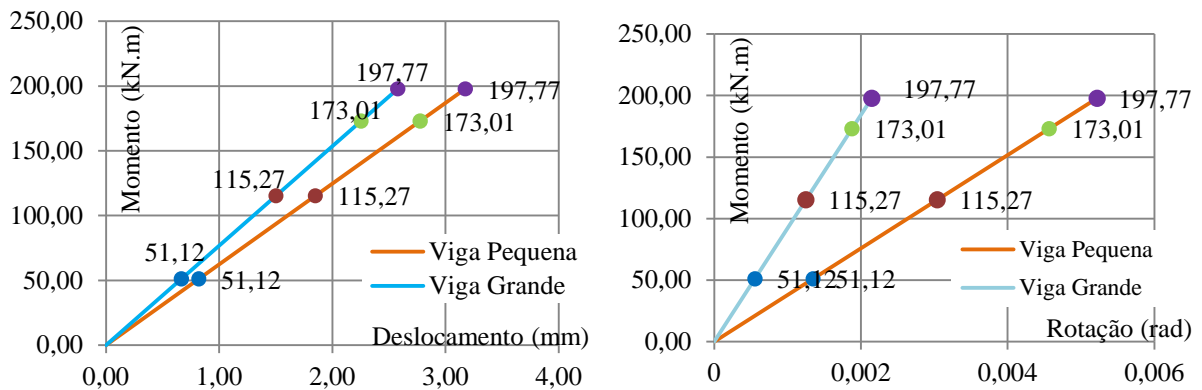


Figura 4.52 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

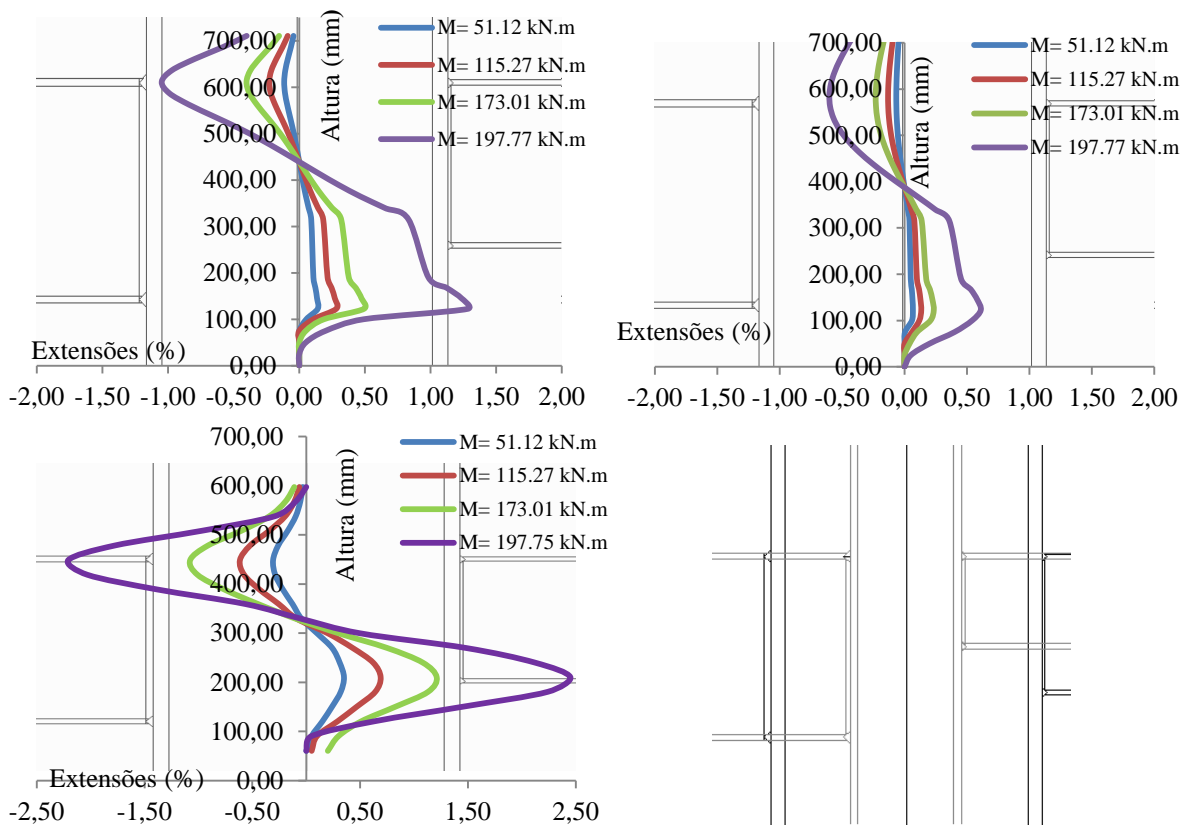


Figura 4.53 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que as extensões neste caso de estudo se encontram em regime elástico (Figura 4.5). Analisando a tendência das curvas referentes à primeira e segunda linha de extensões conclui-se que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande. Da análise dos resultados obtidos na terceira linha verifica-se que a viga grande também influencia o comportamento da viga pequena.

4.1.9.9. Nona Análise

As relações entre as alturas das vigas foram as mesmas (1/2, 1/4 e 3/4). No entanto, a relação entre a altura da secção do pilar e a altura da viga de maiores dimensões foi de 1. A secção do pilar não foi alterada (HEB 600). Para além disso as secções das vigas de menores dimensões foram sendo alteradas para HEB 300, HEB 140* e HEB 450.

4.1.2.9.1. Vigésimo Quinto Caso de Estudo

Os resultados em termos de comportamento global e local obtidos para este caso de estudo foram os seguintes:

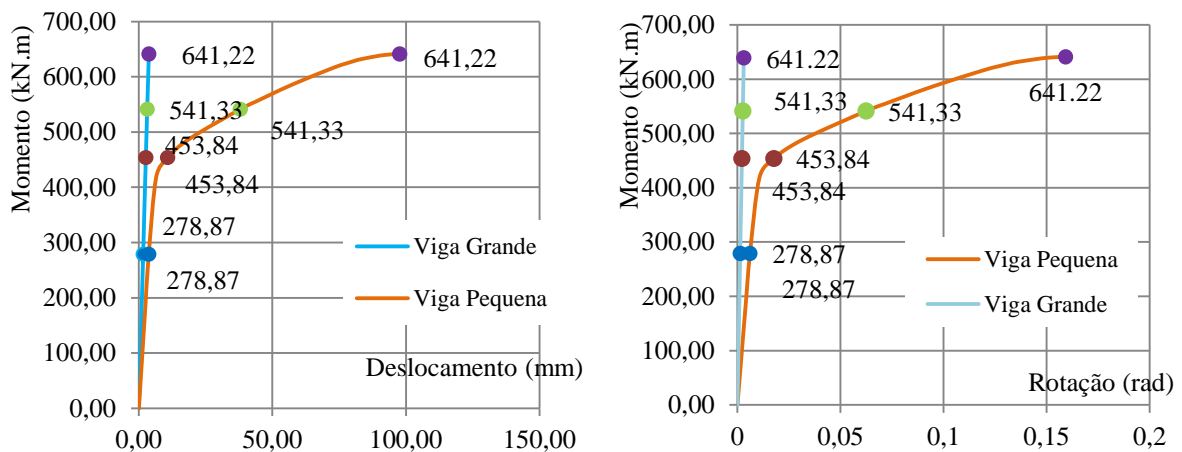
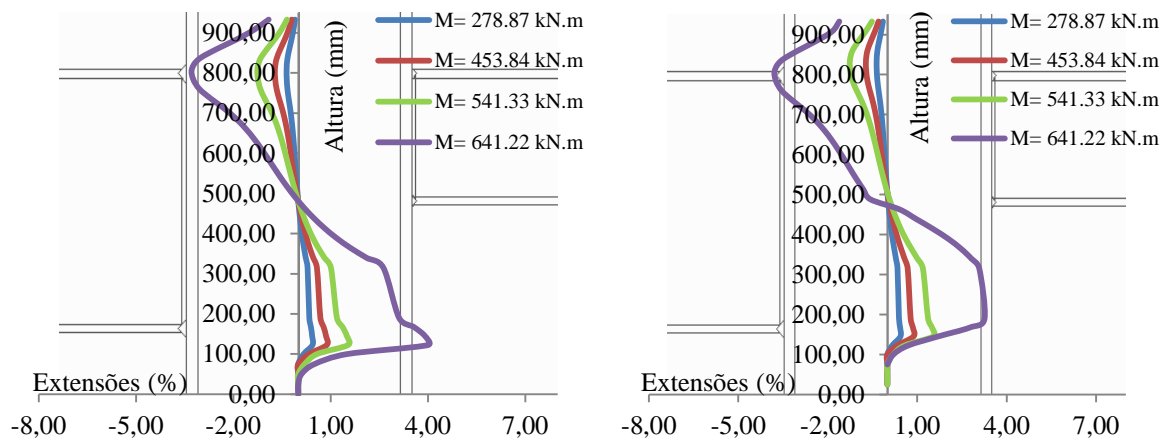


Figura 4.54 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.



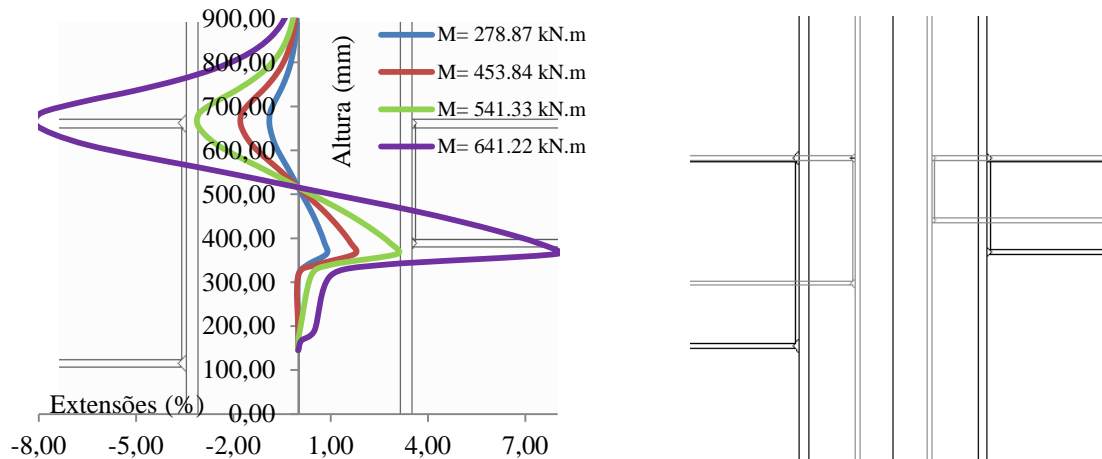


Figura 4.55 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que as extensões estão em regime plástico (Figura 4.5), verifica-se ainda que na segunda linha, na zona do banzo inferior da viga grande existe plastificação nessa zona. Da análise da tendência da primeira e da segunda linha de extensões conclui-se que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande. Além disso, verifica-se nos resultados obtidos na terceira linha que a viga grande influencia o comportamento da viga pequena.

4.1.2.9.2. Vigésimo Sexto Caso de Estudo

Relativamente a este caso de estudo, verificam-se nas seguintes figuras os resultados obtidos em termos de comportamento global e local. Tendo em conta isto, apresenta-se primeiramente a curva momento-deslocamento:

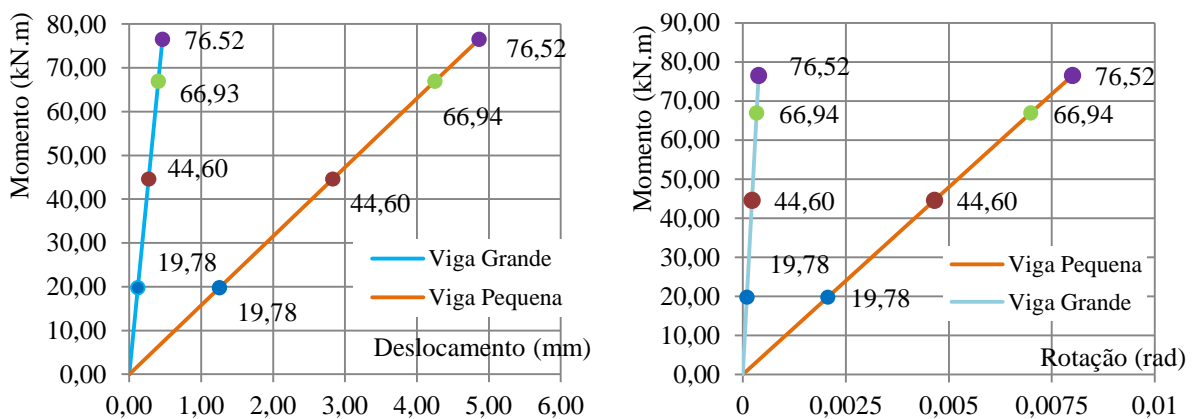


Figura 4.56 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

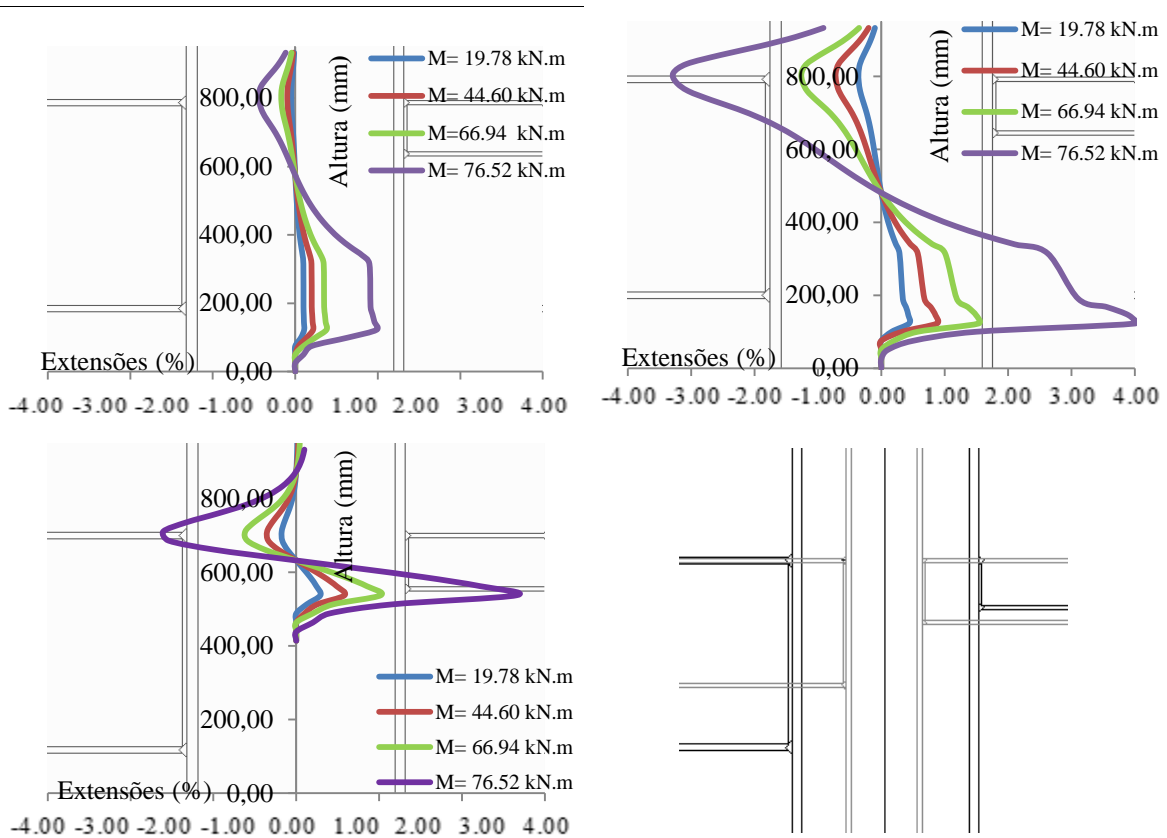


Figura 4.57 – Resultados em termos de comportamentos locais.

Primeiramente, analisa-se que as extensões observadas se encontram em regime elástico atendendo à Figura 4.5 e aos valores obtidos.

No entanto, na segunda linha de extensões, verifica-se existe plastificação no banzo inferior da viga maior. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que a viga pequena não influencia o comportamento da viga grande. Contudo a viga grande influencia o comportamento da viga pequena, mesmo não sendo visível nas extensões apresentadas.

4.1.2.9.3. Vigésimo Sétimo Caso de Estudo

Em termos de comportamento global apresentam-se os seguintes resultados:

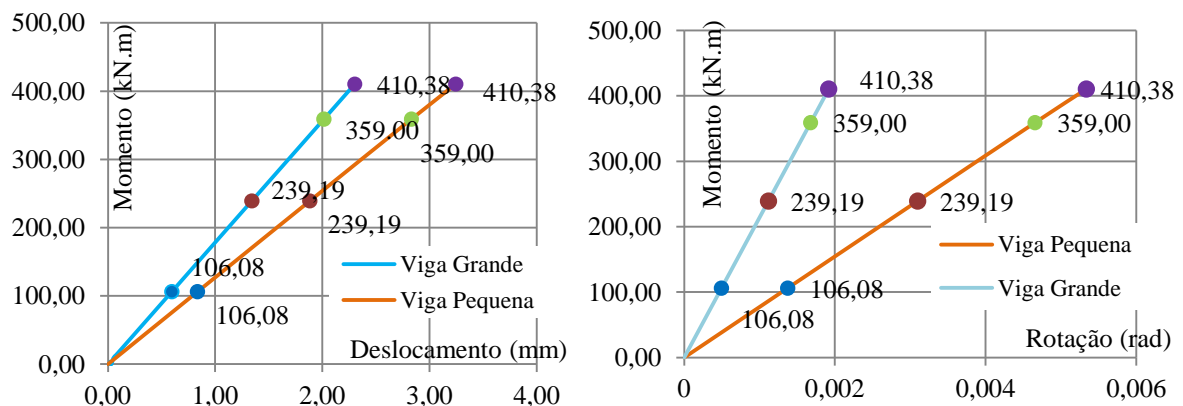


Figura 4.58 – Resultados do modelo de cálculo em termos de comportamento global.

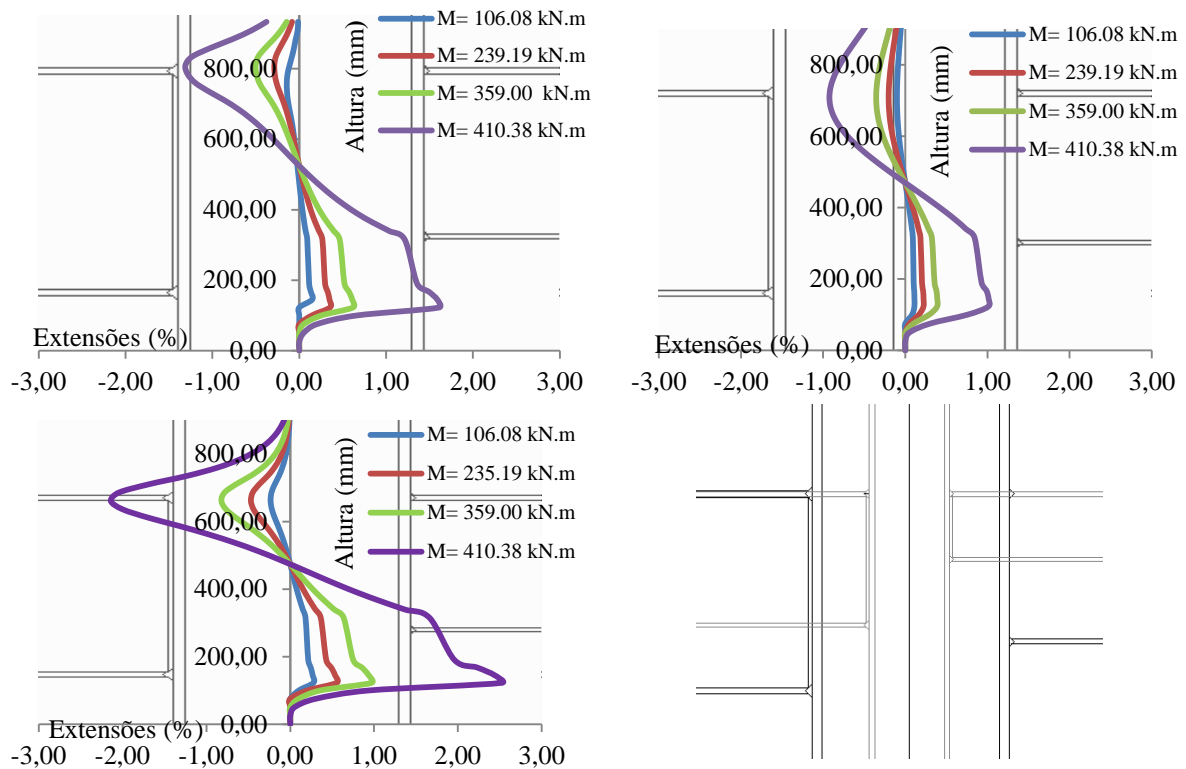


Figura 4.59 – Resultados em termos de comportamentos locais.

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que as extensões obtidas se encontram em regime elástico, atendendo ao seu valor reduzido. Analisando a tendência das curvas para as três linhas de extensões verifica-se que a viga pequena influencia o comportamento da viga grande, assim como, a viga grande influencia o comportamento da viga pequena.

4.1.3. Comparação de Resultados – Comportamento global

Pretende-se realizar uma comparação de resultados em termos de comportamento global, nomeadamente através das curvas momento rotação. Para existir um parâmetro de referência na comparação pretende-se comparar casos de estudo que apresentem a mesma relação entre as alturas das vigas, mas com relações diferentes entre as alturas das secções da viga de maiores dimensões e do pilar.

4.1.9.1. Comparação entre casos em que $\alpha=1/2$ (secção de pilar HEB 240)

Para esta primeira comparação, a relação α mantém-se em todos os casos em estudo. Para esta comparação serão analisados os casos 1, 4 e 7. Referindo que para o caso 1 a relação γ é igual a 1, no caso 4 esta mesma relação é de 2 e no caso 7 o γ é igual a 3. Nos três casos, a secção do pilar é HEB 240. No primeiro caso de estudo, o perfil considerado na viga de maiores dimensões é IPE 240, no quarto caso de estudo é IPE 400 e do sétimo caso de estudo é IPE 750*. Relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 120, HEB 240 e HEB 360, respectivamente para cada caso em análise. Tendo em conta o referido apresentam-se seguidamente as curvas momento-rotação:

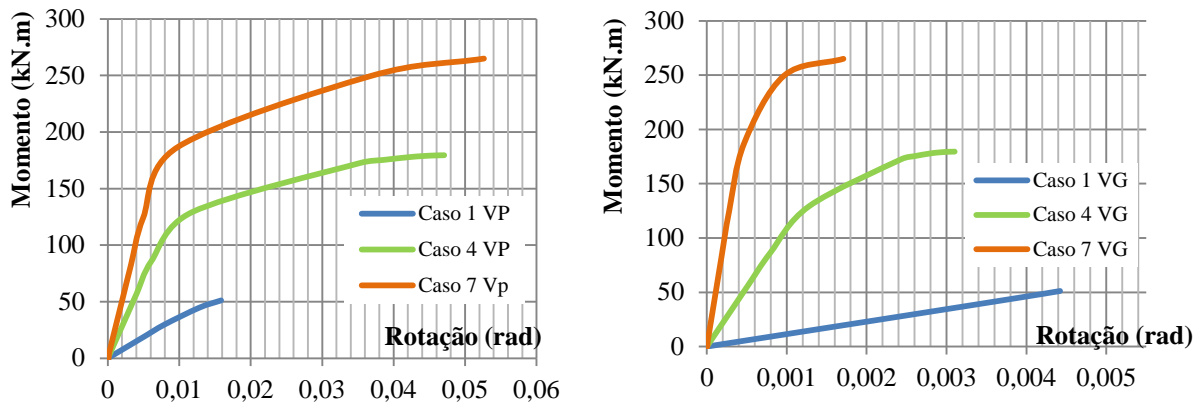


Figura 4.60 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

De acordo com a figura anterior, verifica-se que para a mesma relação de altura da secção das vigas os valores são bastante diferentes, isto porque as relações γ também são diferentes. Tendo em conta isto, refere-se que quer na viga pequena quer na viga grande é no caso 7 que se verifica maior rigidez. Ainda em termos de rigidez, verifica-se que o caso 1, em ambas as vigas, corresponde ao caso onde o valor é inferior. Isto sucede devido à relação γ ser superior para o caso 7 e é inferior para o caso 1.

Analisando os valores das rotações, verifica-se que para a viga pequena, o caso 7 é onde a rotação é mais elevada. Enquanto que no caso 1, o valor observado da rotação é o mais inferior entre os três casos.

Relativamente à viga pequena, verifica-se que o caso 1 apresenta maior rotação, enquanto que no caso 7 a rotação é a mais reduzida. Isto acontece devido ao facto de apesar de a relação α ser constante, a relação γ aumenta do caso 1 para o caso 7 de forma crescente. Desta forma, quando as relações α e γ são muito pequenas, verifica-se que a viga grande sofre maiores rotações, que diminuem à medida que essas relações vão aumentando.

4.1.9.2. Comparação entre casos em que $\alpha=1/4$ (secção de pilar HEB 240)

Nesta comparação, os casos em estudo serão o caso 2, 5 e 8. Procedendo da mesma forma que na comparação anterior, no caso 2 a relação γ é de 1, no quinto caso de estudo esta mesma relação é de 2 e no caso 8 é de 3.

A secção do pilar e das vigas de maiores dimensões mantém-se. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 100*, HEB 1200 e HEB 180, respectivamente para cada caso em análise.

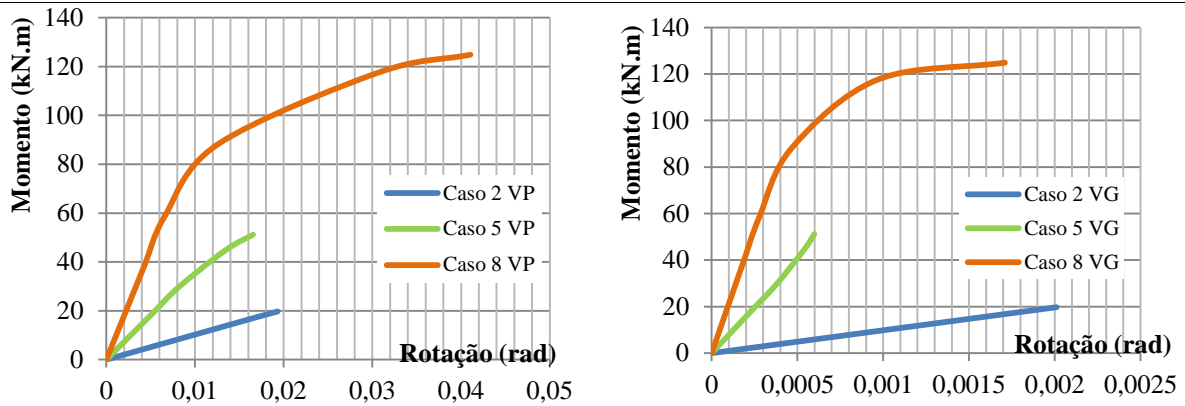


Figura 4.61 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Através das figuras anteriores, procede-se à comparação dos resultados em termos de rigidez e em termos da rotação visualizada em cada viga. Tendo em conta isto, e analisando primeiramente em termos de rigidez, verifica-se que, para todos os casos e em ambas as vigas, a rigidez é crescente do caso 2 para o caso 8. Referindo que isto sucede devido à relação γ ser crescente precisamente do caso 2 para o caso 8.

Analisando o comportamento da viga pequena em cada caso, em termos de rotação, verifica-se que o valor máximo é observado no caso 8. Enquanto que no caso 5 o valor é o mais reduzido. Relativamente à viga de maiores dimensões, verifica-se que rotação mais elevada no caso 2, sendo que, o valor inferior surge na viga do caso 5.

4.1.9.3. Comparação entre casos em que $\alpha=3/4$ (secção de pilar HEB 240)

Assim como nas comparações anteriores, no caso 3 a relação γ é de 1, no sexto caso de estudo, esta mesma relação é de 2 e no caso 9 é de 3. A secção do pilar e das vigas de maiores dimensões mantém-se. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 360, HEB 180 e IPE 550* respectivamente para cada caso.

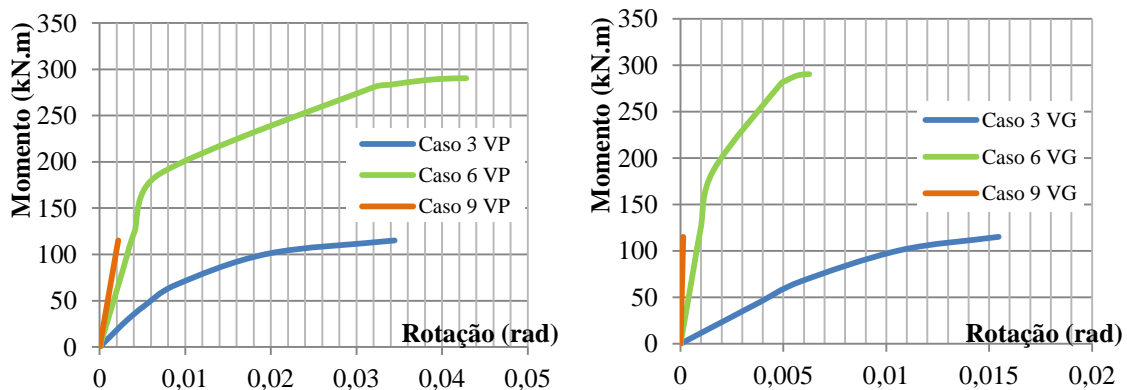


Figura 4.62 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Analisando estes resultados, verifica-se que, em termos de rigidez, o caso 9 é o que apresenta maiores valores em ambas as vigas.

O caso 1, em contra partida é o que apresenta menor valor de rigidez. Em termos de rotações, verifica-se que quanto maior a relação α e a relação γ menor será o valor da rotação. Pois como se comprova nestes resultados, o caso 9, que apresenta relações de α e γ superiores é o caso que apresenta menor rotação.

4.1.9.4. Comparação entre casos em que $\alpha=1/2$ (secção de pilar HEB 400)

Para esta comparação, as relações γ são distintas dos casos estudados anteriormente. No caso 10 a relação γ é de $1/2$, no caso 13, esta mesma relação é de 1 e no caso 16 é de 2. A secção do pilar passa para HEB 400 e as secções das vigas de maiores dimensões passam para IPE 200, IPE 400 e IPE 750*, respectivamente para os casos em estudo. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 100, HEB 200 e HEB 400.

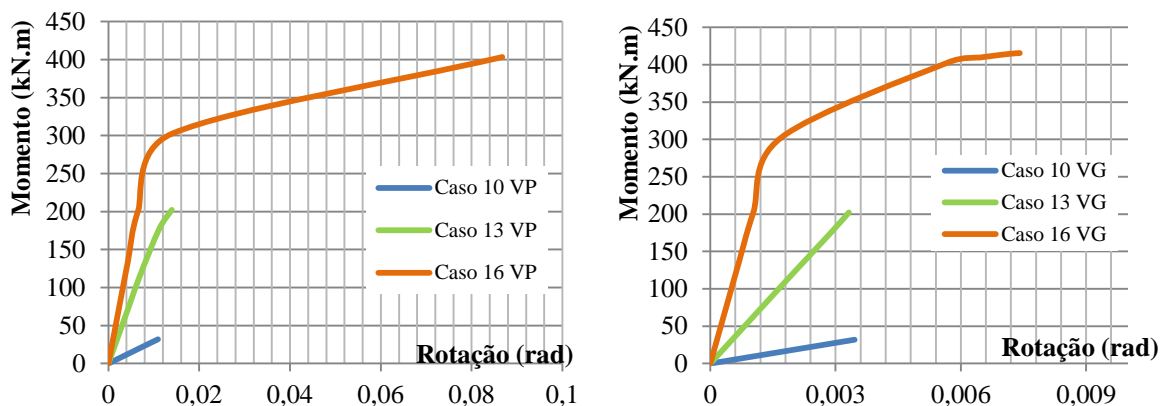


Figura 4.63 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

De acordo com a figura anterior, verifica-se que, em termos de rigidez das vigas, o caso 16 é o que apresenta valores superiores em ambas as vigas. No entanto, o caso 10 apresenta valores mais baixos de resistência. Refere-se que isto sucede devido ao facto de a relação γ ser superior no caso 16 e de apresentar valor mais reduzido no caso 10.

Em termos de rotação, verifica-se que, quer para a viga de maiores dimensões quer para a viga de menores dimensões, o caso 16 é o que apresenta valores superiores. Enquanto que o caso 10, também para ambas as vigas, apresenta valores mais reduzidos.

4.1.9.5. Comparação entre casos em que $\alpha=1/4$ (secção de pilar HEB 400)

As relações γ mantêm-se, sendo que as secções são as mesmas que as consideradas na comparação anterior, respectivamente para cada caso. Referindo ainda que a secção do pilar também se mantém. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 100**, HEB 100 e HEB 200 respectivamente.

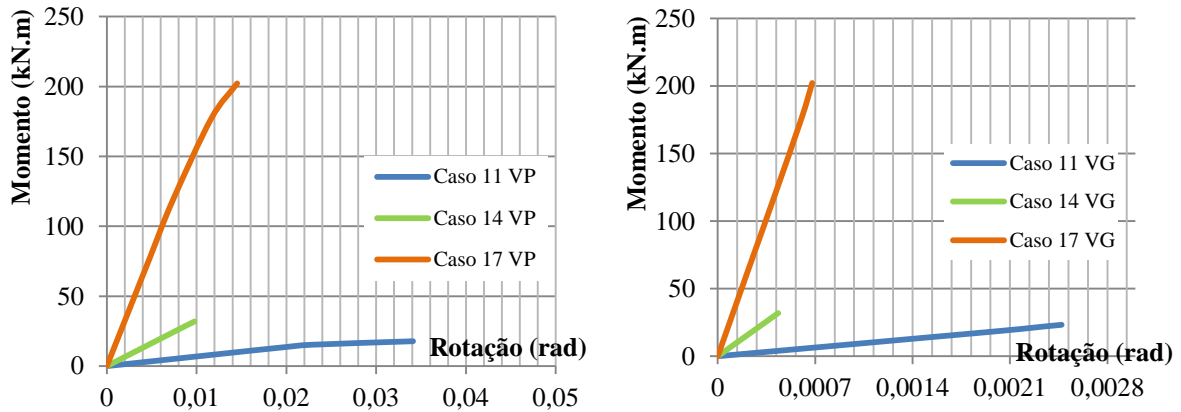


Figura 4.64 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Analisando os resultados anteriores, verifica-se que o caso 17, corresponde ao caso em que a rigidez é superior em ambas as vigas. No entanto, o caso 11, apresenta os valores mais reduzidos em termos de rigidez. Em termos de rotação, verifica-se que para as duas vigas em análise (VG e VP), é no caso 11 onde se observa maior rotação. Desta forma, quando as relações α e γ são muito pequenas, como sucede no caso 11, verifica-se que as rotações são mais elevadas.

4.1.9.6. Comparação entre casos em que $\alpha=3/4$ (secção de pilar HEB 400)

Para esta comparação, as relações γ são distintas dos casos estudados anteriormente. No caso 12 a relação γ é de $1/2$, no caso 15, esta mesma relação é de 1 e no caso 18 é de 2. Atendendo ao referido na comparação anteriores, e referindo que a secção do pilar se mantém e as secções das vigas de maiores dimensões também, respectivamente para os casos em estudo. E que relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 140*, IPE 300 e HEB 600 respectivamente.

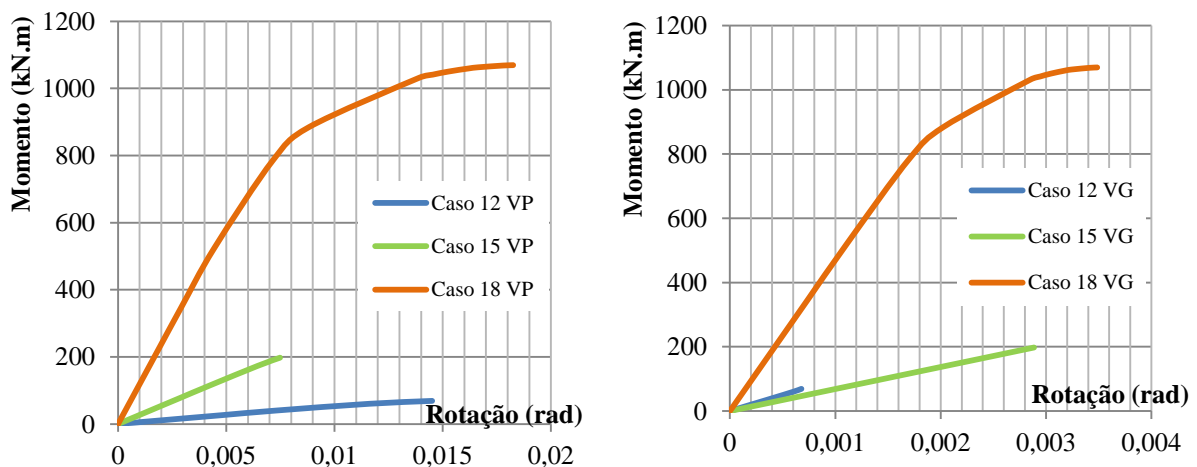


Figura 4.65 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, em termos de rigidez, no caso da viga de menores dimensões, o caso 18 apresenta o valor mais elevado, enquanto que o caso 12 apresenta o valor menor. No entanto, para a viga grande, continua a ser o caso 18 o que apresenta maior valor, contudo, é o caso 15 que apresenta valor menor.

Em termos de rotação, verifica-se que, para as duas vigas, o caso 18 apresenta os maiores valores. Tendo em conta isto, e referindo agora a menor rotação, verifica-se que para a viga pequena é o caso 15. Enquanto que para a viga grande, o rotação mínima apresenta-se no caso 12.

4.1.9.7. Comparação entre casos em que $\alpha=1/2$ (secção de pilar HEB 600)

No caso 19 a relação γ é de $1/3$, no caso 22 esta mesma relação é de $2/3$ e no caso 25 é de 1. A secção do pilar passa para HEB 600 e as secções das vigas de maiores dimensões passam para IPE 200, IPE 400 e IPE 600, respectivamente para os casos em estudo. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 100, HEB 200 e HEB 300 respectivamente.

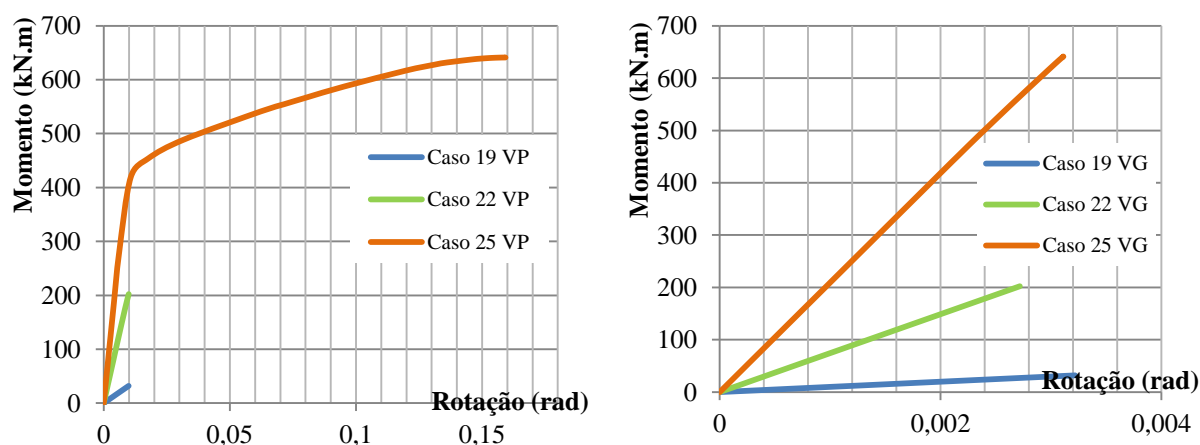


Figura 4.66 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

De acordo com as figuras anteriores, relativamente à viga pequena, refere-se que, a rigidez das vigas aumenta ao longo dos casos, ou seja, a viga do caso 19 apresenta menor rigidez, enquanto que a viga do caso 25 apresenta maior rigidez. Assim como a rigidez, o valor da rotação também é mais elevado para a viga do caso 25 e é mais reduzido para a viga do caso 19. No entanto, salienta-se o facto de a rotação analisada na viga do caso 25 ser muito superior comparativamente com os resultados obtidos nas vigas do caso 19 e 22. Isto sucede porque esta viga atingiu deslocamentos muito elevados e como o braço é sempre o mesmo, a rotação associada também é muito elevada. Relativamente à viga grande, verifica-se que a rigidez é superior no caso 25 e inferior no caso 19, assim também como acontece na viga pequena. Contudo, em termos de rotações verifica-se que é no caso 19 que a rotação é mais elevada. Salienta-se que é neste caso em que as relações α e γ são inferiores, como se conclui anteriormente.

4.1.9.8. Comparação entre casos em que $\alpha=1/4$ (secção de pilar HEB 600)

A secção do pilar mantém-se e as secções das vigas de maiores dimensões também se mantêm, respectivamente para os casos em estudo. Contudo relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 100**, HEB 100 e HEB 140* respectivamente.

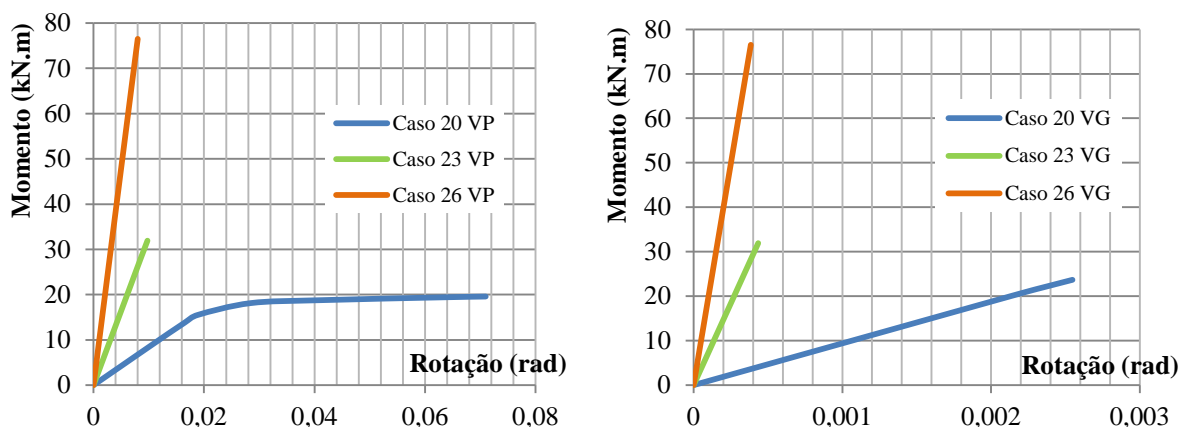


Figura 4.67 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que o caso 26 apresenta maior rigidez em ambas as vigas, assim como o caso 20 apresenta menor rigidez em ambas as vigas. Salienta-se a tendência da curva momento-rotação relativa ao caso 20 na viga pequena.

Analisando os valores das rotações, verifica-se que é no caso 20 em que as rotações são superiores, quer para a viga pequena quer para a viga maior. Além disso, o caso onde se verifica menores rotações em ambas as vigas corresponde ao caso 26. Isto sucede devido à relação γ ser inferior para o caso 20 e ser de valor superior no caso 26.

4.1.9.9. Comparação entre casos em que $\alpha=3/4$ (secção de pilar HEB 600)

Para a última comparação em termos de comportamento global a relação γ para o caso 21 é de $1/3$, no caso 24 esta relação é de $2/3$ e no caso 27 esta foi de 1.0 .

Em análise com a comparação anterior, a secção do pilar mantém-se bem como as secções das vigas de maiores dimensões, respectivamente para os casos em análise. No entanto, relativamente à viga de menores dimensões, adoptou-se uma secção HEB 140*, HEB 300 e IPE 450 respectivamente.

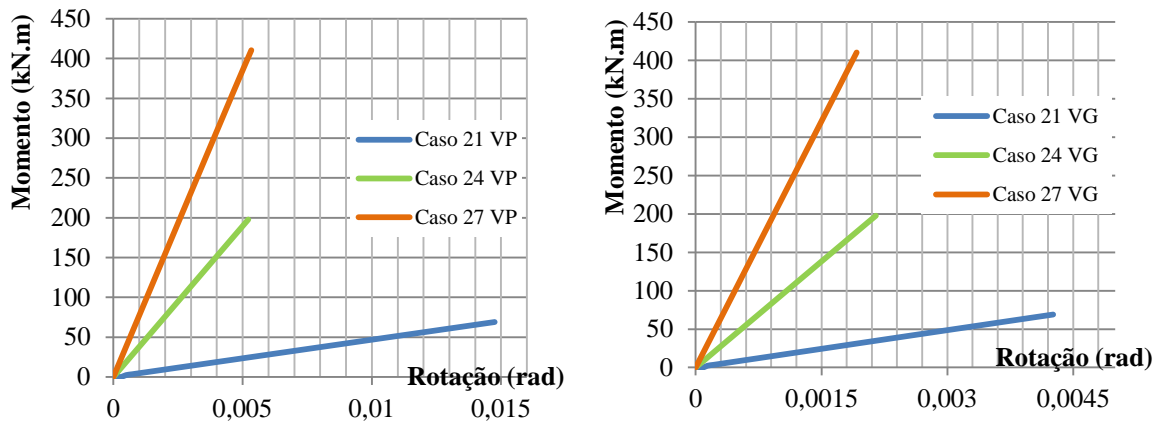


Figura 4.68 – Comparação entre a capacidade de rotação de cada viga nos casos em estudo.

Analisando estes últimos resultados, verifica-se que a rigidez das vigas, quer nas vigas de menores dimensões quer nas de maiores dimensões, é superior no caso 27 e inferior no caso 21. Tendo em conta isto, salienta-se que a relação γ é de 1/3 no caso 21 e é de 1 no caso 27.

Em termos de rotação, verifica-se que é para o caso 20 que os valores das rotações são superiores, para a viga pequena e para a viga grande. Enquanto que as rotações são inferiores para o caso 27, também em ambas as vigas. Tendo em consideração o descrito, conclui-se que quanto menor a relação α e γ maiores serão as rotações analisadas, e vice-versa.

4.1.10 Comparação de Resultados – Formulação do método das componentes

Pretende-se agora avaliar até que ponto é que a formulação do Eurocódigo em termos de parâmetros β serve para ligações assimétricas, se lhe for introduzida uma alteração ao nível da formulação do parâmetro. Essa avaliação é realizada comparando as curvas bilineares do método das componentes para a componente corte, com as suas homólogas determinadas a partir do modelo numérico.

Neste caso, e dado que as vigas têm alturas diferentes não é possível usar a formulação simplificada que o Eurocódigo preconiza para o parâmetro β . Em vez disso revisita-se a sua dedução em Jaspart [Jaspart, 1999] e deduzem-se as expressões adequadas para o caso de ligações assimétricas (equação (1)).

Assim sendo, será necessário analisar o esforço de corte existente na zona do painel superior (v_n^{sup}), devido à acção de ambas as vigas, e o esforço de corte existente na zona do painel inferior (v_n^{inf}), que corresponde a uma situação em nó externo. Esta situação encontra-se explícita na seguinte figura:

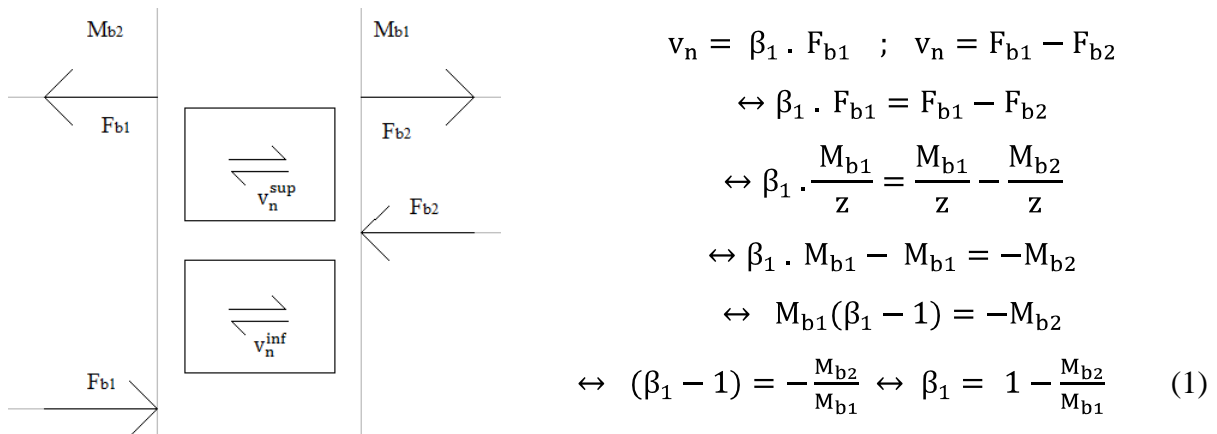


Figura 4.69 – Esquema representativo dos painéis de corte.

$$\beta_1 = \frac{v_n^{sup}}{F_{b1}} \quad \text{e} \quad \beta_2 = \frac{v_n^{sup}}{F_{b2}} \quad (2)$$

Na equação (2) estes parâmetros são definidos para o painel superior, isto porque, como o painel inferior corresponde a uma situação de ligação em nó externo então $\beta = 1.0$.

Como referido, pretende-se comparar o comportamento do painel ao corte com o método bilinear apresentado no Eurocódigo 3. Desta forma, apresentam-se as curvas para o painel superior direito e esquerdo, assim como para o painel inferior. A curva bilinear de cada componente à definida em termos de força pela equação (3) e em termos de rigidez inicial pela equação (4):

$$F_i = k_i \Delta_i E \quad (3)$$

Onde F e Δ representam, respectivamente, a força e o deslocamento na componente, E representa o módulo de elasticidade, e k representa a rigidez inicial elástica associada a cada componente de corte.

$$k_1 = 0.38 \frac{A_{vc}}{\beta z} \quad (4)$$

Sendo:

$$A_{vc} = A - 2 b t_f + t_w + 2r t_f \geq \eta h_w t_w$$

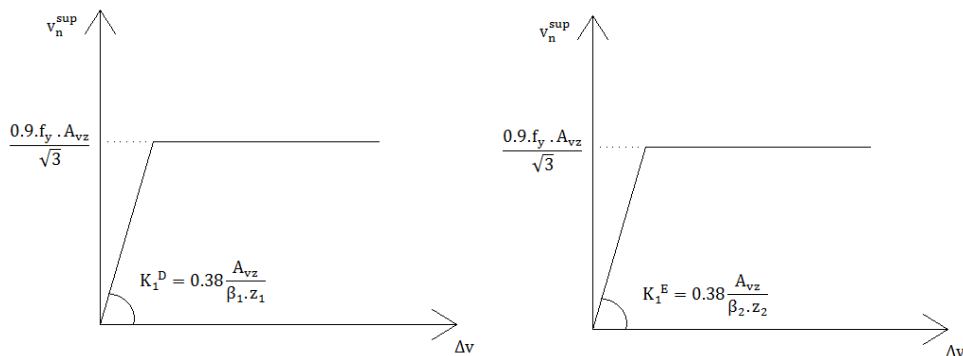


Figura 4.70 – Método bilinear para painel superior direita e esquerda, respectivamente.

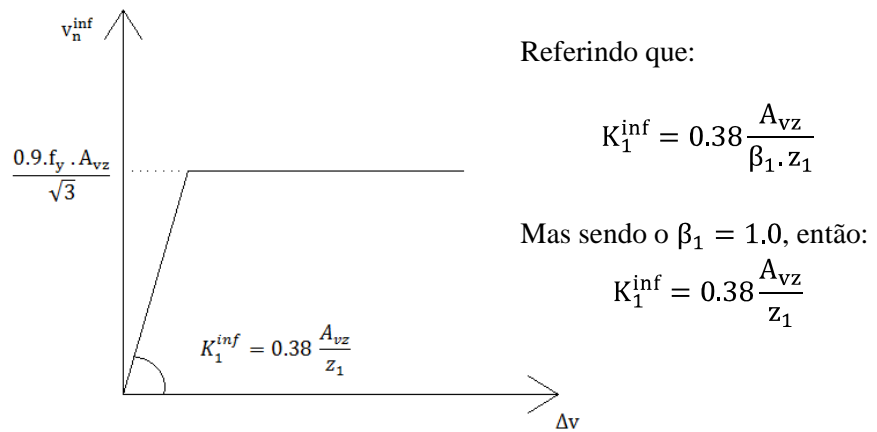
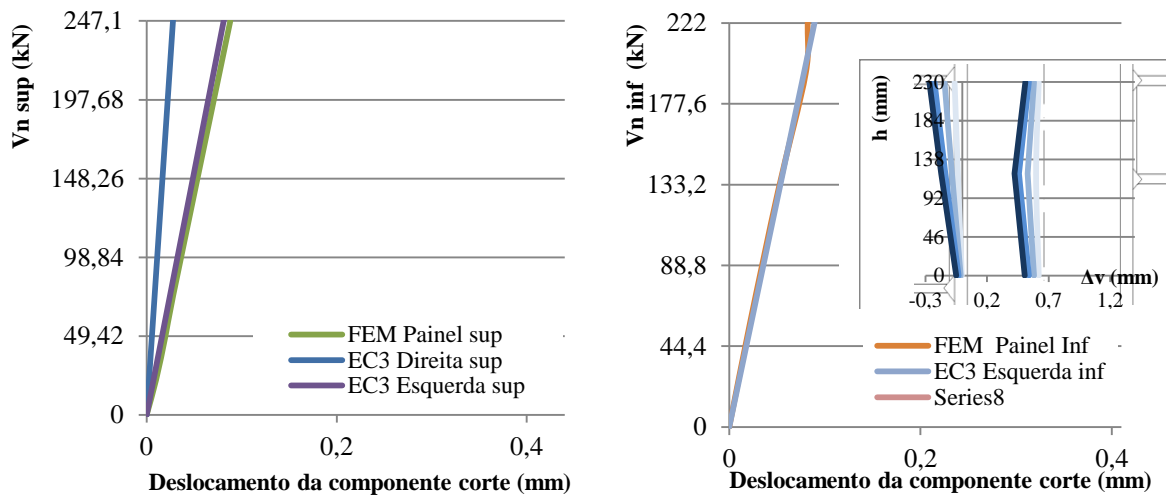


Figura 4.71 – Método bilinear para painel inferior.

Os resultados são apresentados para um conjunto seleccionado de configurações. As principais conclusões apontam no sentido de que mesmo com a alteração na formulação do parâmetro e apesar de em alguns casos os valores analíticos da rigidez balizarem os valores experimentais obtivos.



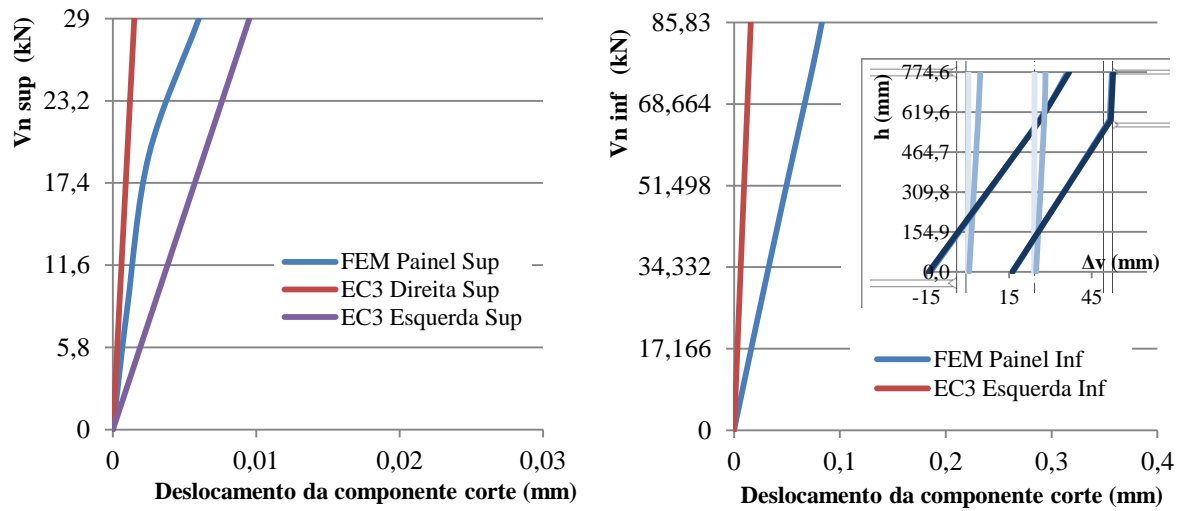


Figura 4.73 – Esforço de corte para o caso 2.

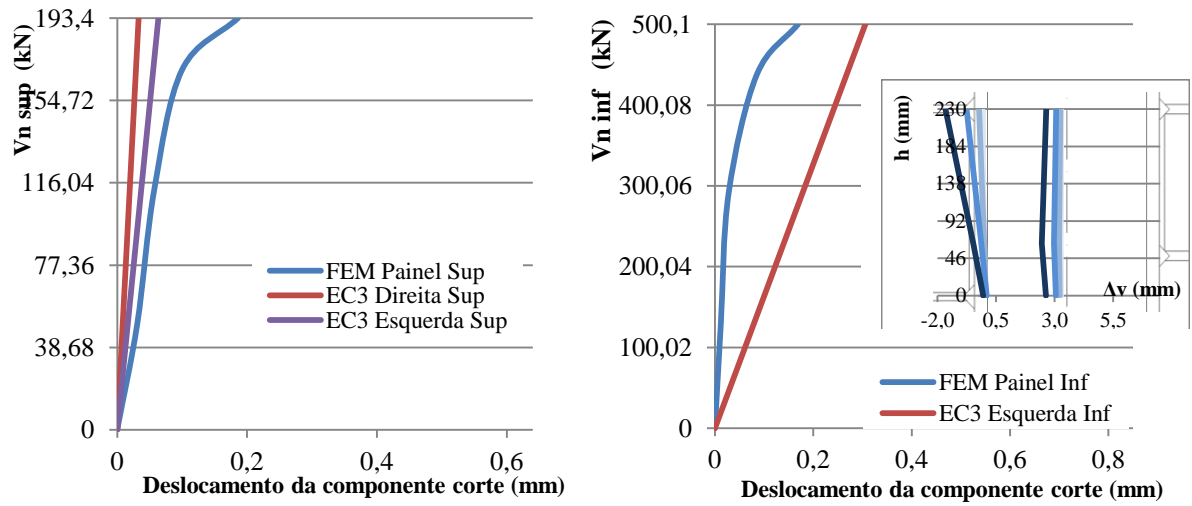


Figura 4.74 – Esforço de corte para o caso 3.

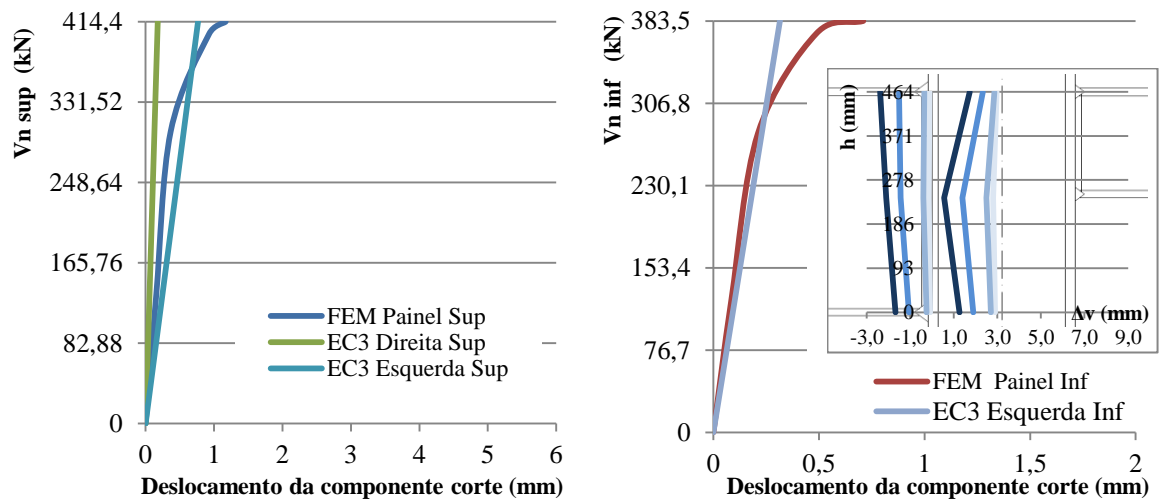


Figura 4.75 – Esforço de corte para o caso 4.

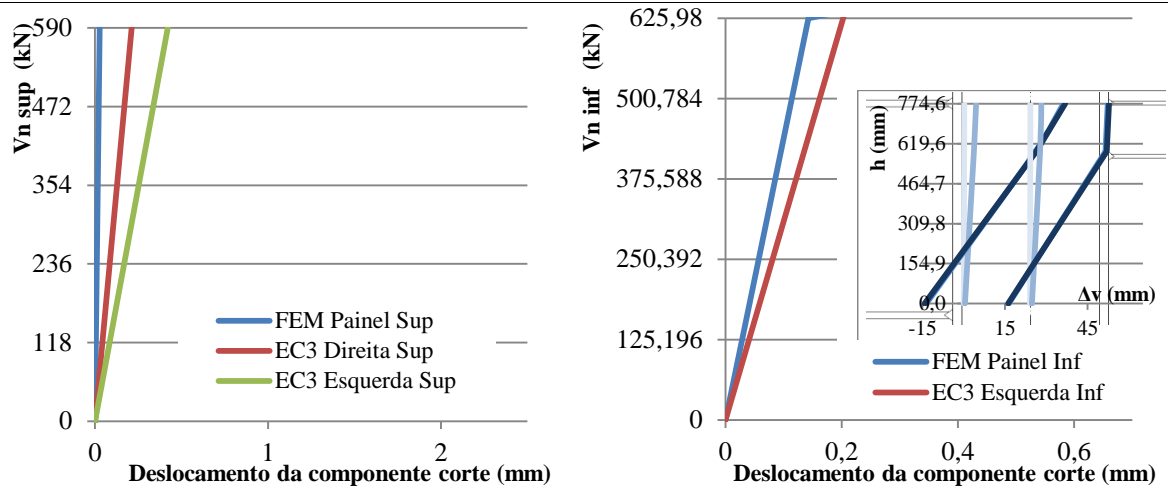


Figura 4.76 – Esforço de corte para o caso 17.

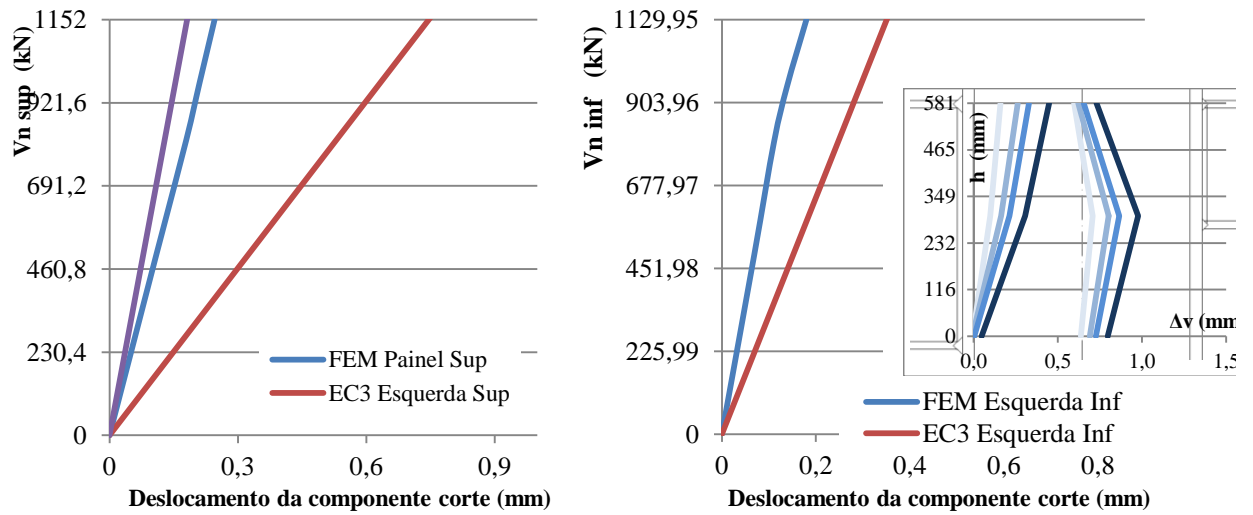


Figura 4.77 – Esforço de corte para o caso 25.

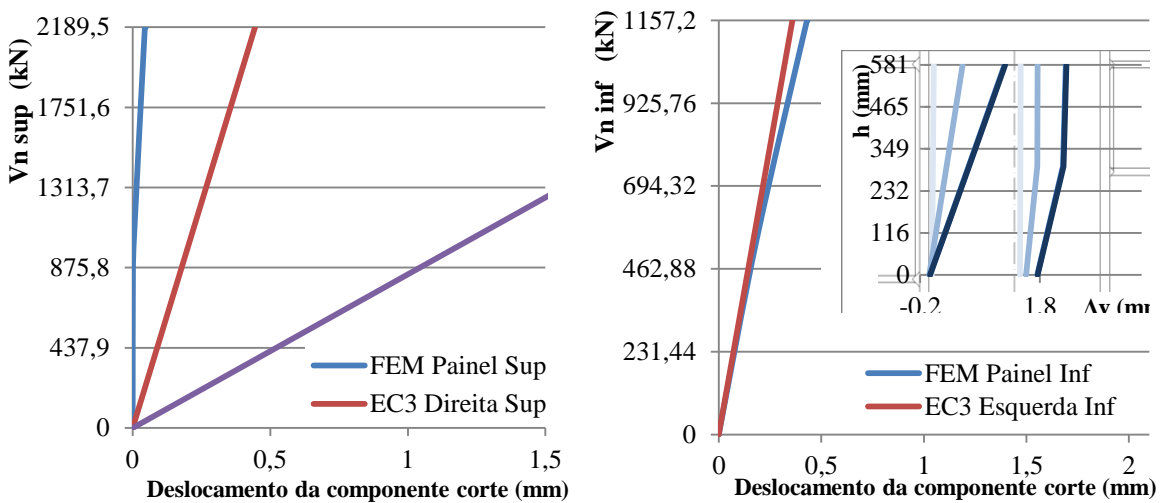


Figura 4.78 – Esforço de corte para o caso 25*.

Referindo que Δv corresponde à deformação dos banzos do pilar nas zonas da ligação e h corresponde à coordenada ao longo da altura da ligação.

* Significa que o caso analisado foi o mesmo, com as mesmas características excepto o carregamento aplicado. Neste modelo determinou-se a carga máxima em regime elástico para cada secção de viga e aplicou-se o dobro desse valor. Desta forma, os momentos analisados, à esquerda e à direita da viga são diferentes.

Os resultados são apresentados para um conjunto seleccionado de configurações. As principais conclusões apontam no sentido de que mesmo com a alteração na formulação do parâmetro β e apesar de em alguns casos os valores analíticos da rigidez se aproximarem (painel inferior) ou balizarem (painel superior) os valores experimentais é necessário trabalho adicional para concluir esta questão.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Relativamente à primeira fase do trabalho, correspondente à preparação do modelo numérico e respectiva validação *benchmarking* as conclusões são que o modelo pode ser considerado suficientemente rigoroso para o trabalho a realizar.

A segunda fase do trabalho corresponde à alteração do modelo numérico conforme a variação paramétrica seleccionada. As conclusões desta parte são relativas aos parâmetros geométricos com maior importância para o comportamento estrutural da ligação evidenciando a importância relativa da contribuição de cada ligação no comportamento do painel da alma do pilar em função dos parâmetros da dimensão das vigas entre elas e da dimensão da ligação em relação ao pilar.

Por último, a comparação dos resultados numéricos para a componente corte com as curvas do método das componentes, com formulação alterada do parâmetro β permite concluir que a geometria da ligação, reflectida na variação paramétrica seleccionada, influencia muito na referida formulação.

Tendo em conta que o objectivo principal da tese é o estabelecimento de um modelo numérico devidamente validado, que permita validar o modelo e a formulação estabelecida no trabalho de referência para um leque paramétrico suficientemente abrangente, considera-se que o objectivo está cumprido. Para desenvolvimentos futuros propõe-se a utilização do modelo desenvolvido para a referida validação e o esclarecimentos de algumas questões levantadas na presente tese como a questão relativa ao parâmetro β . Uma outra possibilidade de desenvolvimentos futuros seria a ampliação do estudo para ligações assimétricas com banzos não alinhados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gervásio, H. "A sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas." *Congresso Latino-Americano da construção metálica CONSTRUMETAL*: São Paulo, Brasil. 2008.
- 1993-1-8, E. C. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints*.
- CMM, A. P. (2010). <http://www.cmm.pt>.
- Jaspart, J.-P. (1990). Shear and load introduction deformability and strength of column web panels in strong axis beam-to-column joints – EC3 formulae : discussion and proposal for improvement. In I. R. 202. *Faculté des Sciences Appliquées, University of Liège*.
- Jaspart, J.-P. (1991.). *Etude de la semi-rigidité des nœuds poutre-colonne et son influence sur la résistance et la stabilité des ossatures en acier*. Ph.D. Thèse. *Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège*.
- Jaspart, J.-P. (1996-1997). Recent advances in the field of steel joints - Column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices.
- Jaspart, J.-P., & Atamaz, W. (Octobre de 1989). Étude du comportement jusqu'à la ruine des nœuds complètement soudés. *Rapport Interne IREM 89/7*.
- Jordão, S. (2008). *Comportamento de Juntas Soldadas em Nó Interno com Vigas de Diferentes Alturas e Aço de Alta Resistência*. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Simões da Silva, L. (2005). *Ligações metálicas: métodos avançados de análise e dimensionamento*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Simões da Silva, L., Jordão, S., & Simões, R. (2012). A component model for welded beam-to-column joints with beams of unequal depth. *Stahlbau 81, Helt 4*, pp. 290-303.
- Simões da Silva, L., Jordão, S., & Simões, R. (Revisão). Behaviour of Welded Beam-to-Column Joints with Beams of Unequal Depth. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Zoetemeijer, P. (1975). The influence of normal, bending and shear stresses on the ultimate compression force exerted laterally to European rolled sections. Delft University of Technology Department of Civil Engineering, The Netherlands: Stevin laboratory: Steel
- Klein, J. (1985). *Das elastisch-plastische last-verformungsverhalten M-steifenloser*. Universität Innsbruck, Austria.

ANEXO A

Quadro 2 - Geometria dos perfis que constituem o modelo da ligação em nó externo.

Perfil	h (mm)	b (mm)	tf (mm)	tw (mm)
HEB 240	246.0	241.4	16.78	10.62
IPE 400	406.8	179.1	13.09	9.10

Quadro 3 - Geometria dos perfis que constituem o primeiro modelo de ligação assimétrica

Perfil	h (mm)	b (mm)	tf (mm)	tw (mm)
HEB 240	245.6	241.3	16.453	10.32
IPE 400	402.7	178.8	12.89	8.93
HEB 200	199.0	201.0	14.365	9.00

Quadro 4 – Geometria dos perfis que foram modificads de forma aque os coeficientes fossem inteiros

Casos	Elemento	Secção	h modificada
Caso 2	VP	HEB 100 *	60 mm
Caso 4, 5 e 6	VG	IPE 500 *	480 mm
Caso 7, 8 e 9	VG	IPE 750 *	720 mm
Caso 9	VP	IPE 550 *	540 mm
Caso 11	VP	HEB 100 **	50 mm
Caso 12	VP	HEB 140 *	150 mm
Caso 16, 17 e 18	VG	IPE 750 *	800 mm
Caso 20	VP	HEB 100 **	50 mm
Caso 21	VP	HEB 140 *	150 mm
Caso 26	VP	HEB 140 *	150 mm

Quadro 5 – Carregamento considerando na primeira e segunda análise realizada.

		Secção	P (kN)			Secção	P (kN)
Caso 1	Viga Menor	HEB 120	84.14	Caso 4	Viga Menor	HEB 240	547.86
	Viga Maior	IPE 240	42.63		Viga Maior	IPE 500 *	277.58
Caso 2	Viga Menor	HEB 100 *	32.46	Caso 5	Viga Menor	HEB 120	84.14
	Viga Maior	IPE 240	16.45		Viga Maior	IPE 500 *	42.63
Caso 3	Viga Menor	HEB 180 ¹	189.36	Caso 6	Viga Menor	HEB 360	527.59
	Viga Maior	IPE 240 ¹	95.94		Viga Maior	IPE 500 *	267.31

Quadro 6 – Carregamento considerando na terceira e quarta análise realizada.

		Secção	P (kN)			Secção	P (kN)
Caso 7	Viga Menor	HEB 360	527.59	Caso 10	Viga Menor	HEB 100	52.50
	Viga Maior	IPE 750 *	267.31		Viga Maior	IPE 200	26.60
Caso 8	Viga Menor	HEB 180	248.56	Caso 11	Viga Menor	HEB 100 **	38.94
	Viga Maior	IPE 750 *	125.94		Viga Maior	IPE 200	19.73
Caso 9	Viga Menor	HEB 550 *	189.36	Caso 12	Viga Menor	HEB 140* ¹	113.45
	Viga Maior	IPE 750 *	95.94		Viga Maior	IPE 200 ¹	57.48

Quadro 7 – Carregamento considerando na quinta e sexta análise realizada.

		Secção	P (kN)			Secção	P (kN)
Caso 13	Viga Menor	HEB 200	332.6	Caso 16	Viga Menor	HEB 400	1683.91
	Viga Maior	IPE 400	168.52		Viga Maior	IPE 750 *	853.18
Caso 14	Viga Menor	HEB 100	52.50	Caso 17	Viga Menor	HEB 200	332.60
	Viga Maior	IPE 400	26.60		Viga Maior	IPE 750 *	168.52
Caso 15	Viga Menor	IPE 300	325.28	Caso 18	Viga Menor	HEB 600	3328.71
	Viga Maior	IPE 400	164.81		Viga Maior	IPE 750 *	1686.55

Quadro 8 – Carregamento considerando na sétima análise realizada.

		Secção	P (kN)
Caso 25	Viga Menor	HEB 300 ¹	1774.42
	Viga Maior	IPE 600 ¹	899.04
Caso 26	Viga Menor	HEB 140*	125.85
	Viga Maior	IPE 600	63.76
Caso 27	Viga Menor	IPE 450	674.97
	Viga Maior	IPE 600	341.98

De acordo com os quadros anteriormente apresentados verifica-se que não se apresentam os valores referentes às análises sétima e oitava, isto porque as vigas consideradas são as mesmas que nas análises quarta e quinta, respectivamente.

¹Esta marcação significa que nesta situação, a viga que apresentava menor rigidez correspondia a viga de maiores dimensões. Assim, a carga da viga de menores dimensões foi determinada em função da carga máxima elástica da viga de maiores dimensões.